МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. Ломоносова

Географический факультет

На правах рукописи

ЛЬВОВСКАЯ Елизавета Александровна

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА БОЛЬШИХ РЕКАХ СЕВЕРА ЕТР

25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Научный руководитель:

доктор географических наук,

профессор

ЧАЛОВ Роман Сергеевич

Москва – 2016

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ 4
ГЛАВА 1 ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА РЕКАХ СЕВЕРА ЕТР 10
ГЛАВА 2 УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РУСЕЛ РЕК СЕВЕРА ЕТР 20
2.1 Сток воды и его изменения за период наблюдений 20
2.2. Гидрологический режим 26
2.3. Сток наносов 32
2.4 Состав руслообразующих наносов и устойчивость русел 38
2.5 Руслоформирующие расходы воды 44
2.6 Геолого-геоморфологическая характеристика 47
ГЛАВА 3 МОРФОДИНАМИКА РУСЕЛ РЕК СЕВЕРА ЕТР 53
3.1 Морфодинамические типы русел, их распространение и условия формирования 53
3.2 Гидролого-морфологический анализ речных русел 72
3.3 Перекаты и перекатные участки и их формирование 99
ГЛАВА 4. РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ И ЕГО СВЯЗЬ С ИЗМЕНЕНИЯМИ ВОДНОСТИ 122
4.1 Факторы переформирования русел за историческое время 122
4.2 Северная Двина 125
4.3 Вычегда 152
4.3 Мезень 173
4.4 Печора 182
4.5 Общие закономерности изменения русел за исторический период и их связь с изменениями водности 194
ГЛАВА 5 ВОЗМОЖНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА 207
5.1 Изменение гидрологических условий в ближайшие 100 лет (существующие модели и сценарии) 207
5.2 Методика анализа 209

5.3 Оценка возможной трансформации русел при изменениях водности рек 221
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 235
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... 238
СПИСОК АРХИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ..... 251
Приложение А 253
Приложение Б 259
Приложение В..... 263

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Формирование русел больших рек Севера Европейской территории России (ЕТР) происходит в относительно однородных природных условиях, не подверженных значительному воздействию хозяйственной деятельности (реки используются только как водные пути). С этих позиций реки уникальны, и исследование их руслового режима позволяет выявить закономерности фоновых переформирований, дать оценку реакции русел рек на изменения факторов русловых процессов без вмешательства антропогенного воздействия. Однако если на Северной Двине и Вычегде русловые процессы изучены достаточно хорошо [Русловые процессы…, 2012], то по Мезени и Печоре о них имеются лишь отрывочные сведения [Чалов, Завадский и др., 2010]. И хотя перевозки грузов и пассажиров в современных условиях резко сократились, возрождение экономики страны, учитывая ресурсный потенциал региона, и то внимание, которое сейчас вновь уделяется Крайнему Северу, неизбежно приведет к восстановлению и дальнейшему развитию водных путей на реках Севера ЕТР, а следовательно, сведения о русловых процессах на реках и оценки дальнейших их переформирований в качестве основы регулирования русла будут востребованы.

Значимость изучения русел больших рек Севера ЕТР возрастает в связи с тем, что в их среднем и нижнем течении преобладают разветвления – тип русла, характеризующийся наиболее сложным режимом переформирований. В последнее время к ним проявляется повышенный интерес [Алексеевский, Чалов, 2009; Чалов, 2011; Чалов, Алабян и др., 1998], но охват исследованных рек, разветвленных на рукава и, соответственно, их региональные гидролого-морфологические оценки остаются недостаточными, а для Мезени и Печоры они вообще отсутствуют.

Объекты исследования – большие реки Севера Европейской территории России в их среднем и нижнем течении: Северная Двина от г. Котласа до слияния с р. Пинегой, 614–94 км от устья; Вычегда – от г. Сыктывкара до слияния с Северной Двиной, 414–0 км; Мезень – от слияния с р. Вашкой до устья р. Пёзы, 158–46 км; Печора от г. Печоры до впадения р. Сулы, 880–190 км, т.е. до верхней границы устьевых областей рек. Для всех рек (кроме Вычегды) характерно

абсолютное преобладание разветвленного русла; Вычегда – река в основном меандрирующая, но с участками разветвленного русла.

Цель исследования состоит в характеристике современного состояния русел рек Севера ЕТР (морфодинамика, устойчивость, антропогенные воздействия) и их сравнительном анализе; закрытии «белого пятна» в географии русловых процессов в отношении Печоры и Мезени; оценке возможных переформирований русел рек Севера ЕТР при изменениях водности.

Это потребовало решить ряд взаимосвязанных **задач:**

- обобщить сведения о русловых процессах на больших реках европейского Севера России;
- дать анализ распространения морфодинамических типов русла в зависимости от условий их формирования;
- установить связи между параметрами русла и характеристиками водности рек (гидролого-морфологический анализ);
- выявить закономерности переформирований русел в прошлом, их связь с колебаниями водности и влиянием антропогенных факторов;
- дать оценку возможных изменений русел в будущем при повышении/понижении водности рек на основе гидролого-морфологических зависимостей.

Защищаемые положения:

1. Условия формирования русел больших рек Севера ЕТР (наличие трех интервалов руслоформирующих расходов воды, прохождение руслоформирующего расхода воды верхнего интервала при затопленной пойме, высокий сток наносов, слабая устойчивость русел, большая их ширина и др.) определяют абсолютное преобладание разветвлений, представленных полным многообразием морфодинамических типов.

2. Гидролого-морфологические зависимости для разветвленных русел больших рек Севера ЕТР носят региональный характер, имея общие тренды. Зависимости дифференцируются по разветвлениям разного морфодинамического

типа, отражая в то же время различия в условиях формирования разветвлений, и определяются статусом рукава (главный, второй основной, второстепенный).

3. Переформирования русел больших рек Севера ЕТР за исторический период происходили под влиянием факторов природной среды; антропогенное воздействие на русла Северной Двины и Вычегды (дноуглубительные работы по трассам судовых ходов) ускоряло или замедляло русловые процессы, не нарушая общей их направленности. Трансформации русел происходили в продолжительные многоводные периоды, являясь результатом саморазвития (в основном в сторону усложнения морфологии русла), так и под воздействием антропогенного вмешательства (упрощение морфологии русла).

4. В зависимости от сценария изменения водности, возможны различные пути переформирований русел. Оценка возможных изменений русловых процессов, а также параметров разветвленных русел по гидролого-морфологическим зависимостям может быть использована при планировании мероприятий, направленных на коренное улучшение судоходных условий на больших реках региона.

Фактический материал. В работе использованы лоцманские карты разных лет издания, материалы регулярных съемок и промеров русла, выполняемых изыскательскими партиями и предоставленные Администрациями Северодвинского и Печорского бассейнов внутренних водных путей, а также хранящихся в архиве научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ, крупномасштабные топографические карты и космические снимки. Автор принимала участие в русловых изысканиях на Северной Двине в 2008 и 2009 гг., составлении планов перекатов и оптимизации автоматизированного расчета дноуглубительных работ. Использовались картографические материалы XVIII – начала XX вв. по Северной Двине и Вычегде, предоставленные И.Н. Каргаполовой и полученные ею в Российском государственном архиве древних актов, Военно-историческом архиве, архивах Государственного Исторического музея, Российской государственной библиотеки и Библиотеки Российской Академии наук. Также использовались

материалы натурных исследований русел рек Северной Двины и Вычегды (2000-е гг.), Печоры (июнь-июль 2008 г.) и Мезени (июнь-июль 2009 г.), проведенные сотрудниками НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева.

Методы исследования. При обработке данных применялись современные методы гидролого-морфодинамического анализа (построение зависимостей между параметрами русла и характеристиками водности), построение *QI*-диаграмм и их совместный анализ с эпюрами руслоформирующих расходов воды $Q_ф$; ретроспективный анализ за период, охваченный картографическим материалом, основывался на сопоставлении карт и планов русел за разные временные срезы с конца XVIII по начало XXI в.

Научная новизна. Впервые был проведен гидролого-морфологический анализ разветвленных русел больших рек Севера ЕТР, которые с этой точки зрения практически не изучались из-за большой морфологической сложности и разнообразия, рассредоточения стока воды по рукавам, его изменчивости во времени и неоднозначности влияния на условия транспорта наносов.

В ходе ретроспективного анализа установлены общие закономерности и особенности переформирований русел рек региона в зависимости от условий их формирования, в том числе антропогенного воздействия, геолого-геоморфологических и гидрологических (сезонные и многолетние колебания водности, условия прохождения максимальных расходов воды) условий. Дана оценка возможных русловых деформаций в будущем при изменениях водности согласно выбранным сценариям ее повышения и понижения.

Практическая значимость. Экстраполяция гидролого-морфологических зависимостей позволила установить изменение параметров рукавов и островов разветвлений разных морфодинамических типов при реализации различных сценариев возможных изменений водности, что очень важно при решении вопросов освоения и исследования рек.

Выявленные закономерности периодических или направленных деформаций русел позволили оценить возможные переформирования русел в долгосрочной перспективе в условиях изменяющихся естественных факторов природной среды,

а также при антропогенном воздействии. Период оценок режима перекатов ограничивается временными интервалами, в течение которых морфология русла не меняется (первые десятилетия); при смене морфодинамического типа русла изменяются условия формирования и, следовательно, сезонный и многолетний режим перекатов.

Результаты работы, представленные в виде оценок возможных изменений русловых процессов и параметров разветвлений, имеют большую практическую значимость при планировании мероприятий по регулированию русел и их хозяйственному использованию, в первую очередь, для судоходства.

Апробация работы. Основные результаты работы были доложены на международных молодежных научных форумах «Ломоносов» (Москва, апрель 2011, 2012, 2013, 2015 гг.), на IX (Волгоград, апрель 2012 г.) и X (Белгород, апрель 2014 г.) семинарах молодых ученых вузов, объединяемых межвузовским советом по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов; на международной научно-практической конференции «Региональные проблемы водопользования в изменяющихся климатических условиях» (Уфа, ноябрь 2014 г.); на научном семинаре научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева «Маккавеевские чтения» (Москва, декабрь 2014 г.); на научном семинаре кафедры гидрологии суши МГУ (Москва, декабрь 2015 г.).

Результаты диссертационного исследования нашли отражение в научных отчетах по инициативным проектам РФФИ «Пространственно-временной анализ русловых процессов: теория и научные основы управления» (09-05-00221) и «Региональный анализ трансформации русловых процессов на реках России в прошлом, настоящем и будущем под влиянием изменений природных факторов и антропогенных воздействий» (проект 12-05-00348), а также программ президента РФ для поддержки ведущих научных школ – проекты НШ-79.2012.5 и НШ-1010.2014.5.

Публикации. По результатам исследования подготовлено **15** публикаций, в том числе **4** статьи в научных журналах, включенных в перечень российских

рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций, из них одна находится в печати, **5** статей в прочих журналах и сборниках и **6** тезисов докладов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации 266 страниц, содержит 37 таблиц, 93 рисунка. Приложения содержат 14 страниц, 4 рисунка и 5 таблиц. Список литературы включает 152 наименования, в том числе 17 на иностранных языках; список архивных материалов включает 7 наименований.

Автор глубоко признательна своему научному руководителю профессору Р.С. Чалову за всестороннюю поддержку и помощь в проведении исследования, научным сотрудникам НИЛ эрозии почв и русловых процессов Н.И. Маккавеева кандидатам географических наук С.Н. Рулевой за предоставленные материалы полевых исследований и фотографии, Н.М. Михайловой за внимание и поддержку, сотрудникам кафедры гидрологии суши МГУ профессору д.г.н В.М. Евстигнееву, к.г.н. Д.В. Магрицкому, к.г.н. С.Р. Чалову за консультации и методическую помощь, кандидату географических наук И.Н. Каргаполовой за предоставленные архивные материалы, сотрудникам кафедры гидрологии суши МГУ и ФГБУ «ГИДРОМЕТЦЕНТР РОССИИ» за помощь в сборе данных о расходах воды.

ГЛАВА 1 ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА РЕКАХ СЕВЕРА ЕТР

Сведения о русловых процессах на реках Севера Европейской территории России (ЕТР) очень неоднородны. Чем севернее и восточнее протекает река, тем меньше она освоена и, следовательно, освещена на картах и в литературе. История освоения Севера берет начало ещё с начала XII в., когда развитие торговли Великого Новгорода заставило новгородцев искать товары для своего обширного рынка. Это послужило причиной устремления промышленных людей на север до берегов Белого моря: новгородцы ходили по р. Сухоне до Устюга, далее волоками и по р. Печоре, а через «Камень» (Урал) на р. Обь [Зайков, 1973]. Практически до конца XVII в. сведения о реках и их режиме собирались торговцами и служилыми людьми, передавались ими из поколения в поколение, составлялись описания рек путешественниками, в основном иностранцами. Первые описания рек Севера появляются в начале XVI века, затем появляются рукописные карты территорий. Подлинники некоторых мелкомасштабных рукописных карт Северных территорий с указанием рек сохранились в Российском государственном военно-историческом архиве, часть из них не датирована. Лишь в обстоятельном труде «Записки о Московии» (1549 г.) подробное описание водных путей по рекам в Мезенскую, Печорскую и Югорскую земли дал дипломат и путешественник барон Сигизмунд Герберштейн, посол Священной Римской империи в Москве.

Наиболее достоверные сведения о реках Севера возможно получить по более точным, чем рукописные, инструментальным картам, которые составляются в середине XVIII века, когда Географический департамент Академии наук издал первый «Атлас Российский» (1745 г.) в масштабе 90 верст в дюйме, основанный на 62 астрономически определенных пунктах. Получаемые Академией наук карты были еще несовершенны, поскольку геодезисты не имели детальных инструкций по определению астрономических координат. Инструкции о математическом обосновании карт с определением географических координат и картографической проекции были разработаны позднее, в 1738 г., Л. Эйлером и И.Н. Делилем по инициативе В.Н. Татищева.

К XVIII в. относятся первые лоции, представляющие большую ценность в исследовании русел рек. Специальные карты содержали информацию о глубинах и грунтах дна, но были выполнены лишь для наиболее важных для судоходства участков. Подлинники некоторых речных съемок XVIII в., в том числе устья Северной Двины, а также «сочиненные» морскими офицерами и штурманами рукописные карты и планы Северной Двины и Печоры сохранились в библиотеке Академии наук, архиве Центрального гидрографического управления ВМФ и Российском государственном военно-историческом архиве. Фрагмент копии одной из таких карт, составленной «с описи и астрономических определений флота капитан лейтенантом П. Крузенштерном в 1846 году» [Меркаторская карта…, 1846], представлен на (рис. 1.1). На этой мелкомасштабной (25 верст) карте обозначены некоторые самые крупные острова в нижнем течении Печоры (ниже впадения р. Цильмы), и по ней можно получить общие представления об их положении, но едва ли об очертаниях берегов и размерах русла и русловых форм.

Самый древний, доступный для исследований источник по Северной Двине и Вычегде – карты Генерального межевания (рис. 1.2) – специальные карты губерний, областей или уездов в масштабе 5 верст в англ. дюйме (1:210000), датированные 1765 и 1780-и г., в т.ч. «Карта находящейся в Архангельской губернии р. Двины со впадающими в нее реками…» [1765]. На карте даны очертание русла, островов, рукавов и притоков.

Следующим картографическим изображением является изданный в 1861 г. Главным управлением путей сообщения «Атлас р. Северной Двины от г. Великого Устюга до г. Архангельска в масштабе 1 верста в дюйме с глубинами по фарватеру» [Атлас реки Северной Двины…, 1858]. Его составление по времени совпало с появлением в 1858 г. в бассейне Северной Двины первых пароходов, что вызвало необходимость их обеспечения лоцманскими картами и проведения первых дноуглубительных работ, направленных на улучшение судоходных условий.

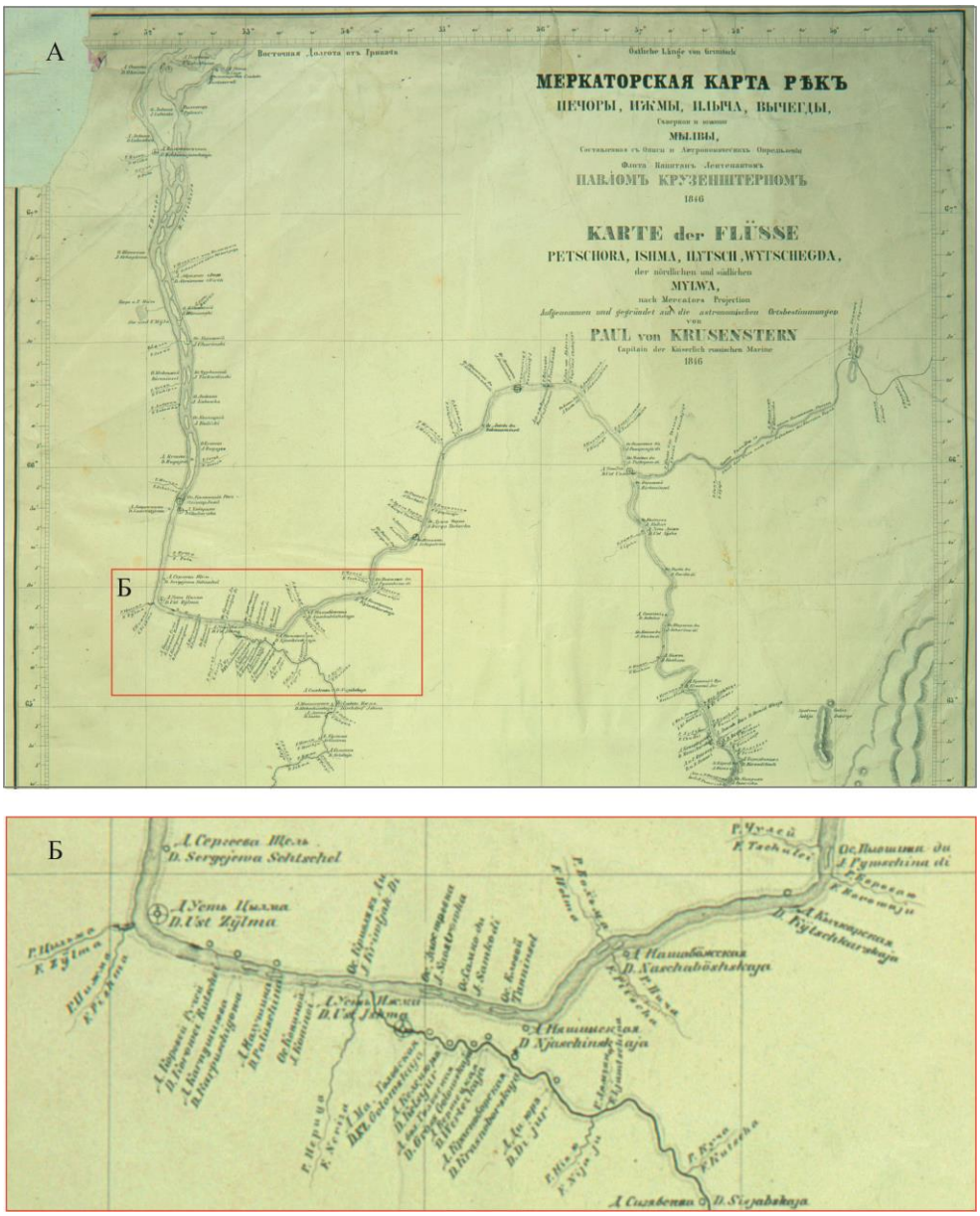


Рисунок 1.1 – Фрагменты Меркаторской карты рек Печоры, Ижмы, Вычегды, Северной и Южной Мылвы [Меркаторская карта…, 1846]

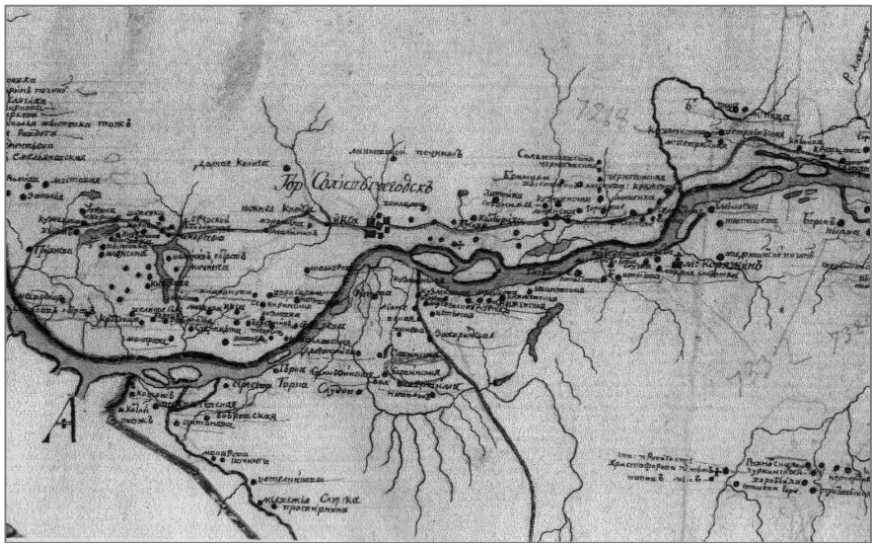


Рисунок 1.2 – Фрагмент карты р. Вычегды [Карта находящейся…, 1765]

Однако изыскательских партий, осуществляющих съемки разрабатываемых земснарядами перекатов, еще не существовало; дноуглубление проводилось без всякой системы, глубины определяли «по соображению». Упомянутые же карты и планы не были привязаны к триангуляционной сети, урезы водной поверхности – к надежным реперам и отметкам постоянных гидрологических постов. Тем не менее можно считать, что в это время было положено начало русловым изысканиям на реках Севера как вида путевых работ [Русловые процессы…, 2012].

С созданием в 1874 году Навигационно-описной комиссии исследования были подчинены общей схеме и опирались на тригонометрическую сеть, впервые было введено понятие проектного уровня и срезки. По результатам изысканий, проведенных по новым правилам, были составлены планы рек в масштабе 50-250 сажень в 0,01 сажени и их продольные профили; в 1876-1910 гг. были изданы атласы Северной Двины (от устья Вычегды до устья) [Подробные планы участка реки Северной Двины от устья р. Ваги до Белого моря..., 1888; Подробные планы участка реки Северной Двины от устья р. Вычегды до устья р. Ваги, 1888], содержащие подробные и сокращенные планы и профили рек [Сокращенные планы…, 1888; Сокращенные профили…, 1888]. К каждому атласу прилагалось «Краткое описание исследования» данной реки.

С 1901 по 1917 гг. описными партиями Управления внутренних водных путей и шоссейных дорог (создано в 1884 г.) впервые или повторно были исследованы Печора с Ижмой и Ухтой, Северная Двина с Сухоной и Вычегдой [Родевич, 1923]. Результатом работ на Северной Двине и Вычегде стала установка сети реперов, связанных между собой нивелировкой. На основе изысканий на р. Вычегде, были построены продольные профили, водомерные графики, рассчитаны расходы воды; вместе с пояснительными записками они опубликованы в издании «Материалы для описания русских рек и истории улучшения их судоходных условий» (по исследованию 1910 г.) [1912]. В них содержались детальные сведения о работах изыскательских партий, описания исследованных рек и соединительных путей, результаты гидрометрических и гидрологических исследований; однако рельеф

коренных берегов и пойм почти не освещался, недостаточны и обрывочны были сведения о скоростях течения, расходах воды и наносов.

Первые крупномасштабные инструментальные карты для Северной Двины и Вычегды датируются концом XVIII в. С конца XIX в. составляются лоцманские карты и атласы на основе проводящихся периодических съемок русел. На протяжение XX в. они издаются в более крупном масштабе (1:5000, 10000, 25000, 50000) через каждые 5-15 лет и корректируются в последние десятилетия ежегодно. Планы перекатов и перекатных участков составляются ежегодно (2-3 раза в год по необходимости). Для Печоры и Мезени крупномасштабные картографические материалы (лоцманские карты) относятся концу 30-х гг. XX в. для Мезени, концу 50-х – началу 60-х гг. XX в. для Печоры. С 2000-х гг. в русловых исследованиях рек Севера ЕТР служат аэрокосмические снимки. Основные типы русел рек Севера обозначены на картах, составленных в 1950-е гг. С.И. Пиньковским [Кондратьев и др., 1959]. Некоторые общие сведения о реках Севера приведены в книге Л.Л. Ильиной и А.Н. Гракова [1987].

Накопленные сведения о русловых процессах рек обобщены на картах русловых процессов, созданных научно-исследовательской лабораторией эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ: карта «Русловые процессы на реках СССР» (масштаб 1:4 000 000) [1990], содержащая разностороннюю характеристику условий и форм проявления русловых процессов, карта «Морфология и динамика русел рек Европейской части России и сопредельных государств» (масштаб 1:2 000 000) [1999], отражающая более детальную информацию о формах руслового рельефа, строении и интенсивности размыва берегов, хозяйственном использовании рек и др.

Такая неравномерность обеспеченности картографическим материалом обусловила значительный «перекос» в изучении русловых процессов в пользу Северной Двины и Вычегды по сравнению с другими крупнейшими реками региона. Режим переформирований русла первых достаточно подробно освещен в научной литературе [Русловые процессы…, 2012], особое внимание уделяется отдельным протяженным участкам, которые представляют собой затруднения для

судоходства. В то же время как русла Печоры и Мезени практически не были исследованы с этой точки зрения.

В 1916 г. во время Первой Мировой войны в связи с увеличением объемов перевозок по Северной Двине и необходимостью поддерживать глубины для прохождения судов сюда были направлены несколько изыскательских партий. На всех реперах, установленных на перекатах ещё в 1910 г., был определен проектный горизонт, относительно которого обрабатывались планы перекатов. Отдельные работы, опубликованные в первой половине XX века, и рассматривающие динамику русловых процессов, носили сугубо практический характер, будучи направленными на обоснование методов улучшения судоходства на реках путем разработки прорезей на мелководных перекатах.

В 1940-50-е годы на наиболее сложных в судоходном отношении участках Северной Двины (от Великого Устюга до Рочегды) и нижней Вычегды работали уже 19 изыскательских партий. Кроме того, были организованы специальные русловые партии Северного бассейнового управления пути (СБУП), в задачи которых входили не только съемки русла, но и измерение скоростей течения и другие работы. На основании этих исследований планировались капитальные работы по закреплению положения судового хода.

Одним из первых исследователей, разработавшим теоретические и практические подходы к решению проблемы улучшения судоходных условий на Северной Двине, стал Н.И. Маккавеев, отметивший необходимость проводить землечерпание с учетом особенностей режима перекатов на реке [Маккавеев, 1949]. В целом, к 50-м гг. XX в. имеющиеся материалы по морфологии русла и русловым процессам Северной Двины, с одной стороны, легли в основу выполнения крупных выправительных работ, а, с другой стороны, были использованы для обобщений в руководствах, инструкциях по воднотранспортному регулированию русла и научных монографиях. В частности, много северодвинских примером приводится в книгах Н.И. Маккавеева [1949, 1955].

В 1957 г. на Северной Двине и Вычегде были проведены первые научные русловые исследования, организованные МГУ им. М.В. Ломоносова по договору с Северным БУП. Инициатором и руководителем их был профессор Н.И. Маккавеев. Работы проводились на Северной Двине от г. Котласа до устья Ваги, на Вычегде от с. Часово до устья. Практической целью исследований было обоснование оптимальных вариантов трассы фарватера в местах, затруднительных для судоходства. В ходе экспедиции был разработан ряд вопросов, связанных с методикой производства русловых исследований [Маккавеев и др., 1961] и впервые был выполнен анализ многолетних русловых деформаций, разработаны научно обоснованные генеральные схемы улучшения условий судоходства, которые в основном потом были успешно реализованы.

Геоморфологические исследования Северной Двины, проведенные в ходе экспедиции, были описаны Е.И. Сахаровой [1960]. Опыт исследований на перекатах использовался Н.И. Маккавеевым при разработке способов проектирования судовых ходов на реках [Проектирование…, 1964]. Главной заслугой работ Северодвинской экспедиции МГУ было то, что они положили начало систематическим региональным исследованиям русловых процессов на больших реках России, а для Северной Двины послужили своеобразным толчком для внедрения научного подхода к проведению дноуглубительных и выправительных работ, направленных на создание современной устойчивой трассы судового хода.

В 1960-80-е годы на реках Северной Двине и Вычегде был выполнен огромный объем работ по дноуглублению. В этот период была достигнута гарантированная глубина в 1,7 м, против существовавшей ранее – 1,1 м (при бытовых глубинах в конце XIX – начале XX вв. – 0,5-0,7 м). Обобщение опыта этих капитальных работ и их обоснования сделаны А.С. Вильпертом [1963, 1970]. В 1990-е гг. изыскательские и дноуглубительные работы были сокращены, а в отдельные годы земснаряды на реку вообще не выводились. В связи с этим произошла «утрата» глубин, гарантированная глубина на некоторых перекатах вернулась к прежним значениям – 1,1-1,2 м. Исследования МГУ, однако, были

возобновлены, и в 1993-1994 гг. охватили всю нижнюю Вычегду в пределах Архангельской области. Их результаты [Белый и др., 2001] позволили обосновать прогнозные оценки развития русловых деформаций (русла в целом и перекатов) на всем протяжении исследованного участка при прекращении дноуглубительных работ, стадийности развития форм русла и форм руслового рельефа (перекатов) и в зависимости от колебаний водности реки.

Последние русловые исследования МГУ на р. Северной Двине были проведены в 2004 г. по заданию Департамента внутренних водных путей; на их основе был разработан комплекс рекомендаций по оптимизации мероприятий для обеспечения условий судоходства на современном этапе и в условиях резкого сокращения (или прекращения) дноуглубительных работ. В настоящее время изыскательские работы на Северной Двине проводятся с привлечением современного оборудования и по существу представляют собой мониторинг состояния водного пути. На каждый перекат составлен паспорт, куда вносятся ежегодные изменения на перекате. Планы перекатов, полученные в ходе съемок в период навигации, формируются в альбомы.

В последние годы выполнено крупное обобщение результатов исследований русловых процессов на Северной Двине и ее притоках. Его итогом явилась монография, подготовленная коллективом ученых МГУ и инженеров «Севводпути» – «Русловые процессы и водные пути на реках бассейна Северной Двины» [2012], благодаря которой Северная Двина и ее притоки в отношении изученности русловых процессов стала наиболее изученной рекой в России.

Гораздо менее освящены сведениями о русловых процессах реки Печора и Мезень. Первые карты крупного масштаба относятся уже к середине XX в., несмотря на то, что эти реки еще в XV в. были одним из ведущих направлений, по которому проходило освоение Русского Севера и с тех пор являлись важными транспортными магистралями. Часть долины Печоры была объектом изучения во время первой экспедиции Русского географического общества, организованной в 1847-1848 и 1850 гг. под руководством профессора Петербургского университета Э.К. Гофмана. Экспедицией были проведены исследования рек Северного Урала, и

Печора как река получила первое описание [Зайков, 1973]. Однако первая сохранившаяся лоцманская карта Печоры относится уже к 1959 г., Мезени – к 1940 г. (фарватер 1937–1938 гг.); следующие в хронологическом порядке карты датированы 1980-и гг.

Освоение и накопление сведений о русле Печоры было связано с нуждами края в перевозке грузов. Судоходство на Печоре и ее более крупных притоках – Ижме, Илыче, Усе и других стало развиваться в начале XIX в. В 1864 г. на Печоре появилось первое паровое судно. Однако состояние водных путей никак не регулировалось, что сдерживало развитие судоходства [Вильперт, 1963]. В начале XX в. особенно остро встал вопрос о наращивании грузоперевозок и поиска путей для вывоза ухтинской нефти. Однако дноуглубление в связи с необходимостью поддержания гарантированных глубин и обеспечения нормальных условий судоходства началось лишь в 1938 г. Объемы дноуглубительных работ год от года увеличивались, а в 1960-х гг. они ежегодно проводились почти на всех перекатах средней и нижней Печоры, часто несколько раз за сезон [Вильперт, 1970]. Начиная с 1998 г. дноуглубление на Печоре, как и на других Северных реках, было практически прекращено, хотя работы изыскательских партий на перекатах сохранились.

На Мезени до недавнего времени также выполнялись промерно-съемочные работы на перекатах и затруднительных для судоходства участках, велось регулярное землечерпание. Однако с 90-х гг. XX века судоходство на реке пришло в упадок, резко сократились перевозки по реке, а в 2010 г. был ликвидирован Мезенский район водных путей как организационная структура по содержанию водного пути. Соответственно прекратились все работы по мониторингу состояния русла.

Первые научные исследования русла Печоры относятся к 30-м гг. XX в. Некоторые сведения о ней содержатся в статьях В.В. Ламакина [1943, 1948, 1951], который обратил внимание на то, что притоки отклоняют поток основной реки, однако связал это исключительно с тектоническими особенностями территории.

Русловой режим Мезени до последнего времени не изучался. Имеющиеся в литературе сведения не всегда достоверны и носят самый общий описательный характер [Давыдов, 1953; Порочкин, Зарбаилов, 1975; Русловой режим…, 1994].

Сведения о русловых процессах Печоры и Мезени обобщены на картах «Русловые процессы на реках СССР» и «Морфология и динамика русел рек Европейской территории России и сопредельных государств»: уклоны, геолого-геоморфологические условия развития русловых деформаций, морфологические типы русел, не всегда определенные правильно, состав руслообразующих наносов, преобладающие формы руслового рельефа и т.д.

В 2004 году научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов МГУ провела рекогносцировочные исследования русла Печоры, в ходе которых были получены данные о распределении расходов воды в рукавах разветвлений в меженный период на участке от г. Печоры до г. Нарьян-Мара, сведения о руслообразующих наносах, проведена подробная типизация русла, уточняющая изданные ранее карты, дана оценка многолетним переформированиям русла.

Первые исследования русла р. Мезени в нижнем течении (от устья р. Вашки до п. Каменки) были проведены только в начале XXI в. по договоренности между географическим факультетом МГУ и Мезенским районом водных путей и судоходства при содействии Северо-Двинского гос. бассейнового управления водных путей и судоходства. В ходе непродолжительной экспедиции (27 июня – 6 июля 2009 г.) были измерены расходы воды в рукавах, проведено продольное профилирование водной поверхности и дна русла, отобраны пробы воды и донных грунтов для определения мутности воды и состава руслообразующих наносов и их гранулометрического состава, определены морфологические типы русла [Чалов и др., 2010]. Было установлено, что в нижнем течении Мезени параллельно-рукавное русло является врезанным, тогда как ранее считалось, что оно широкопойменное.

ГЛАВА 2 УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РУСЕЛ РЕК СЕВЕРА ЕТР

2.1 Сток воды и его изменения за период наблюдений

Сток воды – активный фактор, определяющий направленность и периодичность проявлений русловых процессов на реках, подверженный колебаниям (чередование маловодных и многоводных периодов различной продолжительности), которые обусловлены климатическими причинами. С другой стороны, русловые процессы определяются стоком наносов, который, в свою очередь, зависит не только от стока воды, но и от литологического строения бассейна и долины реки, их рельефа, особенностей климата, преимущественно количества осадков, обеспечивающих поступление наносов с водосбора в русло реки, почвенно-растительного покрова.

Климатические колебания цикличны. Данному вопросу в научной литературе уделено много внимания. Выделяют периоды различной продолжительности: короткие (от года до десятков лет), межвековые (от сотен лет до нескольких тысяч лет), ледниковые и межледниковые (от десятков до сотен тысяч лет) и геологические (сотни тысяч и миллионы лет) [Монин, Сонечкин, 2005]. При этом ряды характеристик атмосферы и гидросферы содержат периодические колебания практически любой продолжительности, объясняя их различными механизмами [Современные глобальные изменения…, 2006]: внутренними по отношению к системе «атмосфера-гидросфера» и внешними (естественные процессы космического, планетарного и геологического происхождения); антропогенными воздействиями и факторами. Существует мнение [Добровольский, 2011], что только «внутренние» механизмы изменчивости обусловливают определенные циклы: установлено [Butler, Johnston, 1996] влияние солнечного цикла (11 лет) на температуру воздуха, выявлено [Jovanović, 1993] воздействие циклов солнечной активности (11-12, 19-22 года) на колебания влажности воздуха; автоколебания (15-35, 50-150 лет) [Mann et al., 1995], оказывающие влияние на различные параметры, внутренняя изменчивость (65-70 лет), воздействующая на глобальную температуру [Schlesinger, Ramankutty, 1994].

А.В. Шнитников [1969] выделял внутривековые циклы от 3-4 лет и менее до вековых циклов продолжительностью 80-90 лет, периодов с временным интервалом в 1500-2000 лет [Шнитников, 1957], объясняемые колебаниями приливообразующей силы.

Для климата последнего столетия (с конца XIX в.) установлены следующие периоды: потепление с максимумом в 1930-40-е гг., сменившееся похолоданием в середине 1960-х – начале 1970-х годов; тенденция к глобальному потеплению прослеживается с начала 80-х годов XX в. [Эколого-географические последствия…, 2011; Прогноз климатической ресурсообеспеченности…, 2008; Climate Change…, 2001, 2007].

Вместе с климатическими изменениями с конца XIX в. до 70-80-х гг. XX в. на большинстве крупных рек центра ЕТР уменьшался годовой сток, с начала 80-х гг. XX в., наоборот, наблюдается его увеличение. На фоне длительных периодов происходят кратковременные колебания водности. В ходе многочисленных исследований установлена продолжительность маловодных фаз циклов, которая составляет от 2-3 до 15-20 лет, и полных циклов, включающих многоводную и маловодную фазы – от 3-5 до 25-45 лет [Евстигнеев, 1990].

Периодические наблюдения за расходами воды на реках Севера ЕТР начались в конце XIX в. В 1880 г. по измеренным расходам воды был подсчитан сток воды р. Сухоны. С 1882 г. получены данные о стоке р. Северной Двины у с. Усть-Пинеги. Сведения о стоке для остальных рек появились только в XX в.: имеются ежегодные данные о расходах воды для Мезени и Печоры с 1932 и 1936 г., соответственно. Наиболее интенсивно сеть наблюдательных пунктов начала развиваться в послевоенные годы, и к 1966 г. их количество достигло 183 против 59 пунктов в 1946 г. Размещение сети станций и постов на реках Севера неравномерное. Сеть развивалась главным образом в обжитых районах – в бассейне Северной Двины. Значительно реже сеть пунктов наблюдений в бассейнах Мезени и Печоры. Таким образом, север и северо-восток территории в гидрологическом отношении оказались слабоизученными [Ресурсы…, 1972].

Водность Северной Двины за период до начала наблюдений за расходами воды ранее не оценивалась. Однако имеется продолжительный ряд максимальных уровней у г. Архангельска (по в.п. Соломбала) с 1752 г., восстановленный до 1880 г. по материалам, опубликованным в различных литературных источниках [Гидрология…, 1965], в т.ч. в работах Т.П. Марютина [1932], Б.Д. Зайкова [1954].

Северная Двина – река с восточно-европейским типом водного режима, для нее характерно длительное весеннее половодье, на которое приходится бóльшая доля годового стока. Это подтверждает достаточно тесная связь между средними годовыми расходами воды ($Q_{ср}$) и объемом стока половодья ($W_{пол}$) по г.п. Усть-Пинега (с 1882 по 2013 г.): $Q_{ср} = 35W_{пол} + 1156$ (R^2 = 0,52). В период половодья проходят максимальные расходы воды ($Q_{макс}$), к которым, в свою очередь, приурочены максимальные уровни ($H_{макс}$). Ввиду того, что на участке между г.п. Усть-Пинега и г. Архангельском Северная Двина не принимает крупных притоков имеется значительная связь: $H_{макс_{Соломбала.}} = 0{,}01Q_{макс_{Усть-Пинега}} + 84$ (R^2 = 0,41) за период совместных наблюдений (1882-1962 гг.). Однако колебания уровня воды в устье подвержены влиянию нескольких составляющих [Гидрология…, 1965]: стоковой, заторной и нагонной, а также составляющей на изменение однородности рядов наблюдения, связанной с борьбой с заторами. С 1915 г. в устье Северной Двины проводятся систематические работы по разрушению льда [Гидрология…, 1965], с 1962 г. объем работ увеличился, что привело к понижению $H_{макс}$.

Чтобы сократить влияние нагонной и заторной составляющих на колебания стока воды необходимо осреднить $H_{макс}$ и $Q_{ср}$ за периоды характерной водности. Совместный анализ разностных интегральных кривых по данным о максимальных уровнях у г. Архангельска, максимальных и среднегодовых расходов воды по г.п. Усть-Пинеге для периода совместных наблюдений (рис. 2.1) показал, что несмотря на отсутствие синхронности колебаний, имеется синфазность кривых – совпадение периодов повышенной и пониженной водности. По данным спектрального анализа наиболее статистически значимыми являются периоды продолжительностью 5,7 лет.

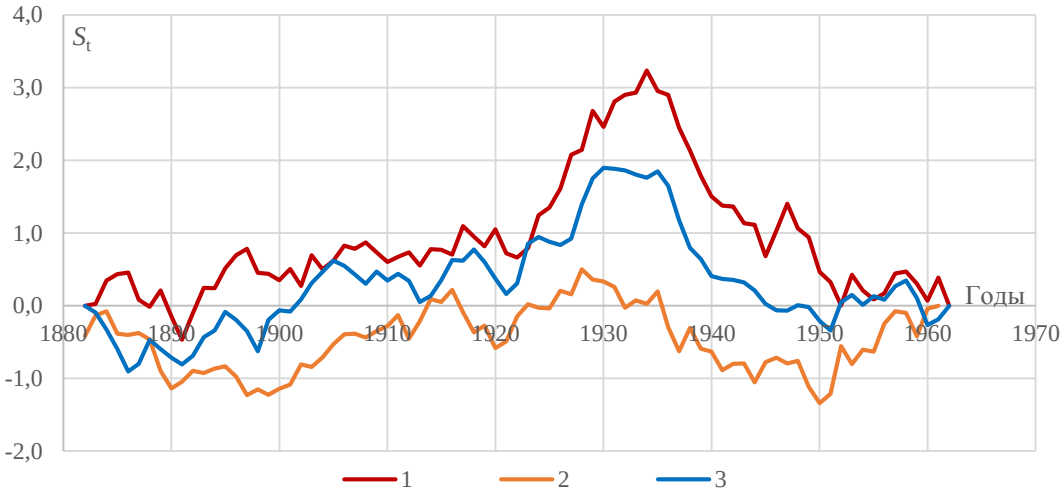


Рисунок 2.1 – Разностные интегральные кривые для Северной Двины: 1 – в.п. Соломбала (г. Архангельск) (уровни, $H_{макс}$); 2 – г.п. Усть-Пинега (максимальные расходы воды, $Q_{макс}$); 3 – г.п. Усть-Пинега (среднегодовые расходы воды, $Q_{ср}$)

Таким образом, задача восстановления водности Северной Двины за период отсутствия наблюдений с целью выделения периодов повышенной и пониженной водности в первом приближении может быть решена на базе построения зависимостей между осредненным за период характерной водности среднегодовыми расходами воды по г.п. Усть-Пинеге и максимальными уровнями по в.п. Соломбала. В качестве длины периода осреднения выбрана продолжительность 5 и 6 лет. Для того, чтобы исключить влияние составляющей на изменение однородности рядов наблюдений, период совместных наблюдений принимается с 1882 до 1962 г., т.е. до начала интенсивной борьбы с заторными явлениями в устье. По полученным уравнениям связи для периода осреднения 5 лет: $Q_{ср} = 6{,}2H_{макс} + 1344$ (R^2 = 0,52) и 6 лет: $Q_{ср} = 6{,}0H_{макс} + 1414$ (R^2 = 0,52) восстановлен средний сток Северной Двины с шагом 5 и 6 лет, соответственно, и по восстановленным данным построены разностные интегральные кривые (рис. 2.2), ординаты которых отнесены к середине периода осреднения. По разностным интегральным кривым в первом приближении выделены периоды повышенной и пониженной водности до начала регулярных наблюдений (табл. 2.1).

Данные о расходах воды на Вычегде отсутствуют за период XVIII – нач. XX в., однако наличие синхронности колебаний среднегодовых расходов воды по г.п. Федяково на Вычегде и г.п. Усть-Пинеге за период совместных наблюдений, о

чем свидетельствует высокий коэффициент корреляции (R^2 = 0,67) связи $Q_{\text{ср}_{\text{Усть-Пинега}}} = 2{,}83 Q_{\text{ср}_{\text{Федяково}}} + 263$, позволяет использовать качественную оценку водности периодов Северной Двины также и для Вычегды.

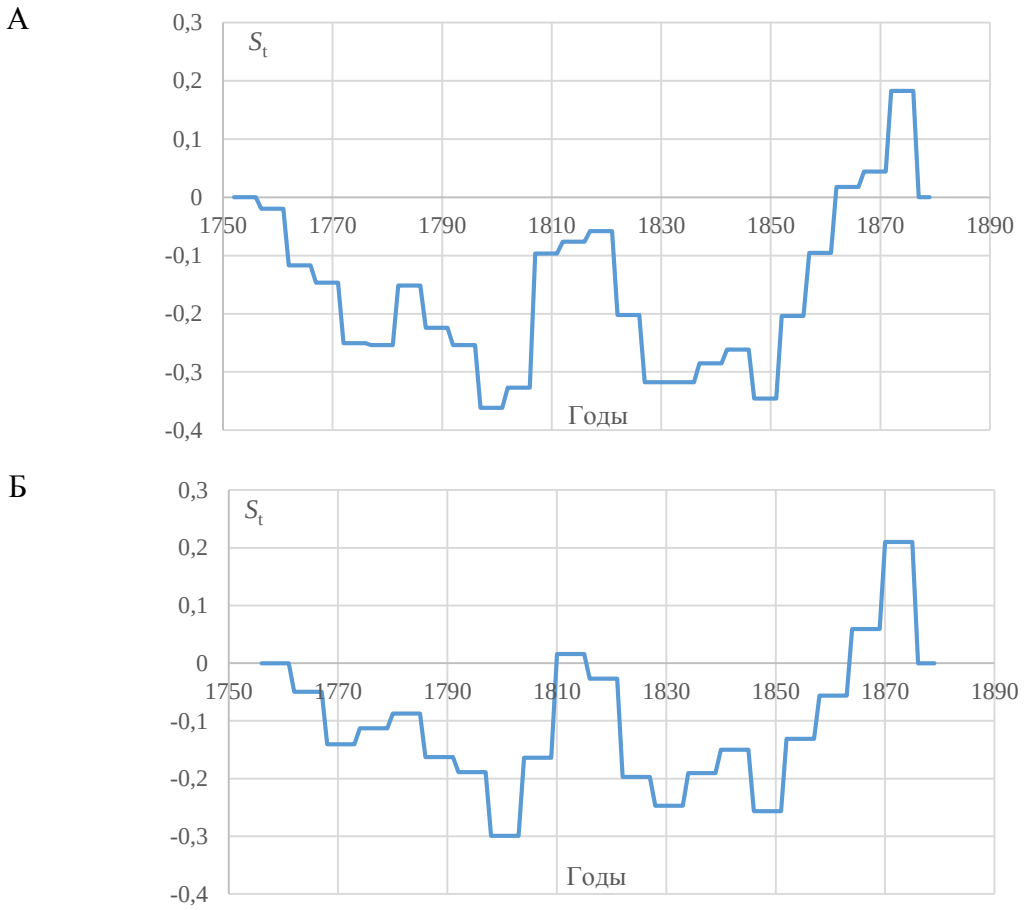


Рисунок 2.2 – Разностные интегральные кривые для г.п. Усть-Пинега по восстановленным $Q_{\text{ср}}$ с периодом осреднения 5 (А) и 6 (Б) лет

Таблица 2.1 – Многоводные и маловодные периоды на реках Севера ЕТР

Река / Период водности	До начала периода наблюдений		С начала периода наблюдений	
	Маловодные	Многоводные	Маловодные	Многоводные
Северная Двина	1752-1774, 1787-1802, 1822-1833, 1846-1851, 1876-1885	1775-1786, 1803-1821, 1834-1845, 1852-1875	1936-1951, 1960-1989, 1999-2013	1886-1935, 1952-1959, 1990-1998
Вычегда			1936-1947, 1958-1981	1886-1935, 1948-1958, 1982-2013
Мезень	–	–	1944-1947, 1977-1980, 1985-1989, 1996-2006, 2010-2013	1938-1943, 1948-1976, 1981-1984, 1990-1995, 2007-2009
Печора	–	–	1936-1980, 2011-2013	1980-2010

Для выделения периодов характерной водности с начала периода инструментальных наблюдений также построены разностные интегральные кривые для среднегодовых расходов воды ($Q_{ср}$) с 1882 г. для Северной Двины, с 1920-1930-х гг. для Вычегды, Мезени и Печоры (рис. 2.3).

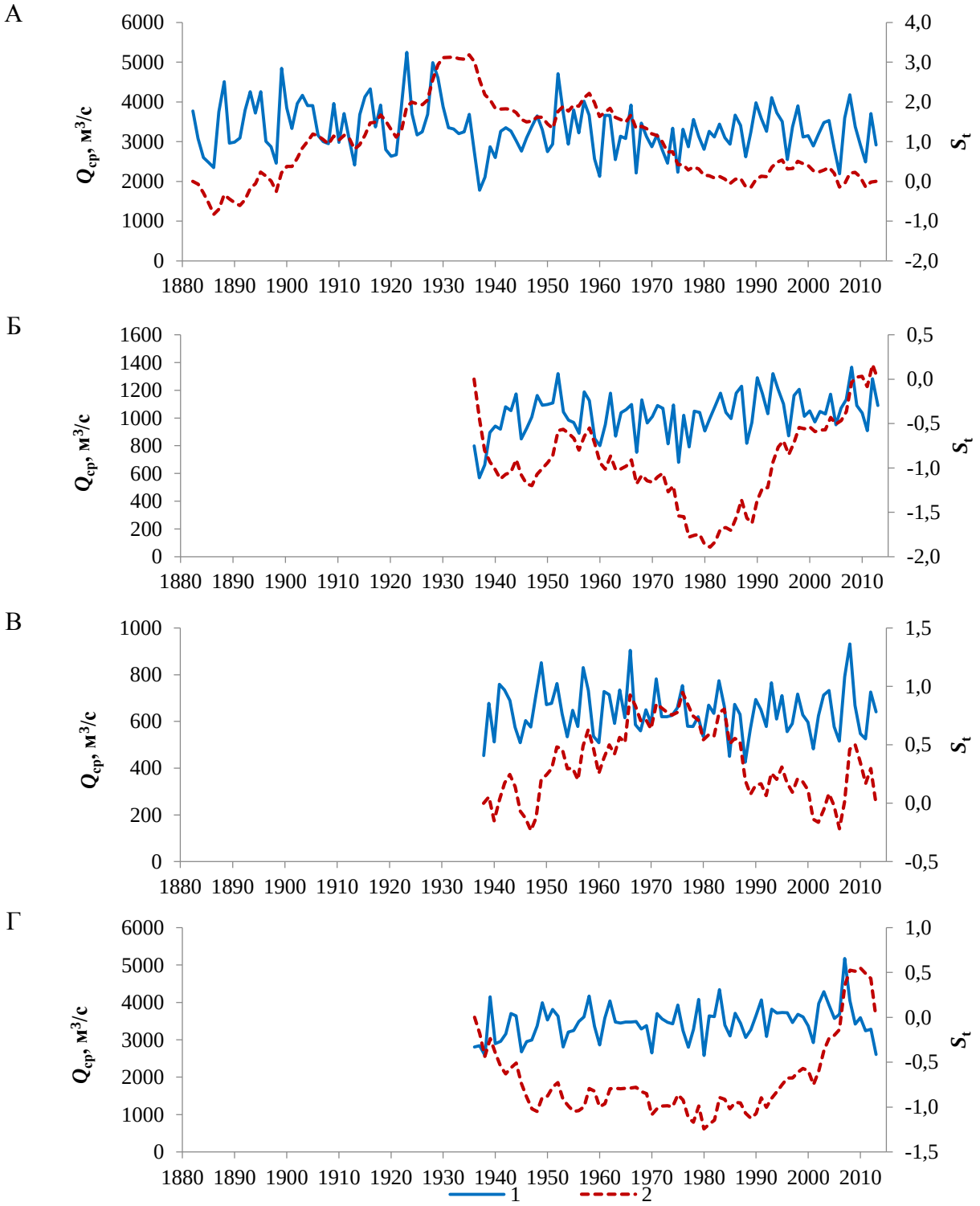


Рисунок 2.3 – Графики колебания среднегодовых расходов воды $Q_{ср}$ (1) и разностные интегральные кривые для $Q_{ср}$ (2) по гидрологическим постам: А) Усть-Пинега (Северная Двина); Б) Федяково (Вычегда); В) Малонисогорская (Мезень); Г) Усть-Цильма (Печора)

Анализ кривых и графиков колебания водности показал, что с 1930-х гг. на реках было несколько периодов повышенной и пониженной (продолжительностью от 3-10 до 50 лет) водности (табл. 2.1). Имеются различия наступления и окончания этих периодов, обусловленные местными факторами. Так, согласно полученным оценкам синхронности колебаний водности Северной Двины и Печоры [Водные ресурсы…, 2008], корреляция между колебаниями очень слабая (0,31), тогда как в большей мере она проявляется в синхронности колебаний водности Северной Двины и Онеги (0,70). Последнее, очевидно, связано с особенностями перемещения подземных вод между бассейнами Северной Двины и Онеги. Отмечается слабый тренд к постепенному увеличению водности на Печоре в течение всего периода наблюдений [Водные ресурсы…, 2008].

На фоне более крупных периодов повышенной и пониженной водности наблюдаются отдельные многоводные или маловодные годы. Однако их влияние на русловые переформирования установить достаточно сложно, поскольку большинство из них не охватывается картографическим материалом.

Согласно оценкам [Водные ресурсы…, 2008] с 1978-2005 гг. значительных внутригодовых изменений стока на реках региона не наблюдалось.

2.2. Гидрологический режим

Распределение годового стока воды по территории соответствует ее климатическим и гипсометрическим особенностям. В пределах равнинной территории он несколько уменьшается с севера на юг, несмотря на увеличение в том же направлении годовой суммы осадков при одновременном увеличении испарения с поверхности водосборов. Отмеченная закономерность, имеющая зональный характер, местами нарушается влиянием рельефа: на плато и возвышенностях сток заметно больше, чем на соседних низменностях. Особенно значительна в этом отношении роль Тиманского кряжа и наветренного северо-западного уступа Беломорско-Кулойского плато.

Большие реки Севера ЕТР принимают ряд крупных притоков (табл. 2.2), наиболее значимые из которых: Вычегда (приток Северной Двины), Вымь (приток

Вычегды), Вашка (приток Мезени), Уса (приток Печоры). В главные реки они привносят не менее 30% стока. Так, среднегодовой расход воды Выми составляет порядка 40% от вычегодского, Вашки – 30% от мезенского. Печора, сливаясь с самый крупным притоком – р. Усой, практически удваивает свою водность. Эти притоки в основном служат границами морфологически однородных участков, поскольку существенное изменение гидрологических условий влечет за собой изменения форм проявления русловых процессов.

Таблица 2.2 – Основные притоки и их вклад в водность главных рек

Главная река	Приток	Км впадения в главную реку	Длина, км	F, м^2	Гидрологический пост ближайший от устья	F, м^2	$Q_{ср}$, м^3/с	Доля от $Q_{ср}$ главной реки, %
Северная Двины	Сухона	744	558	50300	Каликино	49200	450	24%
	Вычегда	673	1130	121000	Федяково	112000	1060	56%
	Вага	362	575	44800	Усть-Сюма	43900	402	15%
	Емца	234	188	14100	Сельцо	7980	72,6	3%
	Пинега	137	779	42000	Кулогоры	36700	378	12%
Вычегда	Нем	785	260	4230	Краснояр	4180	40,5	16%
	Сысола	420	487	17200	Первомайский	11700	105	18%
	Вымь	298	499	25600	Половинки	25100	271	27%
Мезень	Мезенская Пижма	390	236	3830	Ларкино	2930	41,9	6%
	Вашка	201	605	21000	Рещельская	19000	194	30%
	Пёза	86	363	15100	Игумного	12000	126	20%
Печора	Щугор	1037	300	9660	Мичабичевник	9220	254	24%
	Уса	754	565	93600	Макариха	66900	1070	31%
	Ижма	455	531	31000	Усть-Ухта	15000	152	4%
	Пижма	419	283	5470	Боровая	4890	46,9	1%
	Цильма	415	374	21500	Трусово	20900	228	7%

Особое значение имеет слияние Вычегды и Северной Двины. Сопоставление их водности показывает, что на Вычегду приходится 70% среднего многолетнего расхода воды, тогда как на Северную Двину – лишь 30%; кроме того, Вычегда превосходит Северную Двину и Сухону как по длине (1803 км и 1300 км, соответственно), так и по площади водосбора (121 тыс. км^2 и 88,3 тыс. км^2). Это позволяет сделать вывод, что по гидрологическим условиям Северная Двина является притоком Вычегды (недаром до недавнего времени участок от слияния Юга и Сухоны до устья Вычегды называли Малой Северной Двиной).

Реки Севера ЕТР относятся к рекам преимущественно снегового питания. Водный режим их характеризуется высоким весенним половодьем и низкой зимней меженью. В летне-осенний период нередко проходят дождевые паводки, особенно частые осенью, благодаря чему водность рек в летне-осенний период значительно больше, чем в зимний [Ресурсы…, 1972] (табл. 2.3, рис. 2.4).

Таблица 2.3 – Характерные расходы воды

Река	Гидрологический пост	Расстояние от устья, км	F, км^2	$Q_{ср}$, м^3/с	$Q_{ср\ макс}$, м^3/с	$Q_{30\ л\text{-}о}$, м^3/с	$Q_{30\ з}$, м^3/с
Северная Двина	Абрамково	472	220000	1899	11848	1020	431
	Звоз	233	245000	2595	15699	1380	570
	Усть-Пинега	94	348000	3237	21341	1740	694
Вычегда	Помоздино	925	4660	131	462	22	17
	Малая Кужба	657	26500	253	1929	106	56
	Сыктывкар	414	66900	576	4718	284	130
	Малая Слуда	363	68200	678	4533	–	–
	Федяково	73	112000	1018	6829	476	234
Мезень	Макариб	681	6450	80	973	37	16
	Большая Пысса	455	16100	193	1803	93	40
	Малонисогорская	147	56400	645	5913	324	129
Печора	Якша	1506	9620	160	1520	73	27
	Троицко-Печорск	1359	35600	545	4589	221	90
	Усть-Щугор	1036	67500	1073	9552	581	158
	Усть-Цильма	425	248000	3477	23406	1980	422
	Оксино	141	312000	4662	26058	3310	639

Примечания: Среднегодовые и максимальные расходы воды осреднены за весь период наблюдений до 2009 г.; минимальные расходы воды осреднены за период наблюдений до 1966 г. Характерные расходы воды: $Q_{ср}$ – средний многолетний, $Q_{ср\ макс}$ – средний максимальный, расходы 30-дневной продолжительности летне-осеннего периода $Q_{30\ л\text{-}о}$, зимнего периода $Q_{30\ з}$.

Весеннее половодье на реках начинается на юго-западе территории обычно 10-15/IV, в центральной части 20-30/IV, на северо-востоке (бассейн Печоры) 10-15/V. В годы с ранней или сильно запаздывающей весной сроки наступления половодья сдвигаются на ±20-30 дней. Наиболее раннее половодье на большинстве рек наблюдалось в 1937 и 1951 гг., а наиболее позднее в 1941 г. (на реках бассейна Северной Двины) или в 1952 г. (на Мезени и Печоре).

Наибольшая часть суммарного стока воды за весну приходится на талые снеговые воды (60-80%), доля дождевого стока обычно составляет 10-30%, грунтового 5-10% общего объема стока за половодье.

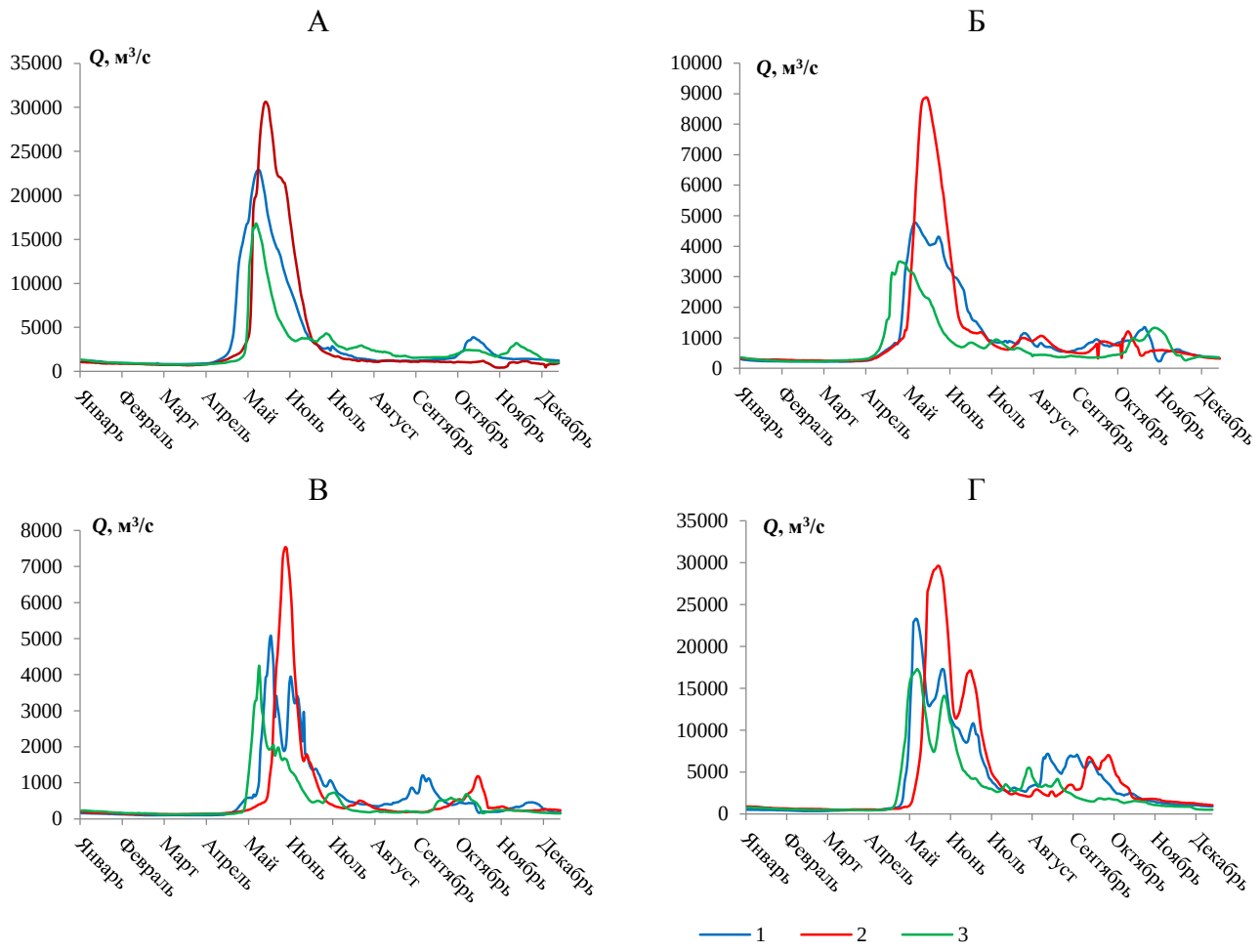


Рисунок 2.4 – Гидрографы рек Севера ЕТР за характерные годы: 1 – средний, 2 – многоводный и 3 – маловодный: А) р. Северная Двина – г.п. Усть-Пинега, Б) р. Вычегда – г.п. Федяково, В) р. Мезень – г.п. Малонисогорская, Г) р. Печора – г.п. Усть-Цильма

Формирование высоких половодий в основном определяется величиной снегозапасов и дружностью снеготаяния. Наиболее высокие подъемы уровней воды за последние годы отмечены в 1997, 2002 гг. на Северной Двине и Вычегде, в 1998, 2004 гг. – на Печоре, в 1999, 2003 гг. – на Мезени.

Продолжительность половодья – от 1,5-2 (Северная Двина, Вычегда, Мезень) до 2,5-3 месяцев (Печора). Гидрограф половодья однопиковый, при возвратах холодов в период снеготаяния в большей или меньшей мере расчленен.

Летне-осенняя межень начинается в конце мая – середине июня, на северо-востоке – в начале–середине июля. В засушливые годы она устойчивая, длится 3-5

месяцев; в дождливые – разбивается на отдельные короткие периоды, общая продолжительность которых может составлять 0,5-1 месяц.

С учетом дождевых паводков на долю стока летне-осеннего периода приходится в среднем около 40% годового стока. Наиболее низкая летняя межень наблюдалась в 1937 г., на некоторых реках – в 1936 или в 1938 гг.

Дождевые паводки летом обычно одиночные, осенью проходят сериями. Вызываемые ими подъемы уровня воды значительно ниже весенних. Продолжительность отдельных паводков 1-2 недели, серий паводков – до 3-6 недель и более.

Зимняя межень начинается в конце октября – ноябре, продолжается 4,5-6 месяцев (до 7 месяцев на равнинных реках тундровой зоны).

Сток воды уменьшается к концу зимы по мере истощения запасов подземных вод, минимальный – обычно в марте. Наинизшие уровни воды, однако, чаще наблюдаются до установления ледяного покрова. При ледоставе уровни повышаются за счет подпорных явлений.

На Северной Двине и Печоре особой сложностью характеризуется режим стока в весенний период, что обусловлено разновременностью развития половодья на основных притоках; существенное влияние в период ледохода оказывают заторы льда.

На Северной Двине половодье обычно проходит двумя волнами. С первой волной, формирующейся на Сухоне и Юге и усиливающейся после впадения Ваги, связано вскрытие Северной Двины, сопровождающееся заторными подъемами уровня. Вторая волна, идущая с Вычегды, следует спустя 1-3 недели после первой. Это приводит к значительному повышению уровня в период ледохода выше мест заторообразования и его уменьшению ниже головы затора. В верхнем течении (до слияния с Вычегдой) Северной Двины высший годовой уровень обычно наблюдается в период вскрытия; ниже устья Вычегды – в одни годы во время ледохода, в другие – на вычегодской волне половодья, т.е. в период открытого русла.

Величина весеннего подъема уровня выше слияния с Вагой обычно около 5-6 м, в местах с неразветвленным руслом и незначительной по ширине поймой – до 9-10 м. В многоводные годы подъемы на 2-4 м больше, в маловодные – примерно на столько же меньше.

На Печоре, Мезени и Северной Двине, текущих с юга на север, в период весеннего подъема формируются заторы. Создавая естественные плотины они вызывают заторные наводнения, способствуют изменению отметок дна русла выше и ниже по течению, а также перераспределению расходов воды по рукавам в разветвленном русле. В этих условиях форма паводочной волны по длине реки заметно меняется. В среднем течении число пиков составляет два-три, а ниже по течению их обычно два. В многоводные годы развитие половодья на Вычегде запаздывает незначительно, и волна весеннего половодья на Северной Двине формируется монолитной (рис. 2.4, А). Заторообразованию, как правило, способствуют резкое уменьшение продольного уклона, разделение русла на рукава, сужение русла или дна долины, резкие повороты русла или изменение направления дна долины.

На Северной Двине заторы обычно формируются у г. Великого Устюга, г. Котласа (выше устья р. Вычегды), с. Двинского Березника (ниже устья р. Ваги), д. Орлецы, г. Холмогоры, г. Архангельска; на Вычегде – у г. Сыктывкара [Русловые процессы…, 2012]. На Мезени формирование заторов происходит в верхнем течении на крутых излучинах в нескольких километрах от деревни Макариб; в среднем – возле островов между деревнями Большая Пысса и Латьюга, а в нижнем – у островов в районе деревень Малонисогорское, Бугаевское, Дорогорское и Лампожня. На Печоре вскрытие реки также сопровождается заторами. В верхнем течении этому способствует сильная извилистость русла. Наиболее продолжительные заторы (3-7 дней) наблюдались в 1938 г. у д. Якша и д. Мутный Материк. Однодневные заторы наблюдались в разные годы у д. Якша, г. Троицко-Печорска, д. Савинобор, с. Усть-Кожва [Ресурсы…, 1972].

2.3. Сток наносов

Сток наносов – важнейший фактор русловых процессов. Во многом он определяется водностью рек, водным режимом, геолого-геоморфологическими условиями в бассейнах рек.

Наиболее подробно сток наносов изучен на Северной Двине [Чалов и др., 2000; Чалов, Резников, 2005; Резников, 2007; Русловые процессы…, 2012], тогда как Мезень и Печора в этом отношении практически не изучены. В нижнем течении Мезени летом 2009 г. был осуществлен отбор проб донных отложений (руслообразующих наносов), выполнен их гранулометрический анализ, определена мутность воды [Чалов и др., 2010]. На р. Печоре наблюдения за стоком влекомых наносов были нерегулярными, производились приборами, малопригодными для работы на северных реках в весенний период и поэтому дающими лишь отрывочные и недостоверные представления. Измерения расходов влекомых наносов были произведены трижды в 1938 г. у с. Усть-Цильма (нижнее течение) в меженный период. Имеются данные расчета стока взвешенных наносов по гидрологическим постам Гаревка и Усть-Цильма (табл. 2.4), полученные на основании двухлетних наблюдений и приведенные к многолетним значениям. Их следует рассматривать как ориентировочные, связь между средними годовыми значениями стока взвешенных наносов и воды нечеткая [Ресурсы…, 1972]. В конце июня – начале июля 2008 г. в нижнем течении от г. Печоры до г. Нарьян-Мара в ходе рекогносцировочного обследования русла была определена мутность потока и определены расходы взвешенных наносов в рукавах.

Автором рассчитан сток взвешенных и влекомых наносов для гидрологических постов Малонисогорская на Мезени, Якша и Усть-Цильма на Печоре (табл. 2.4, 2.6); использовались также данные о стоке взвешенных и влекомых наносов Северной Двины и Вычегды, рассчитанные ранее [Чалов и др., 2000; Чалов, Резников, 2005]. Сток взвешенных наносов определен по стандартной методике, сток влекомых наносов – по методике, предложенной Н.И. Алексеевским [1998] и основанной на зависимостях стока влекомых наносов, определенной по скорости перемещения, размеров и формы гряд, от порядка реки.

Сток взвешенных наносов. Слагающие бассейны рек Севера аллювиальные и флювиогляциальные пески, моренные суглинки, аргиллиты, известняки и гипсы оказывают существенное влияние на интенсивность эрозионных процессов и, соответственно, поступление в реку наносов с его территории. Поэтому величина удельного смыва и, как следствие, мутность речных вод незначительны. Средняя многолетняя мутность воды (ρ) Северной Двины у г.п. Усть-Пинега составляет 37 г/м^3, что в 1,5 раза больше, чем выше по течению (табл. 2.4). К узлу слияния с Вычегдой мутность вновь увеличивается, ее значения находятся в пределах 26-40 г/м^3.

Таблица 2.4 – Средние многолетние характеристики стока взвешенных наносов

Река	Гидрологический пост	Площадь водосбора, км^2	$Q_{ср}$, м^3/с	m	ρ, г/м^3	R, кг/с	W_R, тыс. т
Северная Двина	Абрамково	220000	1899	2,00	22	42,5	1320
	Звоз	285000	2595	-	22	56,5	1793
	Усть-Пинега	348000	3237	2,06	37	122,0	3860
Вычегда	Помоздино	4660	131	-	-	-	-
	Малая Кужба	26500	253	1,86	32	7,6	240
	Сыктывкар	66900	576	-	47	30,0	946
	Малая Слуда	68200	678	-	-	-	-
	Федяково	112000	1018	-	31	32,0	1000
Мезень	Макариб	6450	80	-	-	-	-
	Большая Пысса	16100	193	-	-	-	-
	Малонисогорская	56400	645	2,00	(31)	(19,8)	626
Печора	Гаревка	4040	-	-	4,4	(0,5)	16
	Якша	4430	160	2,06	17	2,7	84
	Троицко-Печорск	35600	545	-	-	-	-
	Усть-Щугор	67500	1073	2,50	-	-	-
	Усть-Цильма	248000	3477	2,18	73	253,7	8021
	Оксино	312000	4662	-	-	-	-

Примечание: $Q_{ср}$ – средний многолетний расход воды, м^3/с; m – показатель степени зависимости $R=f(Q^m)$; ρ – мутность воды, г/м^3; R – сток взвешенных наносов, кг/с; W_R – объем стока взвешенных наносов, тыс. т.

При постепенном увеличении стока взвешенных наносов сверху вниз по течению Вычегды, максимум значений мутности воды приходится на среднее течение в районе г. Сыктывкара (табл. 2.4).

Изменения мутности по длине нижней Мезени незначительны. Об этом можно судить по данным измерений экспедиции МГУ в 2008 г. В продольном

распределении мутности большую роль играет самый крупный приток – р. Вашка, непосредственно при слиянии с которой происходит общее увеличение мутности воды; выше и ниже по течению мутность воды существенно не меняется, составляя в межень менее 4 г/м3 выше по течению и от 5 до 10 г/м3 и ниже. Существенны отличия в содержании взвеси по ширине русла, связанные с локальными процессами массопереноса, не имеющие однако выраженных тенденций. При постоянстве мутности по длине реки происходит увеличение стока взвешенных наносов в меженный период – от 4,7 до 6,5 кг/с как следствие увеличения водности реки в этом же направлении.

Продольные изменения значений средней многолетней мутности воды Печоры имеют наибольший разброс. В нижнем течении у г.п. Усть-Цильма она составляет 73 г/м^3, что более чем в 16 раз превышает значения мутности в верхнем течении (табл. 2.4). Соответственно, значительно увеличивается по длине реки сток взвешенных наносов (R).

Основной сток взвешенных наносов приходится на период половодья; остальная часть годового стока – на летне-осенний период; зимой сток наносов минимален. Аналогично этому на всех реках наибольшей мутностью характеризуется весеннее половодье, наименьшей – зимняя межень (табл. 2.5).

Таблица 2.5 – Мутность воды рек (ρ, г/м^3) в различные сезоны года

Пункт	Период наблюдений	Средняя за период	Весеннее половодье		Межень		
			Средняя	Наибольшая месячная	Лето-осень	Зима	Весь период
Вычегда – с. Мал. Кужба	1957-61, 1964	32	43	50 (V)	14	4,3	9,7
Вычегда – г. Сыктывкар	1950-55	47	77	(167) (IV)	28	4,4	18
Мезень – д. Малонисогорская	1949-51	31	47	55 (V)	15	2,6	9,6
Печора – д. Гаревка	1965, 1966	4,4	7,3	8,9 (V)	1,1	0,6	0,9

Сток наносов Северной Двины и Вычегды в период половодья в 1,5-2 раза превышает меженный сток. При этом на долю зимней межени приходится от долей процента до 3-6% годового стока наносов [Русловые процессы…, 2012].

Для Мезени в межень характерна очень низкая мутность. Согласно данным, полученным в конце 1940-х – начале 1950-х гг. [Ресурсы…, 1972], мутность воды в весеннее половодье примерно в 5 раз превышает меженные значения. В верхнем течении Печоры это соотношение 8:1.

Сток влекомых наносов и соотношение стока влекомых и взвешенных наносов. Исследования стока влекомых наносов на Северной Двине [Чалов и др., 2000] показали, что его величина зависит от продолжительности половодья, состава русловых отложений и климатических условий. Большая часть стока влекомых наносов на Северной Двине и Вычегде проходит в период половодья (60-80%) [Русловые процессы…, 2012]. Изменения его характеристик по длине рек связаны с увеличением их размеров (порядка, водоности), при этом важную роль играют конкретные условия руслоформирования. Так, для Северной Двины характерно уменьшение W_G вниз по реке (табл. 2.6), на Печоре и Вычегде, напротив, от верховьев к устью наблюдается его увеличение.

На Мезени продольные изменения стока влекомых наносов в нижнем течении незначительны. Распределение стока влекомых наносов по рукавам пропорционально мутности и стоку взвешенных наносов, которые увеличиваются от правого берега к левому [Чалов и др., 2010].

По длине рек Севера происходит закономерное увеличение общего стока наносов (табл. 2.6) и его составляющих пропорционально их водности ($Q_{ср}$), т.е. от верховьев к устью. Связи между характеристиками стока наносов и водности (рис. 2.5, А, Б) тесные (коэффициент корреляции R>0,8), имеют линейный характер. Дифференциация полученных зависимостей отвечает условиям руслоформирования и соответствующим им типам русла – врезанным и широкопойменным. При одинаковой водности в широкопойменном русле сток наносов (взвешенных и влекомых) выше, чем во врезанном.

Таблица 2.6 – Характеристики стока наносов для рек Севера Европейской территории России

Река	Гидрологический пост	Расстояние от устья (по лоцманской карте), км	$Q_{ср}$, м^3/с	Порядок реки (по А. Шайдеггеру), *N*	Взвешенные			Влекомые		Соотношение стока влекомых и взвешенных наносов			
					m	*R*, кг/с	W_R, тыс. т	*G*, кг/с	W_G, тыс. т	*G*+*R*, кг/с	W_G/W_R	W_R/W_{G+R}, %	W_G/W_{G+R}, %
Северная Двина	Абрамково	472	1899	10,6*	2,00	42,5	1320	22,5*	710*	65,0	0,53	65%	35%
	Звоз	233	2595	11,0*	–	56,5	1793	19,4*	610*	25,1	0,34	75%	25%
	Усть-Пинега	94	3237	11,5*	2,06	122,0	3860	20,6*	650*	407,5	0,05	86%	14%
Вычегда	Малая Кужба	657	253	8,0*	1,86	7,6	240	5,1	160	12,7	0,67	60%	40%
	Сыктывкар	414	576	9,3*	–	30,0	946	14,3	450	44,3	0,48	68%	32%
	Федяково	73	1018	9,7*	–	32,0	1000	17,1*	540*	49,1	0,53	65%	35%
Мезень	Малонисогорская	147	645	9,0	2,00	19,8	627	4,1	129	23,9	0,20	83%	17%
Печора	Усть-Щугор	1036	1073	9,1	2,50	–	–	146	4616	–	–	–	–
	Усть-Цильма	425	3477	10,9	2,18	253,7	8021	97,5	3076	351,2	0,38	72%	28%

Примечания: * Данные приведены по [Чалов и др., 2000]; голубым цветом – по [Резников, Чалов, 2007]

Сток взвешенных наносов преобладает в общем стоке наносов (W_G/W_R<1; W_R>60%) на всех исследованных участках (табл. 2.6). По мере увеличения водности и порядка рек происходит снижение доли влекомых наносов и увеличение доли взвешенных (рис. 2.6). Повышенной долей взвешенных наносов в общем стоке (более 80%) характеризуется нижнее течение Северной Двины (г.п. Усть-Пинега) и Мезени (г.п. Малонисогорская). Связь между объемами (рис. 2.7, А) и расходами (рис. 2.7, Б) влекомых и взвешенных наносов отражает общую тенденцию для рек Севера ЕТР.

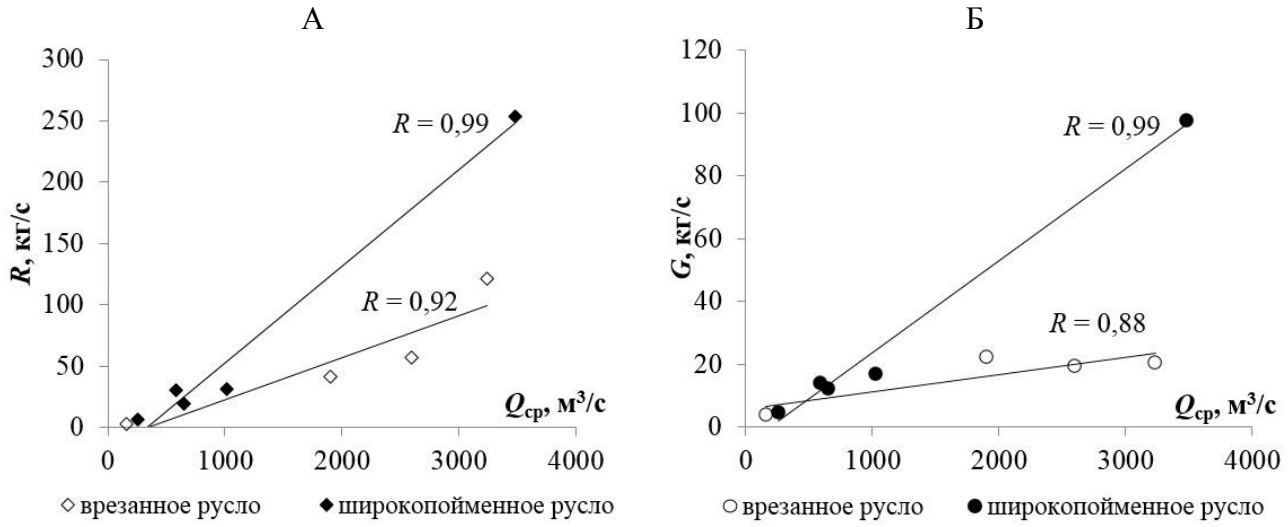


Рисунок 2.5 – Связь средних многолетних расходов воды с расходами стока наносов: А) взвешенных, Б) влекомых для рек Севера ЕТР

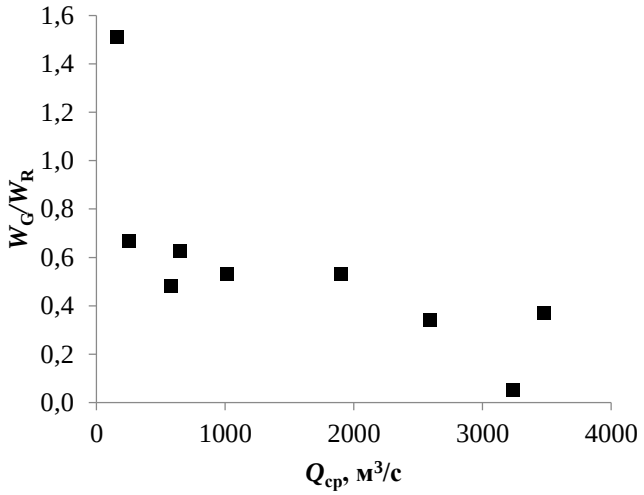


Рисунок 2.6 – Зависимость соотношения стока влекомых и взвешенных наносов W_G/W_R от среднемноголетних расходов воды $Q_{ср}$ рек Севера ЕТР

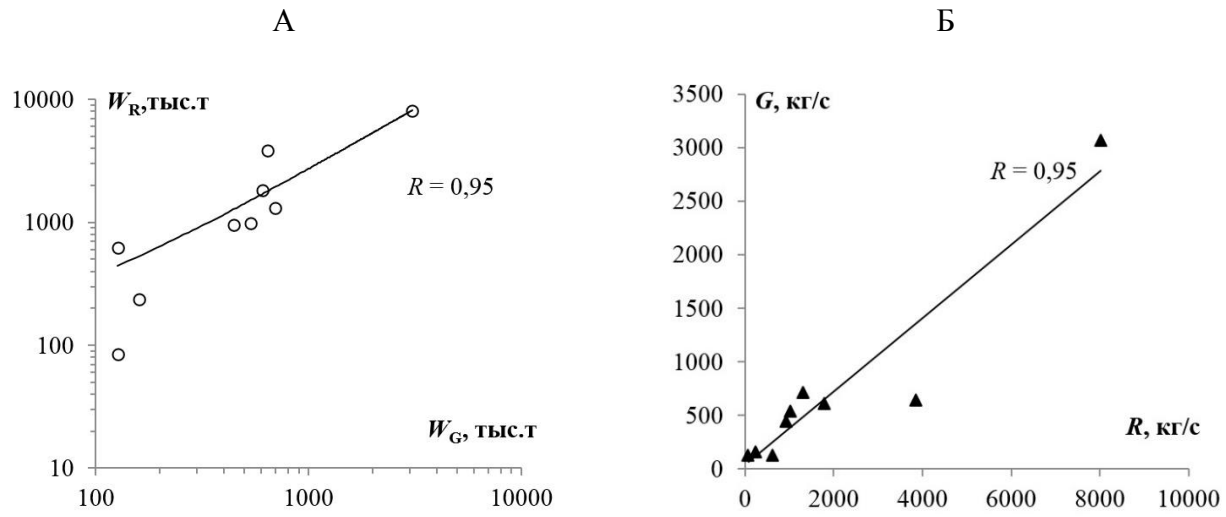


Рисунок 2.7 – Соотношение стока (А) и расходов (Б) влекомых и взвешенных наносов на реках Севера ЕТР

2.4 Состав руслообразующих наносов и устойчивость русел

Все равнинные реки Севера ЕТР – песчаные. Руслообразующие наносы на Северной Двине представлены средне- и крупнозернистыми песками с довольно значительной примесью гравийных частиц (до 20-30%). В зависимости от чередования сужений и расширений дна долины, расположения реки возле коренных берегов или на удалении от них, у впадения притоков средняя крупность их по длине реки изменяется в широких пределах (от 0,11 до 3,0 мм). В составе руслообразующих наносов преобладают среднезернистые пески. Свободные или ограниченные условия формирования русла, и соответственно, геологическое строение русла и долины реки определяют изменения состава русловых отложений. Например, в Черевковско-Ягрышском расширении (510-479 км) река размывает мелкопесчаные озерно-аллювиальные и древнедельтовые отложения, подстилаемые валунными суглинками (мореной) [Сахарова, 1960]. Размыв песчаных берегов приводит к обильному поступлению в русло мелких песков. В результате руслообразующими наносами являются не только среднезернистые, но и мелкозернистые пески. Ниже по течению река прорезает моренные суглинки, насыщенные гравием, галькой и крупным песком, и в русле наряду со среднезернистыми появляются и начинают преобладать среднекрупно- и крупнозернистые пески с примесью гравия и гальки.

От устья Вычегды до устья Ваги (609-314 км) средняя крупность наносов изменяется от 0,25 до 3,0 мм (при большой примеси гравия), при этом в главных рукавах разветвлений преобладают среднекрупнозернистые и крупнозернистые пески, во второстепенных – мелкосреднезернистые и среднезернистые. На участке от устья Ваги до устья Пинеги (314-94 км) преобладают среднекрупнозернистые пески, увеличивается доля среднезернистых и мелкозернистых. Средняя крупность русловых наносов изменяется от 0,11 до 2,97 мм [Русловые процессы…, 2012].

На Вычегде от верховьев к устью песчаные, иногда песчано-галечные наносы на участке от с. Вольдино до устья р. Нема (935-782 км) сменяются мелко-среднезернистыми и среднезернистыми песками до с. Керчемья (703 км) и далее до Сыктывкара (418 км) руслообразующие наносы становятся крупно- и среднекрупнозернистыми часто с примесью гравия. При слиянии с р. Сысолой крупность наносов снижается в левом рукаве, сливающемся с Сысолой, до 0,6 мм (преобладают среднезернистые пески), тогда как в правом рукаве – полое Шарда крупность остается такой же, как на Вычегде выше по течению. Ниже по течению до с. Межога (220 км) руслообразующие наносы в основном песчаные, но при подмыве террас и на отдельных перекатах встречается галька. В нижнем течении Вычегды (220-0 км) руслообразующие наносы представлены песками от мелкозернистого до крупнозернистого с преобладанием среднезернистого (35,6% площади русла), в том числе с примесью гравия (до 30%) [Русловые процессы…, 2012].

В нижнем течении Мезени, как и на Северной Двине, в составе руслообразующих наносов абсолютно преобладают крупнозернистые и среднекрупнозернистые пески (d=0,40-0,90 мм), часто с примесью гравия (d>10 мм). В рукавах, проходящих вдоль коренных берегов (выступов мергелей и аргиллитов), в прибрежной полосе присутствует гравий или мелкая галька. В параллельно-рукавных разветвлениях при близкой водности обоих рукавов в межень наблюдается приблизительно одинаковый состав руслообразующих наносов; относительно маловодные (несудоходные) характеризуются преобладанием среднекрупнозернистых песков (d=0,40-0,60 мм), многоводные

(судоходные) – крупнозернистых (d=0,60-0,90 мм). Наблюдается снижение крупности руслообразующих наносов на перекатах и на перевалах судового хода от одного коренного берега к другому [Чалов и др., 2010].

По составу руслообразующих наносов на Печоре выделяются три участка: от истока до устья р. Илыча русло валунно-галечное и галечное; второй участок отделен от первого двумя короткими, следующими друг за другом, отрезками с преобладанием песчаных и валунно-галечных наносов, которые сменяют друг друга почти до впадения р. Лыжи; от устья р. Лыжи до устьевой области руслообразующие наносы песчаные, с преобладанием средне- и крупнозернистых песков. Для всего нижнего течения р. Печоры средняя крупность донных отложений выдерживается по длине в пределах 0,6-0,4 мм.

Соотношение крупности наносов и уклонов реки определяет устойчивость русел. Для оценки устойчивости русел к размыву использовались число Лохтина $Л=d_{ср}/H$ и коэффициент стабильности Н.И. Маккавеева $K_с=d_{ср}/Ib_р$ где $d_{ср}$ – средний диаметр частиц наносов, мм; H – километрическое падение, м/км; I – уклон, ‰; $b_р$ – ширина русла, м. Средний диаметр частиц $d_{ср}$ определен без учета примеси гравия, который перемещается вследствие аблювиального эффекта и не определяет общую подвижность наносов [Чалов, 1995; Русловые процессы…, 2012].

На Северной Двине (табл. 2.7) участки слабоустойчивого русла чередуются с относительно устойчивыми. Более устойчивым участкам соответствует относительно прямолинейное русло, врезанные излучины, либо простые формы разветвлений (одиночные и односторонние) врезанного русла (Вятское разветвление) или рукавах разветвлений, проходящих вдоль коренного берега (Хаврогорское разветвление). На отрезках с наименьшей устойчивостью во врезанном и широкопойменном русле формируются параллельно-рукавные разветвления (Паячные-Рубежское, Конецгорское, Калкурское), а также узлы слияния рек (Северной Двины с Вычегдой, Вагой, Емцой).

На Вычегде (табл. 2.8) устойчивость русла снижается сверху вниз по течению: до с. Межог (224 км) русло устойчивое, от с. Межога до устья –

слабоустойчивое. Наименьшей устойчивостью характеризуются участки с разветвленно-извилистым широкопойменным руслом.

Таблица 2.7 – Устойчивость русла Северной Двины от Великого Устюга до устьевой области (здесь и в табл. 2,8-2,10: Λ – число Лохтина, K_c – коэффициент стабильности Маккавеева) [Русловые процессы…, 2012]

Км по с/х	Название участка (пункт, перекат)	Λ	K_c
572-558	прк. Телеговские – прк. Красноборский	5	7,6
512-508	прк. I, II Ракульские	5,3	7,1
500-496	прк. V, VI Ракульские	4,6	7,6
489-486	прк. Верх., Ниж. Рубежские	3,5	7,1
340-334,5	прк. I, II Конецгорские	4	6,2
318,5-312	Усть-Важское разветвление	4,7	5,2
267-261	Вятское разветвление	6,9	9,8
254-247	Калкурское разветвление	4,1	5,1
241-235	Орловское разветвление	3,5	4,1
224-214	Хаврогорское разветвление	8,7	15,8
199-191	Усть-Емецкое разветвление	2,6	4,5
178-176,5	с. Челмохотская База	5,8	7
170-167	о. Большой – прк. Сийский	3,3	4,2
133-132	с. Наволочек	7,3	10,7

Таблица 2.8 – Устойчивость русла Вычегды от с. Усть-Нем до устья [Русловые процессы…, 2012]

Км по с/х	Название участка (пункт, перекат)	Λ	K_c
430-220	Запань Алешинская – с. Межог	5,9	7,9
220-145	с. Межог – с. Козьмино	5,1	9,3
145-58	с. Козьмино – с. Надворская Княжица	3,9	5,2
58-0	с. Надворская Княжица – устье	3,1	3,9

Русло Мезени (табл. 2.9) слабоустойчивое на всем протяжении нижнего течения. На участках с наибольшими значениями показателей устойчивости формируются вынужденные излучины (Азаполье – Целегора) или относительно прямолинейное врезанное русло (Козьмогородское – Кимжа). Наименьшей устойчивостью характеризуются рукава параллельно-рукавных разветвлений, свойственные нижнему течению Мезени, исключительно врезанному руслу.

Принимая значения уклонов выше устья р. Усы равным 0,10‰, от устья р. Усы до устья р. Цильмы – 0,04-0,03‰ и от устья р. Цильмы до устьевой области – 0,04-0,02‰, были оценены изменения устойчивости русла (по числу Лохтина) на

каждом морфологически однородном участке нижнего течения Печоры (табл. 2.10) [Львовская, Чалов, 2015]: верхний – русло слабо устойчивое (Λ=4,0); средний – относительно устойчивое и устойчивое (Λ=10÷13, вниз по течению возрастает до 16-20); нижний – устойчивое (Λ=10-20), но с общей тенденцией снижения вниз по течению: Λ=20 в его начале, Λ=10-13 выше дельтовой области (нижние 100 км). На участках с наименьшей устойчивостью формируются сопряженные разветвления в широкопойменном русле (от Кожвинского порога почти до устья Лыжи), наибольшей устойчивости соответствуют обтекающие излучины во врезанном и широкопойменном русле (в районе впадения Цильмы).

Таблица 2.9 – Устойчивость русла Мезени от устья Вашки до устьевой области

Км по с/х	Пункты	Λ	K_c
162-145	устье Вашки – Мал. Нисогора	4,4	3,4
145-116	Мал. Нисогора – перекат Залесье	3,6	1,9
116-105	Перекат Залесье – Палуга	2,9	2,7
105-97	Палуга – Азополье	5,0	6,4
97-92	Азополье – Целегора	5,6	9,3
92-67,5	Целегора – Козьмогородское	2,9	1,7
67,548,5	Козьмогородское – Кимжа	5,6	5,4

Таблица 2.10 – Устойчивость русла р. Печоры от Кожвинского порога до устьевой области [Завадский, Львовская и др., 2015]

Участок (пункты)	Км от устья	Λ
Кожвинский порог – устье р. Усы	862-754	4
Устье р. Усы – устье р. Цильмы	754-672 672-647 647-541 541-422	11-13 16 10-11 16-20
Устье р. Цильмы – устьевая область	422-370 370-347 347-307 307-192	13 20 17 10-13

Как известно, показатели устойчивости русла отражают интенсивность русловых деформаций: чем меньше устойчивость, тем быстрее проходят переформирования русел. Для оценки степени устойчивости русла использована классификация Р.С. Чалова [1983] (табл. 2.11). Однако, очевидно, что одним и тем же величинам показателей устойчивости русла крупных рек Севера ЕТР

соответствуют различные скорости русловых деформаций, что подтверждается ретроспективным анализом и сопоставлением величин Λ и K_c (рис. 2.8). Одной из причин значительных различий является масштабный эффект (водность Печоры в нижнем течении превышает водность Мезени, Вычегды и Северной Двины в 7, 4,5 и 1,5 раза, соответственно), который обусловливает увеличение Λ при одних и тех же K_c на Печоре по сравнению с остальными реками.

Таблица 2.11 – Классификация русел по степени их устойчивости (по Р.С. Чалову [1983])

Характеристика устойчивости	Показатели устойчивости русла	
	Λ	K_c
Неустойчивые	<2	<6
Слабоустойчивые	2-5	6-15
Относительно устойчивые	5-10	15-20
Устойчивые	>10	>20

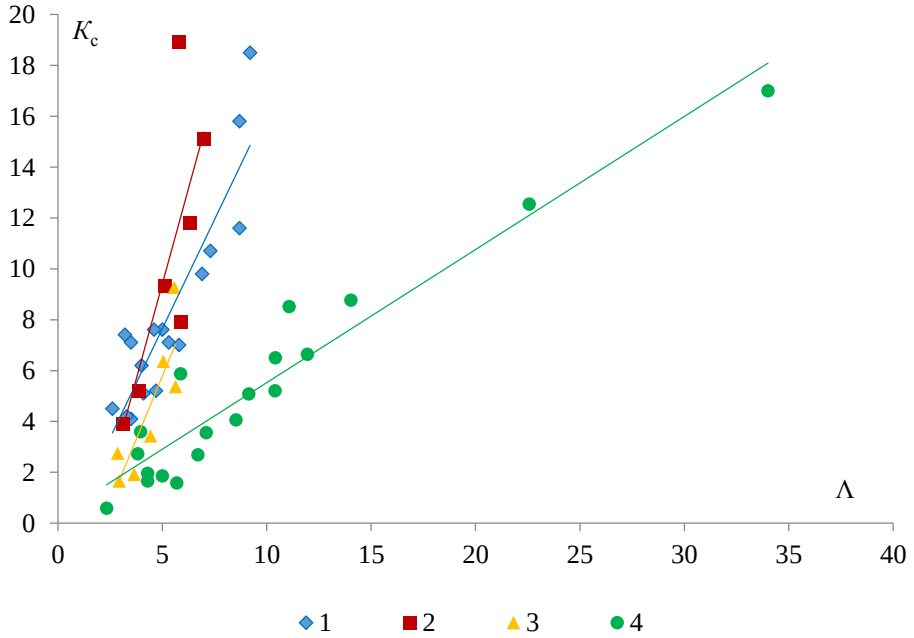


Рисунок 2.8 – Связь коэффициентов стабильности Н.И. Маккавеева (K_c) с числом Лохтина (Λ) для: 1 – Северной Двины, 2 – Вычегды, 3 – Мезени, 4 – Печоры

Влияние стока наносов на форму поперечного сечения русла показывают зависимости показателя устойчивости русла – числа Лохтина $\Lambda = d/I$ и морфометрического параметра Глушкова $\Gamma = \sqrt{b_p}/h$ (здесь b_p – ширина русла, h – средняя глубина) от среднегодовой удельной величины (содержания) влекомых наносов в потоке (рис. 2.9). Чем больше содержание влекомых наносов в русле, тем

меньше его устойчивость и тем более интенсивны русловые деформации; напротив, с ростом удельной величины расхода влекомых наносов увеличивается *Г*, возрастает «перекатность» русла и его относительная мелководность, аналогичная зависимость для рек бассейна Северной Двины была получена П.Н. Резниковым [2007].

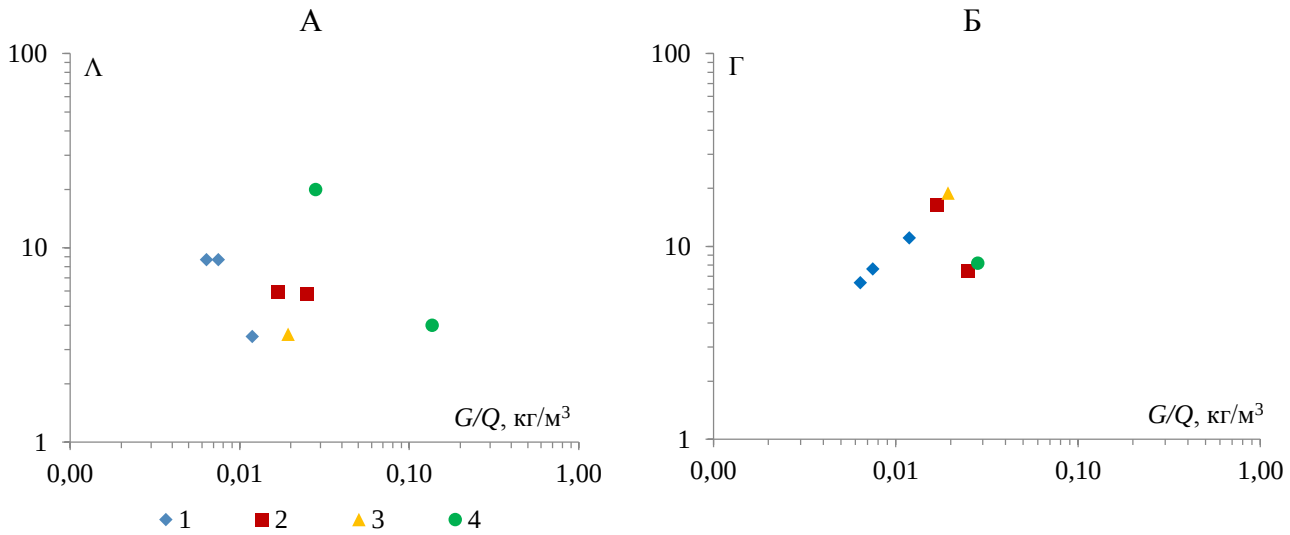


Рисунок 2.9 – Зависимость числа Лохтина Λ (А) и параметра Глушкова (Б) от удельной величины (содержания) влекомых наносов в потоке *G/Q* (обозначения см. на рис. 2.8)

2.5 Руслоформирующие расходы воды

Расходы, определяющие переформирования русел в разные фазы водного режима, называются руслоформирующими $Q_ф$ (по Н.И. Маккавееву [1955; Проектирование…, 1964] и Р.С. Чалову [1979, 2008]). Существуют различные методы их определения. Наиболее известны подходы Н.С. Лелявского [1893], Н.И. Маккавеева [1955; Проектирование…, 1964], Н.С. Знаменской [1968], В.И. Антроповского [1969, 1970], В.С. Лапшенкова [1979], среди зарубежных исследователей – Ф. Шаффернака [Schaffernak, 1950]. Последний впервые разработал графический метод определения руслоформирующего расхода воды на основе сопоставления кривых повторяемости уровней воды и расходов донных наносов, то есть его метод учитывал влияние наносов на формирование русла и продолжительность воздействия на русло тех или иных расходов воды. Н.С. Лелявский предлагал использовать в качестве руслоформирующего расхода воды для перекатных участков меженный расход, однако термин

«руслоформирующий расход воды» он не применял. Наиболее обоснованная методика была разработана Н.И. Маккавеевым [1955]: $Q_ф$ определяется по максимуму произведения $\sigma Q^m IP$, где σ – коэффициент, учитывающий момент выхода воды на пойму, m – показатель степени $R=f(Q^m)$, зависящий от крупности наносов (см. табл. 2.6), P – повторяемость расхода воды Q, I – соответствующий ему уклон водной поверхности. Таким образом, $Q_ф$ представляет собой интегральную характеристику влияния природных условий на русловые процессы, поскольку учитывают не только водность как фактор стока наносов и русловых деформаций, но и повторяемость расходов воды, уклоны, крупность наносов и ширину разлива воды по пойме. Подробный анализ подходов и методов расчетов руслоформирующих расходов воды был выполнен Р.С. Чаловым [2006, 2008]. Им же предложена некоторая модифицированная методика Н.И. Маккавеева: вместо фиксированных m для русел с разным типом донных отложений принимается показатель степени зависимости расхода взвешенных наносов от расхода воды $R=f(Q^m)$); σ вводится не в момент выхода воды на пойму, а при ее затоплении на 0,5-1 м, когда на ней формируется транзитный поток [Чалов, 2008].

В зависимости от природных условий на реках может быть от одного до трех интервалов руслоформирующих расходов воды. По соотношению с расходом воды, при котором происходит затопление поймы, выделяется четыре основных разновидности: в одних случаях расход воды верхнего интервала проходит при затопленной пойме, в других – руслоформирущие расходы воды проходят только в пределах пойменных бровок, при этом до выхода воды на пойму может проходить только один руслоформирующий расход воды, либо их может быть два [Чалов, 1979, 2008].

Для рек Севера ЕТР преимущественно характерны три максимума произведения $\sigma Q^m IP$ (табл. 2.12). В большинстве случаев расход воды верхнего интервала проходит при затопленной пойме, что в свободных условиях русловых деформаций благоприятствует развитию пойменной многорукавности, разветвлений, а в меандрирующем русле – образованию прорванных излучин.

Такие условия характерны для всего среднего и нижнего течения Северной Двины, верхнего и нижнего течения Вычегды, нижнего течения Печоры и Мезени.

На Северной Двине вниз по течению снижается величина и обеспеченность а, следовательно, роль соответствующих расходов воды в формировании русла. Так, обеспеченность расхода верхнего интервала снижается от 3,5% по г.п. Абрамково до 0,7% по г.п. Усть-Пинега. Обеспеченность руслоформирующего расхода воды верхнего интервала по г.п. Абрамково наибольшая среди рек Севера ЕТР, здесь же наиболее широко распространена пойменная многорукавность; следующая по величине обеспеченность $Q_ф$ характерна для г.п. Усть-Цильма на Печоре также существенно превышающая значения для других рек региона.

Таблица 2.12 – Руслоформирующие расходы воды

Река	Пост	верхний интервал		средний интервал		нижний интервал	
		$Q_ф$, м^3/с	P, %	$Q_ф$, м^3/с	P, %	$Q_ф$, м^3/с	P, %
Северная Двина	Абрамково	*9500*	*3,5*	7500	6,4	1500	56,1
	Звоз	*19065*	*0,8*	11685	4,0	1845	35,1
	Усть-Пинега	*28055*	*0,7*	19005	2,4	4525	24,7
Вычегда	Мал. Кужба	*2131*	*1,2*	1249	4,6	514	16,1
	Сыктывкар	–	–	2250	5,0	1100	11,0
	Федяково	*5575*	*1,2*	4037	4,1	961	23,9
Мезень	Бол. Пысса	*1810*	*1,3*	1330	3,0	236	26,0
	Малонисогорская	*6520*	*0,8*	5180	2,0	675	34,0
Печора	Якша	–	–	1130	2,0	–	–
	Троицко-Печерск	*7900*	*0,1*	5500	0,3	3880	2,1
	Усть-Щугор	*13580*	*0,1*	8980	1,2	5910	4,0
	Усть-Цильма	*20800*	*2,6*	7090	15,0	–	–
	Оксино	*21000*	*1,0*	5000	28,5	–	–

Примечание: Руслоформирующие расходы воды для Северной Двины и Вычегды – по данным Р.С. Чалова, П.Н. Резникова [2005], для Печоры и Мезени – рассчитаны в НИЛ эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева; курсивом выделены расходы воды, проходящие при затопленной пойме, и соответствующая им вероятность превышения.

Рост обеспеченности руслоформирующего расхода воды нижнего интервала от верховьев к устью Мезени свидетельствует об увеличении его роли в переформировании небольших русловых форм. Действительно, перекаты в нижнем течении очень подвижны, подвержены значительным сезонным переформированиям.

В среднем течении Вычегды (г.п. Сыктывкар) наблюдается два интервала расходов воды, которые отвечают за руслоформирование в пределах пойменных бровок. Эта особенность указывает на различия в природных условиях относительно остальной части бассейна Северной Двины и Вычегды и находит отражение в проведенном ранее районировании по условиям прохождения руслоформирующих расходов воды [Власов, Чалов, 1991; Русловой режим…, 1994; Резников, Чалов, 2005].

В нижнем течении Печоры наблюдаются два интервала расходов воды – верхний и средний. Последний имеет на Печоре достаточно высокую обеспеченность по сравнению с остальными реками региона и отвечает за переформирование как небольших гряд, так и более крупных русловых форм в пределах пойменных бровок одновременно.

В верховьях Печоры, берущей начало в предгорьях Урала, эпюра имеет один пик – средний (г.п. Якша), который отвечает за развитие русла в бровках поймы.

2.6 Геолого-геоморфологическая характеристика

Геологическое строение территории и ее рельеф являются определяющими факторами руслоформирования наряду с водностью. Рельеф территории Севера ЕТР, несмотря на существенные различия в геологическом строении отдельных частей, однообразен и преимущественно является равнинным. Уклоны рек в пределах равнинных территорий не превышают 0,10‰. Максимальные уклоны дна долины характерны для верховьев Печоры (0,19‰), Мезени и Вычегды (0,17‰), берущих свое начало, соответственно, в предгорьях Уральских гор и Тиманского кряжа.

Равнинный характер в центральной части региона нарушается Тиманским кряжем. Только в узкой полосе на восточной границе рельеф приобретает совершенно иной характер, обусловленный Уральскими горами. На юге бассейны северных рек ограничиваются Северными Увалами. На западе водораздел между бассейнами рек выражен в рельефе слабо. Здесь бассейн Северной Двины граничит с бассейном Онеги. На большей части территории низменные равнины чередуются

с невысокими плато и возвышенными, слабоволнистыми или слегка всхолмленными равнинами. Ближе к морскому побережью низменности занимают обширные пространства; по мере удаления от него площадь их уменьшается, располагаясь полосами вдоль главных рек и их наиболее крупных притоков. Возвышенные равнины приурочены к приводораздельным участкам междуречий. Чем дальше от морского побережья, тем эти участки занимают все большие площади. В целом поверхность бассейнов понижается с юга на север, что определяет общее направление речного стока – к Белому и Баренцеву морям.

Абсолютные отметки низменностей 30-80 м, снижаясь к морскому побережью. На возвышенных равнинах и плато отметки в среднем составляют 100-160 м, местами – до 200-250 м. Переходы от низменностей к возвышенным равнинам и плато выражены отчетливо и имеют характер уступов относительной высотой 50-100 м.

Поверхность плато и возвышенных равнин пересечена густой сетью речных долин, хорошо дренирована и только лишь местами заболочена. В пределах низменностей долины неглубокие.

Заметное влияние на климатические и гидрологические условия региона оказывает Тиманский кряж и его продолжение на северной оконечности полуострова Канин в виде хребта Паэ (Канин Камень). По занимаемой площади он сравним с крупным плато, а по абсолютным отметкам значительно их превосходит: средняя высота его около 190 м (на 30-60 м выше других возвышенностей), отдельные гряды и вершины в средней части Тиманского кряжа (Четласский камень и др.) достигают 350-450 м. Вытянутый в северо-западном направлении от верховьев Вычегды более чем на 700 км, Тиманский кряж делит территорию на две неравные части и является водоразделом между р. Печорой с одной стороны, Северной Двиной и Мезенью – с другой. Расположение Тиманского кряжа на пути господствующего переноса влаги с запада и юго-запада придает ему характер орографического барьера, существенно влияющего на распределение осадков и стока воды. Это находит отражение в некоторых различиях в русловом режиме рек по разные стороны от хребта. Водораздельное же значение Тиманского кряжа,

состоящего из отдельных лесистых гряд и плосковершинных возвышенностей – парм, местами весьма условно. Некоторые притоки р. Печоры, верховья Вычегды с системой притоков, истоки р. Выми расположены между его грядами, пересекая хребет по системе сквозных долин.

Геолого-геоморфологическое строение бассейна сказывается в свободных и ограниченных условиях развития русловых деформаций и, следовательно, в распространении широкопойменных или врезанных русел. Если речная долина пересекает территорию, сложенную легкоразмываемыми горными породами и песчаными отложениями, то условия формирования русла является свободными, русло широкопойменное. В этих условиях «поток управляет руслом» [Великанов, 1958] и, следовательно, русло чутко реагирует на все гидрологические изменения; для него характерны высокие скорости горизонтальных русловых деформаций – в среднем от 1 до 10-15 м/год. Трудноразмываемые горные породы и отложения, определяют ограниченные условия формирования русел, последние являются врезанными, сопровождаются узкой поймой, либо она отсутствует. Трансформации русел при колебаниях водности не происходит вследствие их стеснения трудноразмываемыми отложениями; скорости горизонтальных русловых деформаций минимальны или проявляются через происходящие на коренных берегах склоновые процессы – оползни, осыпи, и поэтому заметны лишь в геологическом масштабе времени. К группе легкоразмываемых отложений и горных пород относятся пески, супеси, лёгкие безвалунные суглинки, галечники; к трудноразмываемым – тяжелые валунные суглинки (морена), глины, скальные и полускальные осадочные породы (мергели, известняки, гипсы и т.д.).

Геологическое строение территории Севера ЕТР в пределах его равнинной части характеризуется преобладанием платформенных структур и глубоким залеганием кристаллического фундамента, перекрытого мощными толщами осадочных отложений. Несмотря на это глыбовая структура и разломы фундамента определяют чередование низменностей и плато, а также развитие долин в течение их всей геологической истории [Ресурсы…, 1972]. Прадолины северных рек были сформированы преимущественно в верхнем мезозое-палеогене и в четвертичное

время заполнялись толщами рыхлых отложений различного генезиса – ледниковыми (моренными), морскими, аллювиальными, дельтовыми, очень разнообразными по составу – от легкоразмываемых песков до относительно устойчивых валунных суглинков и глин. Песчаные дельтовые и аллювиальные отложения при размыве сложенных ими берегов (рис. 2.10, А) являются источниками поступления в русло большого количества наносов. На Северной Двине этому способствуют подстилающие дно долины (на участке Черевково – Ягрыш) плотные моренные суглинки, по кровле которых блуждает русло. В бассейнах рек Севера ЕТР древние коренные породы более ранних периодов – палеозоя выходят на поверхность или перекрыты маломощными толщами рыхлых отложений лишь в северо-западной части территории (на побережье Белого моря), в пределах Уральских гор и Тиманского кряжа, определяя ограниченные условия русловых деформаций. В нижнем течении Северной Двины, уже в ее устьевой области, сформировались особые пойменно-останцово-русловые разветвления с островами, образованными вышедшими на поверхность скальными и полускальными породами. В верховьях Печоры и некоторых ее правых притоков русло формируется в скальных осадочных и метаморфических породах, слагающих Уральские горы и их предгорья. То же характерно для Печоры в месте пересечения ею отрогов Тиманского кряжа – возвышенности хребта Сосвинский Мусюр и рек, протекающих между хребтами Тиманского кряжа – верховьев Вычегды, Мезени, некоторых левых притоков Печоры.

Моренные отложения времен валдайского оледенения и дочетвертичные известняки, гипсы, мергели (пермо-триаса, карбона) создают преимущественно ограниченные условия в нижнем течении Северной Двины от впадения Ваги до устья Пинеги [Русловые процессы…, 2012]; врезанный характер русла нижней Мезени от слияния с Вашкой определяется формированием русел в пермских красноцветных отложениях (мергелях, аргиллитах, алевролитах, песчаниках) [Чалов и др., 2010], слагающих крутые уступы коренных берегов высотой от 10 до 40 м с обеих сторон реки, обрывающиеся к руслу или к узкой пойме ($b_р > B_п$) (рис. 2.10, Б).

А Б

Рисунок 2.10 – А) Толоконная гора на Северной Двине (*фото автора*); Б) коренной берег Мезени (*фото С.Н. Рулевой*)

Чередование трудноразмываемых четвертичных отложений – тяжелых валунных суглинков (моренные отложения), с одной стороны, песков и супесей (аллювиальные, дельтовые, флювиогляциальные отложения), с другой, определяют частое чередование условий развития русловых деформаций (широкопойменных, адаптированных, врезанных) в среднем течении Северной Двины от с. Ягрыша до устья Ваги, где проходит граница валдайского оледенения. Аналогичные условия характерны для нижнего течения Вычегды: мощные толщи рыхлых четвертичных отложений – флювиогляциальных, аллювиальных, древнедельтовых и др. чередуются с мореной московского оледенения и морскими глинами. При этом дочетвертичные (коренные) породы залегают здесь на большей глубине, чем находятся отметки дна плёсов.

Почти на всем протяжении в пределах Печорской низменности Печора протекает по территории с холмисто-моренным рельефом [Спиридонов, 1978]; озерные и флювиогляциальные песчано-галечные отложения чередуются здесь с валунными суглинками [Инженерная геология…, 1978], что обусловливает чередование ограниченных и свободных условий русловых деформаций с преимущественным распространением последних. В долине Печоры коренные породы в пределах Печорской низменности перекрыты мощным чехлом четвертичных отложений (от 120 до 300 м [Карандеева, 1957]) различной

размываемости, представленные преимущественно песками и песчаниками. На севере Печорской низменности в основании береговых обрывов выходит днепровская морена, определяя адаптированный характер русла Печоры в ее среднем течении ниже слияния с Усой. В районе Притиманья отложения представлены трудноразмываемыми породами известняками и доломитами; здесь формируется врезанное русло Печоры.

В северной части бассейна Печоры в пределах Малоземельской и Большеземельской тундры примерно до полярного круга распространена вечная мерзлота. В пределах долины Печоры она представлена подзоной редкоотсровного распространения вечномерзлотных пород мощностью не более 30-50 м [Инженерная геология…, 1978] и охватывает нижние 310 км включая устьевую область и приурочена к породам суглинистого состава, что обусловливает относительно малую интенсивность их размыва [Хмызников, 1934] по сравнению с песчаными. При прочих равных условиях интенсивность размыва последних в пределах криолитозоны выше, чем вне ее [Арэ, 1979], вследствие того, что помимо механических процессов, разрушение берегов происходит также под воздействием термоэрозии.

ГЛАВА 3 МОРФОДИНАМИКА РУСЕЛ РЕК СЕВЕРА ЕТР

3.1 Морфодинамические типы русел, их распространение и условия формирования

Согласно морфодинамической классификации МГУ [Чалов, 2008], существует несколько уровней развития русловых процессов, каждый из которых представляет собой условия, в которых происходит формирование русла на последующих (рис. 3.1). Совокупность кинематических характеристик потока, форм транспорта наносов, их крупности и количества, уклонов определяет разделение рек по типам русловых процессов на горные, полугорные и равнинные (блок I).

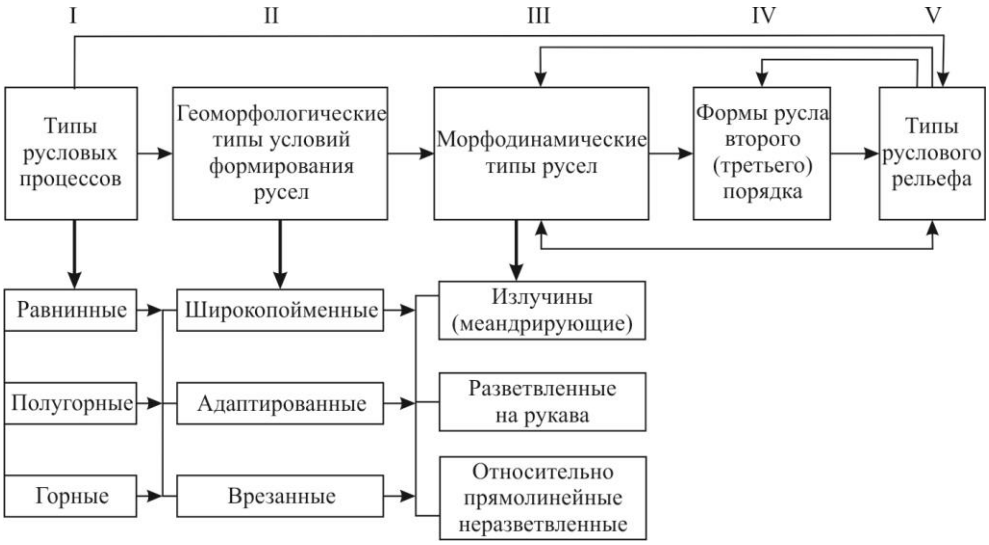


Рисунок 3.1 – Структура морфодинамической классификации речных русел [Чалов, 2008]

Реки Севера ЕТР являются равнинными практически на всем своем протяжении за исключением верховьев Печоры, которая берет свое начало в предгорьях Урала. Различные геолого-геоморфологические условия (свободные и ограниченные) обусловливают развитие широкопойменных, адаптированных и врезанных типов русел (блок II). Основным критерием выделения того или иного геоморфологического типа служит соотношение ширины русла $b_р$ и ширины поймы $B_п$ [Чалов, 2008]: при $B_п>(2\div3)b_р$ в условиях повышенного стока наносов преобладают горизонтальные русловые деформации и формируются широкопойменные русла, при $B_п<b_р$ и дефиците наносов преобладает глубинная эрозия, формируются врезанные русла. Промежуточное положение между

врезанными и широкопойменными руслами занимают адаптированные русла, у которых $b_р<B_п<(2÷3)b_р$.

Для выделения различных типов русел используется также соотношение между шириной русла $b_р$ и шириной дна долины $B_д$, включающей ширину русла и ширину поймы, т.е. $B_п+b_р$. Для Северной Двины на основе анализа $B_д/b_р$ для свободных излучин [Завадский, 2000] и эмпирических данных для разветвленного русла установлены соотношения, учитывающие влияние бортов долины или коренных берегов на развитие русла: при $B_д/b_р<2$ формируются врезанные русла (ограниченные условия развития горизонтальных русловых деформаций); интервалу значений $B_д/b_р$=3-4÷8 соответствуют адаптированные русла; широкопойменным отвечают наибольшие значения соотношения $B_д/b_р$>3-4÷8 (свободные условия развития русловых деформаций).

Для рек Севера ЕТР характерно чередование свободных и ограниченных условий развития русловых процессов. При этом преобладают русла широкопойменные, занимающие более 50% протяженности исследуемых участков (табл. 3.1, рис. 3.2). Таково русло в среднем и нижнем течении Печоры от города Печоры до устьевой области. Исключение составляет 114-километровый отрезок от 541 км до 427 км (впадение р. Цильмы), где русло пересекает юго-западную оконечность возвышенности – хребта Сосвинский Мусюр и является врезанным. В среднем течении Северной Двины от слияния с Вычегдой (608 км) до с. Ягрыша (479 км) ширина поймы достигает 4-6 км, местами 11 км, при соотношении $B_д/b_р$=4-6÷11. За пределами исследуемого участка свободные условия развития русловых деформаций характерны для Мезени, охватывая все ее среднее течение от устья р. Ирмы (681 км) до слияния с р. Вашкой (162 км).

На Северной Двине на участке от с. Ягрыша до устья Ваги чередование сужений и расширений и, следовательно, развитие врезанных, адаптированных и широкопойменных русел обусловлено пересечением рекой областей распространения трудно- и легкоразмываемых отложений. Пойма не имеет здесь сплошного распространения, а соотношение $B_п/b_р$=2-3.

Развитие русел нижнего течения Северной Двины от слияния с Вагой до устья Пинеги, нижнего течения Мезени между устьями Вашки и Пезы, а также русла за пределами исследуемых участков, приуроченные к Тиманскому кряжу и Уральским горам, верховьев Мезени и Печоры, соответственно, проходят в ограниченных условиях развития русловых деформаций вследствие малой мощности рыхлых четвертичных отложений и широкого распространения в долинах рек скальных пород; русла здесь преимущественно врезанные. Пойма отсутствует или ширина ее не превышает ширину русла ($B_п<b_р$), а $B_д/b_р$<2-3.

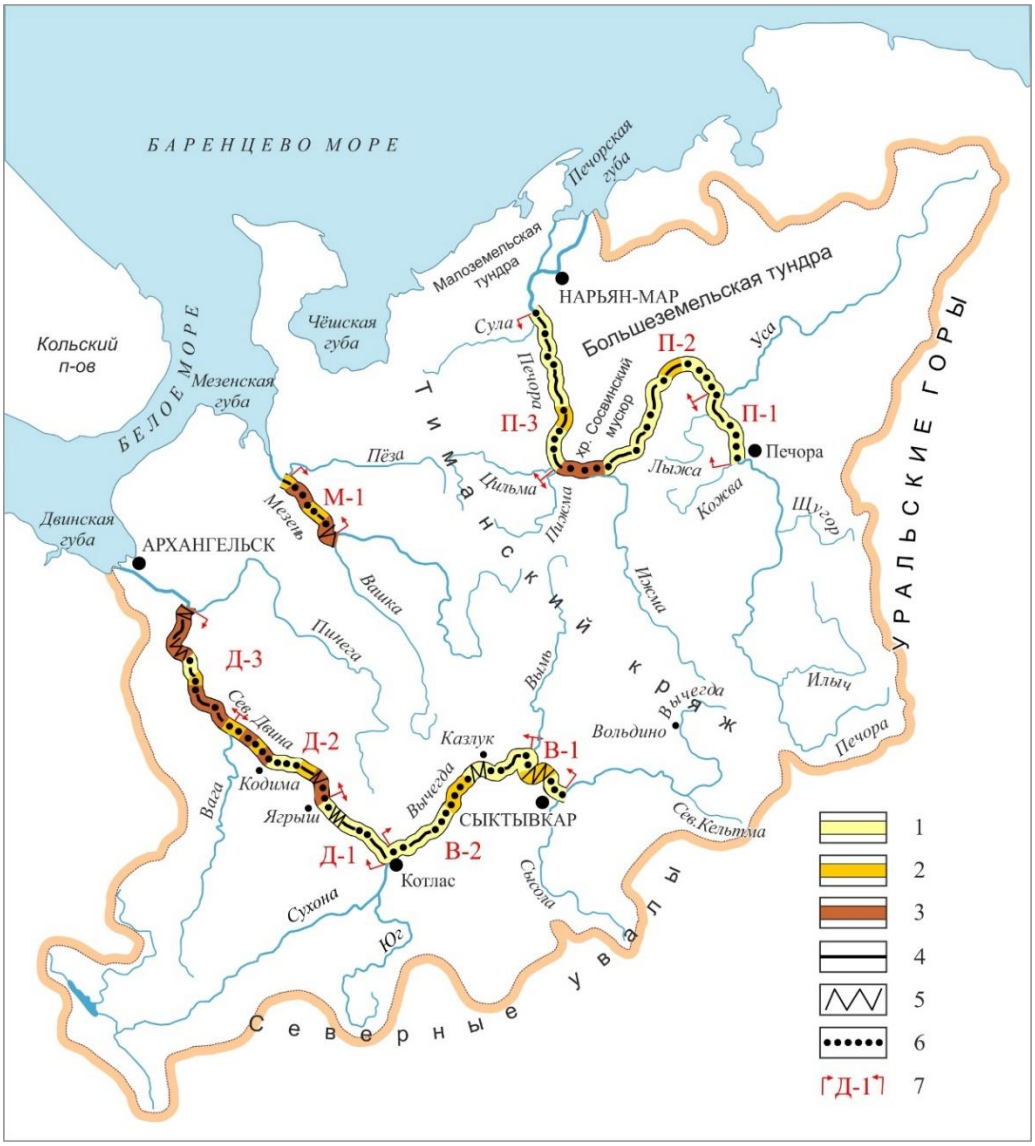


Рисунок 3.2 – Схема распространения типов русла геолого-геоморфологических:
1 – широкопойменного, 2 – адаптированного, 3 – врезанного; морфодинамических:
4 – относительно прямолинейного неразветвленного, 5 – извилистого, 6 – разветвленного;
7 – номера и границы морфологически однородных участков: Д – Северная Двина, В – Вычегда, М – Мезень, П – Печора

Таблица 3.1 – Распространение морфодинамических типов русел на исследуемых участках рек Севера ЕТР

Геоморфологический тип русла	Тип русла / Река	Северная Двина	Вычегда	Мезень	Печора	Всего	
		В числителе – суммарная протяженность, км; в знаменателе – доля от протяженности исследуемых участков, %					
Широкопойменное	Разветвленное	101,5 / 19	101,5 / 30	–	313 / 47	538,5 / 31	**930,5 / 53**
	Относительно прямолинейное	64,5 / 12	31 / 7	–	145 / 22	240,5 / 14	
	Извилистое	12,5 / 2	94 / 22	–	45 / 7	151,5 / 9	
	Всего	**178,5 / 33**	**249 / 59**	**–**	**503 / 75**		
Адаптированное	Разветвленное	53,5 / 10	57 / 14	8 / 7	14 / 2	132,5 / 8	**362 / 21**
	Относительно прямолинейное	41,5 / 8	99 / 24	30 / 26	31 / 5	201,5 / 12	
	Извилистое	–	15 / 4	5 / 4	8 / 1	28 / 2	
	Всего	**95 / 17**	**171 / 41**	**43 / 38**	**53 / 8**		
Врезанное	Разветвленное	101,5 / 19	–	53,5 / 47	61 / 9	216 / 12	**457,5 / 26**
	Относительно прямолинейное	69,5 / 13	–	3 / 3	48 / 7	120,5 / 7	
	Извилистое	102 / 19	–	14 / 12	5 / 1	121 / 7	
	Всего	**273 / 50**	**–**	**70,5 / 62**	**114 / 17**		
Длина исследуемого участка, км		**546,5**	**420**	**113,5**	**670**	**1750**	

Чередование широкопойменных и адаптированных русел с преобладанием первых характерно для всей Вычегды (в том числе около 60% длины исследуемого участка – нижней Вычегды). В верхнем, среднем и частично нижнем течении до устья р. Выми (297 км) ее русло формируется исключительно в свободных условиях развития русловых деформаций; средняя ширина поймы составляет 2,5-3 км, местами уменьшаясь до 300-400 м, соотношение $B_д/b_р$=6-7÷17. Ниже устья Выми широкопойменное русло чередуется с адаптированным; в первом случае русло сопровождается широкой поймой от 3-4 до 6-7 км при $B_д/b_р$=5-6÷10, на участках адаптированного русла $B_д/b_р$=3-4.

По морфологическому строению и особенностям горизонтальных деформаций различают русла извилистые (или меандрирующие), разветвленные на рукава и относительно прямолинейные неразветвленные (блок III классификации). В данной работе морфодинамические типы русла определены для участков нижнего и среднего течения рек Севера ЕТР до их устьевых областей: Вычегды – от г. Сыктывкара (420 км) до слияния с Северной Двиной (если рассматривать как единую речную систему Вычегду–Северную Двину, то рассматриваемый участок Вычегды следует относить к среднему течению этой системы), Северной Двины – от г. Котласа (614 км) до устья р. Пинеги (94 км), Мезени –между устьями рек Вашки (163 км) и Пезы (46 км), Печоры – от г. Печора (865 км) до впадения р. Сулы (190 км).

С учетом протяженности участков относительно прямолинейного русла, в пределах которых сформировались разветвления второго/третьего порядков (они образуются островами, у которых $B_о < 0{,}4B_р$; здесь $B_о$ – ширина острова, $b_р$ – ширина русла перед узлом разветвления [Иванов, 1989; Чалов, 2011]), разветвленные русла абсолютно преобладают на реках Севера ЕТР, занимая около 70% их протяженности, и преимущественно распространены в широкопойменном русле (рис. 3.3), хотя их доля достаточно представлена в адаптированном и особенно во врезанном русле.

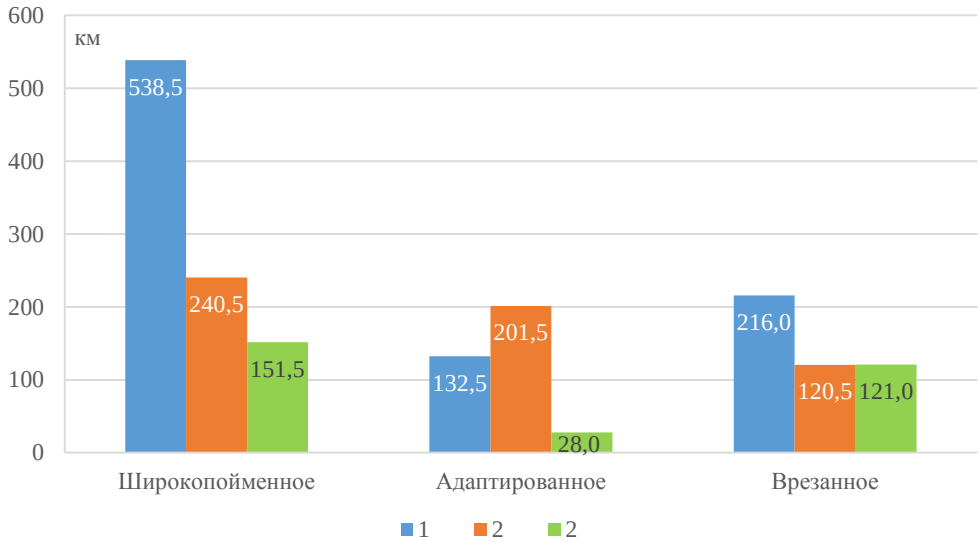


Рисунок 3.3 – Распространение морфодинамических типов русел на реках Севера ЕТР: 1 – разветвленного; 2 – относительно прямолинейного, неразветвленного; 3 – извилистого

Разветвленные русла представлены практически всеми известными морфодинамическими типами (рис. 3.4). Согласно классификации МГУ [Чалов, 2008], среди них преобладают параллельно-рукавные (24% общей протяженности участков разветвленных русел), одиночные (20%), односторонние (16%), пойменно-русловые (15%) и сопряженные (11%). Встречаются также чередующиеся односторонние разветвления, разветвления в узлах слияния рек (Вычегды и Северной Двины, Северной Двины и Ваги, Печоры и Лыжи, Печоры и Ижмы) (рис. 3.4, Ж). Имеются разветвления, которые обычно не включаются в классификации – двусторонние (рис. 3.4, З) и прибрежные (рис. 3.4, И). Двусторонние разветвления представляют собой цепочки вытянутых друг за другом островов вдоль противоположных берегов реки при относительной прямолинейности русла в целом и сосредоточении основного расхода воды посередине реки. Острова, образующие прибрежные разветвления, как правило, заполняют местные расширения русла или крупных рукавов в разветвлениях (вогнутости в береговой линии) или образуют сужения основного русла между звеньями сопряженных разветвлений. При этом они не определяют морфодинамический тип русла, лишь усложняя его облик и увеличивая рассредоточение стока.

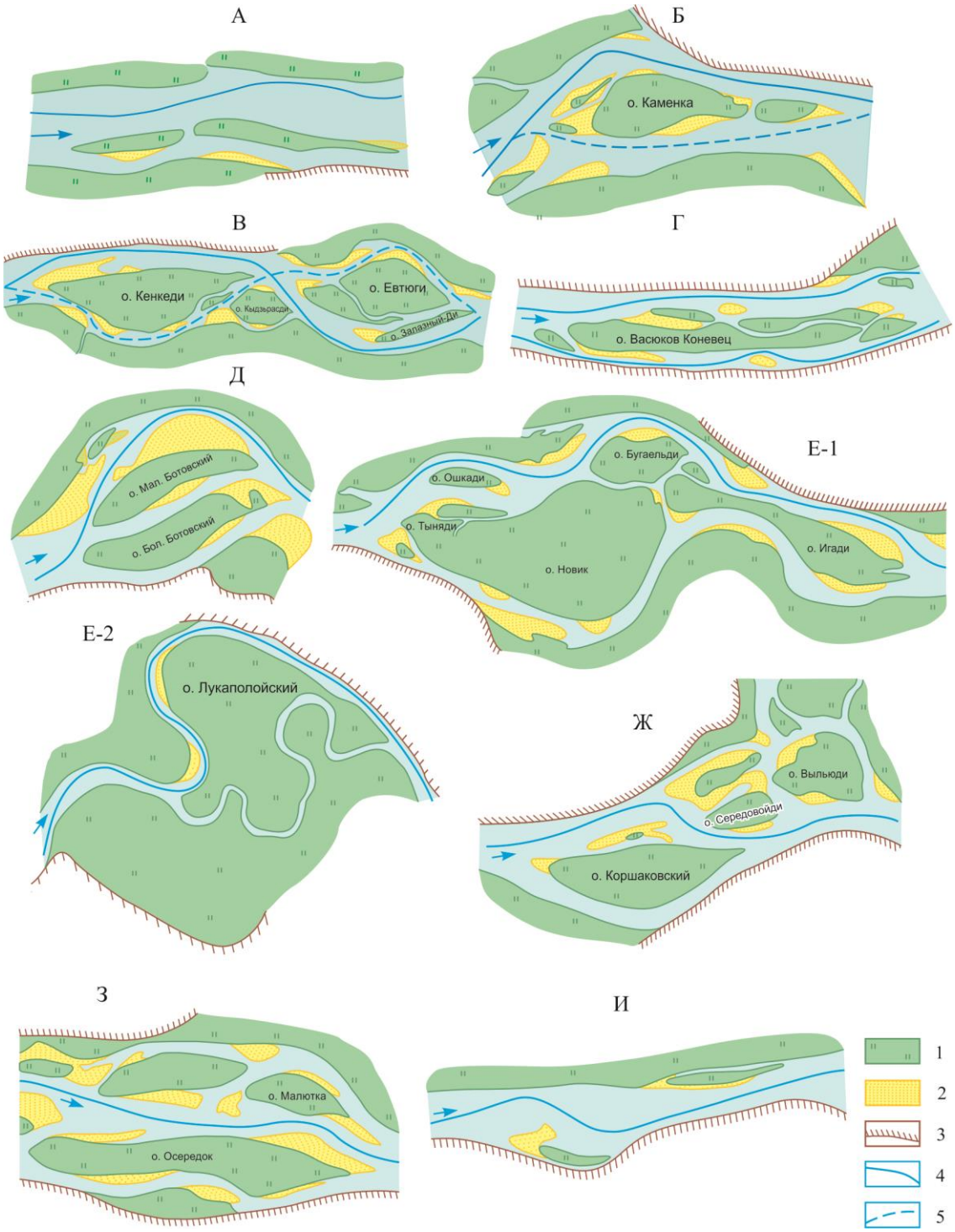


Рисунок 3.4 – Основные типы разветвленных русел на реках Севера ЕТР: А – односторонние (Печора); Б – одиночное (Печора); В – сопряженные (Печора); Г – параллельно-рукавные (Мезень); Д – разветвлено-извилистое (Северная Двина); Е-1 – пойменно-русловое в разветвленном русле (Печора); Е-2 – пойменно-русловое в меандрирующем русле (Вычегда); Ж – дельтовое (слияние Печоры с Ижмой); З – двустороннее (Северная Двина); И – прибрежные (Печора); 1 – пойма, 2 – песчаные отмели, 3 – коренной берег, 4, 5 – положения главного течения реки

Распространение разветвленных русел на реках Севера ЕТР неодинаково (табл. А.1 – А.4). На Северной Двине, Мезени и Печоре разветвленные русла занимают более 50% длины их нижнего течения, тогда как Вычегде, реке с

преимущественно меандрирующим руслом, – около 40%. На Северной Двине наибольшая доля принадлежит одиночным (14%), односторонним (12%) и параллельно-рукавным разветвлениям (11%). Вниз по течению со сменой условий развития русловых деформаций от свободных на участке слияние с Вычегдой – с. Ягрыш к их чередованию с ограниченными от с. Ягрыша до устья р. Ваги, а затем и полностью к ограниченным ниже устья р. Ваги, доля разветвлений снижается: с 16% до 7% – параллельно-рукавных разветвлений, с 15 до 6% – односторонних, с 20% до 14% – одиночных. Врезанное русло Мезени, более чем наполовину разветвленное, представлено преимущественно параллельно-рукавными разветвлениями (47% длины нижнего течения и 86% протяженности разветвленного русла на нижней Мезени). На Печоре распространены параллельно-рукавные (14%), сопряженные (13%) и пойменно-русловые разветвления (10%). Сопряженные разветвления занимают большую часть широкопойменного русла от г. Печоры до слияния с р. Усой (49 км, 45%) и встречаются ниже впадения р. Цильмы как в широкопойменном, так и адаптированном русле, занимая здесь 14% (40 км) протяженности нижнего участка. Этот тип разветвлений широко распространен только на Печоре, хотя встречается также на Северной Двине. Параллельно-рукавные разветвления на Печоре выше слияния с Усой не встречаются, но распространены как во врезанном, так и в широкопойменном русле ниже ее устья вплоть до устьевой области.

В нижнем течении Вычегды среди разветвлений распространены преимущественно одиночные и односторонние (около 25% длины участка), которые, в отличие от Печоры и Северной Двины, не образуют протяженных морфологически однородных участков.

На Вычегде пойменно-русловые разветвления встречаются в меандрирующем русле (рис. 3.4, Е-2). Они, как и на реках с преимущественно разветвленным руслом, формируются на перевалах реки от одного борта долины к другому; при этом главный рукав образует серию из 2-7 излучин и прямолинейного участка русла, проходящего вдоль коренного берега. Второй рукав, также меандрирующий, забирает в межень до 1/3, а иногда больше, общего расхода воды

[Русловые процессы…, 2012]. Такие разветвления формируются в результате спрямления излучин русла, а дальнейшие переформирования связаны с периодическим перераспределением расходов воды по рукавам и неодинаковым влиянием пойменных потоков в многоводные и маловодные половодья при несовпадении их направления с русловым потоком. Пойменно-русловые разветвления Печоры (рис. 3.4, Е-1) и Северной Двины образованы среди разветвлений других типов как в свободных, так и в ограниченных условиях развития русловых деформаций. Их формирование связано с эволюцией острова. На этих реках обычно рукава этих разветвлений образуют по одной крупной излучине (в главном и втором основном рукавах вершины излучин направлены в противоположные стороны, а сами излучины в плане имеют зеркальное отражение); по водности основные рукава этих разветвлений преимущественно равноценны, и практически не изменяют свою величину в разные фазы водного режима и в разные по водности годы.

Относительно прямолинейное неразветвленное русло занимает около 30% (табл. А.1 – А.4) протяженности рек и второе место по распространенности после разветвленного встречается на всех реках в равной мере. Оно представляет собой как короткие «вставки» внутри морфологически однородных участков русла между разветвлениями или излучинами, так и достаточно протяженные участки. В большинстве случаев относительно прямолинейное русло проходит вдоль коренного берега (рис. 3.5, Б, В, Г); протяженность таких участков составляет 5-10 км на Северной Двине, достигая на некоторых участках широкопойменного русла 20 км; на Мезени и Печоре между устьями Усы и Цильмы участки относительно прямолинейного русла вдоль коренного берега протягиваются на 10-20 км, до 30 км на Печоре ниже устья Цильмы; на нижней Вычегде их длина 5-15 км, достигая 30 км ниже устья Выми – от с. Рябово (88 км) до с. Новодворская Княжица (58 км). Во врезанном русле протяженность относительно прямолинейных участков варьирует в широких пределах от 4 до 40 км; наиболее протяженный, участок сформировался на Печоре выше с. Щельяюр (486 км), где река прорезает оконечность возвышенности – хребта Сосвинский Мусюр. При отсутствии

ведущего коренного берега протяженность участков относительно прямолинейного русла на всех реках в основном не превышает 5 км (рис. 3.5, А).

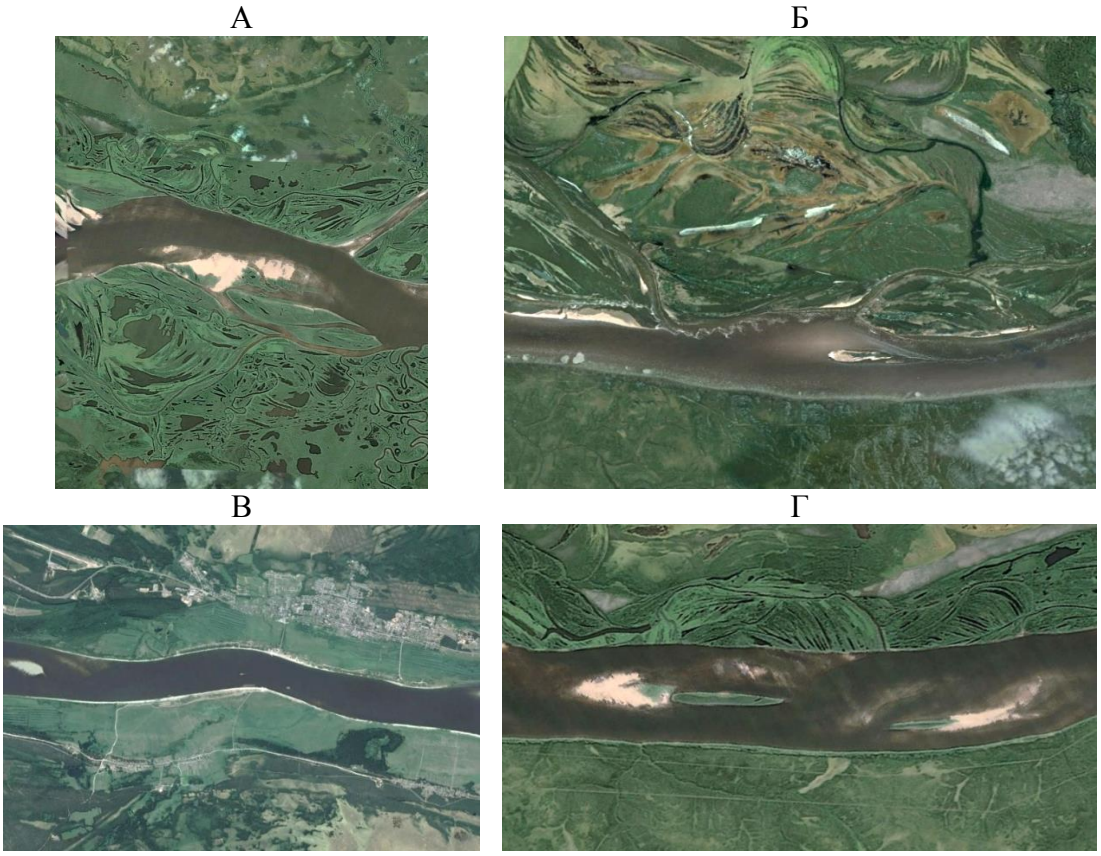


Рисунок 3.5 – Типы относительно прямолинейного русла на реках Севера ЕТР: А – в широкопойменном русле при отсутствии ведущего берега (Печора), Б – в широкопойменном или адаптированном русле вдоль ведущего берега (широкопойменное русло Печоры), В – врезанное (Северная Двина), Г – с разветвлениями 2-го порядка (Печора)

Излучины – наименее распространенный морфодинамический тип русла на Северной Двине, Мезени и Печоре в пределах рассматриваемых участков. Наиболее широко они распространены на Вычегде, занимая 30% протяженности реки (табл. А.2). Здесь они представлены свободными (рис. 3.6, А), преимущественно пологими излучинами, со степенью развитости не превышающей l/L=1,35-1,55, что связано со спрямлением их по достижении стадии развитых [Чалов и др., 2004], обусловленным большими величинами глубины и продолжительностью затопления поймы, слабой ее залесенностью и проходящим в этих условиях руслоформирующих расходов воды верхнего интервала [Русловые процессы…, 2012]. Наряду со свободными излучинами распространены вынужденные, имеющие бóльшие величины l/L > 1,75. На остальных реках региона

встречается несколько свободных (l/L = 1,2-1,3) и врезанных излучин (рис. 3.6, Г), единичные вынужденные (рис. 3.6, Б) и вписанные (рис. 3.6, В).

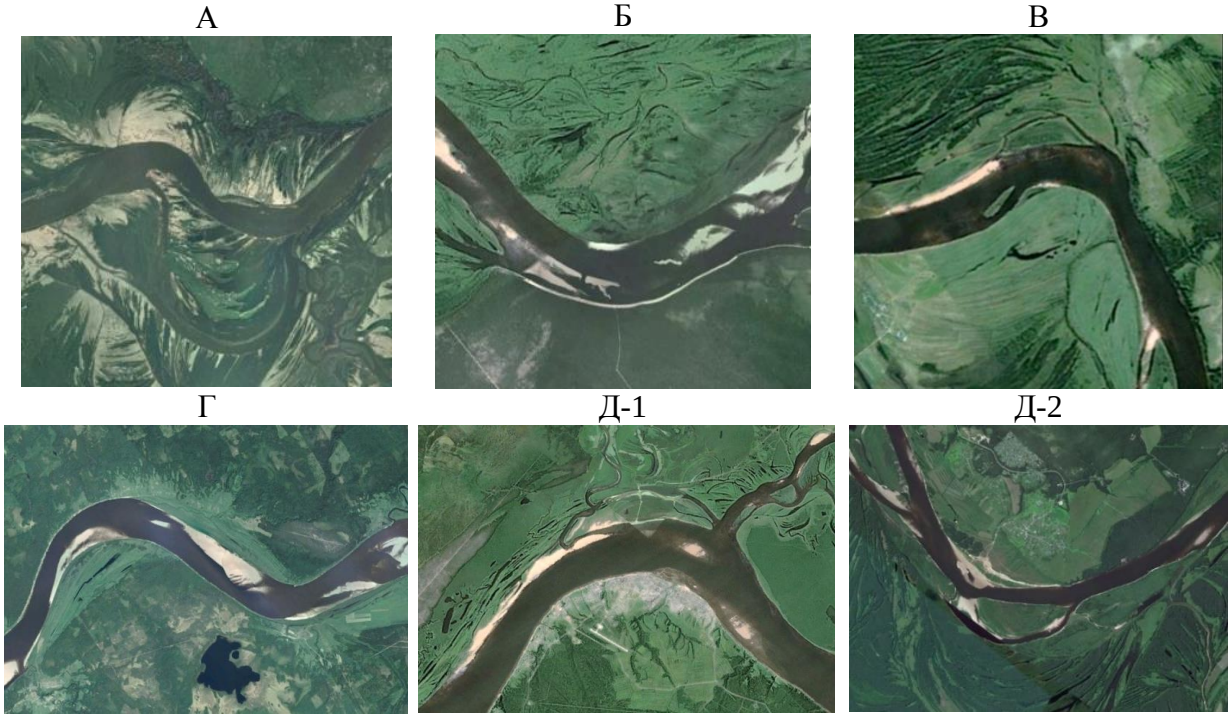


Рисунок 3.6 – Типы излучин на реках Севера ЕТР: А – свободные (Вычегда), Б – вписанная (Северная Двина), В – вынужденная (Вычегда), Г – врезанные (Северная Двина), Д – обтекающая (Печора); Д-2 – обтекающая (Вычегда)

На Печоре имеются своеобразные «обтекающие» излучины, не упоминающиеся в существующих классификациях и описаниях морфологии русел. Выпуклый берег («обтекаемый») в шпоре таких излучин коренной, вогнутый берег – пойменный. Серия из трех таких пологих излучин образована на 573-553 км Печоры, ещё одна более крутая (рис. 3.6, Д-1) сформировалась вследствие коленообразного поворота долины Печоры в районе впадения в нее рек Пижмы и Цильмы. В пределах этой излучины река «обтекает» выступ отрогов возвышенности – хребта Сосвинский Мусюр, образующих ее шпору. По противоположному вогнутому левому берегу развита пойма – в верхнем крыле узкая, шириной $B_п$ < 2-3$b_р$ (здесь заканчивается врезанный участок реки), в нижнем крыле широкая, представляющая собой сначала объединенную пойму притоков, переходящую затем в пойму Печоры. Радиус кривизны этой излучины r = 4 км (при ширине русла в вершине $b_р$ = 1,5 км). Очевидно, наличие коренного берега в шпоре излучин обусловливает возникновение особых гидравлических условий,

аналогичных формированию прямолинейных русел, проходящих вдоль коренных берегов [Чалов, Алабян и др., 1998], которые оказывают на структуру и динамику потока большее воздействие, чем перекосы водной поверхности на пологом изгибе русла такой большой реки, как Печора. Кроме того, на формирование излучины оказывает влияние впадение притоков (Пижмы, Цильмы); выносимые ими наносы отжимают реку к правому коренному берегу. Очевидно имеет значение и нарушение «правила Миловича», согласно которому при $r \leq 2{,}5\text{-}3b_р$ динамическая ось потока прижимается к выпуклому берегу излучины [Маккавеев, 1955; Чалов, 2011]. Такая же излучина имеется на Вычегде (рис. 3.6, Д-2).

В рукавах некоторых разветвлений, на участках относительно прямолинейного русла и на крыльях излучин формируются разветвления второго порядка (блок IV) (рис. 3.1) [Чалов, 2008], преимущественно одиночные.

В относительно прямолинейном русле Печоры и Мезени встречаются разветвления с очень узкими островами ($B_о$ = 200-300 м при $B_р$ = 2-2,5 км) вытянутыми вдоль реки на несколько километров (соотношение $B_о/L_о$ не более 0,1). Таковы острова Верх. и Ниж. Середовые на 671-647 км на Печоре (рис. 3.5, Г) и несколько других, безымянных, меньших размеров. На Мезени в 1930-е гг. существовал о. Великий ($B_о$ от 50 м в самой узкой части до 125-175 м при $L_о$ ~ 3 км), впоследствии размытый в своей средней части и разделившийся на два острова меньших размеров ($L_о$ ~ 700 и 900 м). Проверка параметров этих островов по критериям В.В. Иванова [1989] подтверждает, что эти разветвления являются формой русла второго порядка ($B_о < 0{,}4B_р$ и $B_о/L_о < 0{,}77 \div 0{,}80$), рукава их не образуют изгиба, циркуляционные течения, охватывающие все русло, в их пределах не наблюдается.

Для большинства широкопойменных участков Северной Двины и Печоры характерно развитие пойменных проток («полоев» на Северной Двине, «шаров» на Печоре), протягивающихся на много километров вдоль русла и образующих пойменную многорукавность, наличие которой создает расчлененность поймы на низменные массивы. Ее развитие обусловлено особенностями прохождения руслоформирующих расходов воды $Q_ф$ верхнего интервала при затопленной пойме

[Чалов, 2011]. На Северной Двине пойменная многорукавность распространена между устьями Вычегды и Ваги, протяженность пойменной многорукавности составляет 28% от длины участка [Русловые процессы…, 2012]. На Печоре ниже устья Цильмы русло за редким исключением сопровождается пойменными протоками; встречаются они и выше устья Цильмы. В целом протяженность пойменной многорукавности на Печоре составляет около 50% от длины русла.

Распространение морфодинамических типов русла на реках региона неравномерно и определяется рядом факторов, в числе которых водность реки, геолого-геоморфологические условия, сток наносов, устойчивость русла, условия прохождения руслоформирующих расходов воды и т.д. Учет факторов русловых процессов и степени их воздействия положен в основу выделения на реках Севера ЕТР участков с относительно однородными условиями формирования русел (рис. 3.2). Эти участки, названные морфологически однородными (по И.В. Попову [1965]), в основном соответствуют распространению ограниченных или свободных условий развития русловых деформаций, отличаются по составу руслообразующих наносов, распространению и преобладанию различных морфодинамических типов русла.

На Северной Двине выделяется три участка: 1 – от слияния с р. Вычегдой у г. Котласа (614 км) до с. Ягрыша (479 км); 2 – от с. Ягрыша до устья Ваги (314 км); 3 – от устья Ваги до вершины устьевой области (устье р. Пинеги, 94 км) (рис. 3.2; рис. Б.1).

В пределах 1-го морфологически однородного участка **от устья Вычегды до с. Ягрыша (614-479 км)** условия развития русловых деформаций – свободные, русло преимущественно широкопойменное. Пойма распространена повсеместно, ширина ее 4-6 км, местами до 15 км (у с. Черевково, 513 км) при ширине русла от 0,8 до 3 км (с учетом ширины островов); хорошо развита пойменная многорукавность. Долина реки на этом участке сложена древнеаллювиальными и древнедельтовыми песчаными отложениями, подстилаемыми трудноразмываемыми моренными суглинками [Сахарова, 1960]. Русло характеризуется слабой устойчивостью (Λ = 2,8-3,5) и высоким стоком влекомых

наносов (35% от общего стока наносов, по г.п. Абрамково [Чалов и др., 2000]), представленных преимущественно среднезернистыми и крупнозернистыми песками, часто с примесью гравия. Среди морфодинамических типов русла преобладают разветвленное – одиночные (20%), параллельно-рукавные (16%) и односторонние (15%) разветвлений (табл. А.1). В узле слияния с Вычегдой сформировалось разветвление дельтового типа. Около 30% занимает относительно прямолинейное русло, преимущественно расположенное вдоль ведущего коренного берега. На этом участке расположена единственная на Северной Двине свободная излучина (531-526 км) со степенью развитости l/L = 1,33, и следующая за ней вписанная излучина (Толоконная гора) с l/L = 1,32, активно размывающая вогнутый берег.

В конце участка сформировались Паячно-Ягрышское параллельно-рукавное разветвление со сложным русловым рельефом, представляющим собой в основном беспорядочное скопление гряд – перекатов-россыпей. Их формирование обусловлено сочетанием местных условий руслоформирования: снижением мощности потока половодья и его транспортирующей способности вследствие растекания его по широкой пойме, подпором от резкого сужения дна долины ниже по течению, способствующим аккумуляции наносов, которые поступают сюда в огромном количестве от расположенного выше по течению мощного источника наносов – Толоконной горы – 40-метрового песчаного уступа, пересечения направлений пойменного и руслового потоков во время половодья (левобережные потоки сменяются правобережными).

Участок 2-й **от с. Ягрыша до устья Ваги (479-314 км)** характеризуется частой сменой врезанного (46% протяженности участка), адаптированного (43%) и широкопойменного (11%) русла, что обусловлено чередованием трудно- и легкоразмываемых отложений: от легкоразмываемых песков до относительно устойчивых валунных суглинков. Для участков широкопойменного русла (ширина поймы здесь достигает 4,4 км) характерна наименьшая устойчивость (Λ = 4); врезанное русло, где русло прорезает моренные суглинки, а ширина долины не превышает 2-3 км, характеризуется большей устойчивостью, хотя и относится к

категории слабоустойчивого (от с. Ягрыша до с. Кодимы) [Русловые процессы…, 2012].

Разветвленные русла занимают 60% протяженности участка, среди них, как и выше по течению, преобладают параллельно-рукавные (19%) и односторонние (18%), но, в отличие от первого, встречающиеся не только в широкопойменном, но также в адаптированном и врезанном русле. Только здесь на Северной Двине имеются пойменно-русловые (393-386 км, у с. Кодима) и параллельно-рукавные разветвления во врезанном русле. Имеется двустороннее разветвление, в узле слияния с Вагой – разветвление дельтового типа. Относительно прямолинейное русло занимает около 30% протяженности участка; оно формируется в адаптированном русле преимущественно вдоль правого коренного берега. Меандрирующее русло представлено двумя врезанными излучинами, следующими друг за другом (451-437,5 км).

Ниже устья Ваги (314-94 км) – участок 3-й, долина сужается, преобладают ограниченные условия развития русловых деформаций, русло врезанное (80%), хотя иногда встречаются адаптированное и широкопойменное (10% и 11%). В начале участка ширина поймы наибольшая – 1-4 км. Вниз по течению пойма сужается. Между устьями Ваги и Емцы представляет собой островные массивы шириной 250-500 м, береговая пойма отсутствует. Ниже устья Емцы пойма представлена единичными островами или небольшими береговыми массивами (шириной 0,5-2 км). Устойчивость русла в пределах этого участка изменяется в широких пределах от слабоустойчивого вблизи устья Емцы (Λ=2,3) до относительно устойчивого (Λ=8,7) во врезанном русле.

Преимущественное распространение здесь получили врезанные излучины (36% протяженности участка) и относительно прямолинейное неразветвленное врезанное русло (25%). Среди разветвленных русел распространены в основном наиболее простые типы – одиночные (14%), односторонние (6%) во врезанном и адаптированном русле, встречаются представленные только на этом участке единичные чередующиеся односторонние и сопряженные разветвления; последние

– в широкопойменном русле в районе впадения р. Емцы. Там же имеется небольшой участок параллельно-рукавных разветвлений.

На Вычегде с учетом особенностей условий формирования русла выделяются два морфологически однородных участка (рис. 3.2; рис. Б.2): 1 – от слияния с р. Сысолой (418 км) до устья р. Выми (296 км); 2 – от устья Выми до устья.

В пределах всего нижнего течения реки от р. Сысолы до устья русло Вычегды широкопойменное или адаптированное. Выше устья Выми ширина дна долины около 3,5 км при ширине русла около 300 м, ниже по течению долина несколько сужается до 2,5-3 км, ширина русла увеличивается до 500-600 м, русло сопровождается пойменными протоками, образующими пойменную многорукавность. При этом доля широкопойменного русла снижается от верхнего к нижнему участку с 80% до 51%. Вниз по течению уменьшается устойчивость русла Вычегды. Средние значения числа Лохтина снижаются с 6-8 (относительно устойчивое русло [Чалов, 1983]) на участке от устья Сысолы до устья Выми, до 3 (слабоустойчивое) в низовьях. Увеличение вниз по течению водности и снижение устойчивости русла способствует постепенному увеличению числа разветвлений (с 30% до 48%) (табл. А.2). Протяженность меандрирующего русла Вычегды при этом снижается с 45% на верхнем участке до 19% в нижнем течении. Увеличивается доля относительно прямолинейного русла с 25% до 33%, при этом на нижнем участке возрастает доля разветвлений второго порядка.

Разветвленное русло на участке 1-м **между устьями Сысолы и Выми (418-296 км)** представлено только пойменно-русловыми разветвлениями в меандрирующем русле – у г. Сыктывкара (420-413 км); разветвлением, образованным в результате спрямления Белоборской излучины (410-394 км) и на 325-315 км, образованное о. Лукаполойским.

На участке 2-м **от устья Выми до устья (296-0 км)** разветвления представлены пойменно-русловыми разветвлениями (о. Харлов, о. Шономский) (8%), широко распространены одиночные (15%) и односторонние (20%) разветвления в широкопойменном и адаптированном русле, разветвленно-извилистое русло (5%), которые не встречаются на верхнем участке. Также только

на нижнем участке формируются вынужденные излучины преимущественно в адаптированном русле и одна в широкопойменном ниже с. Оквад (288-284 км).

Русло нижней Мезени представляет собой единый морфологически однородный участок – **от устья р. Вашки (162 км) до устья р. Пёзы (48,5 км)** (рис. 3.2; рис. Б.3). Долина реки сложена трудноразмываемыми отложениями, что обусловливает ограниченные условия развития русловых деформаций: врезанное русло чередуется с адаптированным, на долю каждого из них приходится 50% протяженности реки. С обоих сторон реки к руслу или узкой пойме обрываются крутые уступы коренных берегов высотой от 10 до 40 м [Чалов и др., 2010]. Пойма либо отсутствует, либо ширина ее не превышает ширины русла (1,3-2,1 км включая ширину островов). Врезанное русло полностью соответствует параллельно-рукавным разветвлениям, получившим здесь наибольшее распространение не только среди разветвлений (87%), но и среди морфодинамических типов русла (47%); разветвленное русло представлено также односторонними разветвлениями (табл. Б.3). Второе место по протяженности занимает относительно прямолинейное адаптированное русло (29%), проходящее вдоль коренного берега, в нем встречаются небольшие острова, образующие разветвления второго порядка. Имеются врезанная – у с. Малонисогора (145 км) и вынужденная – у с. Целегора (92 км) излучины. На участках параллельно-рукавного русла основной расход воды переваливает от одного коренного берега к другому 16 раз, вследствие чего преимущественно развиты то левые, то правые рукава. Перевалы потока приурочены к изгибам коренных берегов, образующих выступы, которые оказывают направляющее воздействие на поток, либо к излучинам. Длина перевалов составляет до 2-4 км в параллельно-рукавных разветвлениях. В их пределах при отсутствии ведущих берегов поток теряет устойчивость, образуется извилистость динамической оси потока, формируются гряды и небольшие острова посередине реки. Именно к перевалам на Мезени приурочены наиболее сложные перекатные участки. Участки относительно прямолинейного русла относительно устойчивые (Λ = 5-5,6), в параллельно-рукавных разветвлениях устойчивость русла снижается (Λ = 2,9-3,6).

Русло *нижней Печоры* по его соотношению с коренными берегами, изменению состава руслообразующих наносов (по [Завадский, Львовская и др., 2015] от верхнего к нижнему участку последовательно уменьшается доля гальки и гравия в составе руслообразующих наносов за счет увеличения доли крупнозернистого песка при постоянстве доли среднекрупнозернистого и среднезернистого песка) и распространению морфодинамических типов русла разделяется на три морфологически однородных участка: 1 – от впадения р. Кожвы и Кожвинского порога до слияния с р. Усой (864-757 км) – верхний; 2 – от слияния с р. Усой до впадения р. Цильмы (757-423 км) – средний; 3 – от впадения р. Цильмы до вершины устьевой области (устье р. Сулы, 195 км) – нижний (рис. 3.2; табл. Б.4).

На верхнем 1-м участке (**Кожвинский порог – устье Усы**) русло широкопойменное, сложенное песчаными отложениями, преимущественно разветвленное, представленное в основном сопряженными разветвлениями (45% длины участка), состоящими из 5 звеньев (островов). Среди остальных типов русла наибольшую протяженность имеет относительно прямолинейное, неразветвленное (26%); 10% приходится на извилистое (табл. Б.4). Только здесь на Печоре имеется серия свободных излучин и относительно прямолинейное русло с разветвлениями 2-го порядка в пойменных берегах. При слиянии с р. Лыжей в раструбообразном расширении русла сформировано разветвление дельтового типа, которое встречается на Печоре ещё один раз на среднем участке (при впадении Ижмы). Пойма преимущественно правобережная и островная шириной от 3 до 10 км. В нижнем звене сопряженных разветвлений русло огибает выступ левого коренного берега, а затем несколько отходит от него вплоть до устья Лыжи. На этом отрезке пойма двусторонняя, но после впадения Лыжи становится правобережной вплоть до пойменно-руслового разветвления перед слиянием с Усой. Долина Печоры в этом месте расширяется, ширина береговой поймы составляет более 10 км, островной, представленной крупным о. Кыдзьрасди, – около 5 км. Русло на участке характеризуется наименьшей устойчивостью: $\Lambda = 4$ (слабоустойчивое).

На среднем 2-м участке – **устье Усы – устье Цильмы**, который начинается от слияния с самым крупным притоком – р. Усой (среднегодовой расход воды 1310

м^3/с), Печора практически удваивает свою водность. Долина реки расширяется, в ее строении выделяется хорошо развитая песчаная терраса (высотой 15-25 м) и широкая пойма (2,5-8 м). Однако на 130-километровом участке в 70 км выше устья р. Ижмы и вплоть до коленообразного поворота долины реки у устья р. Цильмы русло врезанное располагается вдоль правого коренного берега высотой до 50-60 м, пойма или отсутствует, либо по ширине не превосходит ширину русла. Русло песчаное, преимущественно разветвленное; ширина рукавов до 300-500 м и длиной до 10 км. За редким исключением, правый берег реки высокий, коренной. Ширина русла колеблется от 650 до 2000 м.

Среди морфодинамических типов русел получили распространение пойменно-русловые (12%) и параллельно-рукавные разветвления (13%), имеются одиночные разветвления, разветвленно-извилистое русло; относительно прямолинейное русло преимущественно проходит вдоль коренного берега. Именно здесь, на среднем участке, в относительно прямолинейном русле встречаются очень узкие острова (Верх., Ниж. Середовые, Домашний). На этом участке расположено второе на реке разветвление дельтового типа (при впадении Ижмы). При слиянии с Усой узел слияния – бездельтовый, с Пижмой и Цильмой – дельтовые разветвления сформированы в устьях притоков. Русло здесь относительно устойчивое и устойчивое (Λ = 10÷13, вниз по течению возрастает до 16-20).

Ниже устья р. Цильмы – 3-й участок – преобладает двусторонняя пойма шириной 4-6 км, вместе с островной поймой ее ширина до 8 км. Лишь местами к реке подходят уступы надпойменных террас, особенно перед ее устьевой областью. Среди морфодинамических типов русла преимущественное распространение получили сопряженные (17%), параллельно-рукавные разветвления (16%) и одиночные (13%) разветвления. Велика доля прямолинейного русла (38%), большая часть которого проходит вдоль коренных берегов. Русло устойчивое (Λ = 10-20), но с общей тенденцией снижения вниз по течению: Λ = 20 в его начале, Λ = 10-13 выше дельтовой области (нижние 100 км) [Завадский, Львовская и др., 2015].

Таким образом, наибольшим разнообразием морфодинамических типов русла характеризуются Северная Двина и Вычегда как единая речная система и Печора, где русло представлено всеми известными типами, характерными для равнинных рек от излучин и простых форм разветвлений до относительно прямолинейного русла с разветвлениями второго порядка и сложных форм разветвлений. Русло нижней Мезени, наоборот, отличается морфодинамическим однообразием.

3.2 Гидролого-морфологический анализ речных русел

3.2.1 Общие положения методы построения зависимостей

Образуя единую систему, речной поток и русло находятся в постоянном взаимодействии, в процессе которого устанавливаются определенные соотношения между характеристиками потока и параметрами русла. Изучение взаимосвязей между ними представляет собой гидролого-морфологический анализ. Основными элементами анализа являются: 1) построение *QI*-диаграмм; 2) установление зависимостей между морфологическими характеристиками потока и русла, с одной стороны, и показателями факторов русловых процессов – стоком воды и наносов, с другой [Чалов, 2008; Чалов, Алабян и др., 1998].

Общие закономерности и различия в распространении конкретных морфодинамических типов русел в зависимости от природных условиях отражает анализ ***QI*-диаграмм**, по осям которых отложены уклоны дна долины (I, ‰) и характерные расходы воды (Q, м^3/с). Впервые метод *QI*-диаграмм был предложен Л. Леопольдом и М. Вольманом [Leopold, Wolman, 1957]. Они получили линию раздела точек, соответствующих меандрирующим и разветвленным руслам. За характерный расход воды был принят расход в бровках поймы, соответствующий $Q_ф$ среднего интервала, и уклон русла I. В.В. Ромашин [1968] получил на *QI*-диаграмме для широкопойменных русел СССР области развития меандрирующих, разветвленных и относительно прямолинейных, неразветвленных русел. Имеется переходная область, в которую попали русла с прорванными излучинами, встречаются разветвленные русла (при этом типы русел были названы терминами,

принятыми в типизации русловых процессов ГГИ [Попов, 1965]). Область в правой верхней части диаграммы охватывает разветвленные русла и пойменную многорукавность, что подтверждает определяющую роль в их формировании $Q_ф$ верхнего интервала, проходящего при затопленной пойме. Близкие результаты по данным о руслах рек СССР были получены В.И. Антроповским [1969], но в отличие от диаграммы В.В. Ромашина, точки, соответствующие относительно прямолинейным руслам, расположились вдоль более пологой линии, чем линии раздела разветвленных и извилистых русел. В.И. Антроповский связал это с возможной неточностью в определении типов русла и уклонов, поскольку им были использованы данные Р.А. Нежиховского [1966] и схематические мелкомасштабные карты С.И. Пиньковского [1961, 1967; Кондратьев, Ляпин и др., 1959]. В поле *QI*-диаграммы точки располагаются группами таким образом, что каждая группа соответствует участкам рек с определенным типом русла. Группы точек разделяются граничными линиями, коэффициенты уравнений для которых различаются и зависят от конкретных природных условий в бассейнах рек и гидрологического режима.

Физический смысл *QI*-диаграмм по А.М. Алабяну [1992; Чалов, Алабян и др., 1998] заключается в том, что произведение *QI* является основным элементом в выражении мощности потока. Чем больше это произведение, тем больше мощность потока, ему соответствующая, а положение точек в поле диаграммы располагаются выше или правее в зависимости от того, что определяет мощность потока: уклоны при малой водности или высокая водность при малых уклонах. При наибольшей мощности потока формируются разветвленные русла. Напротив, малая мощность потока определяет развитие извилистых русел. В области распространения точек, соответствующих разветвленным руслам, большей мощности потока (правая и верхняя часть *QI*-диаграммы) соответствуют наиболее сложные разветвления; в области меандрирующих русел правее и выше расположены прорванные излучины. Относительно прямолинейные русла занимают промежуточное положение. Между извилистыми и разветвленными руслами на *QI*-диаграмме

часто имеется широкая переходная область, существование которой объясняется многообразием условий формирования русел.

Разными исследователями в качестве характерного расхода воды Q принимались расход в бровках поймы, среднее многолетнее значение расхода воды и т.п. Наиболее физически обоснованным является использование руслоформирующего расхода воды $Q_ф$ (в понимании Н.И. Маккавеева [1955]). Однако применение $Q_ф$ имеет существенный недостаток: он рассчитывается для створов гидрологических постов и не учитывает особенностей долины и русла на смежных участках выше и ниже по течению, иногда существенно иных из-за требований к организации гидропостов. В связи с этим расход $Q_ф$ обычно заменяется эквивалентным, близким к нему средним максимальным расходом воды $Q_{ср.макс.}$ или расходом 30-дневной повторяемости Q_{30} [Чалов и др., 2004].

В настоящее время метод *QI*-диаграмм используется для выявления условий формирования русел разных типов на больших реках, их бассейнов и регионов. Получены *QI*-диаграммы для рек Алтая [Смирнова, 2002], бассейнов Северной Двины [Резников, Чалов, 2005], Амура [Борщенко, Чалов, 2011], Оки [Баровский, 2007, 2008] и др., различающиеся коэффициентами в уравнениях, описывающих линии раздела областей, которым отвечают разные морфодинамические типы русла. Обобщение данных исследований позволяет говорить о региональном характере *QI*-диаграмм [Львовская, Чалов, 2013].

Связи параметров русел с характеристиками, отражающими их условия формирования, принято относить к **гидролого-морфологическим зависимостям**. Как в отечественной, так и зарубежной литературе [Антроповский, 1969; Завадский и др., 1997; Завадский, Чалов, 1996; Кондратьев, 1968; Маккавеев, 1955; Матвеев, 1985а,б; Попов, 1965; Розовский, 1957; Ромашин, 1968; Сидорчук, 1992; Callender, 1978; Carlston, 1965; Carson, 1984; Schumm, 1967, Hickin, 1977; Milne, 1983 и др.], они в основном применяются для характеристики меандрирующих русел: радиус кривизны r, шаг L и другие параметры излучин имеют устойчивые связи с показателями водности реки, более устойчивые для широкопойменных, менее – для врезанных русел [Чалов и др., 1998].

Разветвленные русла в этом отношении освещены очень слабо из-за их морфологической сложности и разнообразия, рассредоточения стока воды по рукавам, его изменчивости во времени и неоднозначности влияния на условия транспорта наносов [Алексеевский, Чалов, 2009]. Соответственно, для них гидролого-морфологические зависимости разработаны в гораздо меньшей степени. При этом для характеристики разветвлений не существует общепринятых параметров. Гидролого-морфологические зависимости для разветвленных русел, как правило, представляют собой выражения, связывающие морфометрические параметры рукавов или островов с гидравлическими характеристиками потока [Михайлов, 1971; Чалов, Алабян и др., 1998]. Разработанные Р.С. Чаловым гидролого-морфологические зависимости для разветвленных русел обобщены в монографии [2011]. Результаты анализа критериев подобия ($K_{рук}$ – число рукавов, $K_у$ – число узлов, $n_о$ – число островов в разветвлении, их отношение к шагу разветвления: $n_о/L_{разв}$, $K_{рук}/L_{разв}$, ΔN_1 и ΔN_2 – критериев подобия [Алексеевский, Чалов, 2004]) параметров разветвлений и их связей с условиями формирования позволили обосновать объективность выделения разновидностей разветвленных русел. Показано, что характеристики разветвлений зависят от размера реки, типа русловых процессов и состава руслообразующих наносов, геоморфологических условий и условий их формирования [Чалов, 2011].

Для разветвленного русла р. Лены обнаружено, что значения коэффициента k и свободного члена Y в уравнении связи

$$\frac{B_о}{b_р} = -kq + Y, \qquad (3.1)$$

где $B_о/b_р$ – относительная ширина островов, q – удельный среднемаксимальный расход воды, закономерно возрастают по мере усложнения разветвления (сопряженные – параллельно-рукавные – односторонние чередующиеся – сложные сопряженные), подтверждая положение о том, что увеличение ширины русла и, соответственно, снижение удельного расхода воды приводит к увеличению разветвленности русла [Чалов, 2011]. Отмечено, что подобные зависимости для других рек отличаются значениями k и Y, имеющими региональных характер.

Подтверждением достоверности выделения морфодинамических типов разветвлений явились результаты примененного С.Р. Чаловым [Чалов, Федоровский, 2009] дискриминантного анализа ряда параметров разветвлений рек бассейна Северной Двины: N – порядка реки, $K_{рук}$, $L_{разв}$, ΔN_1 и ΔN_2. На полученной диаграмме рассеяния двух канонических корней выделились области, соответствующие разным типам разветвлений [Чалов, 2011]: точки, соответствующие пойменно-русловым разветвлениям, расположились обособленно относительно одиночных, односторонних и сопряженных разветвлений; слабее различия проявляются между одиночными и односторонними разветвлениями с одной стороны, и пойменно-русловыми и параллельно-рукавными, с другой.

Различаются и морфометрические параметры островов, образующих разветвления разного типа. Форма острова, определяет дальнейшее развитие разветвления. В отличие от осередков, которые представляют собой часть гряды, смещающейся в многоводную фазу режима, острова, будучи покрытыми растительностью, имеют бóльшую высоту, характеризуются на порядок бóльшей шероховатостью и, соответственно, обеспечивают разделение потока даже во время высокого половодья на ветви течения [Чалов, 2011]. Кроме того, сами острова представляют собой препятствие для движения потока, вызывая подпор возле их оголовка. Гидравлически выгодной формой острова, обеспечивающей наименьшие сопротивления потоку, считается каплевидная, при которой отношение длины острова к его ширине L_o/B_o = 3-4 [Baker, 1977; Komar, 1983]. Она достигается и сохраняется в том случае, если разветвление симметрично, а остров сложен однородными отложениями, одинаково реагирующими на размывающее воздействие потока. В противном случае асимметрия разветвления, вызванная неоднородностью строения острова или направляющим воздействием берегов, может приводить к изменению формы острова [Чалов, 1979]. При бóльших значениях ($L_o/B_o > 3\div4$) острова приобретают удлиненную форму за счет роста кос в ухвостьях и у оголовка, при меньших значениях ($L_o/B_o < 3\div4$) – острова увеличиваются в ширину, часто приобретая сложную конфигурацию в плане

(пойменно-русловые разветвления). Связи между L_o и B_o сопряженных и одиночных разветвлений р. Оби были обнаружены А.М. Тарбеевой [2004]. Другой подход к анализу морфометрических параметров островов разветвлений разных типов применил А.Ю. Сидорчук [2005], выделив для р. Волги разветвления разного ранга. Переход от разветвлений одного ранга к другому: острова – крупные острова – островные массивы (одиночные и сопряженные, пойменно-русловые и раздвоенное русло, по классификации Р.С. Чалова [2008]), происходит при увеличении длины разветвления на порядок величины высоты от отметки дна плесовой лощины до поверхности острова. Соответствующие параметры различаются для разных рек, поскольку морфометрические параметры островов зависят от размера реки.

К гидролого-морфологическим зависимостям для разветвленных русел относят также анализ извилистости главного течения реки. Такой анализ был выполнен для средней Лены (выше устья Алдана) и средней Оби (Новосибирск – устье Томи) [Чалов, 2011]. Он показал закономерное перемещение главного течения реки между островами от одного берега к другому в зависимости от типа разветвления. Для извилин главного течения реки Лены изменение радиусов их кривизны описывается зависимостью:

$$\frac{r_1 - r_i}{\sum L} = const, \qquad (3.2)$$

где r_1 и r_i – соответственно радиусы кривизны верхней и нижней излучин главных рукавов в серии, ΣL – суммарная длина шагов излучин этой серии. При этом величины r_1 и r_i определяются устойчивостью русла и имеют, в отличие от меандрирующих русел [Экспериментальная геоморфология, 1969], прямую зависимость от коэффициента стабильности Н.И. Маккавеева: $r = K_c^2 + A$.

Для построения гидролого-морфологических зависимостей, отражающих связь параметров разветвленных русел с показателями, характеризующими условия их формирования, в данной работе были определены ширина (B_o), длина (L_o) островов, ширина ($b_{рук}$) и длина ($l_{рук}$) рукавов при уровнях, соответствующих руслоформирующему расходу воды, радиус кривизны (r) и шаг (L) излучин в

рукавах (рис. 3.7). Если рукав в разветвлении образует одну излучину, огибающую остров (как правило, в одиночных и сопряженных разветвлениях), радиус ее кривизны соответствует радиусу кривизны рукава ($r=r_{рук}$), а шаг излучин обоих рукавов равен и совпадает с шагом разветвления ($L=L_{разв}$). Если рукав образует серию излучин (2-3 излучины), что характерно для пойменно-русловых разветвлений, то величины их параметров меньше параметров самого разветвления и его рукавов ($r<r_{рук}$, $L<L_{разв}$). Были рассчитаны также некоторые безразмерные параметры: относительная ширина острова (ее отношение к ширине русла перед узлом разветвления $B_о/b_р$), отношение ширины рукава при руслоформирующем расходе воды к его средней глубине ($b_{рук}/h$) [Львовская, 2015; Львовская, в печати].

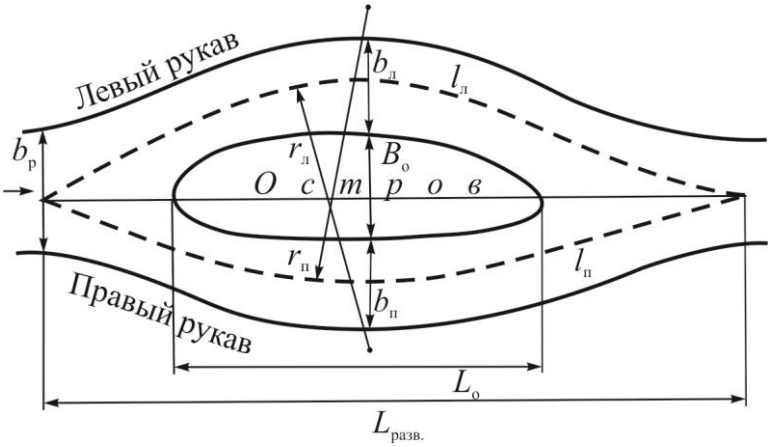


Рисунок 3.7 – Параметры островов и рукавов разветвлений [Чалов, 2011]

Параметры рукавов разветвлений измерялись для основных рукавов, определяющих морфодинамический тип русла, между которыми происходит периодическое (сезонное или многолетнее) перераспределение расхода воды в реке, связанное с переформированиями разветвлений [Чалов, 2011]. В большинстве разветвлений (кроме односторонних) выделяются два, реже три основных рукава, близких по водности; остальные рукава являются второстепенными. Среди основных рукавов выделяются один главный – наиболее многоводный в настоящее время (на судоходных реках в нем, как правило, прокладывается фарватер); второй основной рукав может забирать бóльшую часть расхода воды (более 50%) в периоды повышенной водности, в межень являясь относительно маловодным; со временем в ходе многолетних русловых переформирований роль рукавов меняется.

На больших реках с очень сложными разветвлениями относительная водность главного рукава (в разные фазы водного режима) может составлять <50% стока воды в реке, снижаясь иногда до 20–25%; остальная часть стока рассредоточивается по многочисленным рукавам с относительной водностью от нескольких процентов до 15–20%, изменяясь в разные фазы водного режима в ту и другую сторону [Чалов, 2011]. В односторонних разветвлениях и разветвленно-извилистом русле всегда имеется только один основной рукав – главный, остальные рукава – второстепенные.

При построении гидролого-морфологических зависимостей водность реки принято представлять характерными расходами воды, в той или иной степени определяющими условия руслоформирования: среднегодовыми ($Q_{ср}$), среднемаксимальными ($Q_{ср.макс}$), расходами воды 30-дневной продолжительности (Q_{30}), руслоформирующими ($Q_{ф}$). Для построения зависимостей параметров разветвлений русел (в частности параметром островов) от водности реки в узле разветвления в качестве характерных расходов воды приняты среднемаксимальные ($Q_{ср.макс}$), близкие по величине к руслоформирующим расходам воды верхнего интервала ($Q_{ф}$). Использование $Q_{ср.макс}$ в данном случае целесообразно, поскольку в отличие от $Q_{ф}$, отражающего условия формирования русла в створе гидрологического поста (крупность донных отложений, высоту поймы и др.), они могут быть экстраполированы на относительно бесприточные участки рек по связи $Q=f(F)$, где F – площадь водосбора для каждого узла разветвления.

Для получения зависимостей параметров русел рукавов от их водности расходы воды в них приводились к условиям прохождения руслоформирующих расходов воды ($Q_{ф_{рук}}$). Проведение такого расчета возможно в том случае, если имеются лоцманские карты для данного участка реки, на которых для обоих рукавов указаны их глубины, высоты прирусловых отмелей и поймы. По связи $Q=f(H)$ для опорных гидрологических постов определялся уровень, соответствующий руслоформирующему расходу воды верхнего интервала $Q_{ф_{верх}}$. Это позволяет определять при уровнях $Q_{ф}$ глубину ($h_{рук_{ф}}$) рукавов. Согласно

методике Н.И. Маккавеева [Проектирование…, 1964], соотношение расходов воды в каждом разветвлении рассчитывалось по формуле:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{b_{\text{рук}_\text{л}} h_{\text{рук}_\text{л}} \sqrt{l_{\text{рук}_\text{л}}}}{b_{\text{рук}_\text{п}} h_{\text{рук}_\text{п}} \sqrt{l_{\text{рук}_\text{п}}}}, \quad (3.3)$$

где $b_{\text{рук}}$ – ширина, $l_{\text{рук}}$ – длина, $h_{\text{рук}}$ – глубина рукава при данном расходе воды. При этом допускалось равенство шероховатости в смежных рукавах (C_1=C_2) и учитывалось равенство величин падения водной поверхности в рукавах одного разветвления (Δz_1=Δz_2). Для смежных рукавов в качестве суммарного принимался расход воды, соответствующий уровню выхода воды на пойму по опорному гидрологическому посту для данного участка реки, который распределялся по рукавам каждого разветвления согласно расчету по соотношению (3.3).

3.2.1 *QI*-диаграммы и их совместный анализ с $Q_ф$

Исходная информация для построения ***QI*-диаграммы** для рек Севера ЕТР представлена в таблице 3.2. Морфодинамический тип русла для каждого гидрологического поста указан преобладающий на участке реки, для характеристики которого этот пост является опорным.

От верховьев к устьям рек мощность потока увеличивается, что отражается в смене морфодинамических типов вниз по течению. В верховьях рек Мезени и Вычегды, где водность реки и мощность потока небольшие, распространены сегментные на разных стадиях развития и петлеобразные излучины широкопойменного русла, сегментные пологие и развитые адаптированного русла; на Печоре преобладают врезанные излучины. В среднем и нижнем течении рек, характеризующихся небольшими уклонами (до 0,10‰), но значительными величинами расходов воды, увеличивается доля прорванных излучин и разветвленно-извилистого русла (Вычегда) или преобладают разветвленные русла (Северная Двина, Мезень, Печора) как в широкопойменном, так и врезанном русле. При этом с увеличением водности вниз по течению, а, следовательно, и мощности потока, простые морфодинамические разновидности русел сменяются более сложными.

Таблица 3.2 – Исходная информация для построения *QI*-диаграммы для рек Севера ЕТР

№	Река	Пост	Расстояние от устья, км	Тип русла		*I*, ‰	$Q_{ср.макс.}$, м^3/с
				Морфодинамический	Геолого-геоморфологический		
1	Северная Двина	Абрамково	472	Параллельно-рукавные разветвления	Широкопойменное	0,10	11848
2		Звоз	233	Одиночные и односторонние разветвления	Врезанное	0,07	15699
3		Усть-Пинега	94	Пойменно-русловые разветвления	Врезанное	0,02	21341
4	Вычегда	Помоздино	925	Петлеобразные и сегментные развитые излучины	Широкопойменное	0,19	462
5		Усть-Нем	781	Сегментные пологие и прорванные излучины	Широкопойменное	0,15	1220
6		Мал. Кужба	657	Сегментные пологие и прорванные излучины	Широкопойменное	0,09	1929
7		Сыктывкар	414	Сегментные пологие и прорванные излучины	Широкопойменное	0,07	4718
8		Мал. Слуда	363	Сегментные пологие и прорванные излучины	Адаптированное	0,08	4533
9		Федяково	73	Относительно прямолинейное русло	Адаптированное	0,09	6829
10	Мезень	Макариб	681	Петлеобразные и сегментные развитые излучины	Адаптированное	0,17	973
11		Бол. Пысса	455	Петлеобразные и сегментные развитые излучины	Широкопойменное	0,17	1803
12		Малонисогорская	147	Параллельно-рукавные разветвления	Врезанное	0,15	5913
13	Печора	Якша	1506	Врезанные излучины	Врезанное	0,19	1520
14		Троицко-Печорск	1359	Относительно прямолинейное русло	Широкопойменное	0,10	4589
15		Усть-Щугор	1036	Врезанные излучины	Врезанное	0,05	9552
16		Усть-Цильма	425	Параллельно-рукавные разветвления	Широкопойменное	0,06	23406
17		Оксино	141	Одиночные разветвления	Широкопойменное	0,03	26058

Так, в среднем течении одиночные разветвления чередуются с сопряженными (Печора) и односторонними (Северная Двина), а в нижнем течении, где при небольших уклонах мощность потока максимальна, в широкопойменном русле образуются пойменно-русловые разветвления (Северная Двина, Печора), насчитывающие не менее 3-4 островов, разделенных длинными рукавами, или параллельно-рукавные разветвления во врезанном русле (Мезень, Северная Двина).

Относительно прямолинейное русло формируется в переходных условиях, когда мощность потока велика, но ещё недостаточна для формирования разветвлений. Однако развитие прямолинейных русел обусловливается также рядом внешних условий, в известной мере вуалирующих влияния водности и мощности потока. Во врезанном русле или при наличии коренных берегов, сложенных трудноразмываемыми породами, последние ограничивают горизонтальные деформации русла. Малый сток руслообразующих наносов и высокая устойчивость врезанного прямолинейного русла определяют преимущественно плёсовый его характер, формирующиеся в нем гряды либо относятся к категории дефицитных [Дебольский, Катков, 1977], либо их размеры невелики, что даже в период межени они остаются полностью под водой, и, таким образом, не создают условий для искривления потока или разделения его динамической оси на ветви. Таковы условия развития русла в верхнем течении Печоры в районе г.п. Троицко-Печорска. Напротив, малая устойчивость русла и повышенный сток наносов нижней Вычегды, несмотря на образование большого количества очень динамичных гряд, не успевающих закрепляться растительностью, также обусловливают развитие прямолинейного русла: здесь формируются в адаптированном русле простые формы разветвлений (одиночные, односторонние).

Общие закономерности распространения основных типов русла на реках нарушаются местными условиями формирования русла – особенностями геолого-геоморфологического строения территории, устойчивостью русла, условиями поступления наносов, изменением транспортирующей способности потока и др.

Расположение точек, соответствующих различным типам русла, в поле *QI*-диаграммы для рек Севера ЕТР (рис. 3.8) отвечает общепринятым закономерностям: наименьшие мощности потока соответствуют меандрирующим руслам (минимум произведения *QI*), тогда как наибольшая мощность потока соответствует разветвленным руслам, причем более сложные типы разветвлений располагаются на диаграмме в правой верхней области максимальных мощностей потока. Точки, соответствующие участкам относительно прямолинейного неразветвленного русла, не образуют отдельной области на диаграмме, занимая переходную область между извилистыми и разветвленными руслами. Похожие результаты были получены Н.А. Баровским [2007] для рек бассейна верхней Волги, отметившего, со ссылкой на Н.И. Маккавеева [Проектирование…, 1964], единство условий формирования меандрирующих и относительно прямолинейных русел, и бóльшую необходимую мощность для формирования последних. Действительно, так же, как и для рек бассейна верхней Волги, точки относительно прямолинейного русла тяготеют к верхней границе их распространения на *QI*-диаграмме для рек Севера ЕТР.

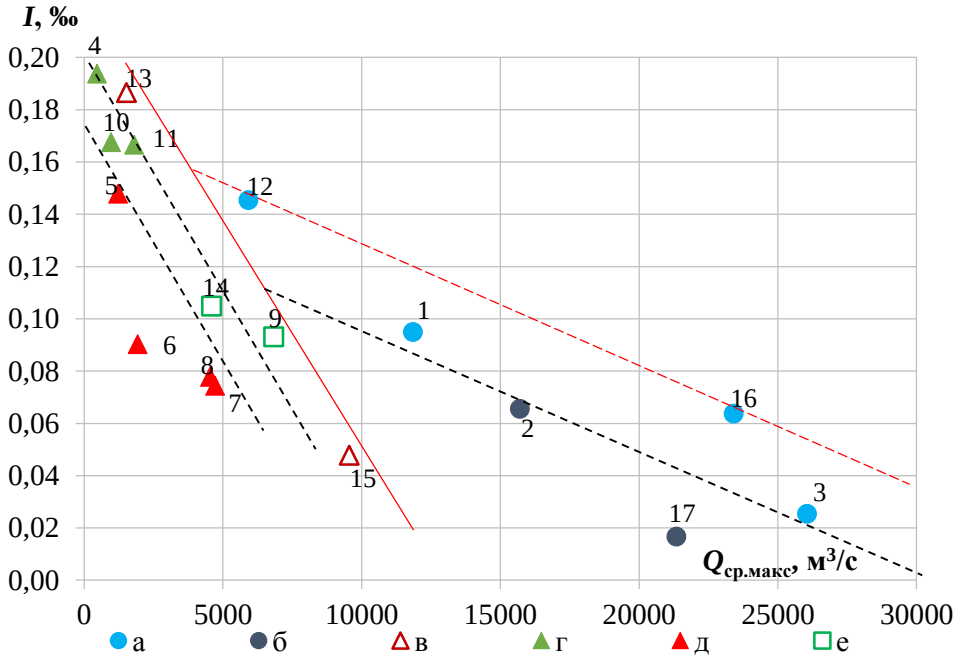


Рисунок 3.8 – *QI*-диаграмма для рек Севера Европейской территории России (номера на диаграмме соответствуют таблице 3.2). Условные обозначения: а – сложные разветвления (параллельно-рукавные, пойменно-русловые), б – одиночные и односторонние разветвления; излучины: в – врезанные, г – петлеобразные и сегментные развитые, д – сегментные пологие и прорванные; е – относительно прямолинейное неразветвленное русло

Точки, соответствующие извилистым руслам, разделяются на три области. Наибольшими мощностями обладают врезанные излучины, при этом они располагаются как в области максимальных значений уклонов (Печора – Якша), так и минимальных (Печора – Усть-Щугор). Менее мощный поток формирует петлеобразные и сегментные излучины на верхней Вычегде и Мезени.Сегментные пологие и прорванные излучины в среднем течении Вычегды расположены в левой нижней части диаграммы. По сравнению с петлеобразными и сегментными излучинами верхнего течения, характеризуются бóльшими значениями расхода воды и меньшими значениями уклона. Увеличение водности вниз по течению реки, глубины и продолжительности затопления поймы, снижение уклонов и степени залесенности поймы способствует развитию спрямляющих излучины рукавов на более ранних стадиях их развития [Каргаполова, 2006].

Разветвленные русла формируются при $Q_{ср.макс}$>4000 м^3/с и I<0,16‰. Если провести верхнюю огибающую (красная пунктирная линия на рис. 3.8), то область разветвленных русел на диаграмме напоминает «клин», полученный также В.Г. Смирновой [2002] для рек Алтайского региона (точка начала «клина разветвления» соответствует $Q_{ср.макс}$=30 м^3/с и I=5,4‰). Проводя аналогию, можно предположить, что на QI-диаграмме рек Севера ЕТР выше и правее области развития разветвлений должны были бы расположиться полугорные русла, которые не формируются на реках данного региона в пределах исследуемых участков в силу природных условий (на диаграмме рек Алтая выше и правее «клина разветвления» расположились точки полугорного относительно прямолинейного русла).

Условия формирования сложных типов разветвлений рек Севера ЕТР аналогичны для разновидностей разветвлений на реках бассейна среднего и нижнего Амура: мощность потока достигается за счет большой водности при малых уклонах, подтверждением чему является соответствие области распространения точек разветвлений сложных типов на региональных диаграммах. Так, для р. Амура в районе г. Хабаровска характерны $Q_{ср.макс}$ = 22431 м^3/с и I = 0,069‰ [Борщенко, 2013], что близко к значениям тех же характеристик на

Печоре в районе г.п. Усть-Цильма: $Q_{ср.макс}$ = 23406 м^3/с и I = 0,06‰ (табл. 3.2). Однако условия формирования рек бассейна Амура более разнообразны, что определяет бóльший разброс точек на диаграмме и отсутствие четкой границы между типами русла.

Совместный анализ *QI*-диаграмм и руслоформирующих расходов воды $Q_ф$, предложенный А.М. Алабяном [1992], представлен для рек Севера ЕТР в таблице 3.3. Линии разветвленного врезанного русла в нижнем течении Северной Двины (г.п. Звоз, г.п. Усть-Пинега) и Мезени (г.п. Малонисогорская) расположены ниже $Q_ф$ верхнего интервала. Это свидетельствует о том, что для переформирований русла этого типа мощность потока достаточна при расходах воды, проходящих в бровках поймы. При этом линия разветвлений в районе г.п. Звоз расположена выше линии поймы в отличие от г.п. Усть-Пинега и Малонисогорская. Формирование разветвленного широкопойменного русла в среднем течении Северной Двины (г.п. Абрамково) и нижнем течении Печоры (г.п. Усть-Цильма) обеспечивается только расходами воды половодья, проходящими при затопленной пойме, сопровождаясь развитием пойменной многорукавности; мощности потока в пределах пойменных бровок недостаточно для формирования разветвлений на этих участках.

Развитие меандрирующего русла повсеместно обеспечивается $Q_ф$ среднего интервала. При этом линия извилистого русла лежит выше линии поймы. Это говорит о том, что в свободных условиях развития русловых деформаций в шпорах излучин развиваются спрямляющие протоки – формируются прорванные излучины. В нижнем течении Вычегды (г.п. Федяково) за формирование русла отвечает верхний интервал $Q_ф$, проходящий выше пойменных бровок. Наличие ведущего коренного берега на этом участке обусловливает формирование преимущественно относительно прямолинейного русла и отдельных узлов разветвлений.

Таблица 3.3 – Совместный анализ *QI*-диаграммы и $Q_ф$ для рек Севера ЕТР

Река	Северная Двина			Вычегда			Мезень		Печора	
Пост / $Q_ф$, м^3/с	Абрамково	Звоз	Усть-Пинега	Мал. Кужба	Сыктывкар	Федяково	Бол. Пысса	Малонисогорская	Усть-Щугор	Усть-Цильма
	11 848					6 829				23 406
Верхний	9 500	19 065	28 055	2 131	–	5 575	1 810	6 520	13 580	20 800
		15 699		1 929	4 718		1 803		9 552	
Пойма	8 500	12 000	25 000	1 500	3 300	4 800	1 500	6 200	9 000	9 000
			21 341					5 913		
Средний	7 500	11 685	19 005	1 249	2 250	4 037	1 330	5 180	8 980	7 090
Нижний	1 500	1 845	4 525	514	1 100	961	236	675	5 910	–

Примечание:

Цветом обозначены расходы воды,

отвечающие за формирование:

- разветвлений,
- излучин,
- относительно прямолинейного русла;

выхода воды на пойму

3.2.3 Гидролого-морфологические зависимости

Извилистые русла. На Севере ЕТР меандрирующие русла распространены преимущественно на средних и малых реках. Ранее были установлены связи параметров (радиус кривизны r, шаг L) свободных излучин от характеристик водности для Вычегды [Завадский, 2000, 2001а; Завадский и др., 1997, 2002; Каргаполова, 2006], выражающиеся уравнениями регрессии: $Q_{ср} = 0{,}02r^{1{,}47}$, $Q_{ср} = 0{,}004L^{1{,}52}$, где $Q_{ср}$ – средний многолетний расход воды. При построении данных зависимостей параметры свободных излучин были осреднены по относительно однородным по водности участкам верхнего и среднего течения реки, располагающихся между устьями крупных притоков (табл. 3.4) [Каргаполова, 2006].

Было показано также, что учет стадии развития излучины позволяет уточнить гидролого-морфологические зависимости [Завадский и др., 2002]. В данном случае применялся иной подход к выборке излучин – определение модальных значений параметров излучин на разных стадиях их развития. Разделение на стадии развития излучин позволили установить тесные (коэффициент корреляции $R > 0{,}8$) линейные зависимости от водности ($Q_{ср}$, $Q_{ср.макс}$) не только параметров r и L, но также длины излучины l и стрелы прогиба $h_и$, которые в значительной степени связаны с формой излучин [Чалов и др., 1998]. Коэффициенты в уравнениях регрессии (табл. 3.5) увеличиваются от пологой сегментной к омеговидной (или синусоидальной) излучине и носят региональный характер, отражая режим стока воды и наносов.

Таблица 3.4 – Морфометрические параметры свободных излучин р. Вычегды, осредненные по участкам [Каргаполова, 2006]

Участок реки	Среднегодовой расход воды ($Q_{ср}$)	Параметры русла настоящего времени (по лоцм. карте 1977 г.)		
		r	L	l/L
Пожег-Тимшер	48	220	460	1,71
Тимшер-Нем	80	290	635	1,66
Нем-Северная Кельтма	140	415	890	1,49
Северная Кельтма-Вишера	235	660	1400	1,59
Вишера-Сысола	440	1010	2115	1,61
Сысола-Вымь	600	1190	2840	1,43

Таблица 3.5 – Коэффициенты k в уравнениях регрессии $l(h_и)=kQ_{ср}(Q_{ср.макс})+C$ и $r(L)=kQ_{ср}(Q_{ср.макс})+C$ в зависимости от стадии развития излучин р. Вычегды [Завадский и др., 2002]

Расход воды	Стадия	l	$h_и$	r	L
Среднегодовой, $Q_{ср}$	$1,1<l/L<1,4$	2,9	1,0	1,3	3,0
	$1,4<l/L<1,7$	4,1	1,3	1,2	2,9
	$1,7<l/L<2,0$	6,3	1,7	0,9	2,5
	$2,0<l/L<3,0$	11,2	4,5	2,3	5,4
Среднемаксимальный, $Q_{ср.макс}$	$1,1<l/L<1,4$	2,3	0,7	1,0	2,2
	$1,4<l/L<1,7$	3,3	1,0	0,9	2,2
	$1,7<l/L<2,0$	4,7	1,3	0,7	1,9
	$2,0<l/L<3,0$	8,8	3,5	1,8	4,2

Анализ полученных сведений об изменениях за временной интервал (1946-1982 гг. для Вычегды) параметров излучин [Завадский и др., 2002]: степени их развитости $\Delta(l/L)=(l/L)_1/(l/L)_2$, стрелы прогиба $\Delta(h_и)=(h_и)_1/(h_и)_2$, $\Delta S=S_1/S_2$ длины размываемых берегов S, и ее отношения к длине излучины $\Delta(S/l)=(S/l)_1/(S/l)_2$, где индексы 1 и 2 соответствуют началу и концу выбранного временного интервала, подтвердил различия в динамике излучин в зависимости от стадии их развития. Зависимости $\Delta(S/l)=f[\Delta(l/L)]$ и $\Delta S=f[\Delta(l/L)]$ обратные, они отражают увеличение скорости удлинения фронта размыва вогнутых берегов излучин относительно темпов развития самих излучин и их удлинения. Коэффициенты уравнений регрессии зависимостей [Завадский и др., 2002] $\Delta(S/l)=f[\Delta(l/L)]$ и $\Delta S=f[\Delta(l/L)]$ (табл. 3.6) резко возрастают у омеговидных излучин. Это подтверждает схему интенсивности деформации излучин [Чалов и др., 1998], в частности, свидетельствует о том, что развитие омеговидных излучин сопровождается удлинением фронта размыва за счет формирования вторичных излучин на их крыльях. Это же подтверждается увеличением коэффициентов регрессии прямой зависимости $\Delta(h_и)=f[\Delta(l/L)]$ до стадии развитых или сегментных крутых излучин, затем их незначительное изменение – стрела прогиба омеговидных излучин изменяется незначительно в связи с замедлением их поперечного смещения. Эти зависимости менее тесные, чем связи основных параметров излучин с

характеристиками водности, однако имеют большое значение для выявления динамики размыва берегов на излучинах на разных стадиях их развития.

Таблица 3.6 – Коэффициенты *k* в уравнениях регрессии Δ(*S*/*l*)= *f*[Δ(*l*/*L*)] и Δ*S*=*f*[Δ(*l*/*L*)] в зависимости от стадии развития излучин р. Вычегды [Завадский и др., 2002]

Стадия	Δ(*S*/*l*)=*f*[Δ(*l*/*L*)]	Δ*S*=*f*[Δ(*l*/*L*)]
Сегментные пологие	0,16	-0,16
Сегментные развитые	0,07	-0,07
Сегментные крутые	0,21	-0,12
Омеговидные	1,26	-0,36
Крутые омеговидные	–	-2,92

Разветвленные русла. Относительная однородность условий формирования русел крупнейших рек Севера ЕТР находит отражение в общих трендах гидролого-морфологических зависимостей [Львовская, 2015; Львовская, в печати]. Местные особенности факторов русловых процессов определяют различия для рек, а также их отдельных участков.

Зависимость ширины рукавов $b_{\text{рук}_\text{ф}}$ при руслоформирующем расходе воды *от руслоформирующего расхода воды в них* $Q_{\text{ф}_\text{рук}}$ имеет вид:

$$b_{\text{рук}_\text{ф}} = kQ_{\text{ф}_\text{рук}} + a, \tag{3.4}$$

Коэффициенты k в уравнении связи (3.4) неодинаковы в разветвлениях разных типов, уменьшаясь от пойменно-русловых к сопряженным разветвлениям, т.е. по мере упрощения их морфологии и упорядочения структуры потока (табл. 3.7). Структура потока в рукавах сопряженных разветвлений аналогична структуре потока на излучинах [Чалов, 2011] – морфологически более простого типа русла, чем разветвления, что, очевидно, определило их последнее место в данной последовательности (табл. 3.7).

Таблица 3.7 – Коэффициенты *k* и *a* в уравнениях (3.4) и соответствующие им коэффициенты корреляции *R*

Разветвление	*k*	*a*	*R*
Пойменно-русловые	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

Полученные связи $b_{\text{рук}_\text{ф}} = f(Q_{\text{ф}_\text{рук}})$ для основных рукавов (главных и вторых основных) одиночных и параллельно-рукавных разветвлений Северной Двины, Мезени и Печоры (рис. 3.9, А, Б) образуют единые тренды. При этом в одиночных разветвлениях вторые основные рукава имеют меньшую ширину по сравнению с главными, а $Q_{\text{ф}_\text{рук}}$ в них в большинстве случаев не превышают 7000 м^3/с (рис. 3.9, А). Ширина рукавов параллельно-рукавных разветвлений сопоставима для главных и вторых основных рукавов при одних и тех же расходах воды (рис. 3.9, Б), что вполне закономерно, поскольку в параллельно-рукавных разветвлениях основные рукава равнозначны по водности и степени развитости. В то же время на Мезени параллельно-рукавные разветвления формируются при водности, в два-три раза меньшей, чем на Северной Двине и Печоре, причем с ростом водности ширина рукавов на Мезени увеличивается быстрее, чем на других реках. Такая дифференциация обусловлена различиями условий формирования параллельно-рукавного русла на этих реках. При значительно меньшей водности по сравнению с Северной Двиной и Печорой развитие параллельно-рукавных разветвлений на Мезени определяется, как и на других реках региона, слабой устойчивостью ее русла и повышенным стоком руслообразующих наносов. Врезанный характер русла Мезени ограничивает горизонтальные деформации и возможности увеличения ширины рукавов за счет размывов противоположных берегов, обеспечивая большую сосредоточенность потока в русле во время половодья.

Зависимости для остальных типов разветвлений (рис. 3.9, В, Г, Д) существенно различаются для главных и вторых основных рукавов. В сопряженных разветвлениях на Печоре (рис. 3.9, В) при одинаковой ширине водность главных рукавов в несколько раз превосходит водность вторых основных, что связано с различиями в их глубинах. В односторонних и пойменно-русловых разветвлениях Северной Двины увеличение водности главных рукавов сопровождается значительным увеличением их ширины (рис. 3.9, Г, Д): например, в односторонних разветвлениях при росте расходов на 20% ширина основных рукавов увеличивается более чем в два раза. При этом ширина вторых основных

рукавов пойменно-русловых и второстепенных рукавов односторонних разветвлений не зависит от водности, оставаясь практически неизменной с ростом расхода воды. Это объясняется неравномерностью распределения стока наносов, несоответствующей распределению стока воды по рукавам, периодическим перекрытием побочнями заходов в рукава, асимметрией разветвлений и др.

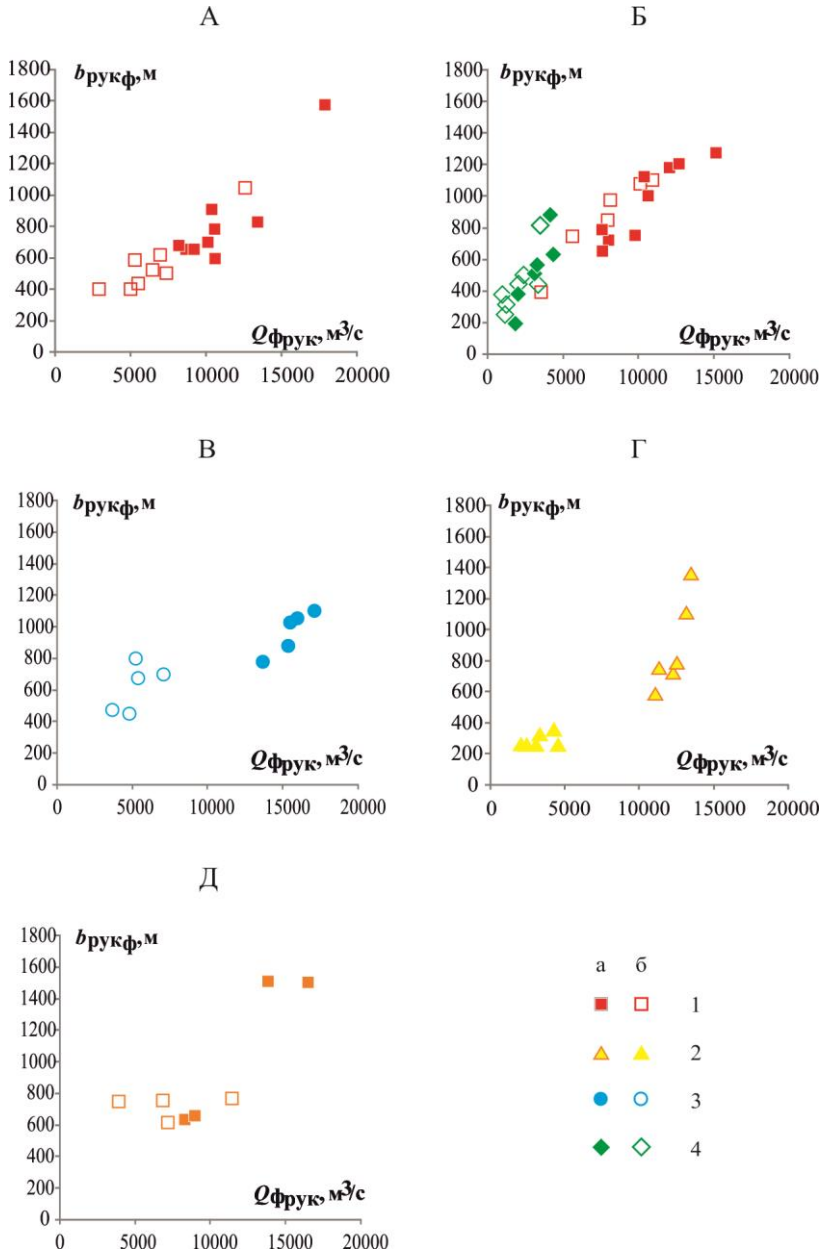


Рисунок 3.9 – Зависимости $b_{\text{рук}_\text{ф}} = f(Q_{\text{ф}_\text{рук}})$ в разветвлениях: А – одиночных; Б – параллельно-рукавных; В – сопряженных; Г – односторонних; Д – пойменно-русловых; 1 –Северная Двина и Печора, 2 – Северная Двина, 3 – Печора, 4 – Мезень; а – главные рукава, б – вторые основные рукава и второстепенные (в односторонних разветвлениях)

Несмотря на рассмотренные различия по рекам и в зависимости от роли рукавов в распределении стока воды, обнаруживается общая достаточно тесная

(коэффициент корреляции R = 0,87) зависимость для рек Севера ЕТР, коэффициенты в формуле (3.4) равны k = 0,057 и a = 271,4.

Коэффициенты в *зависимостях относительной ширины островов* $B_о/b_р$ *от удельного среднемаксимального расхода воды* $q_{макс}=Q_{ср.макс}/b_р$, где $B_о$ – ширина острова, $b_р$ – ширина русла выше узла разветвления:

$$\frac{B_o}{b_p} = kq_{макс} + a, \tag{3.5}$$

также изменяются по разветвлениям разного типа (табл. 3.8, рис. 3.10), но имеют иной порядок по сравнению с зависимостью (3.4): для Северной Двины, Мезени и Печоры – от пойменно-русловых к параллельно-рукавным и прибрежным разветвлениям происходит уменьшение коэффициента a. Наименьшими значениями коэффициента a характеризуются прибрежные разветвления.

Таблица 3.8 – Коэффициенты k и a в уравнениях (3.5) и коэффициенты корреляции R

Разветвление (река)	k	a	R
Пойменно-русловые (Вычегда)	2,65	-17,86	0,92
Пойменно-русловые (Печора и Северная Двина)	0,09	1,78	0,92
Одиночные (Печора и Северная Двина)	0,15	-0,73	0,88
Одиночные (Вычегда)	0,20	-0,70	0,96
Сопряженные	0,32	-0,70	0,94
Односторонние	0,12	-0,46	0,98
Параллельно-рукавные	0,09	-0,27	0,87
Прибрежные	0,05	-0,12	0,82

В этой зависимости в наибольшей мере проявляются различия для пойменно-русловых и одиночных разветвлений Вычегды от таковых для Северной Двины и Печоры, что связано с отмеченными выше (раздел 3.1) особенностями формирования этих типов разветвлений: на Вычегде пойменно-русловые разветвления формируются в меандрирующем русле, на Северной Двине и Печоре – в разветвленном; одиночные разветвления в нижнем течении Вычегды не образуют протяженных участков, представляя собой отдельные узлы разветвлений, в отличие от таковых на Северной Двине и Печоре.

Рукава одиночных, сопряженных и пойменно-русловых разветвлений в большинстве своем извилистые. Рукава в одиночных и каждом звене сопряженных разветвлений образуют одну излучину, шпорой которой является остров, рукава

пойменно-русловых разветвлений – серии излучин [Львовская, Чалов, 2015; Завадский, Львовская и др., 2015]. Рукава параллельно-рукавных и односторонних разветвлений излучин не образуют. Однако даже при отсутствии излучин имеются извилины динамической оси потока возле побочней и осередков, которые при зарастании могут трансформироваться в формы русла второго порядка – разветвления или излучины [Чалов, 2011]. В отличие от русла средней Лены [Чалов, 1979], главные рукава каждого звена сопряженного разветвления которой представлены серией излучин (от 2 до 4) от наиболее пологой верхней до самой крутой нижней, на реках Севера ЕТР рукава сопряженных разветвлений имеют, как правило, один изгиб.

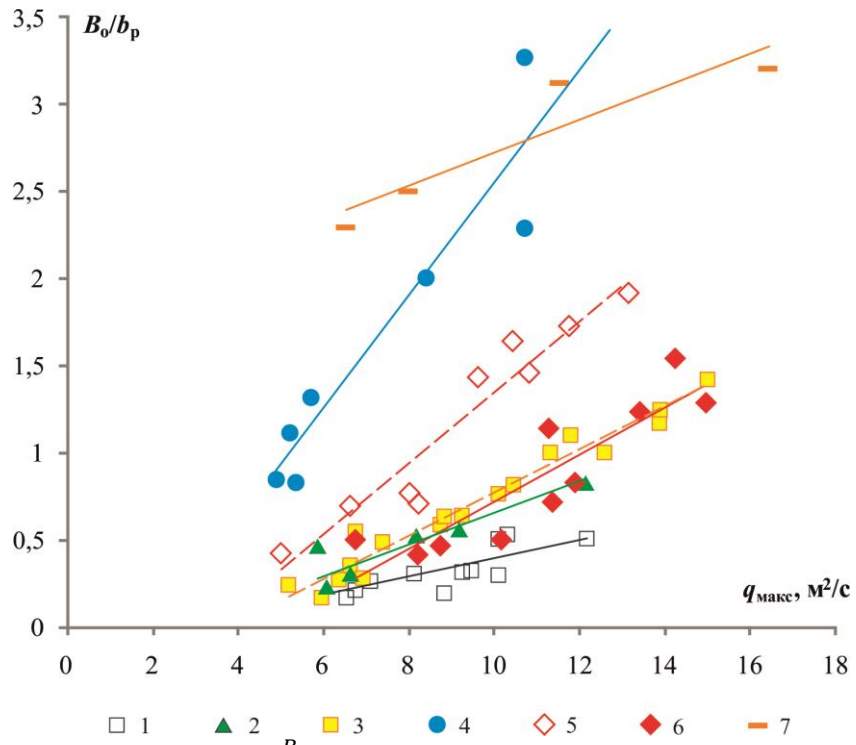


Рисунок 3.10 – График зависимости $\frac{B_o}{b_р} = f(q_{макс})$: 1 – прибрежные; 2 – параллельно-рукавные; 3 – односторонние; 4 – сопряженные (Печора); 5 – одиночные (Вычегда); 6 – одиночные (Печора и Сев. Двина); 7 – пойменно-русловые (Печора и Сев. Двина) разветвления

Полученные *зависимости основных параметров излучин рукавов разветвлений ($r_{рук}$ – радиус кривизны, $L_{рук}$ – шаг) от руслоформирующего расхода воды в рукаве* (табл. 3.9, рис. 3.11, А, Б) также дифференцируются по типам разветвлений. Наиболее тесные связи характерны для сопряженных (*R* равен 0,96 и 0,92) и одиночных (0,93 и 0,78) разветвлений Печоры. Зависимости параметров

излучин, особенно $L_{\text{рук}}$, в пойменно-русловых разветвлениях в разветвленном русле Печоры менее тесные (табл. 3.9).

Таблица 3.9 – Коэффициенты корреляции R зависимостей $r(L)_{\text{рук}_\text{ф}} = f(Q_{\text{рук}_\text{ф}})$ и $r(L)_{\text{рук}_\text{ф}} = f(b_{\text{рук}_\text{ф}})$

Тип разветвления	Река	r	L
Сопряженные	Печора	0,96	0,92
Пойменно-русловые	Печора	0,61	0,63
Пойменно-русловые	Вычегда	0,95	0,79
Одиночные	Печора	0,93	0,78
Одиночные	Северная Двина	0,89	0,50

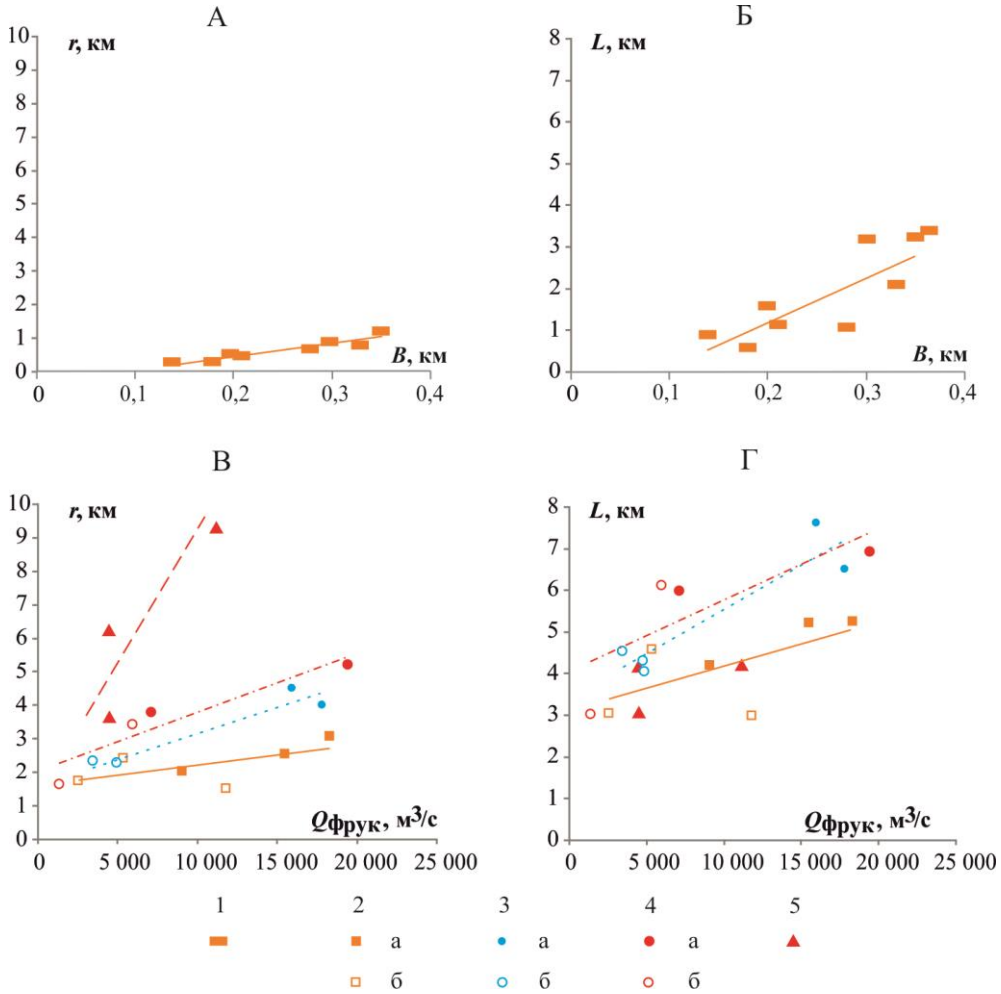


Рисунок 3.11 – Зависимости радиуса кривизны (А, В) и шага (Б, Г) излучин в рукавах разветвлений от ширины рукава в вершине излучины: 1 – пойменно-русловые разветвления Вычегды; от руслоформирующего расхода воды в рукаве: 2 – пойменно-русловых; 3 – сопряженных; 4 – одиночных разветвлений Печоры; 5 – одиночных разветвлений Северной Двины; а – главные рукава, б – вторые основные рукава

Связи параметров излучин рукавов одиночных разветвлений с водностью рукавов Северной Двины и Печоры неодинаковы: на Северной Двине радиусы

кривизны в 1,5-3 раза больше, чем на Печоре; шаг излучин, наоборот – меньше. Хотя параметры излучин главных и вторых основных рукавов разветвлений образуют единые зависимости от водности, но при этом параметры излучин вторых основных рукавов всегда меньше параметров излучин главных рукавов, что связано с большей водностью последних.

Ввиду отсутствия данных о распределении расходов воды по рукавам Вычегды, в качестве величины, их характеризующей, принята ширина рукава в вершине излучины $b_{\text{рук}_\text{ф}}$ при прохождении среднемаксимального расхода воды $Q_{\text{ср.макс}}$, поскольку $b_{\text{рук}_\text{ф}} = f(Q_{\text{ср.макс}})$ [Завадский, 2000; Завадский и др., 1997; Чалов, 2011]. В этом случае $r(L)_{\text{рук}_\text{ф}} = f(b_{\text{рук}_\text{ф}})$. Излучины рукавов пойменно-русловых разветвлений Вычегды имеют тесные связи радиуса кривизны r и шага L (рис. 3.11, В, Г) с шириной рукавов в вершинах излучин $b_{\text{рук}_\text{ф}}$.

Морфометрические параметры островов (табл. 3.10). По соотношению ширин и длин островов рек зависимости для рек Севера ЕТР дифференцируются по типам разветвлений. Для каждой реки были определены как средние значения соотношения L_o/B_o, так и предельные (рис. 3.12, 3.13), достигая которые острова либо объединяются в более крупные, либо частично размываются, приобретая в том и другом случае оптимальную для данной реки форму. Средние соотношения L_o/B_o, которым отвечает большинство островов на участках рек, неодинаковы для каждой реки (рис. 3.12). Относительно более удлиненные острова формируются на Мезени, Северной Двине и Печоре; для Вычегды характерны более широкие острова. Среднему соотношению L_o/B_o на всех реках отвечают острова одиночных разветвлений (табл. 3.10), имеющие наиболее тесную связь между L_o~B_o (R≥0,8) (табл. 3.11). На Печоре и Северной Двине среднему соотношению соответствуют острова одиночных, сопряженных и односторонних разветвлений. В целом разброс значений соотношения L_o/B_o отражает разнообразие разветвленных русел на реках.

Наибольший разброс (табл. 3.10) характерен для Печоры (от 1,4 до 20,0) и Северной Двины (от 1,6 до 11,5), разветвления которых наиболее многообразны как в свободных, так и в ограниченных условиях формирования русел. Для Мезени

и Вычегды характерен наименьший разброс значений L_o/B_o – от 2,2 до 10,8 и от 0,8 до 8,8, соответственно: врезанное разветвленное русло Мезени преимущественно параллельно-рукавное, в меньшей степени представлено односторонними разветвлениями; острова Вычегды образуют одиночные разветвления в прямолинейном адаптированном русле. Врезанный характер русла в первом случае обусловливает меньшую распластанность потока половодья и возможность поперечного роста острова; напротив, воздействие коренных берегов на Вычегде способствует размыву пойменных берегов возле островов и их расширению. Обе реки характеризуются однообразием морфодинамических типов разветвлений – наиболее узких на Мезени, наиболее широких – на Вычегде.

Таблица 3.10 – Границы и средние соотношения L_o/B_o

Река	L_o/B_o			Тип разветвления, отвечающий среднему
	Среднее	Нижняя граница	Верхняя граница	
Вычегда	2,7	8,8	0,8	Одиночные
Печора	3,8	20,0	1,4	Одиночные, сопряженные
Северная Двина	3,9	11,5	1,6	Односторонние, одиночные
Мезень	4,2	10,8	2,2	Одиночные

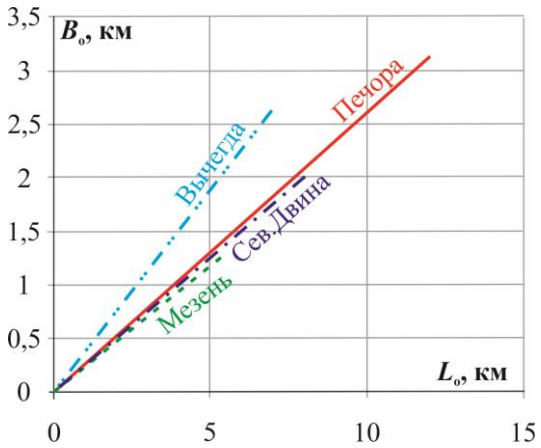


Рисунок 3.12 – Среднее соотношение L_o/B_o

Таблица 3.11 – Соотношения L_o/B_o и коэффициенты корреляции (R) для разных типов разветвлений

Разветвление	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	4,1*	1,0	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	–

Примечание: * Разветвления 2-го порядка

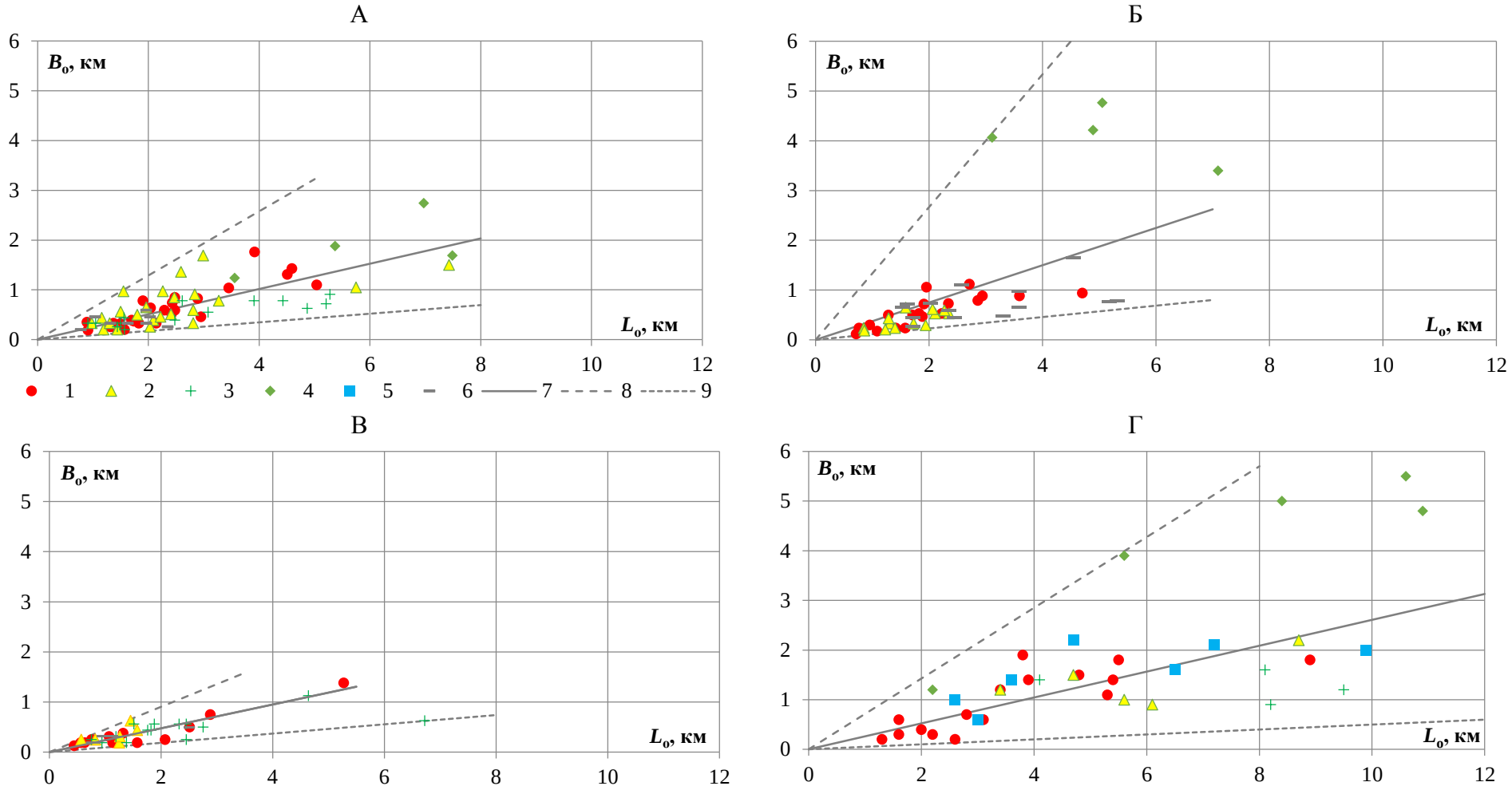


Рисунок 3.13 – Соотношение L_o/B_o для островов: 1) одиночных, 2) односторонних, 3) параллельно-рукавных, 4) пойменно-русловых, 5) сопряженных, 6) прибрежных разветвлений; 7) среднее соотношение L_o/B_o; 8) верхняя и 9) нижняя границы соотношения L_o/B_o; А) Северной Двины, Б) Вычегды, В) Мезени, Г) Печоры

Обнаружена общая закономерность для всех рек – увеличение L_o/B_o от пойменно-русловых к параллельно-рукавным разветвлениям, т.е. в последних острова относительно более длинные и узкие, имеют более вытянутую форму по сравнению с островами в разветвлениях других типов (табл. 3.11).

Для островов одиночных, односторонних (все реки), сопряженных (Печора) и пойменно-русловых в разветвленном русле (Северная Двина) разветвлений L_o/B_o находятся в пределах 3-4, что соответствует гидравлически выгодной форме острова. При этом разветвление при данном соотношении необязательно является симметричным.

Острова, образующие пойменно-русловые разветвления относительно более широкие – на графиках (рис. 3.13) они тяготеют к верхней границе, – особенно на Печоре и Вычегде (рис. 3.13, Б, Г) по сравнению с Северной Двиной (рис. 3.13, А), где они расположены вдоль средней линии, образуя единую область с остальными морфодинамическими типами разветвлений. Вероятно это следствие того, что пойменно-русловые разветвления Северной Двины по форме напоминают очень большие одиночные разветвления, имея форму близкую к симметричной, и располагаются преимущественно во врезанном русле в отличие от того же типа на Печоре и Вычегде. Острова параллельно-рукавных разветвлений, напротив, самые узкие; на Печоре и Северной Двине (рис. 3.13, А, Г) точки, им соответствующие, лежат ниже средней линии, на Мезени – преимущественно вдоль нее, – это еще одно свидетельство относительно малого разнообразия морфодинамических типов русла Мезени и следствие ограниченных условий развития русловых деформаций. Большое количество прибрежных разветвлений Северной Двины и Вычегды (рис. 3.13, А, Б) имеет удлиненную форму: точки им соответствующие располагаются преимущественно ниже средней линии.

А.М. Тарбеевой [2004] были получены соотношения L_o/B_o для Оби (от Новосибирска до устья р. Томи), которые для сопряженных разветвлений равны 3,4, что близко к значению для Печоры. Для одиночных разветвлений значение L_o/B_o = 7,2, что почти в 2 раза превышает характерное для рек Севера ЕТР, т.е. на Оби острова имеют удлиненную форму. По-видимому, это объясняется

формированием одиночных островов на Оби ниже крупных выступов коренных берегов или изгибов долины реки в целом, либо в условиях, когда один рукав отмирающий, вследствие чего остров растет как с оголовка, так и с ухвостья. На реках Севера ЕТР одиночные острова расположены посередине русла и, даже будучи составленными из нескольких объединившихся островов, сохраняют оптимальное соотношение L_o/B_o, разрастаясь как в длину, так и по ширине реки.

Условия развития русловых деформаций, соответствующие типам широкопойменного, адаптированного и врезанного русел, сказываются на относительной ширине L_o/B_o островов односторонних разветвлений [Львовская, в печати]: относительно более широкие острова формируются в широкопойменном русле (величина минимальна – L_o/B_o = 3,3), наиболее узкие характерны для врезанного русла (величина максимальна – L_o/B_o = 5,7), острова разветвлений в адаптированном русле занимают промежуточное положение (L_o/B_o = 4,7). Для островов остальных морфодинамических типов разветвлений дифференциация по типам русла практически не прослеживается.

Пойменно-русловые разветвления характеризуются относительно более узкими островами в разветвленном русле Северной Двины и Печоры (L_o/B_o = 2,2; имея общую для этих двух рек зависимость (R = 0,83), в отличие от островов пойменно-русловых разветвлений в извилистом русле Вычегды (L_o/B_o = 1,3).

3.3 Перекаты и перекатные участки и их формирование

3.3.1 Распространение и условия формирования перекатов и плесов, перекатных и плесовых участков на реках Севера ЕТР

Формы русла – разветвления и излучины, характеризуются вполне определенной структурой потока, обусловливающей возникновение на реке участков повышения и снижения транспортирующей способности потока [Маккавеев, 1949, 1955; Чалов, 1979, 2011]. Это приводит к образованию перекатов – аккумулятивных форм руслового рельефа.

Снижение транспортирующей способности может быть как результатом подпора, так и распластывания потока. Местное снижение транспортирующей

способности связано с неровностями берегов, вызывающих изгиб потока, местные расширения русла, отрыв или подход потока к высокому берегу, узлы разветвления на рукава и их слияние, ответвления крупных пойменных проток (полоев – на Северной Двине и Вычегде, шаров – на Печоре), впадение их в основные рукава, а также сужения и расширения дна долины, повороты (изгибы) русла в пределах дна долины и повороты самой долины, несовпадение направлений потока половодья и руслового потока (особенно при прохождении руслоформирующего расхода воды верхнего интервала при затопленной пойме).

Отдельные перекаты, разделенные протяженными плесами ($l_{пл} > L_{прк}$), обычно «привязаны» к определенному месту на реке или короткому отрезку русла, в пределах которого сказывается влияние того или иного фактора, определяющего снижение транспортирующей способности потока. Вместе с тем формируются перекатные участки, где перекаты следуют один за другим, разделяясь короткими плесовыми лощинами ($l_{пл} < L_{прк}$). Такие перекатные участки возникают под влиянием целого ряда факторов. В пределах достаточно длинных перекатных участков выделяются менее протяженные группы перекатов [Михайлова, 2007], которые разделяются относительно короткими, но достаточно глубокими (5-7 м на Северной Двине) плесами.

Перекатные участки занимают определенное положение в русле реки, протягиваясь на реках Севера ЕТР на десятки километров. Перекаты в пределах перекатных участков могут менять свое положение в русле, смещаясь по руслу и в ходе переформирований. В пределах перекатных участков и групп перекатов развитие всех перекатов, разделенных плесовыми лощинами, взаимосвязано: режим нижерасположенного переката во многом определяется процессами, происходящими на вышерасположенном перекате.

При высоком стоке влекомых наносов (более 30% в общем стоке наносов на реках Севера ЕТР) в русле образуется большое количество перекатов, а слабая устойчивость русла характеризует их активные переформирования в пределах перекатных участков. Наличие мощных источников поступления наносов (Толоконные горы на Северной Двине) является еще одной причиной

формирования сложных перекатных участков. Сочетание нескольких условий обусловливает наибольшую сложность в особенностях морфологии и режима деформаций протяженных перекатных участков.

Промежуточное положение между отдельно расположенными перекатами и перекатными участками занимают перекаты в извилистом русле, привязанные к местам перегибов между смежными излучинами [Чалов, 2011], тогда как на крыльях и в привершинной части излучин образуются плесы ($l_{пл} > L_{прк}$). То же самое наблюдается в разветвленном русле, хотя в большинстве своем разветвлениям соответствуют перекатные участки.

Там, где происходит сосредоточение потока и возникают специфические гидравлические явления, например, при расположении русла вдоль коренного берега и односторонней пойме, стеснении русла коренными берегами, формируются плесовые участки. Так, например, один из наиболее протяженных плесовых участков на Печоре расположен в относительно прямолинейном русле вдоль правого коренного берега между с. Брыкаланском и с. Няшабож (529-508 км). Другой плесовый участок протяженностью 40 км располагается непосредственно выше вершины устьевой области реки в широкопойменном относительно прямолинейном русле (238-198 км); глубины достигают здесь 20 м. На Северной Двине наиболее протяженный плесовый участок – Троицкий плёс протяженностью 6 км (369-363 км), расположен в прямолинейном неразветвленном русле вдоль коренного берега; его глубины достигают 9 м [Русловые процессы…, 2012].

Режим деформаций перекатов определяются совокупностью гидравлических и морфометрических характеристик потока и русла, его морфодинамическим типом, водностью реки, наличием источников поступления наносов и пр. [Маккавеев, 1949; Проектирование…, 1964; Маккавеев, Чалов, 1986]. Сложное чередование условий формирования перекатов и перекатных участков обусловливает их неравномерное расположение в русле реки.

Перекатные участки занимают около 30% протяженности рек региона и распространены неравномерно по длине рек; протяженность и количество образовывающих их перекатов также неодинаковы. В таблице В.1 представлены

наиболее протяженные, состоящие из 4-х и более перекатов, перекатные участки и условия их формирования.

Русло Мезени, Северной Двины и Вычегды в нижнем течении характеризуются практически сплошным расположением перекатных участков, которые прерываются сравнительно короткими плесами, особенно на Мезени (их протяженность не превышает 3-4 км). Перекаты и перекатные участки на Печоре разделяются наиболее протяженными плесами (не менее 5-10 км), для реки характерно преимущественное формирование отдельных перекатов; в пределах перекатных участков перекаты располагаются на бóльшем удалении друг от друга, чем на других реках.

Наибольшее число перекатов в пределах перекатных участков (11-16 перекатов) характерно для параллельно-рукавных разветвлений Северной Двины (табл. В.1), расположенных в расширениях дна долины, где происходит (в период половодья) рассредоточение потока по пойме и пойменным протокам (полоям). Основной причиной формирования наиболее протяженных участков на Вычегде является изменение направления дна долины. В сочетании с несовпадением пойменного и руслового потоков в период половодья, рассредоточением потока по рукавам разветвлений формируются достаточно протяженные перекатные участки, включающие до 9 перекатов (в рукавах пойменно-русловых разветвлений).

Наиболее протяженный перекатный участок на Печоре (21 перекат) охватывает главные рукава сопряженных разветвлений ниже г. Печоры, где показатель устойчивости русла наименьший на реке (Λ = 4). При Λ = 18-20 в рукавах параллельно-рукавных разветвлений ниже слияния с р. Цильмой перекаты очень редки. На Мезени перекатные участки формируются преимущественно там, где главное течение реки переваливает от одного борта долины к другому, пересекая зону аккумуляции наносов посередине реки.

На участках относительно прямолинейного, неразветвленного русла вдоль коренного берега и на излучинах формируются наименее протяженные перекатные участки на всех рассматриваемых реках, состоящие обычно не более, чем из 4-5 перекатов, расположенных в шахматном порядке. Их формирование связано с

наличием выступа коренного берега, несовпадением направления пойменного и руслового потоков в период половодья (Туровецкий – Верх. Канзский на Северной Двине; Сольвычегодский – Осиевский на Вычегде), сужения дна долины ниже по течению (Верх. Рычковский – Новинский на Вычегде) и т.д.

В ходе многолетних переформирований перекаты смещаются в пределах перекатного участка; положение верхнего и нижнего перекатов на участке, как правило, неизменно: при смещении верхнего переката на его месте формируются новый, то же происходит после размыва нижнего переката на участке.

Наиболее протяженные участки формируются на реках Севера ЕТР перед изменением направления дна долины, сопровождающимся переходом русла от одного борта долины к другому и, соответственно, пересечением осей пойменного и руслового потоков.

Устойчивость русла играет особую роль в распространении перекатов в русле: при прочих равных условиях количество перекатов, составляющих перекатный участок, больше там, где меньше Λ. Для анализа распространения перекатов в зависимости от устойчивости русла рассчитан показатель $\eta = \frac{n}{l}$ – количество перекатов n на длину перекатного участка l. Обнаружены закономерные изменения соотношения η ~ Λ по типам русла, как морфодинамическим (табл. 3.12), так и геоморфологическим (табл. 3.13). Зеленым цветом в таблицах выделено наиболее часто встречающееся (подсчитано число участков) соотношение η и Λ, соответствующее типу русла. Анализ данных показывает, что с увеличением устойчивости русла уменьшается относительное количество перекатов η в разветвленном и относительно прямолинейном русле (табл. 3.12), т.е. чем больше устойчивость русла, тем реже встречаются перекаты. В относительно прямолинейном русле, по сравнению с разветвленным, значительно сокращается число участков с большим относительным количеством перекатов (Λ = 2-5 и η > 0,5) – с 10 до 2. Такие условия более характерны для разветвленного русла. В извилистом русле относительное количество перекатов не зависит от устойчивости русла. Это объясняется тем, что перекаты привязаны к

определенным местам в пределах излучин, формируясь на их крыльях и лишь в редких случаях в их вершине.

Таблица 3.12 – Относительное количестве перекатов в зависимости от устойчивости русла по морфодинамическим типам русла

Морфодинамический тип русла	Относительное количество перекатов, η	Устойчивость русла, Λ		
		2-5	5-10	>10
		Кол-во участков		
Разветвленные	<0,2 (<2 прк. на 10 км)	0	0	13
	0,2-0,5 (2-5 прк. на 10 км)	5	13	5
	>0,5 (>5 прк. на 10 км)	10	7	0
Относительно прямолинейные	<0,2 (<2 прк. на 10 км)	0	1	11
	0,2-0,5 (2-5 прк. на 10 км)	6	13	0
	>0,5 (>5 прк. на 10 км)	2	5	0
Извилистые	<0,2 (<2 прк. на 10 км)	0	3	4
	0,2-0,5 (2-5 прк. на 10 км)	2	14	1
	>0,5 (>5 прк. на 10 км)	1	4	0

Примечание: В таблицах 3.13-3.13 зеленым цветом выделено наиболее часто встречающееся соотношение η и Λ

Сопоставление показателя η с устойчивостью Λ (число Лохтина) и геоморфологическим типом русла (табл. 3.13) показало, что в целом на реках региона снижение устойчивости русла сопровождается увеличением относительного количества перекатов η вне зависимости от типа русла. Так, несмотря на врезанный характер в русле Мезени (табл. 3.14), отличающемся малой устойчивостью (в среднем Λ = 3,6-4,7), перекатные участки образованы наибольшим количеством перекатов: показатель η максимален и составляет 0,5-0,6.

Таблица 3.13 – Относительное количестве перекатов в зависимости от устойчивости русла по геолого-геоморфологическим типам русла

Геолого-геоморфологический тип русла	Относительное количество перекатов, η	Устойчивость русла, Λ		
		2-5	5-10	>10
		Кол-во участков		
Широкопойменное	<0,2 (2 прк. на 10 км)	0	2	19
	0,2-0,5 (2-5 прк. на 10 км)	7	16	3
	>0,5 (5 прк. на 10 км)	4	9	0
Адаптированное	<0,2 (2 прк. на 10 км)	0	1	3
	0,2-0,5 (2-5 прк. на 10 км)	4	23	1
	>0,5 (5 прк. на 10 км)	4	5	0
Врезанное	<0,2 (2 прк. на 10 км)	0	1	6
	0,2-0,5 (2-5 прк. на 10 км)	2	1	2
	>0,5 (5 прк. на 10 км)	5	2	0

Таблица 3.14 – Соотношение относительного количества перекатов (η) с показателем устойчивости русла (Λ) и геолого-геоморфологическим типом русла по рекам

Геолого-геоморфологический тип русла	Северная Двина		Вычегда		Мезень		Печора	
	Λ	η	Λ	η	Λ	η	Λ	η
Широкопойменное	5,1	0,5	5,2	0,4			11,2	0,2
Адаптированное	6,7	0,4	5,5	0,4	4,7	0,5	15,1	0,1
Врезанное	5,5	0,4	–	–	3,6	0,6	10,5	0,1

На перекатных участках в русле Печоры, где Λ достигает достаточно больших значений (в среднем до 15,1), η равен 0,1-0,2 прк/км (табл. 3.14). На Северной Двине и Вычегде Λ в среднем составляет 5,1-6,7, а количество перекатов на 1 км перекатного участка η = 0,4-0,5, занимая промежуточное положение между значениями этого показателя на Печоре и Мезени.

Общее снижение относительного количества перекатов в пределах перекатных участков с ростом устойчивости русла и в зависимости от геолого-геоморфологического типа русла иллюстрирует график (рис. 3.14). Во врезанном русле при одном и том же показателе устойчивости перекаты в пределах перекатных располагаются ближе друг к другу ($l_{пл} < L_{прк}$), в широкопойменном русле они удалены друг от друга на бóльшие расстояния ($l_{пл} > L_{прк}$). Имеется переходная область между широкопойменными и врезанными руслами, в которую попали как те и другие, так и все перекатные участки адаптированного русла.

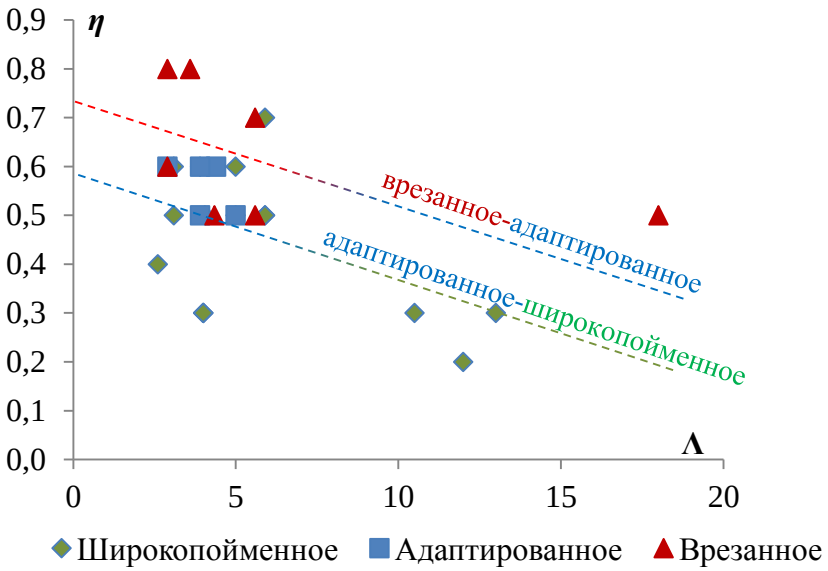


Рисунок 3.14 – Зависимость относительного количества перекатов в пределах перекатных участков от Λ

Установлены также достаточно тесные зависимости относительного количества перекатов η в пределах перекатных участков от устойчивости русла (рис. 3.15) для параллельно-рукавных и разветвленно-извилистых в широкопойменном и адаптированном русле; менее тесная зависимость для параллельно-рукавных разветвлений во врезанном русле.

Отсутствие зависимостей или их проявление в виде тенденций для других морфодинамических типов русла, вероятно, можно объяснить большой ролью других факторов, определяющих формирование каждого конкретного участка.

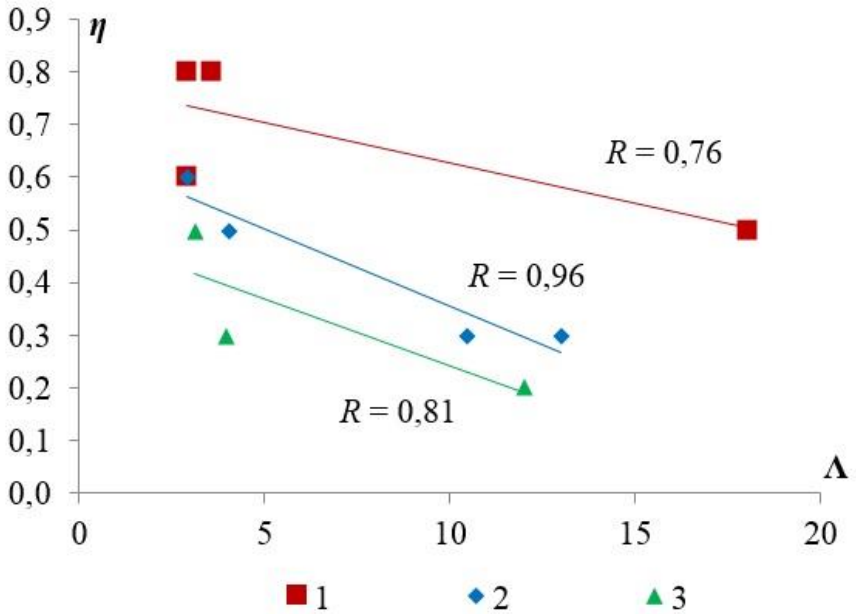


Рисунок 3.15 – Зависимость относительного количества перекатов η в пределах перекатных участков от показателя устойчивости Λ и морфодинамического типа разветвленного русла: параллельно-рукавного во врезанном (1), широкопойменном и адаптированном (2) русле, разветвленно-извилистого в широкопойменном русле (3)

3.3.2 Многолетний и сезонный режим перекатов (на примере Северной Двины)

Общие особенности переформирования перекатов. Деформации перекатов заключаются в одновременном проявлении вертикальных (размывы и аккумуляция наносов на верховом склоне и в подвалье) и горизонтальных переформирований; последние проявляются как в продольных (смещение отдельных гряд и элементов переката – побочней, осередков, кос, перекатов в целом), так и поперечных (миграциях корыта переката от верхнего побочня к нижнему и наоборот увеличении размеров побочней в плане и т.д.). В многолетнем

плане перекаты могут быть относительно стабильными и занимать постоянное место в русле (их переформирования в этом случае связаны с удлинением кос в ухвостье верхнего побочня, образованием затонской части, миграцией корыта переката), либо смещаться в пределах перекатных участков, в ходе которых меняется взаимное расположение морфологических элементов, высота гребня и побочней, отметки дна в пределах седловины [Чалов, 2010]. На фоне многолетних деформаций перекатов происходят их сезонные изменения. В условиях слабоустойчивого русла сезонные деформации перекатов проявляются в тех же формах, что и многолетние, но в сроки, ограниченные одним гидрологическим годом или периодом открытого русла.

Скорости смещения перекатов определяются устойчивостью русла, величиной руслоформирующего расхода воды [Маккавеев, 1955] и неодинаковы для отдельных лет и других временных периодов с различной водностью (многоводные, маловодные, средние по водности); следовательно, колебания водности также определяют скорости переформирования перекатов как в многолетнем, так и сезонном плане. В отличие от многолетних деформаций сезонные переформирования перекатов определяются внутригодовыми колебаниями водности и стока наносов.

Режим перекатов определяется также их положением в русле. Наиболее подвижными в многолетнем плане являются перекаты, расположенные в относительно прямолинейном, неразветвленном русле; наоборот, относительно стабильны перекаты, расположенные в узлах разделения потока на рукава, слияния рукавов, на перегибах между смежными излучинами [Чалов, 2010]. Поэтому изменение типа самого русла и его морфологических характеристик вследствие многолетних деформаций влечет перестройку морфологии перекатов и режима их деформаций. К изменению морфологии перекатов могут приводить и сезонные деформации переката, связанные с отторжением побочня и превращением его в осередок, или же, наоборот, формированием осередка в половодье и превращением его в побочень к межени, надвижением на перекат гряд меньших размеров и т.д.

Сезонный режим перекатов обычно проявляется в намыве гребня во время половодья и размыве на спаде половодья и в межень. Однако такая схема выполняется далеко не всегда. Чаще всего она проявляется у перекатов типа перекошенной гряды (по морфодинамической классификации перекатов Р.С. Чалова [1979, 2011]) и связана с гидравлическим режимом потока на перекате, который аналогичен режиму затопленного водослива с широким порогом. Существуют перекаты, для которых характерна обратная схема сезонных деформаций: размыв в период половодья и намыв в межень. Как правило, это перекаты – нижние в паре сопряженно развивающихся перекатов: если в период половодья на гребне верхнего переката происходит аккумуляция наносов, на нижнем возникает их дефицит, и его гребень размывается; в межень на такой паре перекатов наблюдается прямо противоположная ситуация.

От половодья к межени меняются и скорости деформаций перекатов. Как правило, гряды крупных размеров (класса А и Б по Н.И. Алексеевскому [1998]) смещаются только в период половодья, происходит их рост в высоту вследствие аккумуляции на них наносов. По мере спада уровней перемещение гряд замедляется, со временем прекращается и начинается размыв гребней с образованием углубленного корыта на седловине переката. То есть, по мере сокращения или прекращения горизонтальных деформаций происходит смена знака вертикальных.

Как правило, под сезонным режимом переката понимают периодические изменения, которые происходят на перекате от половодья к межени. Однако для выявления периодических переформирований следует рассматривать сезонные деформации за ряд лет, учитывая при этом возможные изменения в условиях формирования переката, связанные с переформированиями самого русла.

Многолетние деформации перекатов Северной Двины. Условия руслоформирования на Северной Двине таковы, что перекаты преимущественно «привязаны» к определенным формам русла (узлам разветвлений, местам впадения притоков и пойменных ответвлений – проток, полоев, перегибам между смежными излучинами, чередованию сужений и расширений дна долины и т.д.),

определяющим условия их формирования и динамику, тогда как доля свободно перемещающихся перекатов невелика. Свободно перемещающиеся перекаты располагаются в ***относительно прямолинейном неразветвленном русле*** и характеризуются преимущественно направленным смещением вниз по течению в многолетнем плане. Среди них наибольшими средними скоростями продольного смещения – около 100-170 м/год, – характеризуются, расположенные в относительно прямолинейном русле вдоль коренного берега (перекат Усть-Евдский, II Ракульский, Коповский и др.); на участках относительно прямолинейного русла в пойменных берегах (Ниж. Тулгасский, Саулинский, Верх. Борисовский и другие перекаты) они характеризуются несколько меньшими скоростями смещения (70-100 м/год). Типичным примером простого (перекат-перекошенная гряда, по классификации Р.С. Чалова) свободно перемещающегося переката является Саулинский перекат (рис. 3.16); он смещается со средней скоростью 70 м/год, возрастающей в многоводные годы и снижающейся в маловодные. В многоводные годы на гребне переката образуется осередок, существующий до 7-10 лет. Полный цикл развития переката от его образования в начале участка, смещения в конец участка и последующего размыва или надвижения на относительно стабильный перекат составляет около 40 лет [Михайлова, 2014].

Смещение более сложных с точки зрения морфологии перекатов – с крупным осередком на седловине переката – сопровождается попеременным развитием то правой, то левой проток у осередка. Полный цикл переформирований составляет около 20 лет при скоростях смещения переката 120 м/год. Примером может служить Верх. Корбальский перекат.

При наличии на участках относительно прямолинейного неразветвленного русла выступов коренного берега перекаты, расположенные возле него, представляют собой относительное стабильные образования, не испытывающие продольного смещения. Деформации таких перекатов заключаются в периодическом росте и размыве одного из побочней, способствующем смещению переката вниз по течению, где он выходит из зоны влияния выступа коренного

берега и частично размывается. В некоторых случаях переформирования таких перекатов связаны с поочередным развитием побочней, то у правого то у левого берега (Абрамковский перекат).

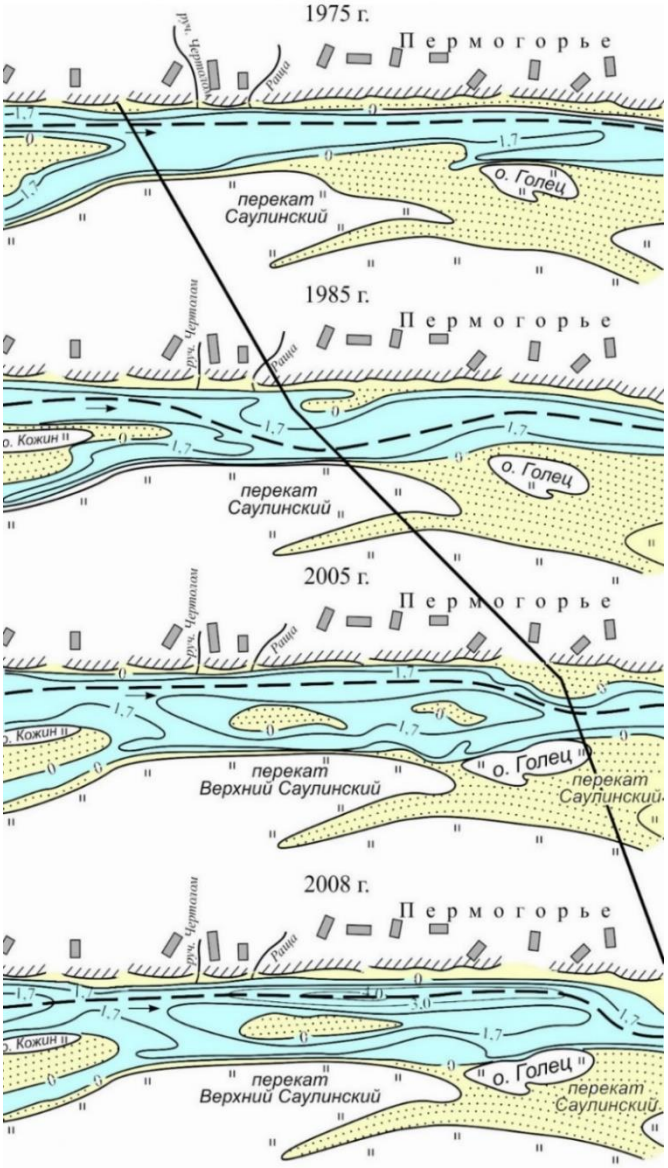


Рисунок 3.16 – Сопоставленные планы Саулинского переката [Михайлова, 2014]

В отличие от свободно перемещающихся перекатов, скорости смещения гребней «привязанных» перекатов варьируют в широких пределах от 15 до 200 м/год (Шоромско-Тоемские перекаты), а местами и значительно больших величин (Паячно-Коптельские перекаты). Поперечные деформации (миграция корыта переката, в т.ч. связанная с отторжением побочня и образованием осередка) перекатов обычно носят циклический характер, а их интенсивность зависит в основном от высоты половодья. Характер многолетних деформаций перекатов

определяется морфодинамическим типом русла, в котором они формируются, и их положением в русле относительно коренных берегов, островов, элементов излучин.

Режим деформаций ***перекатов в разветвленном русле*** Северной Двины различается в зависимости от их расположения в узлах разветвлений (на отрыве и на подходе к коренному берегу), в узлах слияния рукавов (на перевале от одного берега к другому, вдоль ведущего берега, на подходе к ведущему берегу), непосредственно в рукавах разветвлений и зависит от расположения рукава разветвления относительно русла на вышележащем участке, длины и извилистости рукава, соотношения расходов воды и наносов в смежных рукавах. Так, переход главного течения из одного рукава в другой сопровождается размывом расположенных в них перекатов (таковы Верх. Ягрышский, Ср. Шоромский, Верх. Слудский, Верх. Ростовский, Верх. Шилингский, Усть-Вагский, Карговинский, Кирпичный, Ниж. Репный).

Перекаты в узлах разветвлений, как правило, морфологически наиболее сложные, состоят из нескольких гряд. Многолетние переформирования таких перекатов проявляются преимущественно в периодическом разрастании и размыве побочней, частичном или полном перекрытии захода то в один, то в другой рукав разветвления. Нередко деформации перекатов в узлах разветвлений сопровождаются развитием осередков на их седловине.

Режим многолетних деформаций и морфология перекатов различается в зависимости от расположения их в узлах разветвления на отрыве и на подходе потока к коренному берегу. Первые состоят, как правило, из двух гряд, верхняя из которых находится на отрыве от ведущего берега выше узла разветвления, а нижняя непосредственно у оголовка острова (Верх. Усть-Курский, Верх. Красноборский, III Паячный). Переформирования таких перекатов (рис. 3.17) заключаются в смещении верхнего гребня вдоль ведущего берега со средними скоростями 30-50 м/год с образованием осередка и постепенном искривлении оси потока у оголовка острова; когда гребень достигает места отрыва потока от коренного берега, скорости смещения его увеличиваются до 100-170 м/год; при

достижении им нижнего, относительно стабильного, гребня происходит обмеление переката. Полный цикл таких деформаций составляет около 20-30 лет.

Перекаты на подходе к ведущему берегу представляют собой перекошенную гряду с развитой затонской частью (Ср. Красноборский); как правило, они более стабильны в многолетнем плане. Деформации этих перекатов проявляются в их эпизодических смещениях со скоростями 20-30 м/год, а также изменениями высоты их гребня и смещения корыта переката в верхнее положение в результате надвижения на них нижней гряды вышерасположенного переката (рис. 3.17).

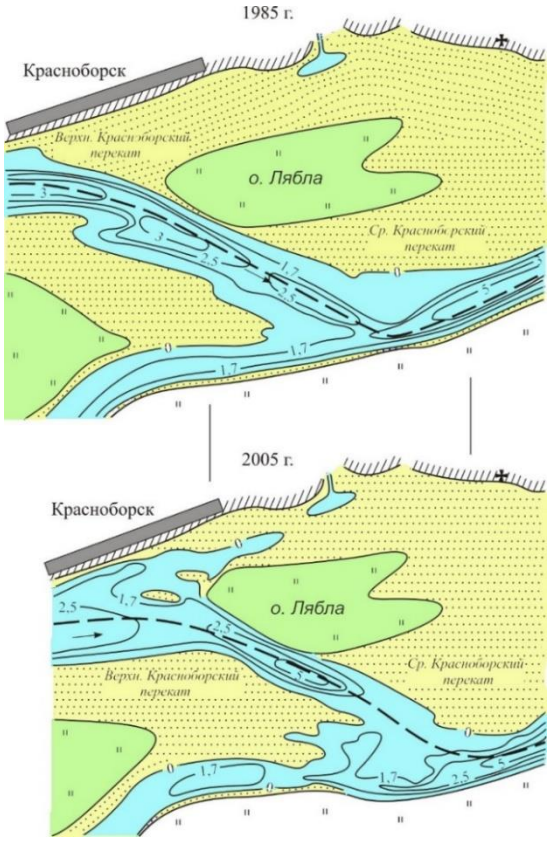


Рисунок 3.17 – Многолетние деформации Верх. и Ср. Красноборских перекатов [Михайлова, 2014]

В случае, если в узле разветвления не происходит перемещения основного потока от одного берега к другому, а бóльшая часть расхода воды сосредотачивается в одном из рукавов разветвления, переформирования перекатов, расположенных в начале рукава, заключаются в смещении их гребней со скоростями от 15 до 50 м/год и изменении положения корыта переката вследствие роста верхнего побочня у оголовка острова и обратно; в отдельные годы возможно

формирование осередка на седловине. Полный цикл переформирований перекатов составляет 50-60 лет.

Переформирования перекатов в рукавах разветвлений (перекат Тулгасские гряды) характеризуются чередованием периодов стабилизации и интенсивного смещения (до 200 м/год) в периоды, соответственно, пониженной и повышенной водности как реки в целом, так и самого рукава.

На перекатах, расположенных в узлах слияния рукавов (рис. 3.18), в многолетнем плане происходит удлинение косы в ухвостье острова и смещение корыта переката из верхнего положения в нижнее; часто этот процесс сопровождается отчленением части косы и образованием осередка на гребне переката (за исключением перекатов на подходе в коренному берегу). В периоды повышенной водности при прочих равных условиях происходит углубление корыта переката в нижнем положении за счет спрямления динамической оси потока; в периоды пониженной водности стрежень потока искривляется, и корыто переката закрепляется и углубляется в верхнем положении. Кроме того, на рост косы и изменение положения корыта переката оказывает влияет надвижение на перекат гряд расположенных в рукаве выше по течению, а также направляющее воздействие коренного берега рукава.

Переформирования перекатов в узлах слияния рукавов характеризуются относительно низкими скоростями. Скорости смещения гребней перекатов в узлах слияния рукавов на перевале от одного берега к другому (например, Кургоменский перекат) не превышают 15-30 м/год; полный цикл переформирований, связанных с изменением положения корыта переката составляет 35-40 лет. Более стабильны в многолетнем плане перекаты на подходе к ведущему берегу (перекат Лябла); скорости смещения гребней таких перекатов составляют около 20 м/год. В отличие от перекатов на перевале и при подходе к ведущему берегу, перекаты, расположенные вдоль него в узлах слияния рукавов (Ниж. Борисовский перекат – рис. 3.18), могут состоять как из одной, так и из двух гряд, верхняя из которых формируется в результате надвижения гряды с вышерасположенного переката, нижняя располагается на стрелке при слиянии рукавов. Из всех перекатов в узлах

слияния рукавов эти являются наиболее динамичными в многолетнем плане; скорости смещения гребней их составляют 30-50 м/год, а полный цикл переформирований – 20-25 лет. Разновидностью перекатов вдоль ведущего берега являются перекаты-косы (Ниж. Телеговский, Волонковский, Ниж. Селецкий), возникающие при слиянии близких по водности рукавов. Вытягиваясь со средней скоростью около 100 м/год, косы частично размываются.

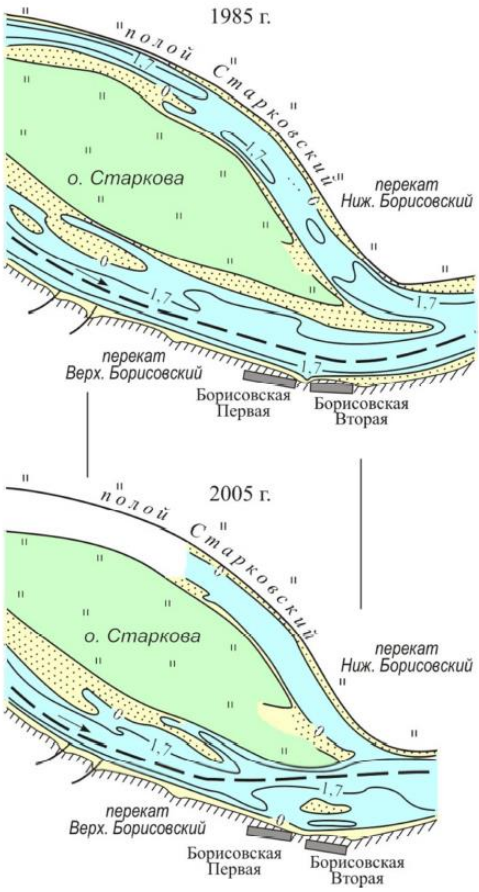


Рисунок 3.18 – Многолетние деформации Ниж. Борисовского переката [Михайлова, 2014]

Режим перекатов ***на излучинах*** заключается в смещении корыта переката от верхнего побочня к нижнему, где оно попадает под влияние циркуляционных течений [Чалов, 2011] и быстро заносится. Часто этот процесс сопровождается образованием осередка на седловине переката. Полный цикл изменения положения корыта перекатов на верхних крыльях свободных пологих излучин (IV Шиловский, Ниж. Церковницкий, Верх. Усть-Евдский, Кодимский) составляет от 40 до 60 лет. Переформирования перекатов в нижних крыльях излучин (Кабельный, Кокса, III Шиловский) интенсифицируются в периоды повышенной водности (скорости

смещения их гребней достигают 200-300 м/год) и замедляются в периоды пониженной водности. Относительной стабильностью в многолетнем плане характеризуется единственный перекат, расположенный в вершине Толоконской излучины на Северной Двине.

Своеобразными особенностями режима переформирований отличаются ***перекаты-россыпи*** (Паячно-Коптельские перекаты, Верх. и Ниж. Усть-Вагские), состоящие из большого числа гряд, беспорядочно расположенных в русле. Перекаты этого типа формируются при несовпадении направлений пойменного и руслового потоков, большого стока наносов, распластывания потока. Многолетние деформации этих перекатов заключаются в интенсивном смещение гряд – элементов переката-россыпи – друг относительно друга со средними скоростями до 300 м/год при полном смещении на расстояние полной длины гряды в течение 1-3 лет, их дальнейшим размывом или объединением друг с другом, либо причленением к берегам, островам или прирусловым отмелям. При этом положение самой россыпи остается неизменным.

Сезонный режим перекатов Северной Двины. Как река со слабоустойчивым руслом, Северная Двина характеризуется большими темпами сезонных деформаций перекатов. ***Горизонтальные деформации*** проявляются в поперечных и продольных изменениях положения элементов переката (побочней, корыта) в течение одного гидрологического года.

По характеру поперечных деформаций перекаты на Северной Двине можно разделить на три группы:

- с изменяющимся положением корыта переката, отторжением нижней части верхнего побочня и образованием осередка, который впоследствии причленяется к нижнему побочню или размывается (Кургоменский, Шидровский и Ниж. Усть-Курский, Ниж. Канзский перекаты) (рис. 3.19, А);
- со смещением корыта переката от верхнего побочня к нижнему или в результате изменения положения динамической оси потока (III Паячный перекат), либо, при наличии осередка, переходом основного течения из одной протоки у

осередка в другую (Верх. Ягрышский, Верх. Рубежский перекаты) внутри одного сезона в годы с повышенной водностью (рис. 3.19, Б);

- отличающиеся сужением (стеснением) корыта переката, сильным искривлением оси потока (положение корыта перпендикулярно берегам) при его относительно стабильном положении в плане из-за встречного роста обоих побочней (ухвостья верхнего и приверха нижнего) или одного из них (Верх. и Ниж. Липовецкие перекаты) (рис. 3.20).

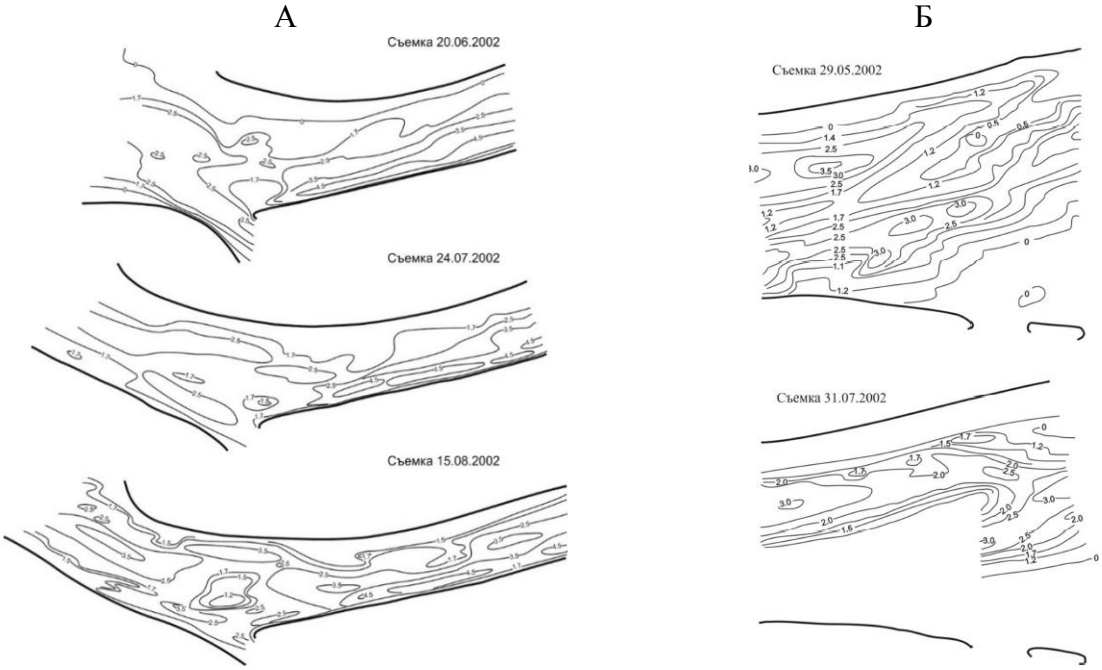


Рисунок 3.19 – Сопоставленные планы Ниж. Канзского (А) и III Паячного (Б) перекатов

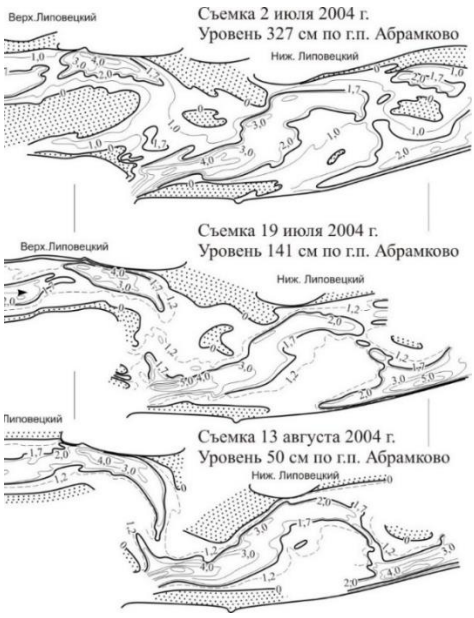


Рисунок 3.20 – Сезонные переформирования Верх. и Ниж. Липовецких перекатов [Русловые процессы…, 2012]

Продольные деформации перекатов заключаются в смещении гребней в период половодья регрессивно (вверх против течения), на спаде половодья и в межень преимущественно трансгрессивно (вниз по течению) (рис. 3.21).

В период половодья вся гряда переката смещается вниз по течению с аккумуляцией на верховом (напорном) склоне. Этот процесс может сопровождаться регрессивным отступанием низового откоса гряды (подвалья) из-за его частичного размыва вследствие возникающего здесь дефицита наносов (их аккумуляции на верховом склоне) (рис. 3.21, Б). Во время спада половодья и межень, когда поток сосредотачивается в пределах седловины переката, может наблюдаться как трансгрессивное (рис. 3.21, А), так и регрессивное смещение гребня переката. Верховой склон в пределах «активной» зоны размывается – формируется корыто переката, а продукты размыва аккумулируются в подвалье, обусловливая смещение гребня вниз по течению; в это время перекат представляет собой водослив с широким порогом. Однако может наблюдаться и регрессивный размыв переката, когда он размывается по типу оврага.

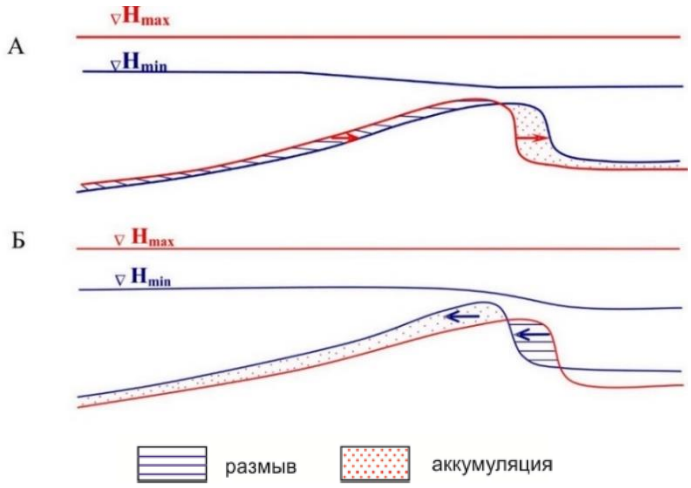


Рисунок 3.21 – Схема продольного смещения гребня переката: А – трансгрессивного, Б – регрессивного [Михайлова, 2014]

На Северной Двине выделяются как подвижные перекаты с большими скоростями смещения (до 19 м/сут), расположенные в русле вдоль ведущего берега и на отрыве от него, так и малоподвижные, расположенные на подходе потока к высокому берегу и перед сужением русла в пойменных бровках; скорости их

смещения не превышают 6–7 м/сут (Ср. и Ниж. Ягрышские, Тулгасский) (табл. 3.15).

Таблица 3.15 – Скорости смещения гребней перекатов Северной Двины, находящихся в различных условиях формирования

Расположение переката	Средняя скорость смещения за многолетний период, м/сут	Горизонтальные деформации			
		на спаде половодья		в межень	
		направление смещения	скорость, м/сут	направление смещения	скорость, м/сут
Вдоль ведущего берега	0,5-12	Трансгрессивное	1-7	Трансгрессивное	0,5-12
		Регрессивное	1,5-11	Регрессивное	~8
На отрыве от ведущего берега	1-19	Трансгрессивное	1,5-19	Трансгрессивное	2-15
		Регрессивное	3	Регрессивное	~2
Разветвленное русло	1-10	Трансгрессивное	1-9	Трансгрессивное	~8
		Регрессивное	1		
На подходе к ведущему берегу	0,5-6	Трансгрессивное	0,5-4	Трансгрессивное	2-6
Сужение дна долины или русла в пойменных берегах	1-3	Трансгрессивное	1-3	Трансгрессивное	2

Внутригодовое распределение скоростей смещения гребней неравномерное и зависит от изменения водности от половодья к межени (со снижением уровня воды скорости смещения уменьшаются) и интенсивности изменения уровня воды. Такого рода зависимости (рис. 3.22), будучи различными на перекатах в зависимости от их расположения в русле, хорошо выражены в многоводные и средние по водности годы [Михайлова, Львовская, 2013].

Для *перекатов на отрыве потока от коренных берегов*, как правило от правого (рис. 3.22, А), характерны прямые линейные связи скорости смещения гребня в обоих направлениях. Для трансгрессивного смещения скорости минимальны при малой интенсивности изменения уровня (в межень) и максимальны (6–8 м/сут) при высокой (на спаде половодья); обратное соотношение характерно при регрессивном смещении. Если такие перекаты расположены в начале расширения русла в пойменных берегах и перед крупными разветвлениями, то скорости продольного смещения гребня для них в целом ниже (до 3–5 м/сут). С увеличением интенсивности изменения уровня до 10 см/сут скорости смещения как трансгрессивного, так и регрессивного возрастают, но затем снижаются на пике половодья (рис. 3.22, Б). Очевидно, такое изменение зависимостей связано с

рассредоточением потока половодья ниже перекатов, что влияет на изменение транспортирующей способности потока.

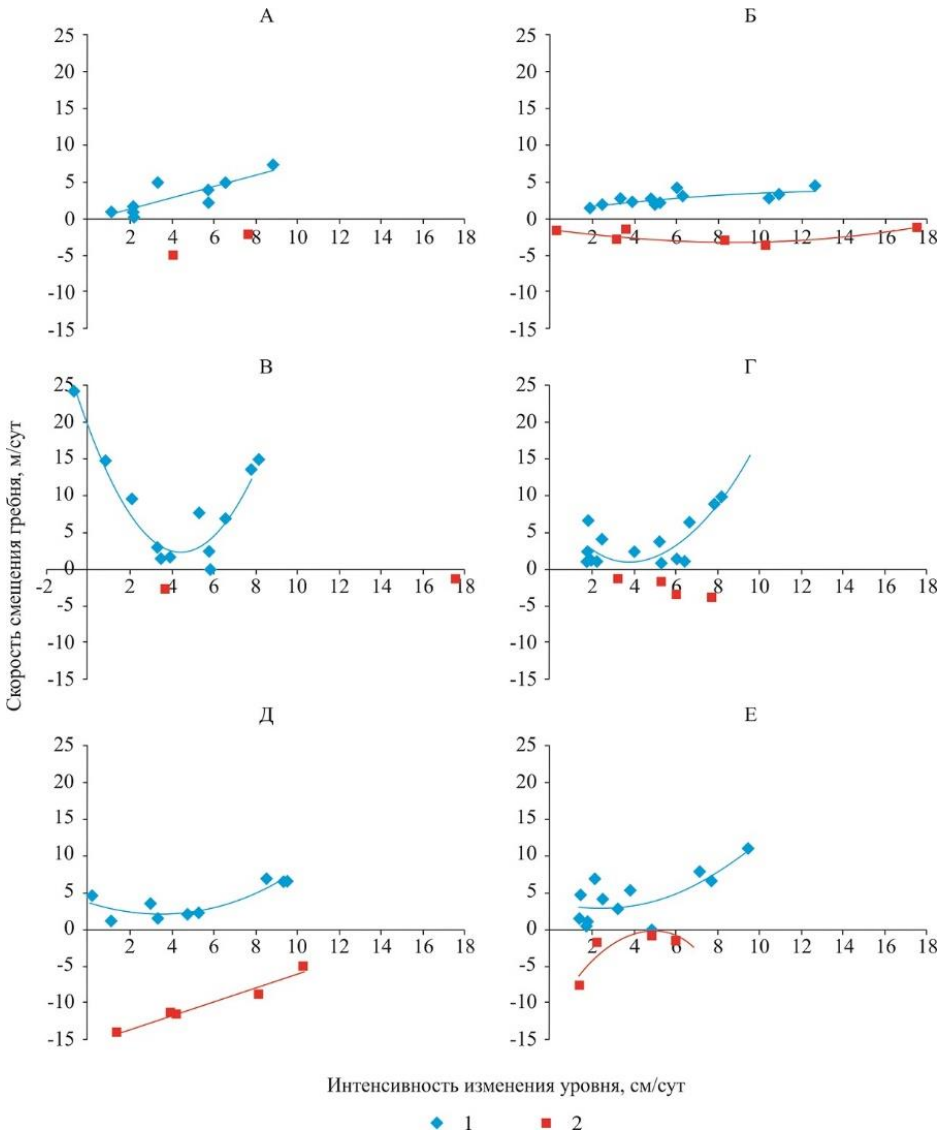


Рисунок 3.22 – Зависимости скоростей смещения гребней перекатов от интенсивности изменения уровня воды при их положении: А, Б – на отрыве потока от ведущего берега, В, Г – на подходе потока к ведущему берегу, Д, Е – в узлах разделения и слияния рукавов; 1 – трансгрессивное, 2 – регрессивное [Михайлова, Львовская, 2013]

Перекаты на подходе потока к высокому берегу (рис. 3.22, В), в т.ч. *в рукавах крупных разветвлений* (рис. 3.22, Г), характеризуются крутой параболической зависимостью скоростей трансгрессивного смещения гребней, при которой минимальные скорости смещения (2–4 м/сут) соответствуют интенсивности изменения уровня 4–5 см/сут в фазу перехода от половодья к межени. Максимальные скорости (10–15 м/сут) наблюдаются в глубокую межень и на пике половодья при минимальной (менее 2 см/сут) и максимальной (около 8 см/сут)

интенсивности изменения уровня. Первые соответствуют условиям возникновения наибольшего продольного уклона водной поверхности над гребнем переката, вторые – интенсивной аккумуляции наносов на перекате во время половодья при несовпадении направлений руслового и пойменного потоков и подпоре потока от набегания на препятствие (коренной берег или остров). Скорости регрессивного смещения гребней малы и слабо изменяются во всем диапазоне изменения уровней.

Для *перекатов при разделении русла на рукава* (рис. 3.22, Д) и *слиянии рукавов* (рис. 3.22, Е) характерны меньшие скорости трансгрессивного смещения гребней при интенсивности изменения уровня 4 см/сут. При этом они уменьшаются на спаде половодья от 10 до 1–1,5 м/сут. В межень скорости продольного смещения гребней несколько увеличиваются.

В узлах разделения русла на рукава регрессивное смещение перекатов (аккумуляция наносов на верховом склоне) описывается обратной линейной зависимостью: скорости смещения максимальны в межень (уровни колеблются незначительно) и минимальны в половодье. Очевидно, это связано с изменениями наносоотсасывающей роли рукавов в разные фазы режима.

Вертикальные деформации перекатов (соответствуют изменению отметок дна) проявляются в изменении высоты гряды $h_г$ в зависимости от глубины потока h [Кондратьев и др., 1982]. Для Северной Двины установлена [Михайлова, Львовская, 2013; Михайлова 2014] линейная связь высоты гряды на стрежне с глубиной русла (рис. 3.23), изменяющейся при колебании уровней, которые отражаются в изменении величины срезки ΔH, т. е. $h_г = f(h, \Delta H)$. Коэффициент a этой линейной зависимости увеличивается с ростом срезки (табл. 3.16).

При прочих равных условиях высота гряды $h_г$ увеличивается с ростом глубины потока h, что отражает условия аккумуляции наносов на верховом склоне переката в период половодья и, наоборот, его размыв в межень.

Установлено также, что при одной и той же глубине потока соотношение $h_г/h$ закономерно уменьшается с ростом срезки и, соответственно, уровня воды (табл. 3.17). То есть аккумуляция на верховом склоне переката замедляется с ростом уровней воды.

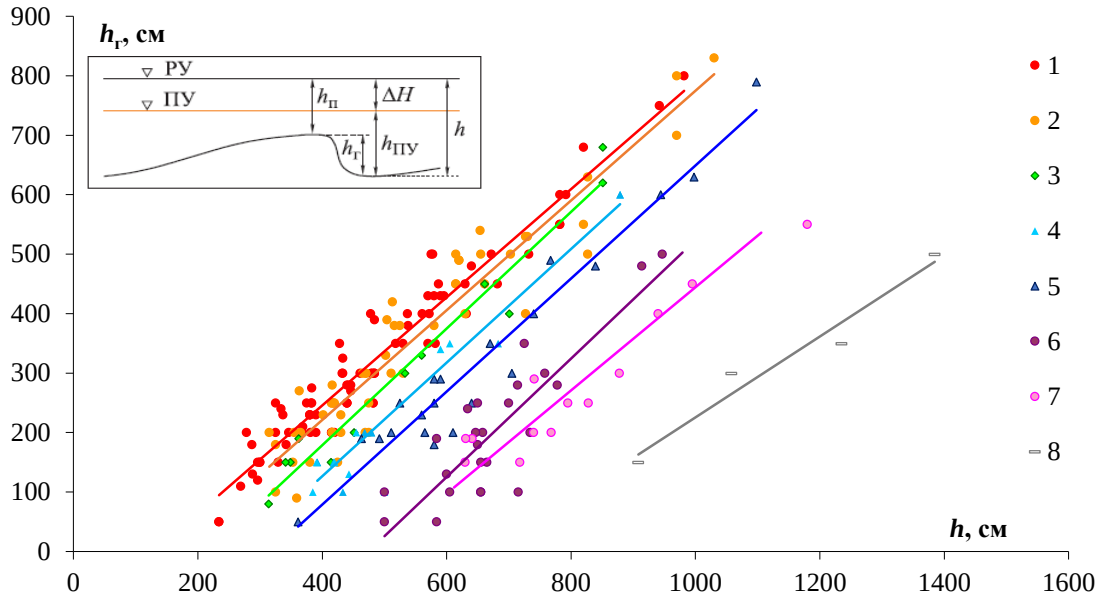


Рисунок 3.23 – Зависимость высоты гряд перекатов $h_г$ от глубины потока h на Северной Двине при различной срезке ΔH: 1 – менее 0 см; 2 – от 0 до 30 см; 3 – от 30 до 60 см; 4 – от 60 до 140 см; 5 – от 140 до 210 см; 6 – от 210 до 330 см; 7 – от 330 до 400 см; 8 – более 400 см. На врезке – схема соотношения высоты гряды $h_г$ и глубины потока в нижней плесовой лощине при наблюдаемом (рабочем) уровне (РУ) h, при проектном уровне (ПУ) $h_{ПУ}$; ΔH – срезка уровня; $h_п$ – глубина потока на перекате [Михайлова, Львовская, 2013]

Таблица 3.16 – Коэффициенты зависимости высоты гряды $h_г$ от глубины потока h на Северной Двине при различной срезке ΔH

№ (соответствует нумерации на рис. 3.23)	ΔH	k	a	R
1	<0	0,91	-118	0,93
2	0-30	0,92	-148	0,95
3	30-60	0,98	-214	0,98
4	60-140	0,96	-256	0,99
5	140-210	0,95	-301	0,97
6	210-330	-1,00	-472	0,84
7	330-400	0,87	-423	0,91
8	>400	0,68	-454	0,98

Таблица 3.17 – Соотношение $h_г/h$ в зависимости от глубины потока h и срезки ΔH

h	400	600	800	1000	1200
ΔH	$h_г/h$	$h_г/h$	$h_г/h$	$h_г/h$	$h_г/h$
<0	0,61	0,69	0,76	0,79	–
0-30	0,55	0,68	0,74	0,78	–
30-60	0,45	0,63	0,71	0,77	–
60-140	0,31	0,52	0,63	0,69	–
140-210	0,20	0,46	0,58	0,65	–
210-330	–	0,21	0,39	0,52	–
330-400	–	–	0,34	0,45	–
>400	–	–	–	0,23	0,30

ГЛАВА 4. РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ И ЕГО СВЯЗЬ С ИЗМЕНЕНИЯМИ ВОДНОСТИ

4.1 Факторы переформирования русел за историческое время

Переформирования русел определяются рядом факторов, объединяемых в группы естественных и антропогенных, причем на русло воздействуют одновременно обе группы факторов. При этом антропогенные, с одной стороны, усиливают или, наоборот, сокращают темпы и масштабы естественных русловых деформаций, с другой, видоизменяют морфометрические характеристики русла вследствие механического воздействия и регулирования стока воды и наносов, и через них изменяя русловой режим реки. К естественным факторам относятся связанные с климатом, изменения которого вызывают колебания водности, условия прохождения руслоформирующих расходов воды и сток наносов. Антропогенные факторы могут быть косвенными (распашка земель или вырубка лесов, изменяющая условия стока воды и наносов с водосбора), и прямые (карьерные выемки грунта, разработка прорезей и т.д.) [Беркович, 2001]. Создание водохранилищ воздействует на русло реки, одновременно изменяя ее водный режим, морфологию самого русла и направленность русловых деформаций.

Переформирования русел рек Севера ЕТР рассматриваются как условно естественные с ненарушенным гидрологическим и русловым режимами. Условность такого состояния связана с тем, что в течение XX века и особенно его 2-й половины Северная Двина и Вычегда подвергались масштабным антропогенным нагрузкам, связанным с регулированием русел для обеспечения водных путей: проводилась разработка дноуглубительных прорезей, строительство дамб, полузапруд, перекрывающих полностью или частично несудоходные рукава, укрепление берегов от размыва [Русловые процессы…, 2012], то есть переформирования русел этих рек проходили не только под влиянием факторов природной среды, но на фоне антропогенных воздействий на русла. Однако эти воздействия основывались преимущественно на выявленных закономерностях руслового режима и не изменяли морфодинамику русла, вследствие чего русла рек

сохранились как природные объекты, а русловым процессам «задавалась» такая направленность развития, которая закрепляла морфологию русла в оптимальном положении в отношении использования и эксплуатации реки при опасном их проявлениях. С 90-х годов XX в. в связи с общим экономическим кризисом, регуляционные работы на реках были прекращены, и лишь на Северной Двине (от слияния с Вычегдой до устья Ваги) продолжались в минимальных объемах, вследствие этого русла вернулись к своему естественному состоянию. Русла Печоры и Мезени на протяжении того же временного периода (2-я половина XX века) подвергались лишь эпизодическим дноуглубительным и выправительным работам. Определенное воздействие на русла рек оказывал также сплав леса (рис. 4.1), особенно в связи с сооружением крупных запаней. Кроме того, при сплаве в русло попадает много плывущей древесины (бревен), которая местами способствует разрушению берегов или, задерживаясь, образует препятствия для нормального движения потока.

Согласно проведенному исследованию [Беркович, 2001] степени антропогенного воздействия на реки и интегральной оценке его негативного проявления для рек Севера ЕТР – Северной Двины, Вычегды, Мезени и Печоры характерна слабая экологическая напряженность, при которой механическому изменению подвержено менее 25% длины рек, отсутствует регулирование их стока. С учетом положительных эффектов дноуглубления такая оценка представляется завышенной; зачастую отрицательные последствия имеют естественные переформирования русел, происходящие без антропогенных вмешательств. Таков, например, «уход» Северной Двины от райцентра Верхняя Тойма, который, благодаря, смещению ухвостья островного массива, создающего параллельно-рукавное разветвление, оказался в относительно мелководном затоне, и теперь подход к пристани поддерживается только интенсивным землечерпанием. То же самое произошло в конце 1-го десятилетия XXI века в районе Котласа, где из-за размыва левого берега основной поток реки перешел в левый рукав «дельтового» разветвления, оставив «вне транзита» речной вокзал и ряд причалов. Если бы здесь своевременно были выполнены работы по управлению русловыми процессами,

подобное не произошло бы. Таким образом, именно прекращение антропогенного воздействия на реки привело к отрицательным последствиям и экологической напряженности для условий жизни и деятельности людей.

А

Б

Рисунок 4.1 – Сплав леса: А – на Северной Двине (*фото автора*) и Б – Вычегде (*фото С.Н. Рулевой*)

Из-за различий в морфологии и условиях формирования русел по длине рек, антропогенных воздействий, их переформирования на разных участках отличаются большим разнообразием, причем русловые деформации произошли практически на всем протяжении рек: каждый нижерасположенный участок развивается сопряженно с вышерасположенным. Поэтому переформирования русел этих рек требуют детального рассмотрения в пределах морфологически однородных участков. Правда на реках встречаются участки, где деформации за

рассматриваемый период не были зафиксированы, и в ретроспективном анализе описание их не приводится. Наибольшей протяженностью участков относительно устойчивого русла характеризуется Печора, где переформирования происходили преимущественно в пределах отдельных узлов разветвлений или участков разветвленного русла, единичных излучин.

Переформирования русел рек Севера ЕТР определяются как сменой коротких периодов пониженной и повышенной водности (от сезонных колебаний до нескольких лет), так и более продолжительных (десятки лет и более). Кратковременные колебания, вызывающие периодические переформирования русел рек, накладываются на относительно более продолжительные маловодные и многоводные периоды, которые, в свою очередь, отвечают за направленные тенденции в русловых деформациях.

4.2 Северная Двина

Устье Вычегды – с. Ягрыш (620-479 км). На Северной Двине в узле слияния с Вычегдой (*620-608 км*) сформировалось *дельтовое разветвление* (рис. 4.2). Его переформирования связаны с ростом и частичным отторжением косы на стрелке, вследствие чего изменяется положение основного течения у о. Пустого. За последние 100 лет это привело к общему смещению узла слияния на 2 км вниз по течению. На это накладывает отпечаток смещение побочня на устьевом участке Вычегды. В частности, с конца 1980-х гг. размыв левобережного вычегодского побочня способствовал развитию правой протоки у о. Пустого. Полный цикл переформирований русла при слиянии рек составляет 40-50 лет. При этом положение основного потока слева от о. Пустого соответствует периоду пониженной водности; с началом многоводного периода начинает развиваться правая протока, куда к концу многоводного периода перемещается основное течение реки.

Интенсивное удлинение стрелки в маловодный период 1960-1970-х гг. сопровождалось отступанием левого берега Северной Двины на 350 м, т.е. скорость его размыва составляла 10 м/год. Одновременно возле правого берега ниже устья

Вычегды происходит аккумуляция наносов – рост Рыбацких песков. Последующее смещение правобережного побочня в устье Вычегды и развитие левого рукава у о. Пустого сопровождается прекращением размыва левого берега. Затем процесс повторяется; период переформирований составляет 20-25 лет.

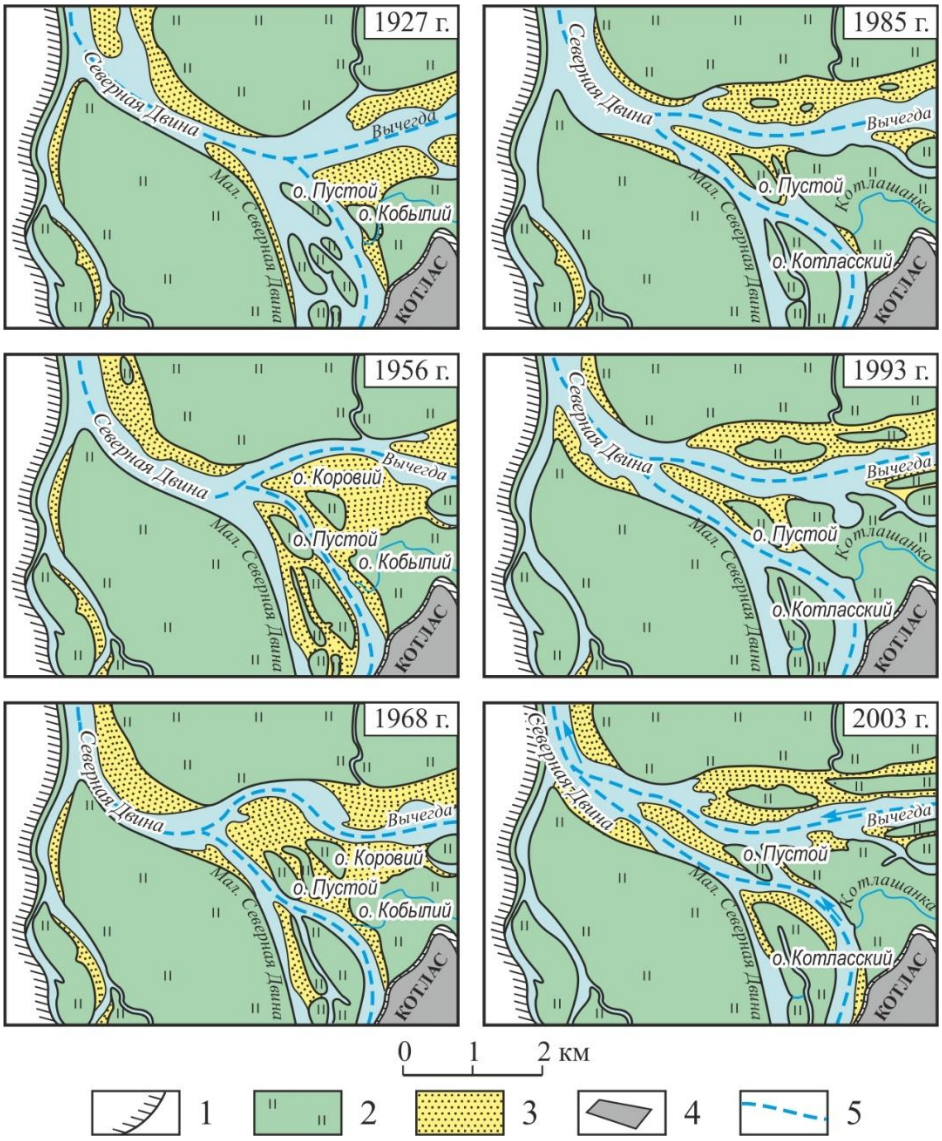


Рисунок 4.2 – Переформирования дельтового разветвления в узле слияния Северной Двины и Вычегды и относительно прямолинейного русла: 1 – коренной берег; 2 – пойма; 3 – побочни и осередки; 4 – населенные пункты; 5 – судовой ход [Русловые процессы…, 2012]

Существенные изменения произошли в *одиночном разветвлении на 605-595 км*, в настоящее время образованным о. Марковским (рис. 4.3). Разветвление расположено за плечом левого коренного берега, отклоняющего поток в сторону правобережной поймы. Огибая острова, основной поток возвращается к левому берегу. Вогнутость левого берег заполнена небольшими пойменными

безымянными и Туровецкими островами, между ними и о. Марковским проходит второй, относительно маловодный рукав разветвления. В XVIII-XIX вв. в группу островов, создающих одиночное разветвление, входил также о. Песчанский, а современный правый рукав являлся левым; острова Марковский и Туровецкий в то время составляли единый левобережный пойменный массив, расчлененный пойменными протоками – полоями.

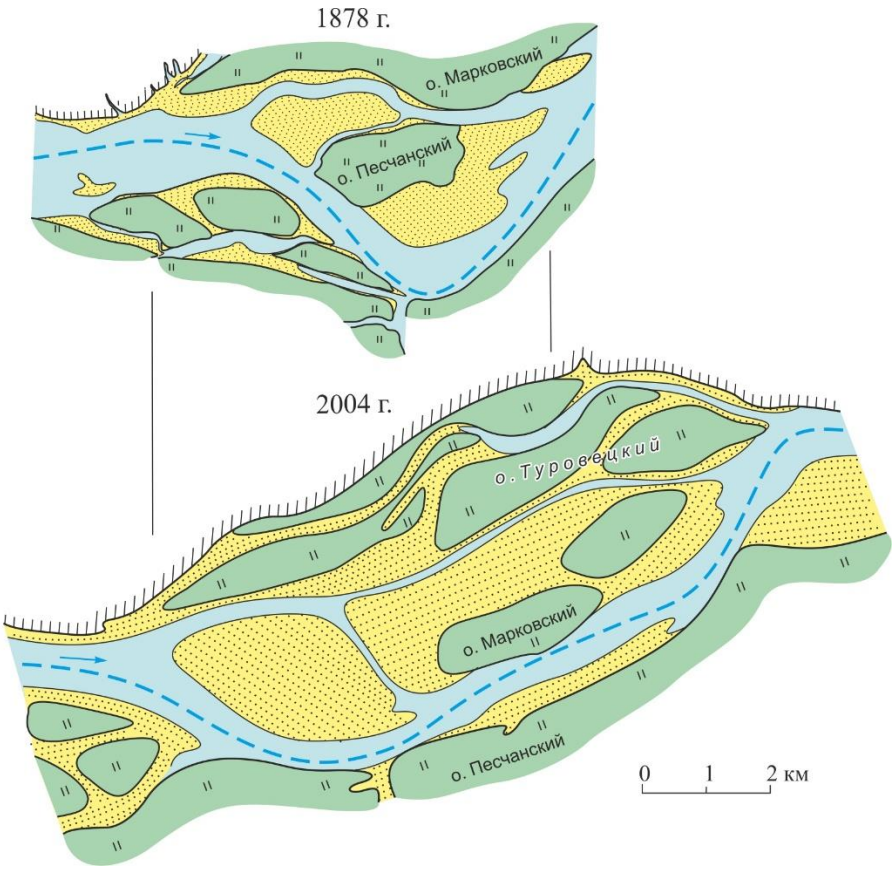


Рисунок 4.3 – Переформирования русла в пределах Марковско-Туровецкого разветвления (605-595 км) [Русловые процессы…, 2012]

В 1870-е гг. одиночное разветвление было образовано о. Песчанским, в котором главным по водности был правый рукав, который образовывал излучину со степенью развитости *l/L*=1,46. Последующее искривление рукава привело к тому, что основное течение переместилось в более прямой левый рукав, что совпало с многоводным периодом на реке. Бывший главный рукав обмелел и превратился в верхнюю часть пойменной протоки – Песчанского полоя, а остров вошел в состав правобережной поймы. Одновременно в системе левобережных пойменных проток развивался рукав между островами Марковским и Туровецким,

что привело к восстановлению одиночного разветвления. С середины 1950-х гг. и до настоящего времени правый рукав у о. Марковского является главным, чему способствовали дноуглубительные работы на перекатах в этом рукаве. В естественном состоянии в периоды пониженной водности активизируется левый рукав, в многоводные – правый. При отсутствии дноуглубительных работ такие переформирования могли приводить к периодическому развитию обоих рукавов в соответствии с продолжительностью маловодных и многоводных циклов, которые с 1920-х годов сменяли друг друга в среднем каждые 20-25 лет.

В *одиночном разветвлении* (*588,5-581 км*), образованном о. Канзским, в конце XVIII века главным был левый рукав, в начале многоводного периода конца XIX века – правый; в 1940 г. в маловодный период водность обоих рукавов была примерно одинаковой, с 1950-х гг. главным рукавом стал левый, проходящий вдоль коренного берега, чему способствовали дноуглубительные и выправительные работы. Полный цикл перемещения основного течения из одного рукава в другой составлял от 30 до 70 лет. Таким образом, в естественном состоянии в годы с повышенной водностью основной поток перемещался от ведущего берега в более прямой правый рукав, в маловодные он возвращался в левый рукав вдоль коренного берега, и это положение было искусственно закреплено.

На *581-567 км* за последние 300 лет произошло самое масштабное переформирование русла на Северной Двине [Каргаполова, 2006]. Сейчас русло на этом участке представлено *односторонними разветвлениями*, образованными островами Лобановским, Ср. Телеговскими, Кузнецовским и другими меньших размеров (рис. 4.4). На 581-559 км во второй половине XVIII в. русло подходило к правому террасовому берегу, формируя большую сегментную излучину со степенью развитости l/L=1,67. Повышенная водность конца XIX в. способствовала возникновению в шпоре излучины спрямляющей протоки, в которую в начале XX в. на фоне продолжительного многоводного периода переместилось основное течение реки, сократив длину русла с 25 до 15 км. В новом русле в левой части дна долины сформировалось сопряженное разветвление из двух звеньев.

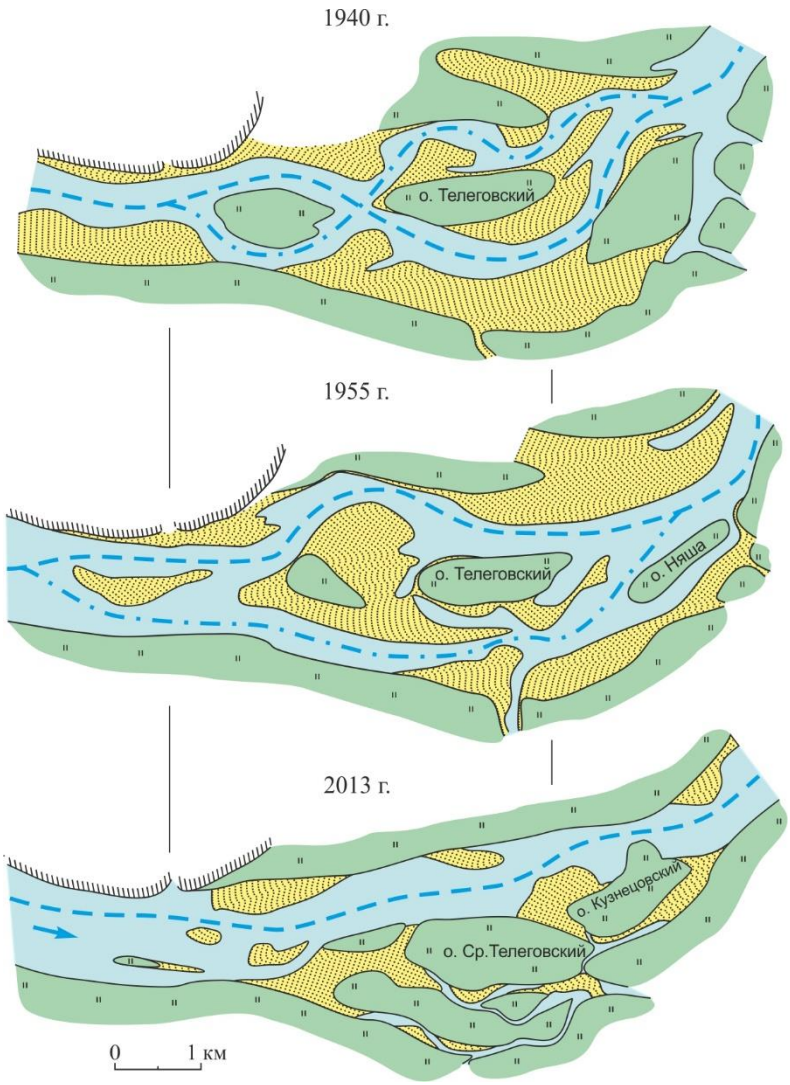


Рисунок 4.4 – Трансформация разветвленного русла на участке 581-561 км: 1940 г. – сопряженные, 1955 г. – одиночное, 2013 г. – односторонние разветвления

У о. Верх. Телеговского, образовывавшего верхнее звено сопряженных разветвлений (рис. 4.4), в конце XIX в. главным рукавом являлся правый. В начале XX столетия основной поток перешел в левый рукав, правый обмелел и к середине века стал частью Песчанского полоя. С этого времени основной поток реки следует вдоль левого коренного берега, а сопряженные разветвления трансформировались в одиночное, представленное о. Ср. Телеговским и ранее составлявшего нижнее звено сопряженных разветвлений. Во вновь сформировавшемся одиночном разветвлении развитие то левого, то правого рукава осуществлялось каждые 5-10 лет под влиянием периодически надвигающихся побочней [Чалов, 1979]. В 1950-е гг. благодаря крупным выправительным работам положение главного течения реки было закреплено в левом рукаве; т.к. правый рукав был перекрыт полузапрудами,

основной поток стал устойчиво располагаться в левом рукаве. Таким образом, произошло изменение типа разветвления: сначала естественным путем сопряженные разветвления с периодическим развитием рукавов трансформировались в одиночное, а затем во второй половине XX в. – в односторонние как следствие выправительных работ.

Вписанная излучина на *526-518,5 км* (рис. 4.5) имеет степень развитости *l/L*=1,21, радиус кривизны *r*=3,6 км. В привершинной части ее поток прижимается к 40-метровому уступу террасы – Толоконной горе (рис. 4.6, А). В XIX в. на этом участке существовали острова, разделяющие поток на два рукава, левый из которых, очевидно, являлся более многоводным, уступ террасы был отделен от русла узкой поймой. К 1878 г. излучина имела радиус кривизны *r* = 9,8 и степень развитости *l/L*=1,14. Пойма была размыта и к 1940 г. правый берег, образованный Толоконной горой, отступил на 335 м; скорость размыва в этот период составила 5,4 м/год, что почти в 3 раза меньше современного значения (табл. 4.1). Сосредоточению потока вдоль уступа Толоконной горы, образующей вогнутый берег излучины, способствовали переформирования излучины, расположенной непосредственно выше по течению, ее искривление и продольное смещение, обеспечивающие направление потока к Толоконной горе. Наиболее интенсивный размыв Толоконной горы происходил в периоды пониженной водности (40-е гг. XX в.; 2000-е – нач. 2010-х гг.) (табл. 4.1). Фронт размыва на протяжении XVIII – начала XXI вв. сокращался и в настоящее время имеет протяженность 2,5 км (табл. 4.2, рис. 4.6, Б). В первой половине XX в. параметры излучины изменялись (табл. 4.2) *l/L* от *1,21* до *1,3; r* за период с 1955 до 2013 г. возрос с 3,3 до 3,7.

Благодаря интенсивному размыву Толоконной горы в реку поступает огромное количество наносов: около 1,4 млн м^3 в год, что составляет примерно 1,9 млн тонн/год при общем объеме стока наносов по г.п. Абрамково около 2 млн тонн. За 1955-2004 гг. в реку ежегодно поступало 264 тыс. м^3/год или примерно 370 тыс. тонн/год, т.е. 18,5% от общего стока наносов.

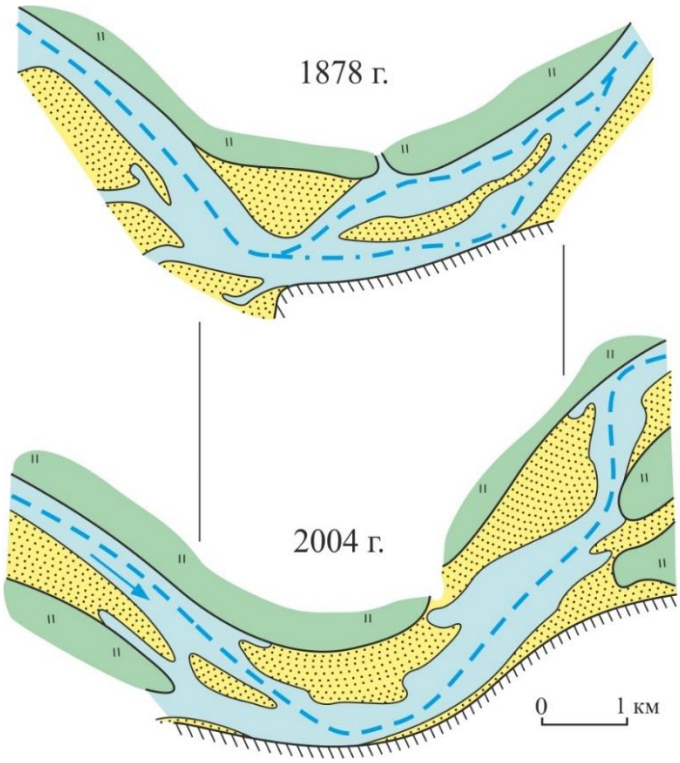


Рисунок 4.5 – Переформирования вписанной излучины (Толоконная гора) на 531-518,5 км [Русловые процессы…, 2012]

Таблица 4.1 – Изменение характеристик размыва Толоконной горы с 1878 по 2013 гг.

Годы	Протяженность фронта размыва на начало периода, км	Смещение границ фронта размыва	Величина максимального отступания, м	Скорость максимального размыва за период, м/год	Отклонение водности периода от Q_0, %
1878-1940	4	Верхней – на 1123 м вниз Нижней – на 450 м вниз	335	5,4	+3%
1941-1955	3,5	Нижней – на 1100 м вверх	120	8	-5%
1956-1975	3,3	–	65	3	+10%
1976-2004	3,3	Нижней – на 900 м вверх	49	2	+7%
2005-2013	2,4	–	125	14	-5%

Примечание: Q_0 – средний многолетний расход воды за весь период наблюдений по г.п. Усть-Пинеге

Таблица 4.2 – Изменение основных параметров Толоконной излучины

Год	*r*	*l/L*
1878	9,8	1,14
1940	3,3	1,3
1955	3,7	1,21
1975	3,3	1,23
2004	3,3	1,22
2013	3,6	1,21

А

Б

Рисунок 4.6 – А – Толоконная гора (*фото автора*); Б – изменение положения фронта размыва на космическом снимке 2013 г.

Разветвлено-извилистое русло (518,5-511 км) представлено Ботовской излучиной, шпору которой составляют острова Мал. и Бол. Ботовские (рис. 4.7). За последние 120 лет эта излучина из сегментной пологой превратилась в крутую: в 1878 г. ее степень развитости *l/L*=1,29, в 2000 г. – *l/L*=1,7; одновременно увеличивалась водность спрямляющих проток, что отразилось в снижении скорости размыва левого пойменного берега: 3 м/год при 6 м/год ранее. В 2000-е гг. произошло спрямление излучины по Ботовской протоке. Одновременно развитие спрямляющих проток через шпору Ботовской излучины способствовало активизации Луковецкого полоя – левой пойменной протоки в нижнем крыле излучины. К началу XXI в. на фоне многоводного периода водность Луковецкого полоя увеличилась, и в нем сосредоточился основной поток, окончательно отделив о. Прутняк от левобережного пойменного массива. В результате на *511-506,5 км* образовалось *одиночное разветвление*.

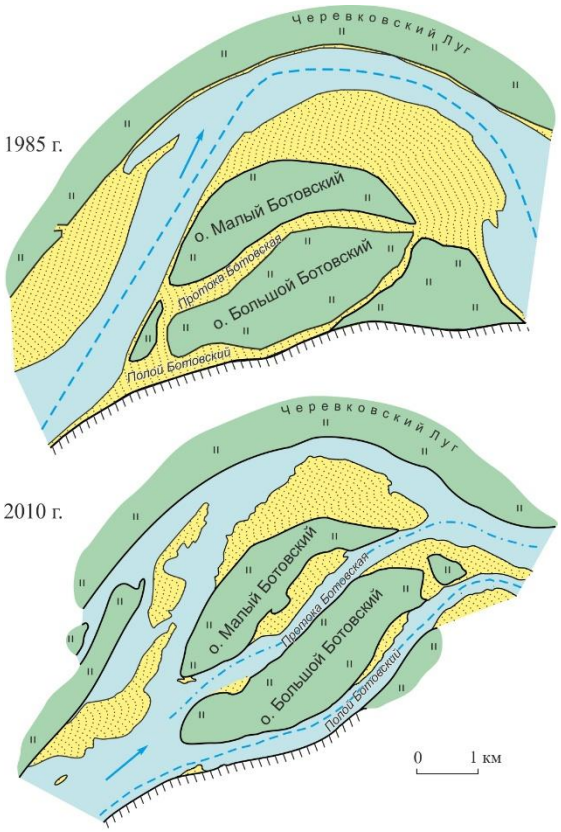


Рисунок 4.7 – Переформирования разветвленно-извилистого русла (518,5-511 км) [Русловые процессы…, 2012]

Расположенные ниже по течению *односторонние разветвления* (*510-501 км*) достаточно стабильны. Главный рукав проходит вдоль правого коренного берега, в т.ч. благодаря строительству дамб в левобережной части русла. В многолетнем плане наблюдается направленный размыв со средней скоростью 5-6 м/год правого берега, сложенного глинами, слоистыми песками и суглинками [Сахарова, 1960]. Разработанная на всём протяжении этого участка прорезь в коренных грунтах, подстилающих русло вместе с выправительными сооружениями обеспечивает транзит наносов, поступающих от размыва Толоконной горы, на нижерасположенный участок русла.

Активным переформированиям подвержено *параллельно-рукавное разветвление* на *500-479 км*. Формирование и последующие интенсивные переформирования этого участка русла определяется: поступлением большого количества наносов, особенностями геологического строения русла; рассредоточением потока по многочисленным пойменным протокам, резким сужением дна долины в конце участка, вызывающими подпор потока во время

половодья и аккумуляцию наносов в его пределах; сменой левобережной поймы на правобережную, что обусловливает пересечение пойменного и руслового потоков в период половодья под углом 30°.

В конце XVIII в. с 500 км до 485 км русло было относительно прямолинейным, неразветвленным (рис. 4.8), и лишь в конце участка разделялось на два рукава Авнюгским и Ягрышским островами. В XIX-XX вв. в результате, усиления размыва Толоконной горы и поступления в реку дополнительного количества наносов началось активное формирование островов и их регрессивное смещение со скоростью 12-15 м/год, а в наиболее многоводные годы и периоды – до 20 м/год [Каргаполова, 2006]. В настоящее время разветвление начинается на 500 км и образовано серией островов: Паячным, Голодай, Рубежским, Ягрышским и рядом безымянных. В итоге за 200 лет система островов выросла регрессивно на 15-16 км.

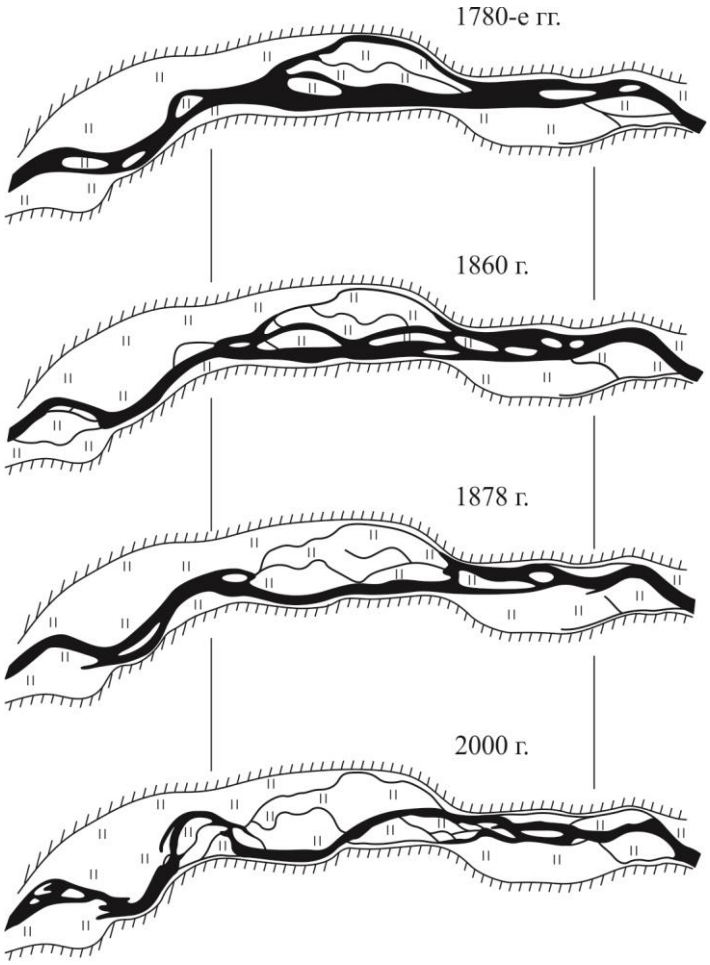


Рисунок 4.8 – Усложнение морфологии Паячно-Ягрышского разветвления русла и смежных участков с XVIII по XX век [Русловые процессы…, 2012]

На протяжение 120 лет периодически менялась значимость основных рукавов разветвления. В конце XVIII в. оба рукава являлись равноценными; в середине XIX в. преимущественное развитие имела система правых рукавов, в конце XIX в. – левых. Во второй половине XX в. развитие правых рукавов было приостановлено выправительными работами: перекрытием дамбами Тядемского полоя (1960-е гг.) и пойменных проток, расчленяющих левобережную пойму (рис. 4.9), разработкой прорезей в коренном ложе судоходного рукава и регулярным землечерпанием на всем протяжении трассы фарватера, что на многие годы позволило сохранить за левым рукавом статус главного.

Сооружение дамб в правом рукаве – Тядемском полое привело к различиям в отметках уровней воды в рукавах и, следовательно, к перекосам водной поверхности, которые усиливались, особенно в межень, из-за образования обширных песчаных отмелей, осередков и побочней и их интенсивного (до 500 м/год) смещения. Из-за больших поперечных перекосов водной поверхности отмель у оголовка о. Рубежского – нижнего в цепочке островов, периодически размывается, открывая заход в нижнюю часть правого рукава – протоку Старица; как правило, это приходится на маловодные периоды. В эти периоды водность правого рукава у о. Рубежского немного превышает водность левого рукава. Однако в течение 2-3 лет между островами посередине русла разрастаются косы, перекрывающие заход в протоку Старица, и основной расход воды возвращается в левый рукав, этот процесс совпадает с периодами повышенной водности на реке. Периодичность смещения основного потока из одного рукава в другой составляет около 20 лет.

В нижней части участка параллельно-рукавных разветвлений в XVIII в. на месте современного о. Ягрышского в верхнем крыле пологой вписанной излучины перед сужением дна долины располагался безымянный остров, впоследствии размытый. Переформирования русла с конца XIX в. (рис. 4.10) заключались в смещении потока к правому берегу, сопровождавшимся размывом о. Якшина и смещением безымянных островов (современного о. Ягрышского) вниз по течению и их объединением.

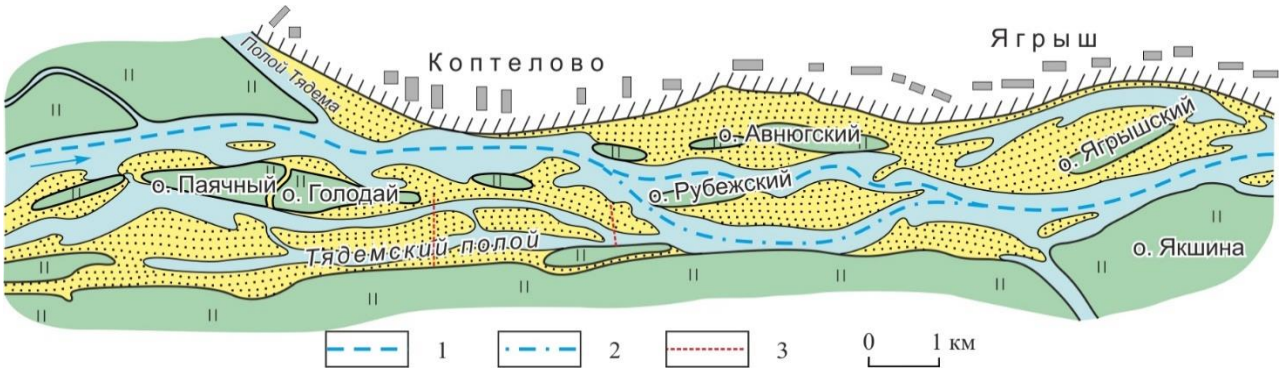


Рисунок 4.9 – Изменение положения основного расхода воды на Паячно-Ягрышском участке параллельно-рукавных разветвлений в 2000 (1) и 2003-2005 (2) гг.; выправительные сооружения (3) [Михайлова, 2014]

Рисунок 4.10 – Переформирования русла у о. Ягрышского в конце участка параллельно-рукавных разветвлений на 484-474 км: 1 – границы русла и положение островов в 1878 г., 2 – положение судового хода 1878 г.; космический снимок 2013 г.

В середине XX в. оба рукава у о. Ягрышского – правый, ныне главный, и Ягрышский полой были равноценными по водности, при этом основной расход воды проходил в левом рукаве. Однако наклон кровли коренных пород от левого берега к правому и общий изгиб долины в конце участка перед ее сужением обусловил смещение основного расхода воды в правый рукав, тогда как Ягрышский полой стал маловодным – в межень он забирает не более первых процентов общего расхода воды реки. Повышение водности реки способствовало смещению положения основного расхода воды в правую часть русла и развитию правого рукава у о. Ягрышского.

С. Ягрыш – устье р. Ваги (474-314 км). На *474-469 км* располагается участок *относительно прямолинейного русла*. Вдоль правого берега расположены отмели, отделенные от берега узкой протокой. С середины XX в. отмели стали

закрепляться растительностью, увеличиваться в размерах и превратились в небольшие прибрежные острова.

Рукава *параллельно-рукавных разветвлений* во врезанном русле на *469-461 км* в настоящее время сильно различаются по водности – основной расход воды сосредоточен в левом рукаве; второй рукав – Свагский полой на 463-461 км перекрыт дамбой (рис. 4.11), отметки верха которой превышают уровень половодья.

Рисунок 4.11 – Параллельно-рукавное русло на 469-461 км; дамба в Свагском полое [Михайлова, 2014]

Дамба была сооружена в 1980-е гг. для создания затона, в котором формировались плоты для их дальнейшего сплава. До сооружения дамбы полой неоднократно менял свою водность: в 1950-е – период повышенной водности он сильно мелел, в маловодные 1970-е гг. был полноводным.

На *461-542 км односторонние разветвления,* образованные островами Лобановским, Варзенским, Малетинским, ещё в середине XX в. представляли собой продолжение системы параллельно-рукавных разветвлений, верхняя часть которой образована о. Свагским. После сооружения дамбы в Свагском полое в ухвостье о. Свагского поток из правого рукава стал направляться в левую часть русла, а водность Свагского полоя в нижней части системы значительно сократилась.

На участке *452-437,5 км* русло образует две смежные пологие *врезанные излучины*. В привершинной части верхней излучины в конце XIX в. располагались два острова, образовывавшие сопряженные разветвления второго порядка (рис. 4.12).

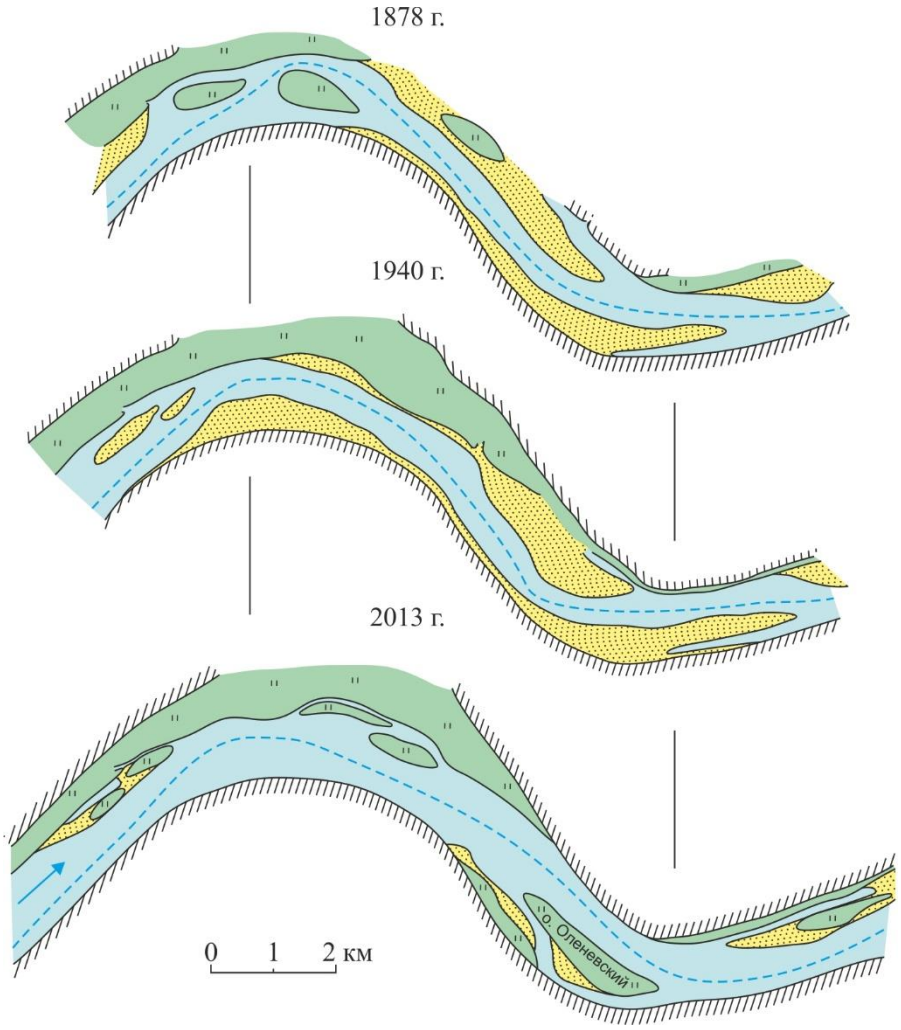


Рисунок 4.12 – Переформирования русла на врезанных излучинах 452-437,5 км

В XX в. острова были размыты, и на их месте в разные годы то у правого выпуклого, то у левого вогнутого берега излучины образовывались отмели. В настоящее время в вершине верхней излучины у левого вогнутого берега имеются небольшие прибрежные острова. В вершине нижней излучины расположен небольшой остров Оленевский, сформировавшийся в многоводный период 1950-х гг. в результате отчленения части массивной левобережной отмели. Положение основного потока относительно этого острова зависит от прохождения потока на вышерасположенной излучине: если поток прижимается к выпуклому берегу

верхней излучины, то на нижней излучине он также стремится занять положение у выпуклого берега, однако с запаздыванием на несколько лет, и наоборот.

На участке *437,5-393 км относительно прямолинейное* преимущественно широкопойменное русло (на 417-406,5 км – адаптированное) проходит вдоль правого коренного берега; встречаются *односторонние (426,5-421,5 км)* и *одиночные (421,5-417 и 406,5-399,5 км)* разветвления. Односторонние разветвления у левого берега сформировались в течение XX в. в результате закрепления отмелей растительностью.

Участок заканчивается резким поворотом долины и сменой левобережной поймы на правобережную островную (рис. 4.13). Перед поворотом долины расположен о. Большой Луг, представлявший собой в конце XVIII в. верхнее (из двух) звено сопряженных разветвлений [Каргаполова, 2006]. Нижнее звено расположено уже в пределах следующего участка и представлено островами Кодимским и Телячьим.

Рисунок 4.13 – Участок русла на 407-383 км на снимке 2013 г.

К середине XIX в. левая протока Воднокурская у о. Большой Луг обмелела, превратившись в пойменное ответвление, основной расход воды переместился в правый рукав, который стал частью участка относительно прямолинейного русла. В многоводный период второй половины XIX в. происходил размыв левого рукава у о. Кодимского. К концу XIX в. был размыт заход в левый рукав, и оба рукава у о. Кодимского стали практически равными по водности, при этом ниже по течению

у о. Телячьего основной расход воды сосредотачивался в левом рукаве. Перемещение основного расхода воды из одного рукава в другой и обратно занимало не менее 30-40 лет. Таким образом, на данном участке произошла трансформация сопряженного разветвления в относительно прямолинейное русло до поворота долины и пойменно-русловое разветвление ниже по течению.

В настоящее время на участке ниже поворота долины продолжается перестройка русла. В начале XXI в. в левом рукаве пойменно-руслового у о. Телячьего начали формироваться параллельно-рукавные разветвления. Вплоть до Троицкого плёса (369-363 км) посередине русла располагались отмели; динамическая ось потока огибая их прижималась то к левому коренному, то к правому пойменному берегам, делая 7 извилин. Верхним в цепочке островов *параллельно-рукавного русла* на участке *393-378 км* является остров Слудский (рис. 4.14), образовавшийся вследствие отчленения части массивного левобережного побочня в левом рукаве, превращения его в осередок к 1955 г. и зарастания в 1960-е гг., чему способствовало сооружение направляющей поток дамбы в левом рукаве у о. Телячьего и в целом малая водность реки в этот период. К 1975 г. длина острова L_o составляла 560 м, ширина B_o=130 м. За 50 лет о. Слудский значительно увеличился в размерах как в ширину (до 600 м), так и в длину (до 3,7 км), его ухвостье сместилось на 2 км ниже ухвостья о. Телячьего, а отмели ниже по течению закрепились растительностью и превратились в небольшие острова, расположенные цепочкой друг за другом. Изменился тип русла: относительно прямолинейное неразветвленное стало параллельно-рукавным. Очевидно, усложнение типа русла связано с аккумуляцией на данном участке наносов перед сужением дна долины (на 369 км).

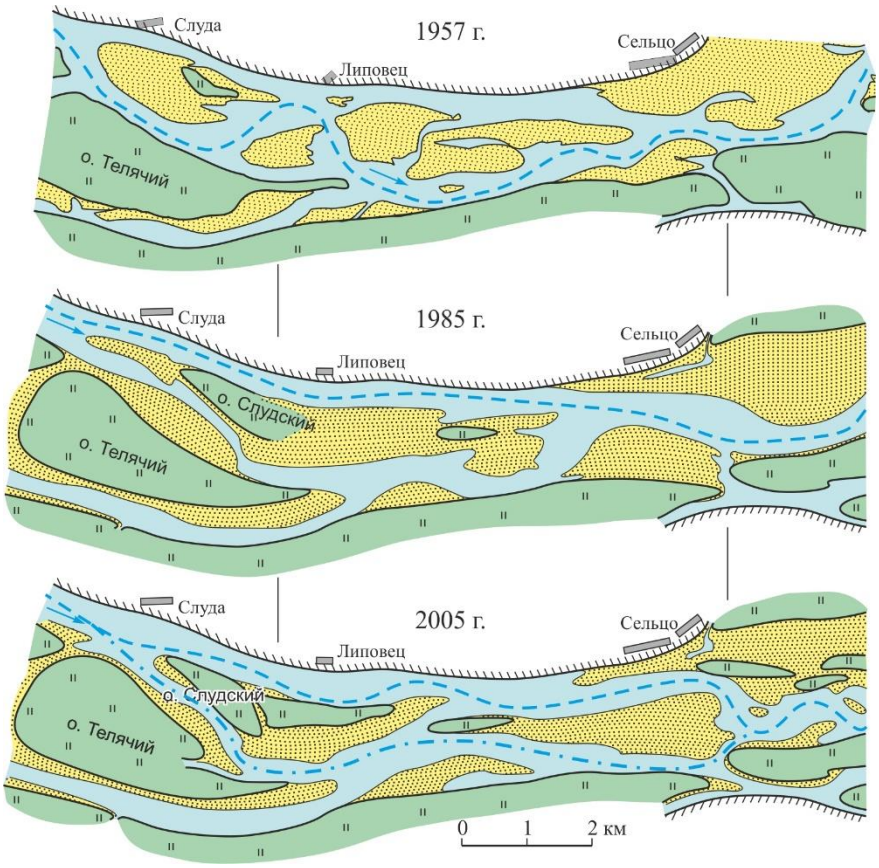


Рисунок 4.14 – Формирование параллельно-рукавного русла на 393-378 км [Русловые процессы…, 2012]

Ниже по течению расположено *двустороннее разветвление* (*378-369 км*), образованное цепочками островов у противоположных берегов, основными среди которых являются – о. Малютка (у левого берега) и о. Осерёдок (у правого берега) (рис. 4.15); основной расход воды проходит посередине русла между ними. В конце XIX в. русло представляло собой пологую излучину, правобережная пойма была разделена узкими пойменными протоками. В многоводный период конца XIX – начала XX в. наблюдался размыв левого берега у современного о. Малютка; одновременно разрасталась отмель у левого берега в верхней части участка и развивалась пойменная протока между островами Малютка и Осередок. Усложнение морфологии русла на данном участке свидетельствует об общем повышении водности реки на протяжение XX в.

На *369-363 км* русло *относительно прямолинейное* вдоль правого коренного берега. В его пределах расположен глубокий (до 9 км) Троицкий плёс. На нижерасположенном участке положение основного потока определяется выступами мысов коренного берега. У оголовка о. Тулгасского, образующего

одностороннее разветвление на 363-354 км, выступ правого коренного берега направляет поток в левый лукав, определяя устойчивое положение основного расхода воды в нем, вплоть до с. Рочегды, где образовано *одиночное разветвление* у о. Окулкова (*351-348 км*), ниже по течению русло становится врезанным *относительно прямолинейным* (*348-344 км*).

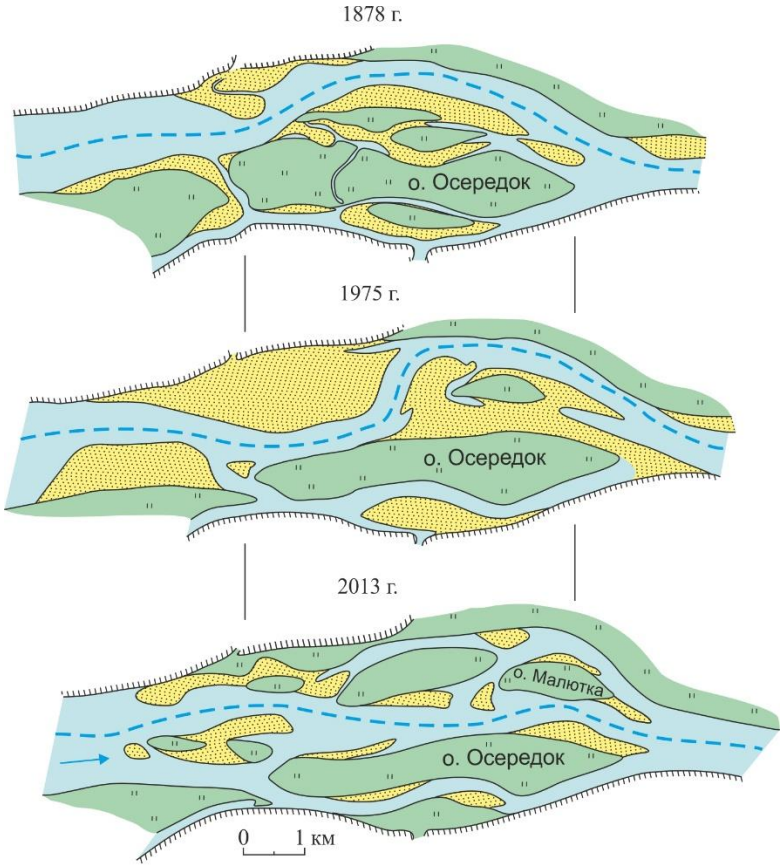


Рисунок 4.15 – Переформирования русла на участке двусторонних разветвлений на 374-369 км

Параллельно-рукавное разветвление на участке *344-329 км*, образованное островами Коневец и Прозоровским, расположено в местном расширении дна долины. В XVIII-XIX вв. разветвление было протяженнее: цепочку островов замыкал расположенный ниже по течению о. Зеленец (рис. 4.16). С XVIII в. и до настоящего времени главным рукавом разветвления является правый, верхняя часть которого проходит вдоль коренного берега. К середине XIX в. все острова в разветвлении, особенно о. Коневец, значительно увеличились в размерах.

В XX в. произошло объединение островов в том числе прибрежных – Конецгорского и Ростовского, в пределах островного массива посередине реки, чему способствовало сооружение дамб, перекрывающих протоки между ними (в

первой половине XX в.), а также развитие поперечной протоки Прозоровской между островами Коневец и Зеленец. Водность обоих рукавов (Чамовского полоя – левобережного и Прозоровской протоки – правобережного) у о. Зеленец менялась в зависимости от смещения побочней, периодически перекрывающих заход в один из них [Русловые процессы…, 2012]. В настоящее время Чамовский полой у о. Зеленец значительно обмелел (его водность – 5,2%) и функционирует только в период половодья; в маловодный период конца 2000-х – начала 2010-х гг. часть отмелей в полое стала зарастать и превращаться в пойму.

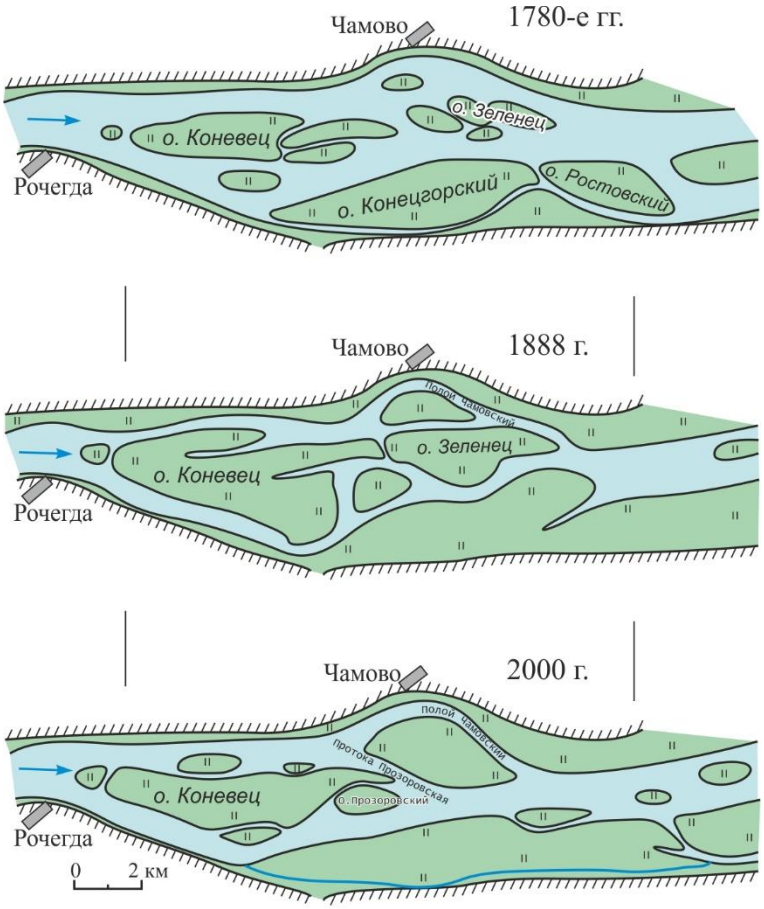


Рисунок 4.16 – Переформирования русла на участке Конецгорского параллельно-рукавного разветвления на 344-329 км [Русловые процессы…, 2012]

До середины XX в. участок *326-320 км* был представлен относительно прямолинейным неразветвленным руслом (рис. 4.17), основной поток в котором проходил у левого пойменного берега. Этот участок характеризуется активной аккумуляцией наносов, которая обусловлена сужением дна долины ниже впадения р. Ваги.

По Е.И. Сахаровой [1960], именно сужение дна долины Северной Двины ниже по течению играет большую роль в формировании русла на данном участке, т.к. влияние подпора в половодье Северной Двины Вагой здесь еще не прослеживается. За период 1940-70-х гг. в результате зарастания песчаных отмелей сформировались два острова – Могучий и Лотовочный Песок, образовавшие, соответственно, одиночное и одностороннее (у правого берега) разветвления с расположением основного потока в правом рукаве у о. Могучего. В маловодный период 2000-х гг. на данном участке происходило формирование новых островов в ухвостье о. Могучего и о. Лотовочного песка, и объединение их с уже существующими островами.

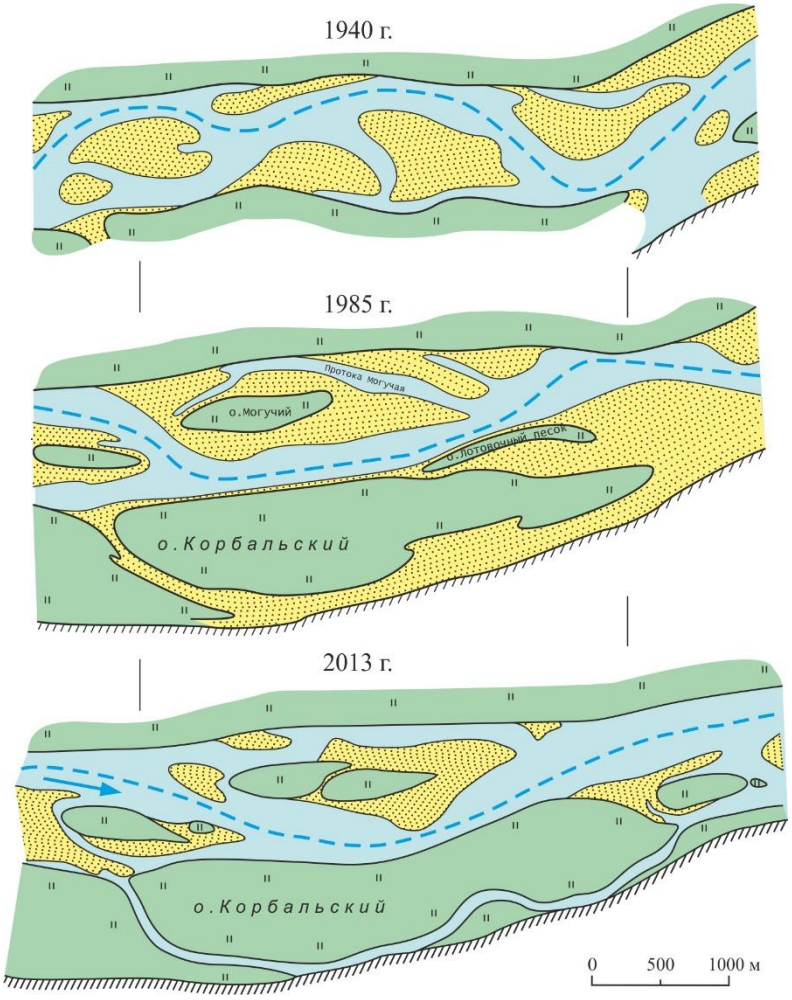


Рисунок 4.17 – Переформирования русла на участке 326-320 км

В узле слияния с Вагой (*318-312 км*) расположено *одиночное разветвление дельтового типа*, образованное о. Шилингским (рис. 4.18). В середине XIX в. возле устья Ваги в русле Северной Двины располагались лишь осередки и о. Большой. К

1950-м гг. здесь сформировался крупный о. Шилингский (длиной 4,5 км). Оголовок острова в начале XX в. размывался со скоростью до 25 м/год. Основной поток, проходивший в XIX в. в правом рукаве разветвления, переместился в левый в начале XX в., причиной чему, вероятно, послужило периодическое перекрытие побочнем захода в рукав. До настоящего времени левый рукав является главным в разветвлении, однако в период половодья статус рукавов меняется, и правый (полой Шилингский) забирает 70% стока реки [Русловые процессы…, 2012], что связано с подпором потока Северной Двины со стороны Ваги [Сахарова, 1960].

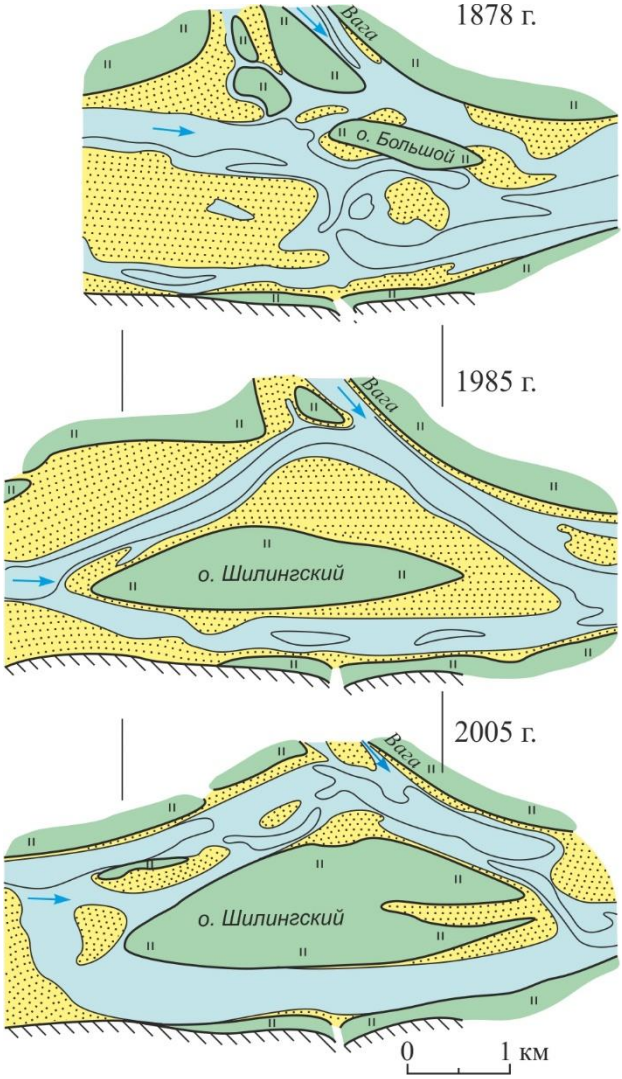


Рисунок 4.18 – Переформирования русла в узле слияния Северной Двины с Вагой (318-312 км) [Русловые процессы…, 2012]

От устья Ваги до вершины устьевой области (314-94 км). Врезанное русло Северной Двины от устья Ваги до устья Пинеги является устойчивым, и за период, охваченный съемками, заметных изменений в его морфологии не происходило, за

исключением отдельных участков, где были зафиксированы значительные переформирования русла.

Односторонние чередующиеся разветвления (*301-293 км*) представлены островами Новым (у левого берега) и Пяндским (у правого) (рис. 4.19). Остров Новый существовал ещё в середине XIX в. Остров Пяндский сформировался в маловодные 1940-е гг. в результате зарастания обсыхающей в межень отмели, формирующейся здесь ещё с середины XIX в.

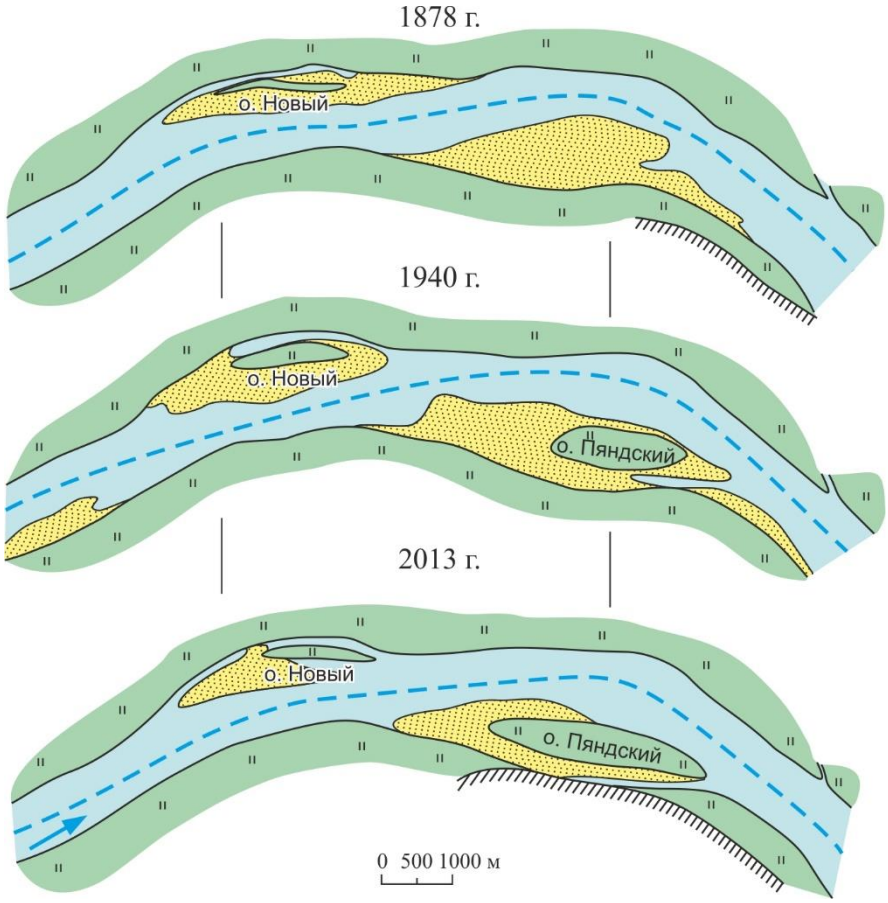


Рисунок 4.19 – Переформирования чередующихся односторонних разветвлений на 301-293 км

В середине XIX в. в привершинной части адаптированной излучины на 284-274 км существовал узкий островной массив, включающий современный о. Богачев ныне образующий *одиночное разветвление* на *284-280 км* (рис. 4.20). К 1878 г. на фоне общего повышения водности реки в ухвостье острова сформировалась песчаная отмель, впоследствии заросшая. Сам о. Богачев рос в ширину. Одновременно по мере искривления правого рукава начала развиваться спрямляющая левая протока – полой Собачий пролаз. Наиболее активное ее

развитие пришлось на многоводный период 1950-х гг.; возможно, именно в этот период во время половодья она стала забирать значительную часть расхода воды, а с началом маловодного периода 1960-х гг. водность протоки сократилась, чему способствовали запани, сооруженные в начале 1960 гг. В настоящее время основной расход воды реки сосредоточен в правом рукаве у о. Богачев, при этом левый рукав – протока Собачий пролаз забирает в период половодья значительную долю расхода воды – до 45%.

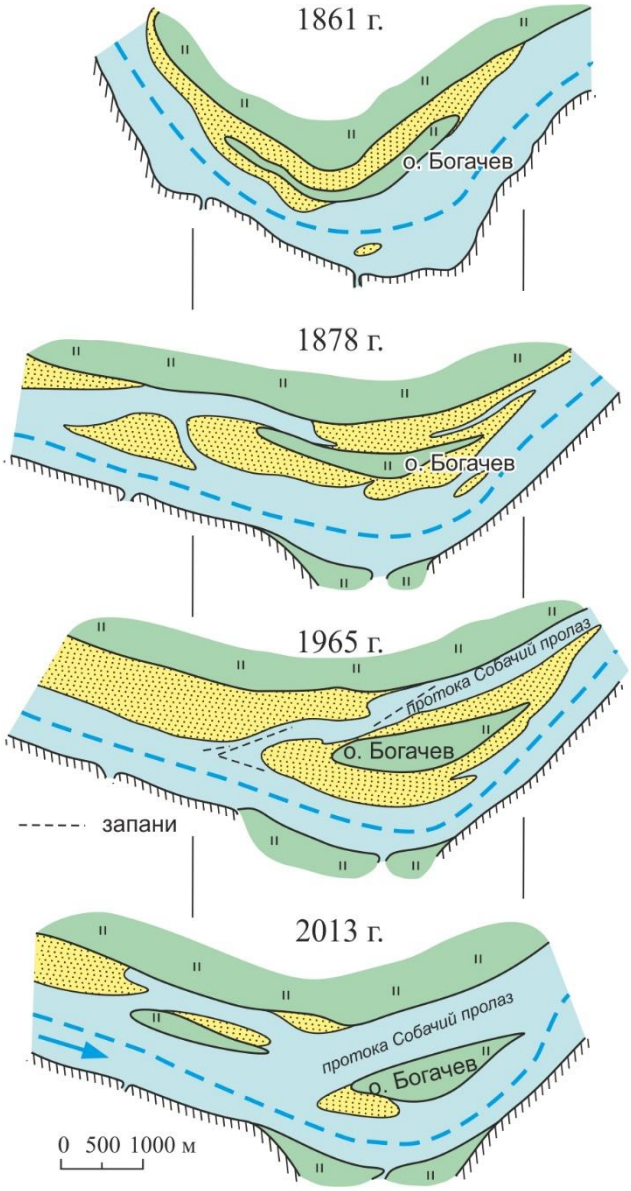


Рисунок 4.20 – Переформирования русла на 284-274 км

На участке *сопряженных разветвлений* (*257-241 км*), образованных островами Калкурским, Мокеевым (ранее о. Кольский) и Почтовским за

рассматриваемый период значительно изменялась морфология русла и положение основного потока относительно островов (рис. 4.21).

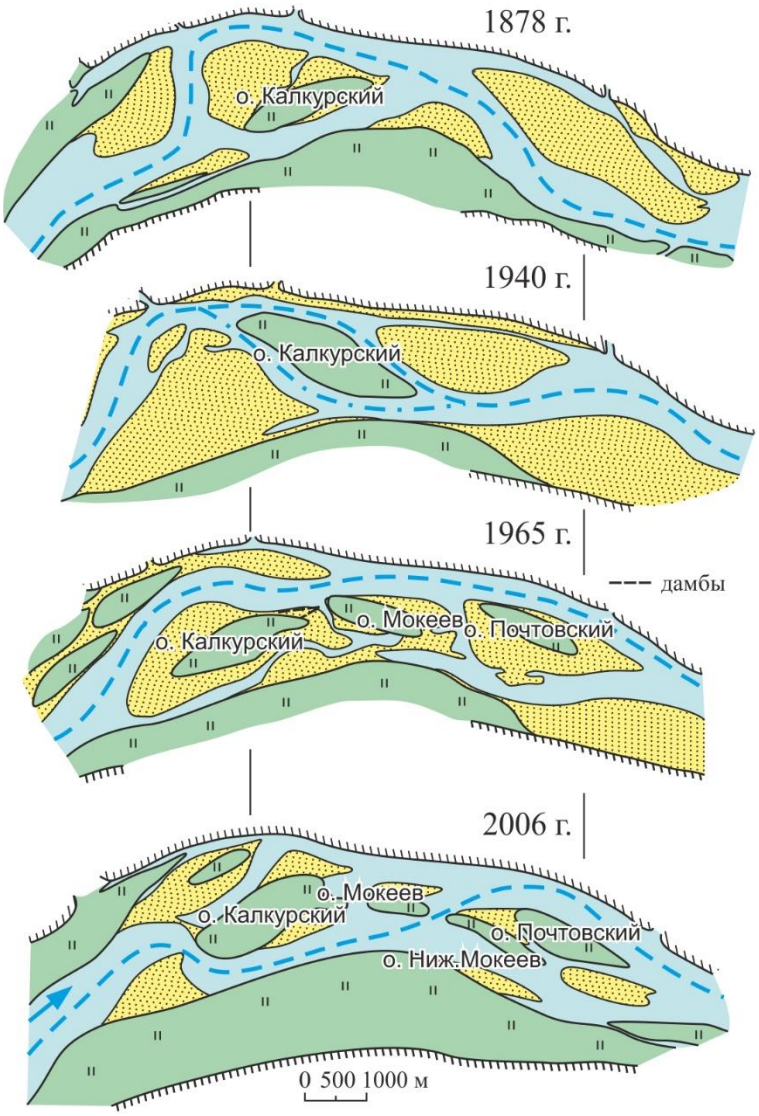


Рисунок 4.21 – Переформирования русла на 257-241 км

До 1950-х гг. на данном участке существовал только о. Калкурский, образующий одиночное разветвление, в котором периодически происходило попеременное развитие рукавов в зависимости от надвижения на них побочней. До начала XX в. основной поток проходил в левом рукаве у о. Мокеева, в 1940 г. оба рукава имели примерно одинаковую водность, а к середине 1950-х гг. основной поток снова вернулся в левый рукав. В маловодный период 1940-х гг. отмели выше и ниже по течению (современные острова Калкурский и Почтовский) начали закрепляться растительностью. В 1955 г. в начале многоводного периода разветвление из одиночного трансформировалось в сопряженное – основной поток

переваливал от левого берега к правому между о-вами Мокеевым и Почтовским. К 1965 г. разветвление состояло уже из трех следующих друг за другом островов, а основной расход воды был закреплен в левом рукаве (протока между островами Калкурским и Мокеевым была перекрыта дамбой) вплоть до начала XXI в. В 1980-е – начало 1990-х гг. это положение поддерживалось с помощью дноуглубительных работ [Михайлова, 2014]. В начале XXI в. дноуглубительные работы в левом рукаве были прекращены и разветвление снова трансформировалось в сопряженное, у о. Калкурского поток переместился в правый рукав, о. Мокеев разделился на две части, чему способствовал большой поперечный перекос между левым рукавом, перекрытым побочнем, и правым – Калкурской протокой, а также направляющее воздействие выступа правого коренного берега. В настоящее время основной поток проходит между островами, образовавшимися в результате разделения о. Мокеева. Таким образом, антропогенное вмешательство способствовало превращению сопряженных разветвлений в односторонние, а после его прекращения, разветвление снова стало функционировать как сопряженное, при этом основной поток по правилу «восьмерки» перешел в противоположные рукава.

Остров Березниковский (ранее Овечий), образующий *одиночное разветвление* (*241-235 км*), делит поток на два практически равноценных рукава. В XIX в. основным по водности был правый рукав вдоль коренного берега. В XX в. это положение было закреплено серией дамб, что вызвало обмеление левого рукава – протоки Орловской и сокращение доли расхода воды в ней до 5%.

Параллельно-рукавное разветвление на 197-188 км характеризуется периодическим изменением положения основного потока в рукавах, связанным с попеременным развитием отмелей на заходе в них. Преимущественно он проходит в левом рукаве вдоль пойменного берега, однако в отдельные годы в период половодья развивается правый Пинегшевский рукав.

За последние 120 лет стала более пологой вторая в серии *врезанных излучин* с вершиной у с. Челмохта (*188-154 км*); степень ее развитости l/L изменилась с конца XIX в. с 1,56 до 1,38. Очевидно, это связано с зарастанием в ее верхнем крыле отмелей у правого вогнутого берега.

На *94 км* у вогнутого берега *врезанной излучины* напротив впадения реки Пинеги в Северную Двину в 1990-е гг. по мере естественного смещения русла в сторону правого Пинежского берега образовался о. Антушевский, представляющий собой ныне прибрежное разветвление.

Основные закономерности многолетних переформирований русла Северной Двины. Переформирования русла Северной Двины не одинаково по морфологически однородным участкам. От устья р. Вычегды до устья р. Ваги преимущественно широкопойменное русло характеризуется слабой устойчивостью. Наиболее характерными является перераспределение расходов воды между рукавами разветвлений, связанные с периодическим надвижением и перекрытием их песчаными отмелями, отмиранием рукавов и превращением их в маловодные пойменные ответвления; развитием и спрямлением некоторых излучин. Наиболее существенные переформирования, в том числе связанные с изменением морфодинамического типа русла (спрямление серии излучин у Красноборска, переход основного расхода воды из Песчанского полоя к левому коренному берегу в районе с. Телегово, деформации узла слияния Северной Двины с Вычегдой) произошли в продолжительные многоводные периоды. Высокие половодья способствуют перемещению основного расхода воды из одного рукава в другой. При этом на многоводные периоды приходится расположение основного потока в более прямых рукавах, тогда как в годы с пониженной водностью основной расход проходит в рукаве, характеризующимся бóльшим изгибом. Образование новых островов и увеличение разветвленности русла на этом участке определялось не только увеличением водности, но и большим стоком наносов, а в районе Паячно-Ягрышского разветвления – поступлением их благодаря размыву вогнутого берега вписанной излучины – Толоконной горы выше по течению, особенно в маловодные периоды. Периоды пониженной водности способствовали развитию излучин (увеличению их степени развитости) за счет интенсификации размывов вогнутых берегов (Толоконская излучина) и отмиранию пойменных проток (Песчанский полой, Пермогорский полой).

Большое значение в формировании русла Северной Двины и его дальнейших переформированиях имеет строение ее долины (чередование сужений и расширений) [Сахарова, 1960]. В расширениях перед сужениями дна долины формируются наиболее сложные разветвления: параллельно-рукавное Паячно-Ягрышское, параллельно-рукавное у о Слудского, переходящее в двустороннее в районе Липовецких и Селецких перекатов, параллельно-рукавное Конецгорское и нижерасположенные односторонние разветвления в районе Ростовских и Корбальских перекатов. На этих участках происходит наиболее активная аккумуляция наносов, образуется большое количество все новых и новых песчаных отмелей – осередков, которые впоследствии увеличиваются в размерах, покрываются растительностью, объединяются в острова или причленяются к пойме.

Влияние Толоконной горы, поставляющей дополнительное количество наносов в русло, прослеживается не только в пределах расположенного непосредственно ниже по течению Паячно-Ягрышского разветвленного русла; предположительно продукты ее размыва аккумулируются вплоть до устья Ваги. Так, именно с началом наиболее интенсивного размыва этого песчаного уступа (после 1940-х гг.) связано образование осередков, последующее их зарастание и превращение в острова Могучий и Лотовочный пескок на 326-320 км, их разрастание и объединение последнего с пойменным массивом.

Ниже слияния Северной Двины с Вагой широкопойменное русло сменяется врезанным, преимущественно устойчивым. Одновременно меняется и характер деформаций. На многоводные периоды приходится размывы берегов и островов, развитие спрямляющих проток и разделение островов; напротив, маловодные периоды характеризуются формированием новых пойменных массивов.

Существенную роль в переформированиях русла Северной Двины играет антропогенный фактор. Его влияние, как правило, проявляются в закреплении определенного положения основного расхода воды в русле с помощью капитального выправительных работ или периодического дноуглубления; это приводит к упрощению морфологии русла несмотря на общее повышение водности

реки, которое при отсутствии антропогенного вмешательства приводит к усложнению морфологии русла. Примерами тому служат Телеговское и Калкурское разветвления, где перекрытие дамбами правых рукавов привело к трансформации системы сопряженных разветвлений в первом случае в одиночные и далее в односторонние, во втором – в односторонние. Прекращение антропогенного вмешательства влечет возврат русла в естественное состояние, как это произошло в Калкурском разветвлении (257-241 км) в конце XX – начале XXI в.

4.3 Вычегда

Слияние с р. Сысолой – устье р. Выми (418-296 км). Наиболее интенсивные переформирования русла произошли в районе г. Сыктывкара, при слиянии Вычегды и Сысолы (рис. 4.22) с конца XVIII до начала XX вв. (*420-413 км*), где образовано *пойменно-русловое разветвление*. До середины XIX в. узел слияния находился примерно на 4 км ниже современного, а в районе современного захода в затон Вильты – Красный Водник существовала протока, по которой часть вычегодского потока направлялась в Сысолу. В многоводный период 1850-1860 гг. произошло спрямление двух излучин Вычегды, что привело к формированию новой конфигурации узла слияния рек, находившегося в 1908 г. в 2,3 км ниже современного [Русловые процессы…, 2012]. К 1930 г. узел сместился на 1,6 км вверх по течению вследствие встречного размыва берегов на пологих излучинах обеих рек и развития крутой вынужденной излучины на подходе к левому коренному берегу, в вершине которой находится устье Сысолы. При этом угол между сливающимися реками увеличился до 20°, а образовавшийся в результате этих переформирований остров присоединился впоследствии к о. Шардаполойскому.

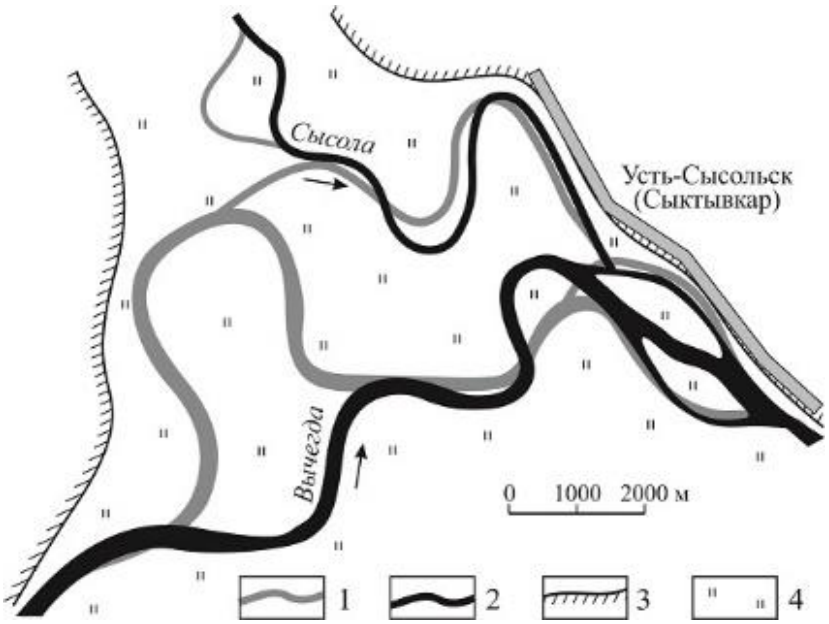


Рисунок 4.22 – Переформирования русла в узле слияния Сысолы и Вычегды с конца XVIII до начала XX в.: 1 – положение русла по съемке 1780 г.; 2 – положение русла по съемке 1909 г.; 3 – уступы террас и коренных берегов; 4 – пойма [Русловые процессы…, 2012]

В конце 1930-х гг. спрямилась Трехозерская излучина Вычегды, вызвав во второй половине XX в. активизацию размывов вогнутых берегов свободных излучин до 6-8 м/год, полную перестройку русла выше узла слияния и начало развития нового рукава – полоя Шарда, который в нижней своей части унаследовал положение русла Вычегды XVIII-XIX вв. (рис. 4.23). В результате угол встречи рек стал составлять 80-85°. В настоящее время Шарда-полой активно развивается [Рулева, Чалов, 2003] и забирает основной расход воды Вычегды, в то время как ее участок между заходом в полой и слиянием с Сысолой мелеет.

В районе Сыктывкарского ЦБК и речного порта (*410-394 км*) Вычегда образует большую Белоборскую *вписанную излучину* (рис. 4.24). В течение последних 100 лет радиус ее кривизны *r* и степень ее развитости *l/L* увеличились, соответственно, с 1 до 1,3 км и с 2,9 до 3,4 – экстремально большое значение для свободных излучин среднего и нижнего течения Вычегды. Во второй половине XX в. в тыловой части излучины сформировалась спрямляющая протока – полой Серт, развитию которого способствовала повышенная водность этого периода. Однако переходу в него основного течения реки препятствовали берегозащитные и портовые сооружения. Тем не менее в начале XXI в. полой стал забирать 80-90% расхода воды, в том числе в результате их разрушения.

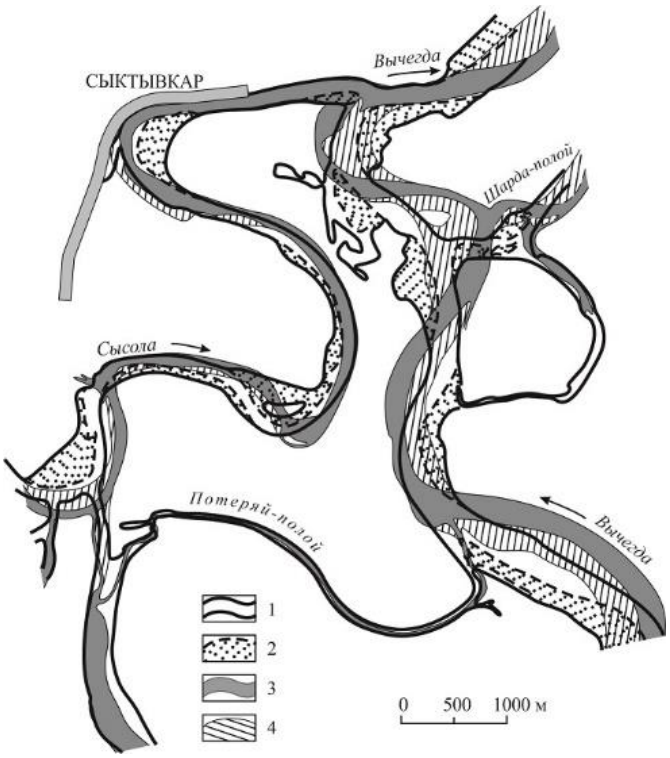


Рисунок 4.23 – Переформирования русла в узле слияния Вычегды и Сысолы во второй половине XX – начале XXI в. Положение русла (1) и побочней (2) в 1968 г.; русла (3) и побочней (4) в 2007 г. [Русловые процессы…, 2012]

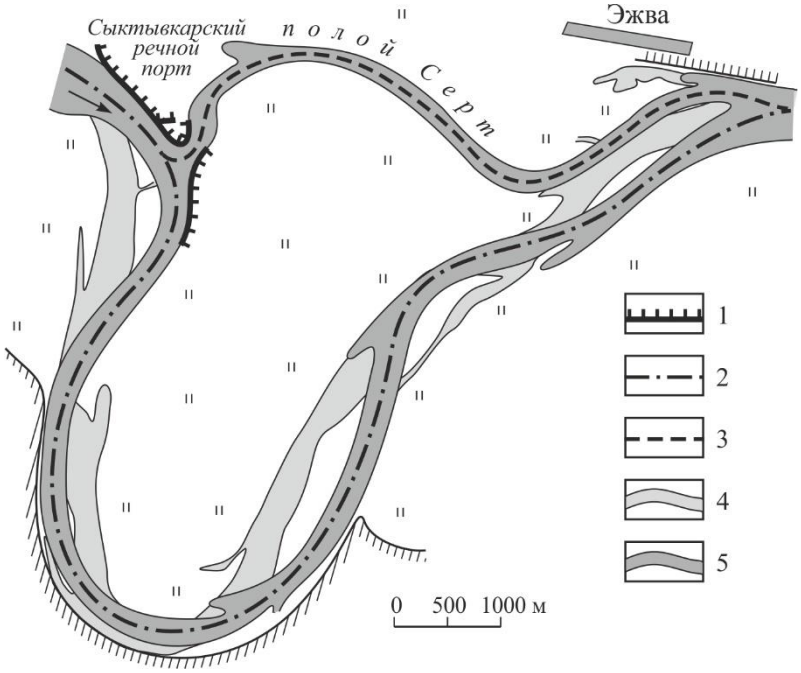


Рисунок 4.24 – Переформирование Белоборской излучины и развитие полоя Серт; 1 – положение берегозащитных сооружений и причальных стенок Сыктывкарского РП; 2 – положение судового хода до 2009 г.; 3 – положение судового хода после 2009 г.; 4 – положение русла в 1912 г.; 5 – положение русла в 2013 г.

В пределах *относительно прямолинейного русла* вдоль левого коренного берега на *388-381 км* в течение второй четверти XX в. на фоне периодов

пониженной водности увеличивалась кривизна извилин динамической оси потока за счет роста побочней расположенных здесь в шахматном порядке (рис. 4.25). В 1960-е гг. русло начало трансформироваться в разветвленное – стали формироваться острова, однако в результате проведения дноуглубительных работ в 1970-е гг., приводящих к отторжению побочней, динамическая ось потока была закреплена вдоль высокого левого берега. Отторгнутые побочни к началу 1980-х гг. присоединились к правобережной пойме и закрепились растительностью; впоследствии образовавшиеся острова объединились несмотря на общее повышенние водности реки начала конца XX – начала XIX вв.

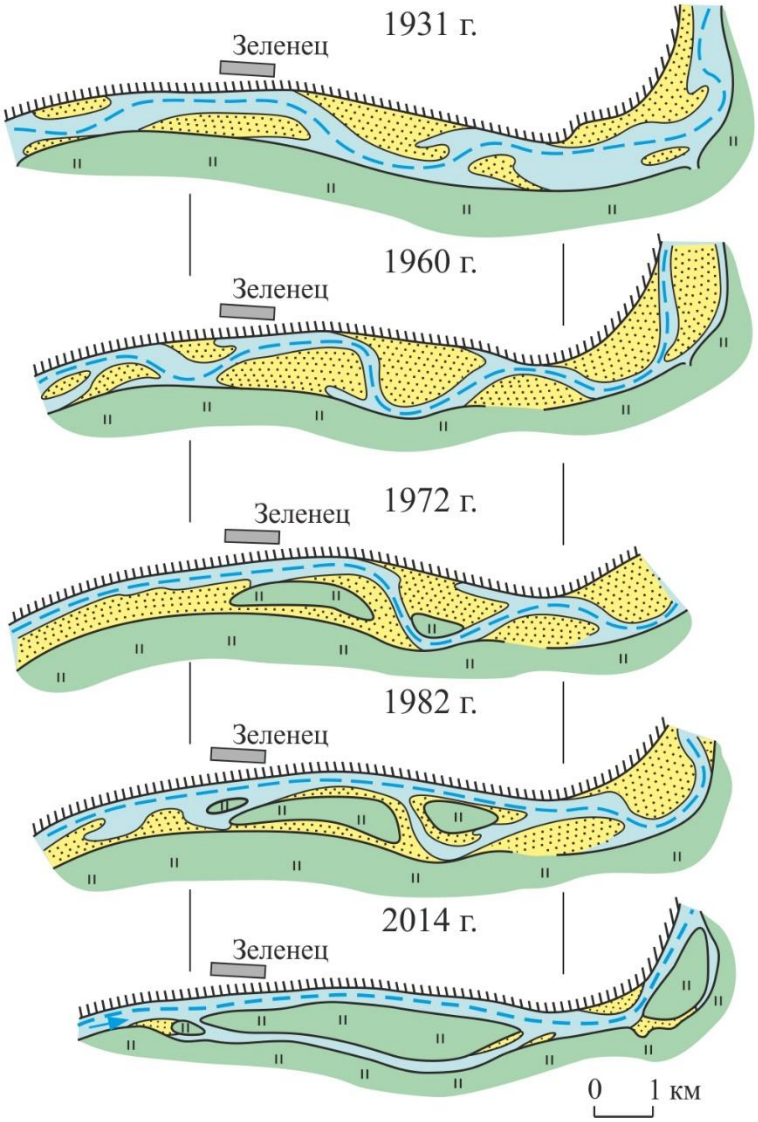


Рисунок 4.25 – Переформирования относительно прямолинейного русла на 388-381 км

В районе с. Часово на *368-365 км* расположена крутая *сегментная вынужденная излучина*. Мощное половодье 1947 г. и последующий период

повышенной водности спровоцировали интенсивное развитие спрямляющего рукава в ее шпоре (рис. 4.26). В 1957 г. водность спрямляющей протоки достигла 60% [Русловые процессы…, 2012]. В результате спрямления излучины степень ее развитости *l/L* уменьшилась с 2 до 1,2. Закреплению основного потока в спрямляющей протоке способствовали дноуглубительные работы по трассе судового хода. К 1980-м гг. заход в старое русло оказался полностью перекрыт обсыхающими отмелями, а затем и возникшей на их месте молодой поймой. Аккумуляции наносов на данном участке также способствовали гидравлические условия – дополнительный подпор, создаваемый в период половодья в условиях сужения дна долины дамбой в нижнем крыле и опорами мостового перехода (364,5 км), строительство которого было завершено в 1960 г. [Русловые процессы…, 2012].

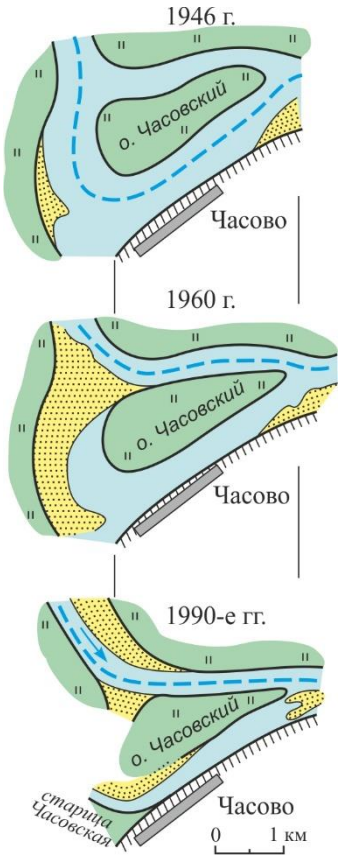


Рисунок 4.26 – Спрямление Часовской излучины [Русловые процессы…, 2012]

Русловые деформации в районе с. Усть-Пожега (*345-335 км*) на *крутой сегментной свободной излучине*, верхнее и нижнее крыло которой «контролируются» правым коренным берегом и характеризуется формированием

на протяжении 60 лет (1931-1992 гг.) на ее крыльях вторичных излучин (рис. 4.27). Образование побочней приводило к размыву берегов напротив них, сами побочни зарастали, превращаясь в прибрежные острова, в результате образовались пологие изгибы динамической оси потока. С 1960-х гг. на фоне периода пониженной водности рос остров Осникский в верхнем крыле излучины, его длина *L* за 40 лет увеличилась с 700 м до 1,5 км.

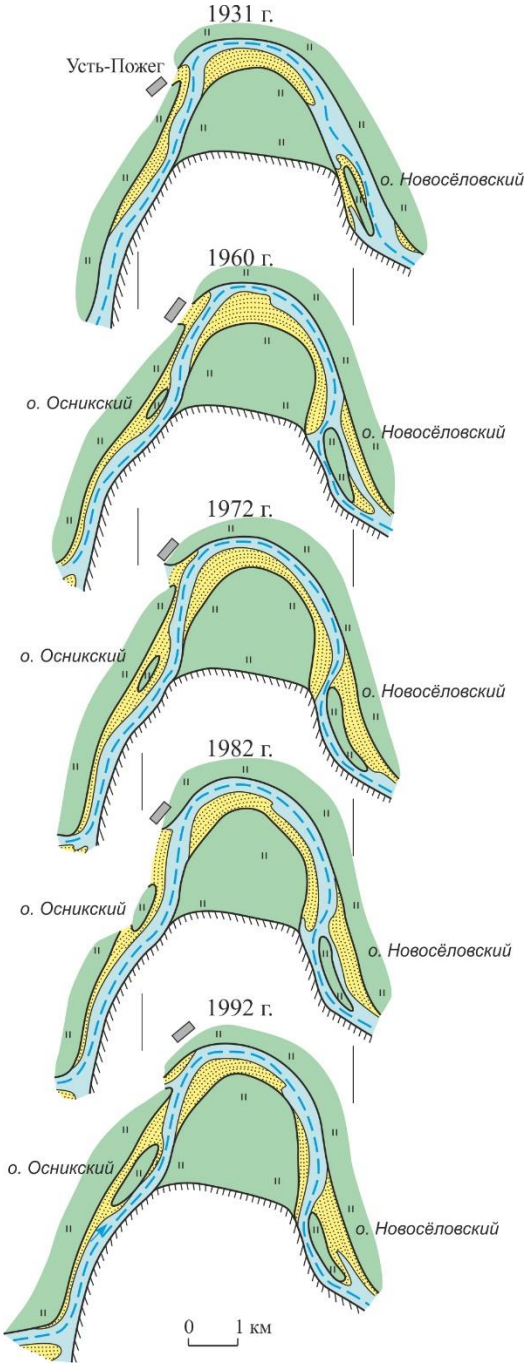


Рисунок 4.27 – Образование вторичных излучин на крыльях излучины у с. Усть-Пожег на 345-335 км [Русловые процессы…, 2012]

В районе с. Кожмудора (*325-315 км*) расположено *пойменно-русловое разветвление* в извилистом русле. Оба рукава этого разветвления меандрируют, создавая серию из двух (левый, главный) и шести (правый – Лука-полой) свободных излучин. Основной расход воды проходит здесь в левом рукаве. Однако в начале XX в. до 1950-х гг. главным по водности был правый рукав – Лука-полой. В начале 1950-е гг. аккумуляции наносов на заходе и выходе из него привела к сокращению его водности и увеличению извилистости (рис. 4.28), обусловив необходимость разработки прорезей в левом, менее извилистом, рукаве, где основной расход проходил в конце XVIII в. Это совпало с началом многоводного периода на реке. В настоящее время Лука-полой продолжает интенсивно меандрировать, забирая до 30% стока воды в реке.

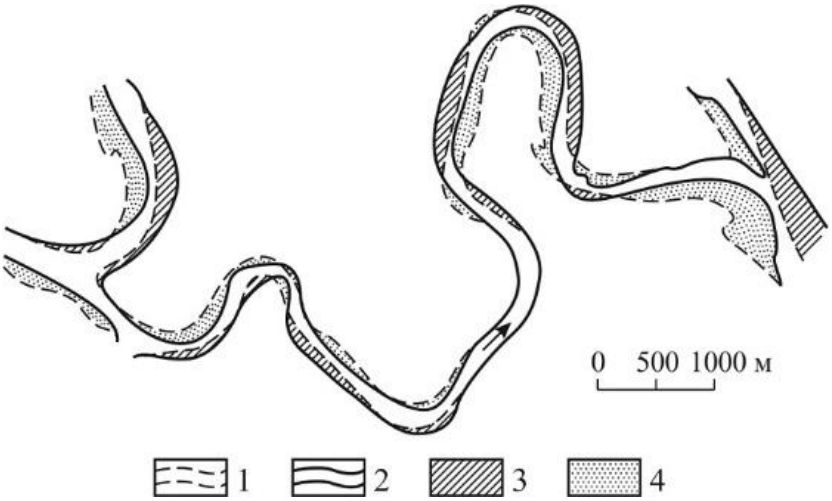


Рисунок 4.28 – Увеличение извилистости Луки-полоя: 1 – границы русла в 1946 г.; 2 – границы русла в 1953 г.; 3 – размыв; 4 – аккумуляция [Русловые процессы…, 2012]

Устье Выми – устье (296-0 км). На участке *284-276 км* находится остров Поп-Керосский, образующий прибрежное разветвление в *относительно прямолинейном русле*. Непосредственно ниже по течению до 1980-х гг. располагался о. Тыдорский, образовывавший одиночное разветвление. До середины XX в. правый рукав у о. Тыдорского был главным, пока заход в него не перекрыл сместившийся побочень от ухвостья о. Поп-Керосского. Основной поток сместился в левую часть русла к коренному берегу, такое его положение было закреплено в 1957 г. при помощи перекрытия запрудами правого рукава. К 1980-м гг. о. Тыдорский присоединился к пойме на фоне маловодного периода (рис. 4.29).

Изменение положения оси потока у о. Тыдорского в середине XX в. спровоцировало развитие согласно правилу «восьмерки» правобережной протоки у о. Кырского (*276-273 км*), ранее пересыхающей в межень, и размыву его оголовка. В многоводный период 1980-х – нач. 2000-х гг. основной расход воды перешел в правый рукав, и о. Кырский образовывал уже *одиночное разветвление* с двумя относительно равноценными рукавами при преимущественном развитии правого. Примечательно, что в конце XVIII в. остров входил в состав левобережной поймы, отделяясь от нее узкой пойменной протокой.

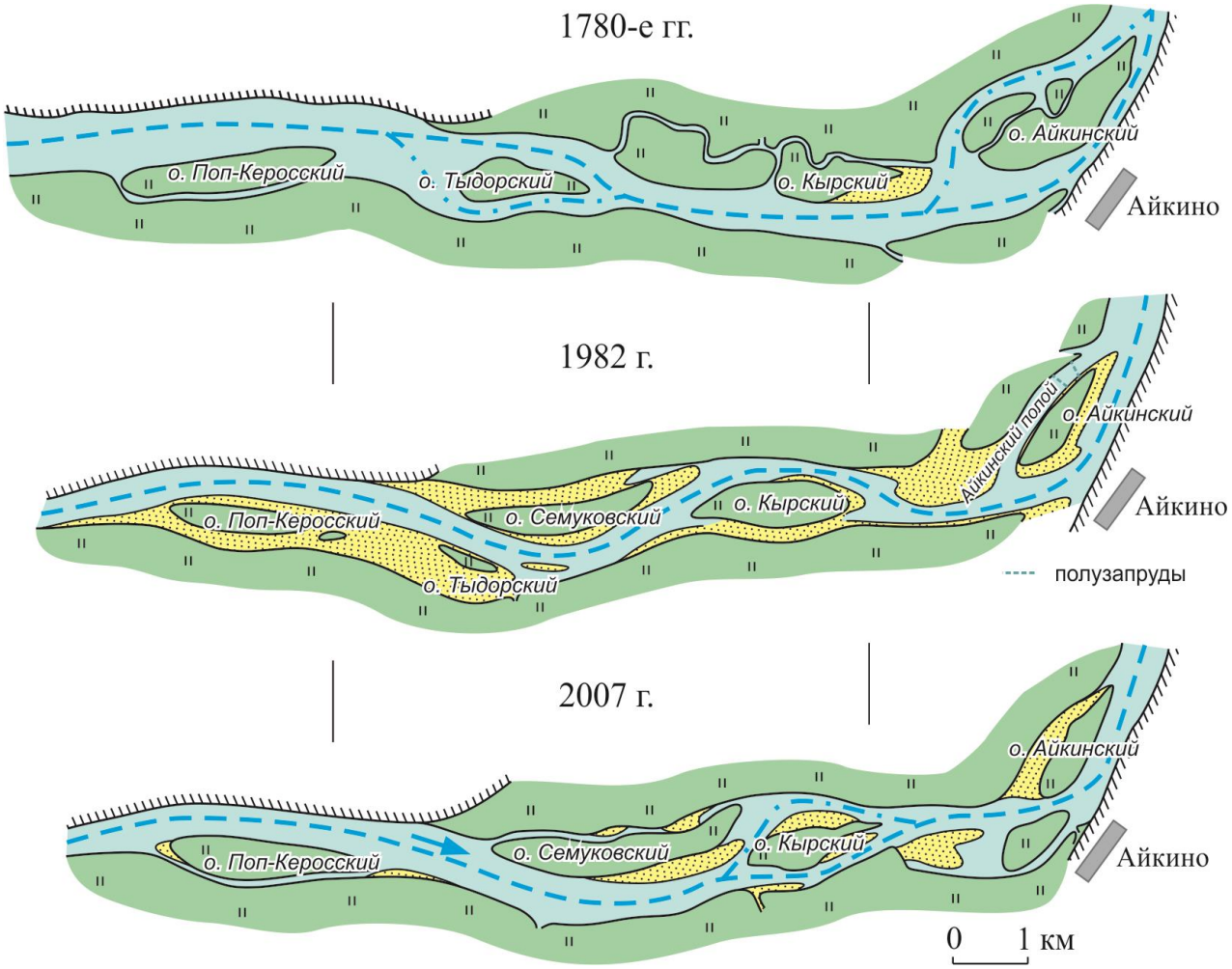


Рисунок 4.29 – Переформирования на участке относительно прямолинейного русла на 284-276 км

Ниже по течению (*272-268 км*) в привершинной части *вынужденной излучины* расположен о. Айкинский (рис. 4.29). Левый рукав – Айкинский полой, спрямляющий вынужденный изгиб русла, периодически активизируется: он развивался в 1780-х гг., в начале XX в. обмелел, а в 1930-х гг. имел статус главного

рукава [Русловые процессы…, 2012]. В 1980-е гг. в Айкинском полое были сооружены две полузапруды, способствовавшие его полному обмелению к началу XXI в.

Перемещение основного расхода воды в Айкинский полой, спрямляющий вынужденную излучину, до перекрытия его полузапрудами соответствовало периодам повышенной водности на реке. В верхнем крыле излучины на протяжении всего рассматриваемого периода происходило смещение потока в левую часть русла к оголовку о. Айкинского, чему способствовали переформирования на вышерасположенном участке и смена значимости рукавов у о. Кырского. Таким образом, на участке 284-268 км периодическое развитие рукавов и переход основного расхода воды из одного рукава в другой у островов Поп-Керосского, Тыдорского, Кырского, Айкинского осуществлялось сопряженно – по правилу «восьмерки», однако в течение XX в. произошло упрощение и трансформация системы сопряженных разветвлений в относительно прямолинейное русло, одиночное разветвление и вынужденную излучину. Это, по-видимому, свидетельствует о меньшей водности XX в. в целом относительно XIX в.

В *относительно прямолинейном русле* на *255-250 км* имеется разветвление второго порядка, образованное о. Покровским (рис. 4.30), отделенным от поймы левобережной протокой – полоем Покровским, который забирает в половодье до 15-20% расхода воды реки. До начала XX в. остров Покровский представлял собой одиночное разветвление (свидетельство того, что водность реки в XIX в. была больше, чем в XX в.); остров увеличивался в размерах на протяжении конца XVIII – начала XX вв. Для этого разветвления характерно внутригодовое и многолетнее перераспределение расходов воды по рукавам: в половодье и многоводные периоды поток направляется плечом правого коренного берега в полой Покровский, углубляя его, при более низких уровнях основной поток следует по главному руслу реки, огибая выступ правого коренного берега. Несовпадение направлений половодного потока вызывает активное перемещение побочней и осередков в ухвосте о. Покровского, достигающих 150-200 м/год [Русловые процессы…, 2012].

На *250-242 км* русло образует *вынужденную излучину* с нижним крылом вдоль правого коренного берега (рис. 4.30). В шпоре излучины расположен о. Ликанди, отделенный от основного пойменного массива крупной протокой – полоем Ликанди, спрямляющим вынужденную излучину, сформировавшимся в XIX в. В начале XX в. полой был относительно прямолинейным, однако со временем стал меандрировать; в настоящее время образует две излучины со степенью развитости *l/L*=1,19 – верхняя и 1,27 – нижняя, забирая около 30% общего расхода воды реки. Оголовок о. Ликанди размывается и за 100 лет отступил на 750 м вниз по течению.

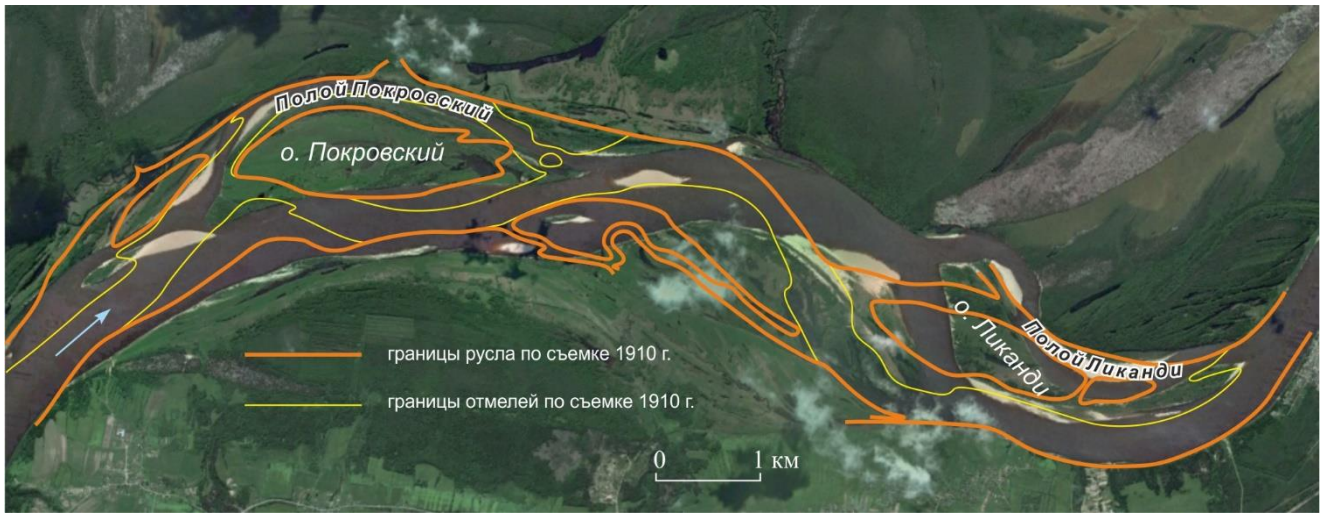


Рисунок 4.30 – Переформирования русла на участке 255-242 км; космический снимок 2004 г.

В районе с. Жешарта (*237-230 км*) русло образует пологую сегментную *вписанную излучину* с вершиной вдоль вогнутого берега, образовавшего уступ левобережной террасы (рис. 4.31). Проведение периодических дноуглубительных работ выше по течению у с. Жешарта, направленных на закрепление основного течения у левого вогнутого ее берега, способствовало разработке спрямляющей протоки у правого выпуклого берега в шпоре излучины за островами Верх. и Ниж. Жешартскими. В настоящее время основное течение реки поддерживается в левой части русла у Жешартских островов за счет перекрытия спрямляющей протоки системой дамб и полузапруд [Русловые процессы…, 2012]. Начало многоводного периода на реке способствовало в 1949 г. отчленению побочня, разросшегося в ухвостье о. Ниж. Жешартского, превратившегося в

о. Башлыковский. Левый берег о. Ниж. Жешартского с начала XX в. отступил почти на 300 м. В настоящее время протока у левого берега за о. Башлыковским активизируется лишь в период половодья.

В вершине излучины на протяжении XX в. происходил рост побочней у ее правого выпуклого берега в маловодные периоды, их отчленение в периоды повышенной водности, дальнейшее зарастание; динамическая ось потока при этом направленно перемещалась к правому выпуклому берегу, чему способствовало закрепление положения потока у левого берега путем выправительных работ; протоки между островами в вершине излучины отмирали, новые острова становились частью пойменного массива. В результате в вершине излучины сформировалась узкая частично островная пойма, ширина которой не превышает 600 м.

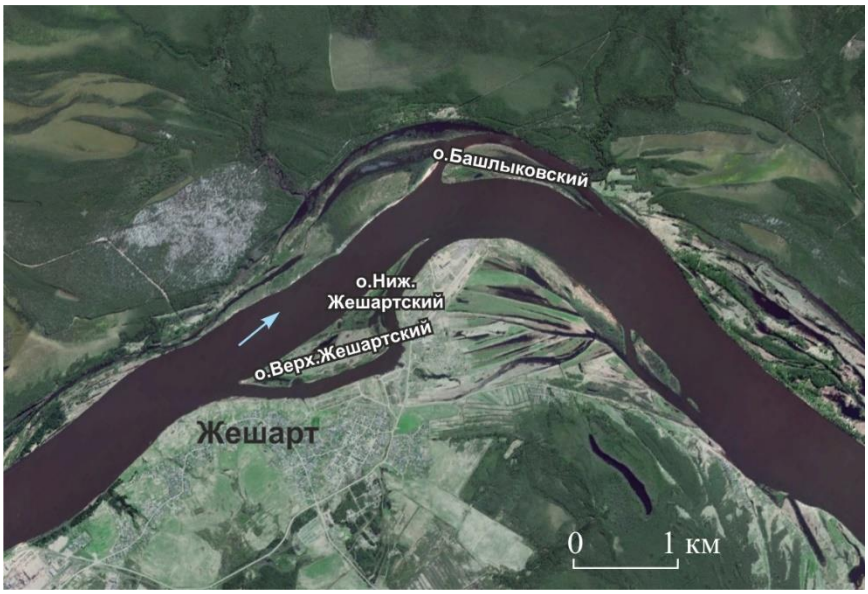


Рисунок 4.31 – Вписанная излучина на 237-230 км

В 1909 г. на участке современного *относительно прямолинейного русла* на *214-208 км* существовало одиночное разветвление, образованное о. Сухановским. Основным рукавом был левый, образующий вписанную излучину со степенью развитости *l/L*=1,13 (рис. 4.32, А). К 1930-м гг. в многоводный период активизировалось развитие правого, более прямого, рукава, куда переместился основной поток; левый рукав стал отмирать.

Расположенная на *208-203 км* Яренская излучина в расширении долины (ширина поймы до 6-7 км) активно развивалась на протяжении XIX-XX вв. (рис. 4.32, А). Коренной берег направлял поток в правую часть русла, способствуя развитию Яренской излучины. Скорость смещения ее вогнутого берега достигала в среднем 5-8 м/год, *l/L* изменялась от 1,15 в конце XVIII в. до 1,73 в начале XX в. К 1930-м гг. она превратилась в крутую омеговидную излучину, и в ее шпоре начала формироваться спрямляющая протока, чему способствовала повышенная водность реки, а также перестройка русла в Сухановском разветвлении. В 1950-е гг. Яренская излучина спрямилась при *l/L*=2,2. В настоящее время на месте бывшей Яренской излучины сформировалась серия из двух пологих *свободных излучин* со степенью развитости *l/L*=1,22 и 1,19 соответственно.

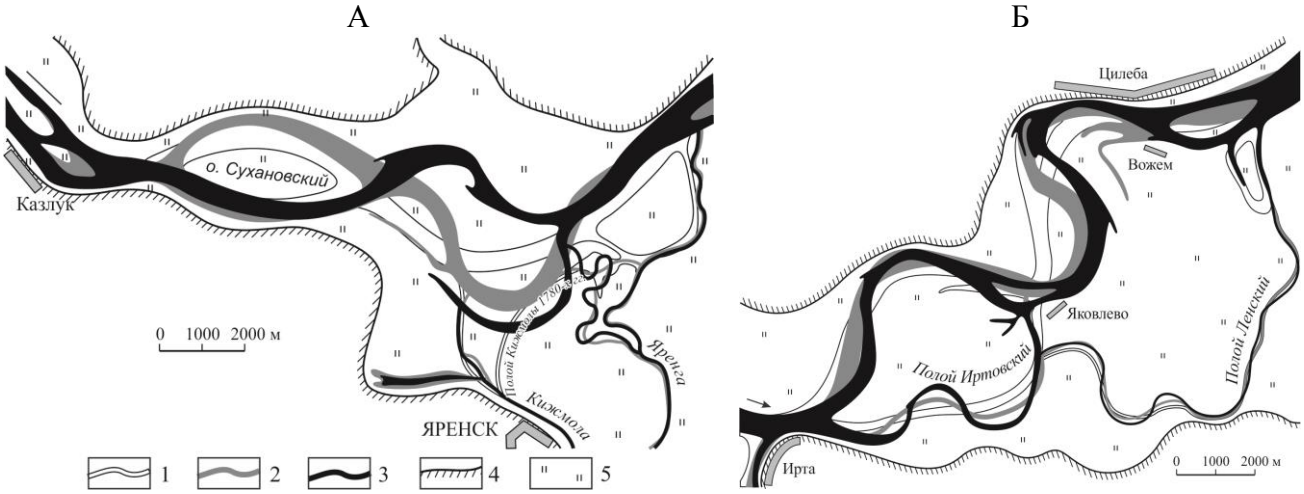


Рисунок 4.32 – Переформирование русла на участке в районе с. Яренск (А) и с. Ирты (Б) с конца XVIII до начала XXI в.: 1 – положение русла в 1780-е гг.; 2 – то же в 1909 г.; 3 – то же в 2001 г.; 4 – коренные берега; 5 – пойма [Русловые процессы…, 2012]

До XVIII в. на перевале русла от правого коренного к левому коренному берегу (*191-171 км*) существовало пойменно-русловое разветвление с поперечной протокой у д. Яковлево (рис. 4.32, Б). Левый рукав этого разветвления в настоящее время представляет собой современное русло, правый рукав образовывали расположенные в правобережной части поймы крупные полои – Иртовский и Ленский, тогда представлявшие собой второй основной рукав. Уже к концу XVIII в. Ленский полой в нижней части разветвления, испытывая подпор от более многоводного левого рукава (на что указывает образование острова в его устье) при

угле встречи около 90°, обмелел и превратился в маловодную пойменную протоку. Полой Иртовский в верхней части разветвления до середины XX в., сохраняя статус второго основного рукава пойменно-руслового разветвления, активно меандрировал, вследствие чего его длина стала больше длины левого рукава; кроме того, развитие излучины левого рукава, которое наиболее интенсивно происходило в первой половине XX в., привело к увеличению угла встречи потоков левого и правого рукавов до 90-110° и возникновению подпора. В настоящее время полой функционирует в период половодья, забирая до 15% расхода воды в реке при ширине в 2 раза меньшей, чем основное русло.

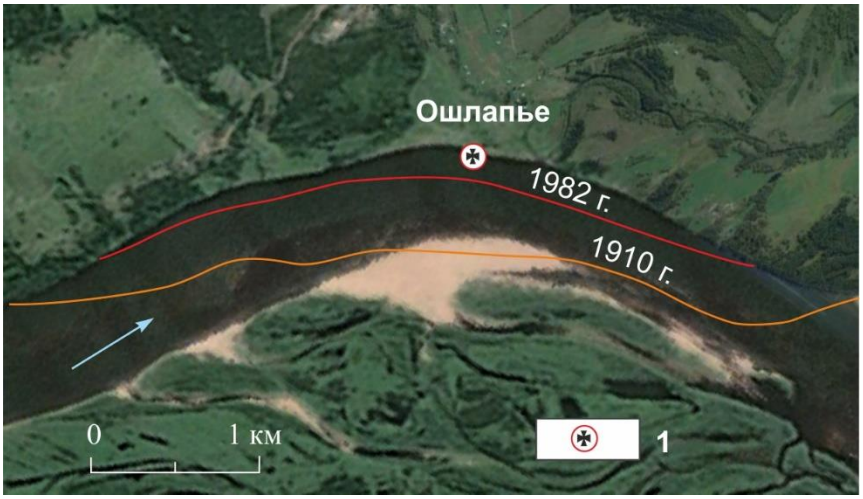
В настоящее время этот участок представлен четырьмя сопряженно развивающимися *адаптированными и свободными излучинами* (рис. 4.32, Б). Верхнее крыло первой частично контролируется коренным берегом (с. Ирта), вторая излучина – вписанная, третья – свободная, четвертая – вынужденная. Переформирования русла на этом участке проявляются в продольном смещении верхней излучины, поперечном – свободной излучины и сжатии вынужденной с различной интенсивностью. Продольное смещение верхней излучины в районе с. Ирты, наблюдающееся с конца XVIII в., происходило со средней скоростью 3-5 м/год. Это способствовало увеличению кривизны следующей (вписанной) излучины. Максимальные деформации свободной излучины наблюдались в первой половине XX в.: размыв вогнутых берегов в вершине и нижнем крыле достигал в это время 10 м/год. Вследствие этого происходило сжатие нижней в серии вынужденной излучины, нижнее крыло которой следует вдоль коренного берега у с. Цилеба: ее l/L=1,5 в 1780-е гг, l/L=1,8 в 1909 г., l/L=1,9 в 2014 г., и она из крутой сегментной превратилась в пальцеобразную с крыльями, ориентированными субпараллельно и изгибом русла в вершине на 180°.

Упрощение морфологии русла на участке 214-203 и 191-171 км в XX в. является подтверждением относительной маловодности реки в целом в XX в. по сравнению с XIX в., на это также указывала И.Н. Каргаполова [2006].

Ниже по течению на участке между с. Суходолом и с. Козьмино (*162-145 км*), представленном пологой излучиной и пойменно-русловым разветвлением, в XX в.

происходили значительные переформирования. В течение всего XX в. размывался левый (вогнутый берег) *пологой сегментной излучины* в районе с. Ошлапье на *162-158 км*: с 1910 по 2005 г. средняя скорость размыва составляла 5-6 м/год; за этот почти 100-летний период берег отступил почти на 600 м (рис. 4.33, А), что привело к обрушению церкви в начале XXI в. (рис. 4.33, Б).

А



Б

Рисунок 4.33 – Размыв берега у с. Ошлапье (163-158 км) в 1910–2005 гг.: А – границы левого берега в 1910 и 1982 гг. на снимке 2005 года: 1 – церковь; Б – церковь на бровке поймы в 2005 г. (*фото С.Н. Рулевой*)

На участке *158-145 км* находится *пойменно-русловое разветвление*. Левый (главный) рукав этого разветвления представлен тремя свободными излучинами; правый – крупный полой Прось, состоит из 4 излучин (3-х свободных и 1-й адаптированной), уступающих по размерам излучинам основного русла (табл. 4.3). В период с конца 1950-х гг. до начала 2000-х гг. водность полоя сократилась с 30%

до 10%, чему, вероятно, способствовала аккумуляция наносов у захода в него, поступающих от размыва берега у с. Ошлапье.

В течение XX в. излучины обоих рукавов активно развивались, что проявлялось в увеличении степени их развитости (за исключением верхних в серии) (табл. 4.3) и радиусов кривизны (за исключением нижних в серии излучин). За 100 лет излучины смещались продольно (рис. 4.34): на 1 км сместилось нижнее крыло 2-й излучины в левом рукаве, а вогнутый берег в вершине 3-й – размылся на 800 м; в правом рукаве нижнее крыло 3-й излучины сместилось на 700 м, вогнутый берег 4-й отступил на 400 м.

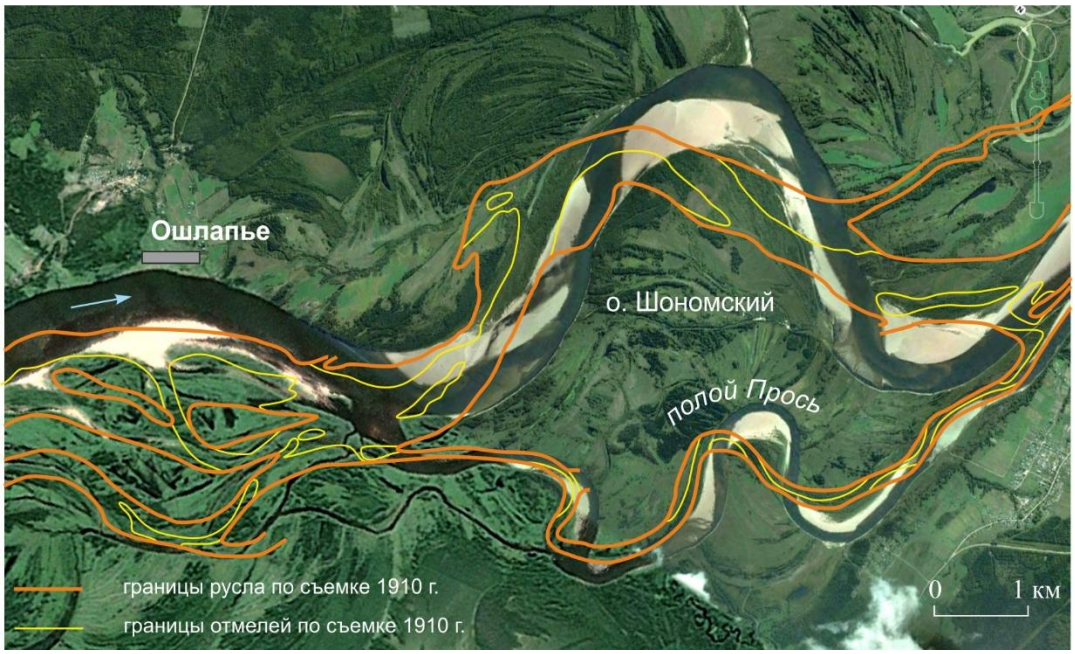


Рисунок 4.34 – Переформирования пологой сегментной излучины и пойменно-руслового разветвления на 162-145 км; космический снимок 2004 г.

Таблица 4.3 – Изменение параметров излучин рукавов в пойменно-русловом разветвлении на 162-145 км

Рукав	№ излучины	1910		2004	
		l/L	*r*, м	*l/L*	*r*, м
Левый (главный) рукав	1	1,43	1390	1,30	1520
	2	1,46	1145	1,69	1155
	3	1,24	2290	1,54	1000
Правый рукав (полой Прось)	1	1,28	330	1,25	615
	2	1,57	135	1,79	300
	3	1,58	300	2,26	380
	4	1,12	780	1,54	500

Увеличение параметров излучин полоя Прось (радиусы кривизны *r* увеличились в 2 раза) при сокращении его водности, вероятно, свидетельствует о том, что водность реки в целом в начале XXI в. увеличилась по сравнению с началом XX в.

Относительно прямолинейное русло вдоль правого коренного берега преобладает на участке *145-58 км*, прерываясь одиночными и односторонними разветвлениями, которые не образуют здесь протяженных участков. Русловые деформации в естественном режиме развивались здесь до середины XX в. В 1960-80-е гг. здесь проведены работы по коренному улучшению судоходных условий, заключающиеся в приведении потока к правому коренному берегу путем отторжения побочней перекатов и углубления вдоль него рукавов в разветвлениях русла. Блуждание потока по рукавам и образование извилин динамической оси потока определялось формированием побочней ниже выступов коренного берега и их последующим смещением; продолжительность периодов смещения основного расхода по рукавам составляла 20-25 лет. После проведения работ разветвленное русло превратилось в прямолинейное неразветвленное. После прекращения работ в 1990-е гг. восстановления прежней морфодинамики русла не происходит [Белый, Иванов и др., 2001].

Переформирования *одиночных и односторонних разветвлений* в пределах этого участка связаны с перераспределением расходов воды по рукавам. На участке между д. Карповская и с. Слободчиково (145-122 км) периодическая перемещение основного потока между рукавами разветвления, вызвала необходимость проведения выправительных работ. В результате строительства дамб в левом рукаве у о. Васильпух (133 км) и в правом рукаве разветвления у о. Кобылий (129 км) (рис. 4.35) во второй половине XX в. основной поток был закреплен в противоположных рукавах, что привело к изменению морфологии разветвлений, которые из одиночных превратились в односторонние. В течение последнего 20-летия XX в. – начала XXI в. для данного участка характерно увеличение размеров островов (например, о. Кобыльего и др.) и образование новых за счет зарастания песчаных отмелей, что стало результатом антропогенного воздействия.

На *58-40 км* до 1980-х гг. русло представляло собой три смежных свободных излучины. Размывы их вогнутых берегов в 1960-е гг. (д. Задовая – 49 км, д. Емышево – 44 км, г. Коряжма – 38 км) достигали 8-10 м/год [Русловые процессы…, 2012]. В многоводный период во второй половине 1980-х гг. произошло спрямление Емышевской излучины при степени развитости *l/L*=1,7 (рис. 4.36), и к 1991 г. старое русло полностью обмелело.

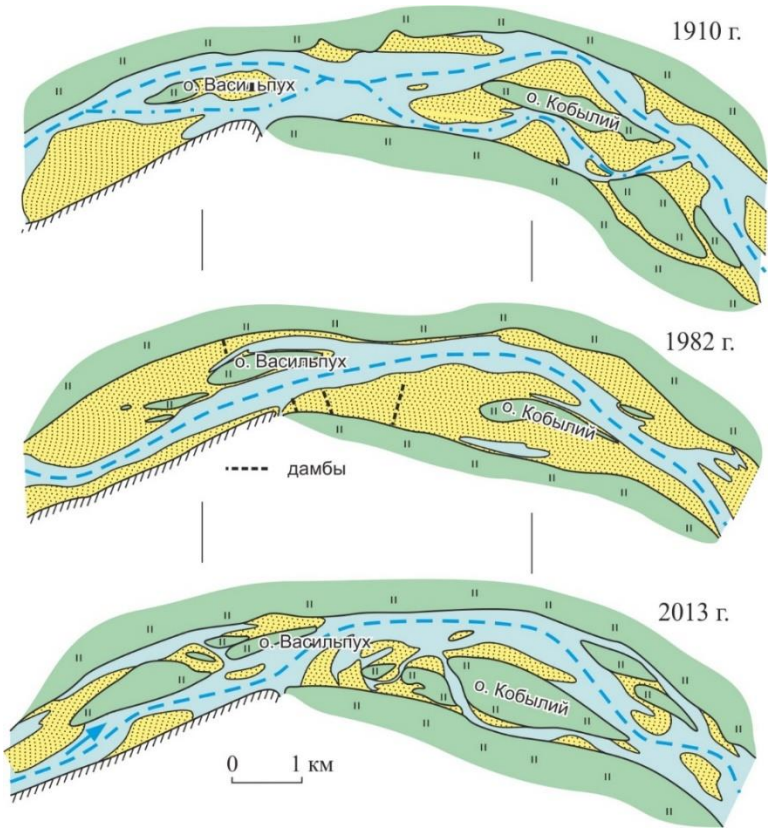


Рисунок 4.35 – Переформирования русла на 136-125 км

В районе г. Сольвычегодска (*31-22 км*) русло *разветвлено-извилистое* (рис. 4.37). У выпуклых берегов излучин последовательно образовывались осередки, которые, зарастая, превращались в острова; протоки за ними мелели и превращались в пойменные ложбины. При достижении излучиной критической кривизны (*l/L*>2,4) наиболее прямая протока (ложбина) вновь начинала развиваться, и в нее переходил основной поток. В 1984 г. была разработана капитальная прорезь (рис. 4.37, А) по спрямляющей Сольвычегодскую излучину протоке, старое русло превратилось в курью (залив в нижней части) и полностью обмелело со стороны захода в него. Новое русло начало постепенно искривляться:

в 1984 г. радиус его кривизны был *r*=2,4 км и степень развитости *l/L*=1,11, в 2015 г. – 2 км и 1,15, соответственно. Правый вогнутый берег, представленный островами, составлявшими шпору бывшей излучины, размывается со скоростями около 10 м/год [Русловые процессы…, 2012].

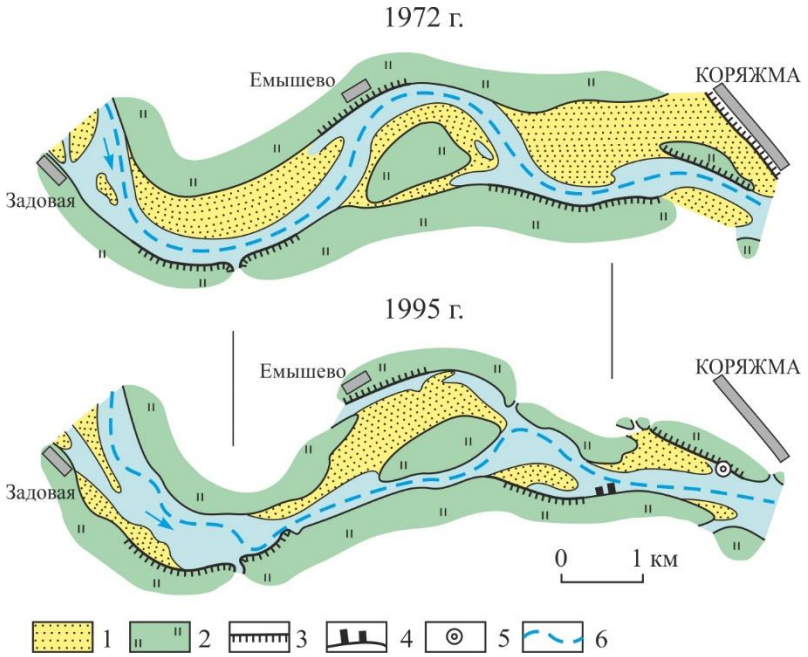


Рисунок 4.36 – Переформирования русла на Задовской и Емышевской свободных излучинах: 1 – зона аккумуляции; 2 – пойма; 3 – укрепление берега; 4 – полузапруды; 5 – водозабор; 6 – судовой ход [Русловые процессы…, 2012]

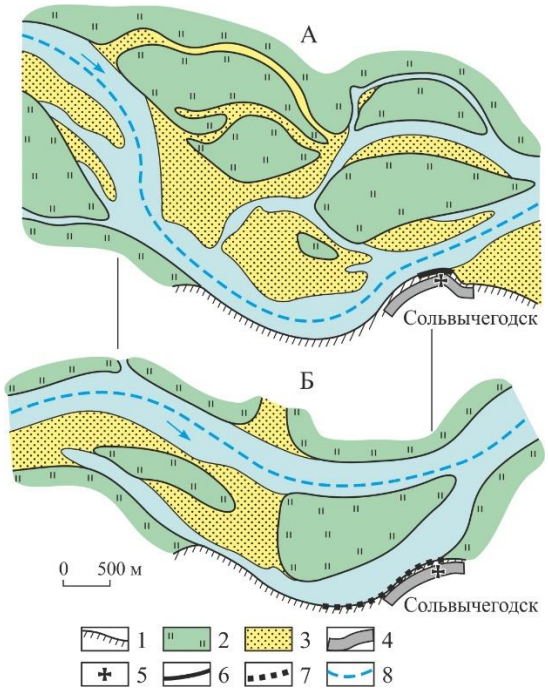


Рисунок 4.37 – Спрямление Сольвычегодской излучины (разветвленно-извилистое русло): А – 1982 г.; Б – 1995 г.; 1 – уступы надпойменных террас; 2 – пойма; 3 – прирусловые отмели; 4 – город; 5 – Благовещенский собор; 6 – берегоукрепление начала XX в.; 7 – современное берегоукрепление (каменная наброска); 8 – судовой ход [Русловые процессы…, 2012]

В *одиночном разветвлении* Вычегды, расположенном непосредственно перед узлом слияния с Северной Двиной на *5-0 км*, происходило перераспределение расходов воды по рукавам. В начале 1970-х гг. в устье Вычегды произошел переход основного потока из правого в левый рукав одиночного разветвления, связанный с переформированиями русла Северной Двины в узле слияния: выдвижением косы на стрелке и оттеснением потока в правую часть русла, а затем отторжением ее вычегодским потоком и смещением последнего в левую часть русла Вычегды.

Основные закономерности многолетних переформирований русла Вычегды. В течение рассматриваемого периода слабоустойчивое русло Вычегды (Λ снижается вниз по течению с 5,9 до 3,1) испытывало значительные деформации: развитие и спрямление излучин, перераспределение расходов воды в рукавах разветвлений, отмирание и развитие пойменных проток, изменение конфигурации узла слияния и места впадения притока, вплоть до смены морфодинамического типа русла.

Общие тенденции переформирований извилистого русла нижней Вычегды проявляются в активизации пойменных проток (Шарда-Полоя, полоя Серт и др.) в шпорах излучин с последующим спрямлением последних, спровоцированные преимущественно кратковременными повышениями водности в течение нескольких лет или одного года. Так, в середине XIX в. произошло спрямление излучины в узле слияния Вычегды и Сысолы; в течение XX в. на участке выше устья Выми спрямились Трехозерская (421-419 км), Белоборская (410-394 км), Часовская (368-365 км) излучины; ниже устья Выми – Яренская (208-203 км), Емышевская (45-41 км).

Согласно результатам палеогидрологического анализа нижней Вычегды [Сидорчук и др., 1999], в течение последних 10 тыс. лет водность реки колебалась от -50% до +30% от современного значения $Q_{ср}$, однако внутригодовые колебания стока были менее выраженными, поэтому даже при значениях $Q_{ср}$ близких к современным русло реки оставалось меандрирующим; многолетние колебания водности отражались в изменении ширины русла реки. В периоды, когда максимальные расходы возрастали (9,2-8,9 тыс. лет назад), формировались

пойменные протоки и разветвленно-извилистое русло. Продолжающийся в настоящее время процесс спрямления макроизлучин, начался еще 2 тыс. лет назад при среднегодовом расходе воды $Q_{ср}$=770 м^3/с, что почти вдвое меньше современного (1160 м^3/с). Это было связано с перераспределением стока воды внутри года и увеличением роли руслоформирующих расходов воды. И.Н. Каргаполова [2006] указывает и другую возможную причину изменения морфологии русла за последние два столетия – перемещение русла от левого к правому борту долины.

Характерный для излучин русла и рукавов разветвлений естественный процесс увеличения извилистости за счет образования вторичных изгибов на крыльях излучин сопровождается ростом побочней и усилением размыва противоположных берегов; в многоводные периоды в результате отчленения массивных побочней и их дальнейшего зарастания формируются острова на крыльях излучин русла (у с. Усть-Пожег, 341 км) и рукавов пойменно-русловых разветвлений (на 180 км; у с. Цилеба, 169 км).

Понижение водности приводило к консолидация островов, постепенному отмиранию пойменных проток, сокращению водности вторых рукавов пойменно-русловых разветвлений, в которые, однако, продолжало отвлекаться до 30% расхода воды [Белый и др., 2001]. Переход основного расхода воды в менее извилистый рукав часто был связан с увеличением извилистости второго рукава (полои Иртовский, Ленский, Прось); при этом излучины главного рукава также продолжали развиваться.

Распространение широкой поймы на нижней Вычегды и ее затопление при прохождении руслоформирующих расходов воды определяют особенность переформирования разветвленного русла Вычегды: развитие всё новых пойменных проток с последующим переходом в них основного расхода воды. Цикл перехода основного расхода воды из одного рукава в другой не превышает 20-30 лет [Каргаполова, 2006]. Наличие ведущего коренного берега, в большинстве случаев, определяет стабильность расположения основного потока вдоль него на протяжение 200 лет и более.

Русловые процессы на нижней Вычегде, происходящие за последние 200 лет, свидетельствуют о снижении водности реки XX в. по сравнению с XIX в., что отмечалось И.Н. Каргаполовой [2006], и проявилось в уменьшении числа случаев смены значимости рукавов в основных разветвлениях Вычегды на участке ниже устья р. Выми: за последние 200 лет из 23 основных разветвлений переход основного течения из одного рукава в другой осуществлялся в 15 из них (65%), причем за 130-и летний период 1780-1910 гг. – в 10 случаях (43%), а за 90-летний период 1910-2001 гг. в 5 (22%); произошло также снижение протяженности узлов разветвлений, образованных в XX веке по сравнению с их длиной в XVIII-XIX вв. в среднем с 3 до 1,5 км [Каргаполова, 2006].

Увеличение параметров излучин (радиусов кривизны) вторых рукавов пойменно-русловых разветвлений, зафиксированные в течение XX в., при сокращении доли расхода воды в них свидетельствует об общем повышении водности реки второй половины XX в. по сравнению с первой, увеличении максимальных расходов воды половодья и обеспеченности $Q_ф$ верхнего интервала на протяжение последнего столетия (происходили периодические повышения водности разной продолжительности от 11 до 37 лет).

Большую роль в переформированиях русла реки сыграл антропогенный фактор, способствующий закреплению определенного положения динамической оси потока и, как и на Северной Двине, приводящий к упрощению морфологии русла, уменьшению его разветвленности (отмирание рукавов, причленение островов к пойме), закреплению основного потока вдоль одного из берегов на участках относительно прямолинейного русла и в рукавах одиночных разветвлений, способствуя их трансформации в односторонние или полному обмелению бывших вторых рукавов. Последствия дноуглубительных и выправительных работ после их прекращения проявились в стабилизации относительно прямолинейного русла, т.е. возврата к естественному состоянию после прекращения дноуглубительных работ не произошло. Это связано с тем, что русло Вычегды в пределах таких участков имеет ведущий коренной берег, вдоль которого было закреплено основное течение реки.

4.3 Мезень

Устье Вашки – устье Пёзы (163-48,5 км). Переформирования русла в узле слияния Мезени и Вашки (бездельтовый тип) на *163-161 км* заключаются в периодическом росте обширной отмели на стрелке и ее отторжении (рис. 4.38). При прохождении основного потока Мезени вдоль правого берега перед слиянием с Вашкой, и встрече двух потоков под острым углом, происходит рост отмели на стрелке (1938 г.); с ростом угла встречи потоков отмель размывается (1961, 1980-е, 2010-е гг.). Процесс развития отмели и ее размыва периодический, однако зависимость от колебаний водности отсутствует, будучи связанной со смещением побочней вдоль русла Мезени.

Переформирования в узле слияния Мезени и Вашки оказывают влияние на изменение положения динамической оси потока в пределах участка врезанного *относительно прямолинейного русла на 162-159 км*. При встрече потоков на стрелке под острым углом стрежень потока проходит посередине русла. С ростом отмели на стрелке мезенский поток искривляется и направляется к левому берегу у с. Ущелья, где, испытывая направляющее воздействие мыса левого коренного берега, отклоняется к правому вогнутому берегу у с. Березник.

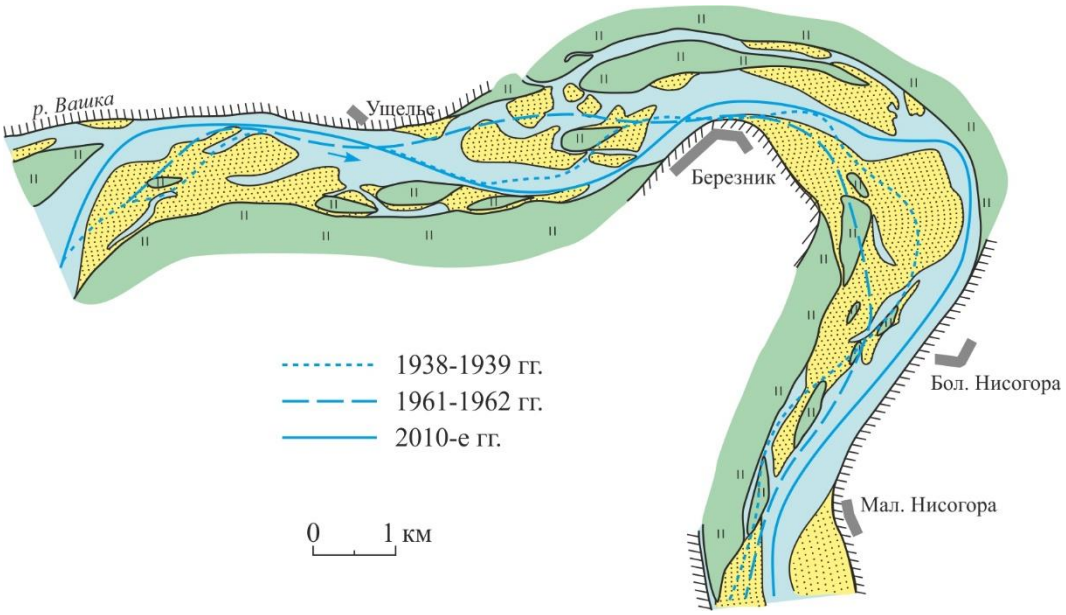


Рисунок 4.38 – Изменения положения судового хода на участке от устья Вашки до с. Мал. Нисогора. План русла – по космоснимку 2013 г.

Переформирования в пределах *врезанной излучины* у с. Мал. Нисогоры на *159-145 км*, в свою очередь, определяются положением потока относительно выступа коренного берега у с. Березник (рис. 4.38). Проходя по касательной относительно мыса правого коренного берега поток не испытывает направляющего воздействия мыса (кон. 1930-х, нач. 1960-х, 1980-90-е гг.), и в вершине излучины следует посередине русла, подходя к левому коренному берегу в нижнем крыле Нисогорской излучины у с. Бол. Нисогоры (в 1930-е гг. в 1,8 км выше). Огибая мыс правого коренного берега (2010-е гг.) поток испытывает направляющее его воздействие, и переваливает к левому вогнутому берегу в вершине Нисогорской излучины, где развита неширокая пойма ($B_п$~$b_р$), и следует вдоль него в привершинной части и в нижнем крыле почти до с. Мал. Нисогора, где русло прижимается к левому коренному берегу.

Ниже по течению расположен первый (29 км; от с. Мал. Нисогора почти до с. Кесломы, 145-116 км) из двух протяженный участок *параллельно-рукавных разветвлений во врезанном русле*. Второй участок протягивается на 24,5 км от с. Целегора до с. Козьмогородского (92-67,5 км). Оба участка сформировались непосредственно ниже излучин – врезанной и вынужденной, соответственно, и сменяются адаптированным относительно прямолинейным руслом. Границы этих морфологически однородных участков стабильны, будучи привязанными к местам изменения направления долины. Относительно стабильно также положение мест внутри участков, где происходит изменение водности основных рукавов и, соответственно, находятся перевалы значительной части расхода воды от одного берега к другому. Они определяются местными неровностями коренных берегов, оказывающих на поток направляющее воздействие. При этом часть стока воды, иногда бóльшая, направляется в рукав к противоположному относительно выступа берегу, что делает его главным в системе: правый рукав у о. Комарова Роща на 143 км (51% от общего расхода воды в русле на спаде половодья), левый рукав у о. Виловатая Роща на 136 км (63%), правый у о. Чаповецкого на 128 км (63%), левая протока у осередков перед о. Заречным и левый рукав у о. Тоострова на 125 км (57%).

Периодическое развитие и отторжение кос в ухвостье отмели в нижнем крыле Нисогорской излучины создает условия для отвлечения значительной части расхода воды в левый – второй основной рукав *параллельно-рукавного разветвления*, образованного о. Комарова Роща (144-140 км). В нем проходит 49% стока воды несмотря на то, что основная часть потока направляется вогнутостью левого коренного берега у с. Мал. Нисогоры (147 км) в правый рукав разветвления.

Ниже по течению на 140-131 км основной расход воды сосредоточен в левом рукаве параллельно-рукавных разветвлений (54%). Остров Виловатая Роща образует разветвление второго порядка в левом рукаве. В течение второй половины XX в. основной расход воды перешел из правого в левый рукав этого вторичного разветвления. За многоводный период с конца 1930-х до начала 1960-х гг. остров сместился примерно на 300 м (расстояние, равное половине его длины) вниз по течению, а динамическая ось потока перешла в начале 1980-х гг. в левый рукав этого вторичного разветвления (рис. 4.39).

С начала 1980-х гг. к началу 2000-х гг. остров сместился еще на 200 м. Одновременно с этим выше по течению вследствие смещения побочней перекатов, расположенных на перевале потока от правого к левому берегу, происходила аккумуляция наносов за плечом правого коренного берега, усиливая его направляющее воздействие на поток. Это привело к сосредоточению основной части потока вдоль левого коренного берега у о. Виловатая Роща и размыву берега выше по течению в вершине пологого изгиба. Скорости отступания вогнутого берега возросли: с конца 1930-х до начала 1980-х гг. берег отступил на 100 м со средней скоростью 2,7 м/год, с начала 1980-х до начала 2000-х гг. – на 70 м со скоростью 3,1 м/год. С конца 1930-х гг. происходило изменение конфигурации островов в этом разветвлении. Так, о. Заозерская Кошка объединился с небольшим безымянным островом, расположенным в его ухвостье, и разросся к 2004 г. В результате зарастания отмелей образовались новые острова у правого берега.

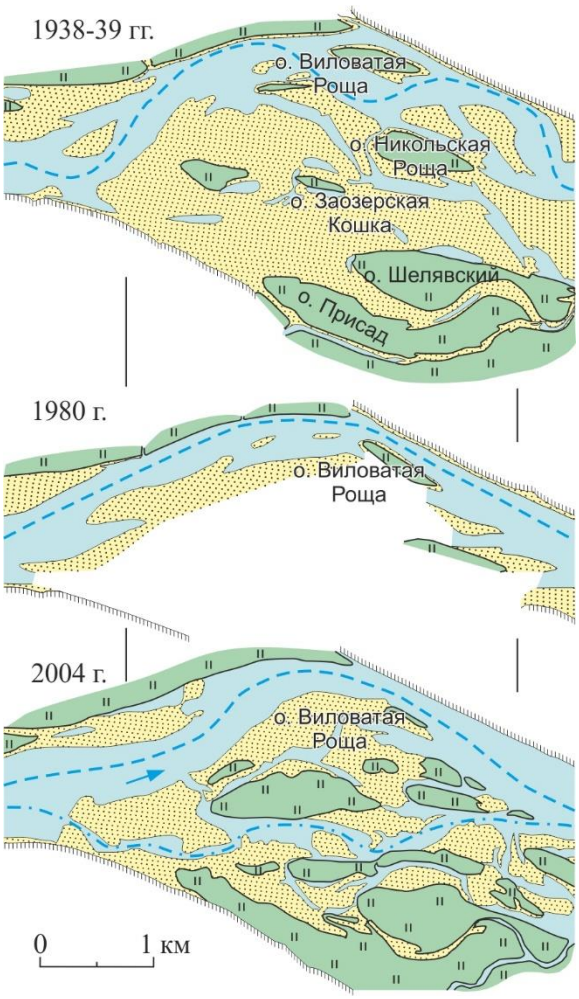


Рисунок 4.39 – Переформирования параллельно-рукавного разветвления на 140-131 км

Существенные переформирования произошли на перевале потока от левого к правому берегу (*131-120 км*) в пределах *параллельно-рукавных разветвлений* в районе с. Юромы (рис. 4.40). В 1937-38 гг. на 131-127 км основной поток был сосредоточен у левого берега. С конца 1930-х гг. за плечом левого коренного берега происходила аккумуляции наносов, рост отмели и последующее частичное отторжение на фоне периода пониженной водности. В результате зарастания отчленившейся части отмели в начале 1960-х гг. образовался о. Чаповецкий (131-127 км). В течение второй половины XX в. остров рос как трансгрессивно, так и регрессивно. На протяжении того же временного периода продолжался рост отмели в его ухвостье и в вогнутости левого берега. В конце 80-х гг. XX в. разросшаяся отмель практически перекрыла заход в левый рукав разветвления, куда ранее отвлекалась бóльшая часть расхода воды. Это привело к активному развитию правого рукава. Повышение водности начала 1990-х гг. спровоцировало

переход основного течения, направляемого выступом левого берега, из левого рукава в правый у о. Чаповецкого; доля расхода воды в нем в настоящее время составляет 63%. Ниже по течению до конца 1980-х гг. поток подходил к правому коренному берегу у с. Юрома (126 км), но после перехода основного течения в правый рукав у о. Чаповецкого, перевал потока от левого берега к правому сместился на 1,5 км вверх по течению к с. Бугава (127,5 км).

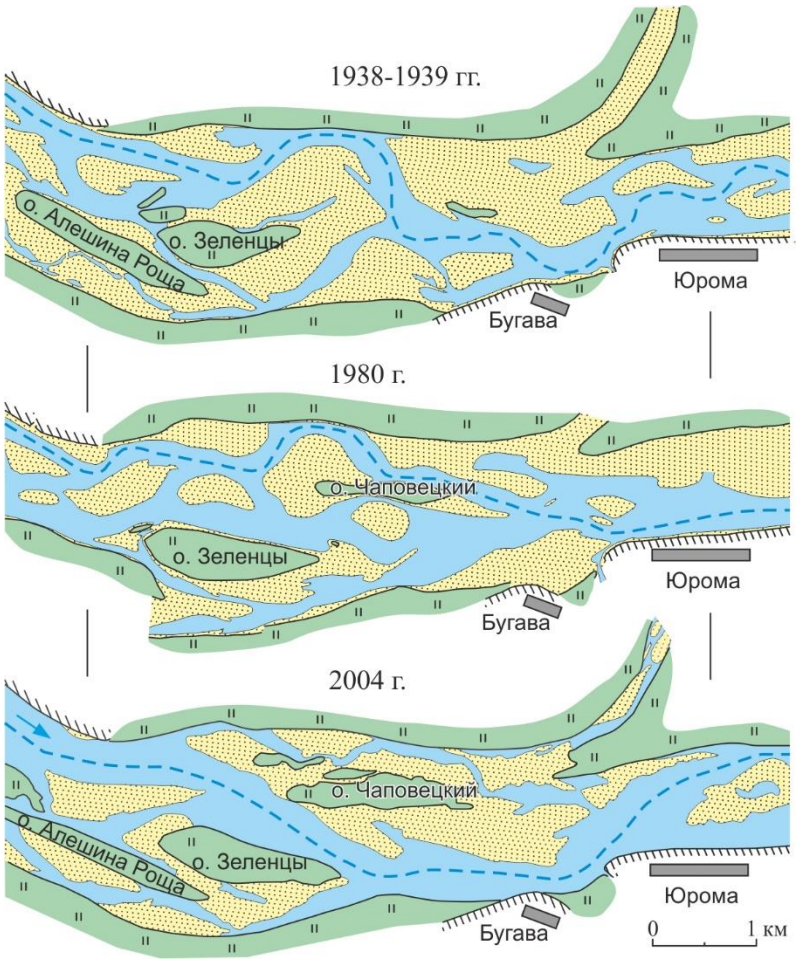
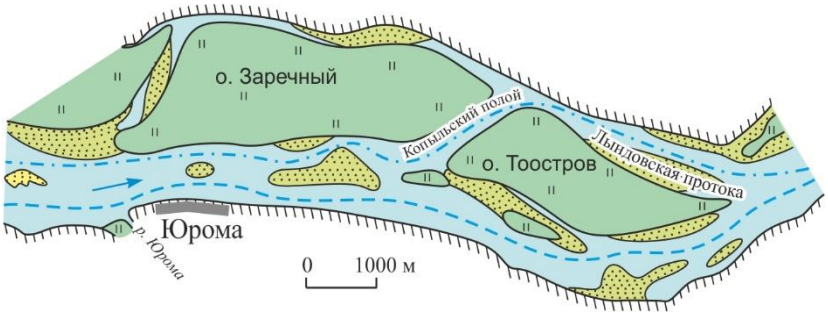


Рисунок 4.40 – Переформирования русла на 131-120 км

В результате изменения положения перевала потока на 131-127 км стало проявляться направляющее влияние на поток выступа правого коренного берега, вследствие чего существенно увеличилась водность левой ветви течения возле о. Заречного (рис. 4.41, А), вдоль которого в настоящее время сосредотачивается 57% расхода воды в реке, и углублению левого рукава у о. Тоострова (Лындовской протоки), водность которой в настоящее время составляет 38% [Отчет…, 2010].

Также произошло общее развитие и углубление поперечного Копыльского полоя между о-вами Заречным и Тоостровом (рис. 4.41, Б).

А



Б

Рисунок 4.41 – Переформирования русла на 127-120 км (А): план русла – по топографической карте 1961-1962 гг., голубые линии – ветви течения в параллельно-рукавном русле; размыв оголовка о-ва Тоострова со стороны Копыльского полоя (122,5 км) (Б) (*фото Р.С. Чалова*) [Отчет…, 2010]

На коротком участке (*116-105 км*) *относительно прямолинейного адаптированного русла* в конце 1930-х гг. динамическая ось потока была извилистой, огибая, расположенные в шахматном порядке побочни: правый–левый–правый (рис. 4.42). К началу 1960-х гг. на фоне периода пониженной водности верхний правобережный побочень размылся из-за удлинения о. Тоострова и кос в его ухвостье, а ниже по течению у правого берега сформировался обширный правобережный побочень длиной более 3 км и шириной 1,1 км (при ширине меженного русла менее 300 м). В конце 1980-х гг. в период пониженной водности сформировался небольшой о. Губенец, а в начале 2000-х гг. побочень частично зарос в тыловой части.

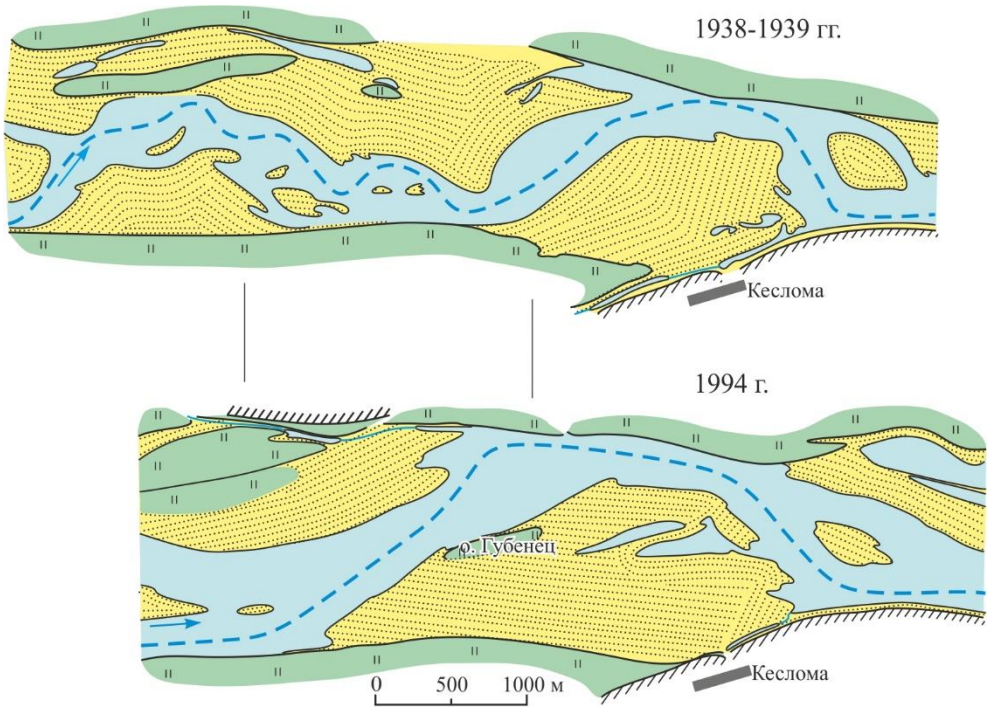


Рисунок 4.42 – Переформирования русла на 116-105 км [Отчет…, 2010]

В начале участка с *односторонними разветвлениями* (*105-97 км*) в результате роста правобережного побочня в устье р. Палуги и последующего отчленения его части, спровоцированного высокими половодьями 1951-1952 гг., к началу 1960-х гг. сформировался о. Ванин; динамическая ось потока проходила вдоль левого его берега. Рост побочня в периоды малой водности продолжался, о. Ванин смещался вниз по течению, отжимая динамическую ось потока к левому берегу. Повышение водности 1960-1970-х гг. спровоцировало переход основного расхода воды в правый относительно острова рукав, где он проходит и в настоящее время. Ниже по течению поток стабильно располагается вдоль правого коренного берега. В нижней части участка на перевале к левому берегу у с. Азаполье с конца 1930-х гг. до конца 1980-х гг. происходило спрямление динамической оси потока, связанное с размывом побочней расположенных здесь перекатов, однако в начале 2010-х гг. извилистость динамической оси снова увеличилась.

Существенные переформирования произошли в пределах второго протяженного участка *параллельно-рукавного русла* на *85-75 км* у с. Погорелец (рис. 4.43). Выше по течению с начала 60-х годов XX в. на фоне многоводного периода ниже выступа левого коренного берега разрасталась отмель, искривляющая динамическую ось потока и отклоняющая его к оголовку

о. Черсогорская Ерка. В результате последний стал размываться (отступил с начала 1960-х к началу 2000-х гг. более, чем на 250 м). Это привело к смещению в конце 1980-х гг. перевала основного потока от левого берега к правому (по сравнению с 1937-1938 гг.) вниз по течению на 1 км. Однако, несмотря на сильное искривление динамической оси, левый рукав не потерял своей значимости и до настоящего времени остается главным по водности при явной тенденции развития правого рукава, куда поток направляется мысом левого берега; в 2009 г. он забирал 26% расхода воды на спаде половодья.

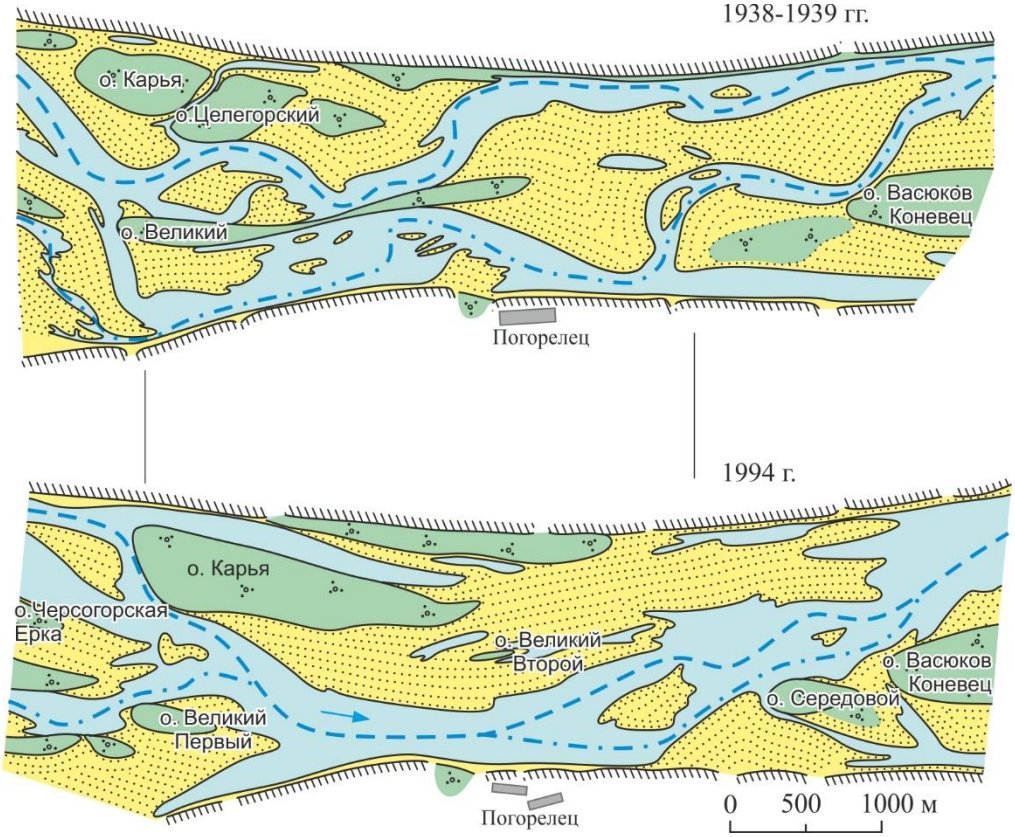


Рисунок 4.43 – Переформирования русла на участке 82-74,5 км [Отчет…, 2010]

Одновременно ниже по течению сильному размыву подвергался оголовок о. Карья (более чем на 500 м за весь период, скорость 7,5 м/год). В конце 1930-х гг. возле о-вов Карья и Целегорского поток отклонялся в центральную часть русла к о. Великому длиной 2,8 км. К 1960-м годам о. Великий в основном был размыт, разделившись на два небольших острова (бывшие наиболее широкие части единого острова) – о. Великий Первый и о. Великий Второй. Между вновь образовавшимися островами поток сместился к правому берегу к с. Погорелец.

В маловодный период конца 1990-х – начала 2000-х гг. о. Великий Второй был полностью размыт.

В *относительно прямолинейном адаптированном русле* на *67,5-48,5 км* динамическая ось потока проходит вдоль левого берега. Непосредственно выше мыса левого коренного берега в устье протоки Белое Озеро периодически разрастается обширный побочень (1980-е гг.), искривляющий динамическую ось потока и, отжимая ее к правому берегу. В дальнейшем в высокое половодье происходит отторжение побочня, который затем превращается в осередок; динамическая ось потока при этом возвращается к левому берегу (конец 1930-х, начало 1960-х и начало 2010-х гг.).

Основные закономерности многолетних переформирований русла Мезени. Переформирования русла нижней Мезени носят «внутрирусловой» характер, и обусловлены режимом переформирования перекатов и их отдельных элементов (побочней, осередков), ростом кос в ухвостьях островов. Важной особенностью русловых деформаций на Мезени является полное отсутствие влияния антропогенного фактора. Переформирования русла Мезени не имеют четкой связи с колебаниями водности и в течение рассматриваемого временного периода (кон. 1930-х – нач. 2010-х гг.) проявляются в росте побочней, отчленении их частей в периоды высоких половодий и последующем превращении их в острова, повсеместном увеличении островных массивов за счет зарастания присоединившихся к ним отмелей. За последние 50 лет (с начала 1960-х гг.) до 50–60% площади обсыхающих в межень песчаных массивов превратились в молодые пойменные массивы и острова; согласно результатам дендрохронологического анализа возраст наиболее старых древовидных кустарников – 30-40 лет [Чалов и др., 2010].

На протяжении рассматриваемого временного периода наблюдалось направленное развитие вторых рукавов параллельно-рукавных разветвлений и в некоторых случаях перемещение в них основного расхода воды. Зачастую развитие вторых рукавов спровоцировано смещением динамической оси потока к мысу коренного берега, где она начинает испытывать его направляющее воздействие,

устремляясь во второй основной рукав. Рост отмелей в тени мысов коренных берегов усиливает направляющее воздействие на поток. Переформирования русла проявляются не только в перераспределении стока воды между основными рукавами параллельно-рукавных разветвлений, но также между рукавами разветвлений второго порядка. В пределах участков относительно прямолинейного русла и на излучинах наблюдалось изменение положения динамической оси потока также связанное с деформациями грядового рельефа. Ещё одной особенностью русла Мезени является то, что на всём протяжении рассматриваемого участка за редким исключением русловые деформации проявляются «сопряженно», т.е. переформирования на вышерасположенном участке влекут изменения русла ниже по течению.

4.4 Печора

Кожвинский порог – слияние с р. Усой (864-757 км). Среди разветвленных русел нижней Печоры наибольшей динамичностью характеризуются сопряженные разветвления. Встречаясь на верхнем и нижнем участках, они формируются в свободных условиях развития русловых деформаций. На верхнем участке (от Кожвинского порога до устья Усы, 864-757 км) система *сопряженных разветвлений*, протяженностью 49 км (*862-813 км*) состоит из пяти звеньев, образованных островами Бол. Кепресди, Кенкеди, Евтюгди, Выйымвидзьди, Шипди (рис. 4.44). Русло здесь характеризуется наиболее низкими значениями устойчивости (Λ = 4,0), активным смещением перекатов и их побочней, что является основной причиной переформирований русла в целом [Завадский, Львовская и др., 2015]. Расположение побочней определяет распределение расходов воды в рукавах сопряженных разветвлений. Смещение побочней Рассольного (в первом звене) и Верх. Соколовского (между вторым и третьим звеньями) перекатов приводит к постепенному искривлению стрежня потока на перевалах от одного берега к другому между звеньями разветвлений, направляя его во вторые рукава.

Рисунок 4.44 – Система сопряженных разветвлений на 862-813 км

На фоне постепенного увеличения водности Печоры, водность вторых рукавов с конца 1950-х гг. к первому десятилетию XXI в. увеличивалась, и они получили тенденцию к развитию. При этом от верхнего (первого) звена к нижнему (пятому) этот процесс проходит с некоторым запаздыванием во времени, что отражается в постепенном уменьшении доли отвлекаемого во вторые рукава расхода воды сверху вниз по течению. В настоящее время на спаде половодья в них отвлекается 29%, 24%, 25% и 19% общего расхода воды последовательно от первого верхнего к четвертому нижнему звену. На фоне постепенного размыва побочней на заходе во вторые рукава (начиная с третьего звена), сами рукава Евтюг-Шар и Вяткин Шар остаются заполненными массивными песчаными отмелями. В пятом звене правило «восьмерки» в результате оказывается нарушенным, что усугубляется наличием левого ведущего коренного берега, к которому прижимается поток, и основным по водности, как и в предыдущем звене, здесь остается левый рукав (70% от общего расхода воды в русле), на заходе в который за плечом коренного берега за вторую половину XX – начало XXI века сформировалось вторичное одиночное разветвление. С конца 50-х гг. XX в. до 2010-х гг. изменения положения основного потока по рукавам не происходило, проявляясь лишь в виде тенденции повышения/понижения водности рукавов в каждом звене. Это позволяет сделать вывод о том, что период смены значимости рукавов в этой системе превышает 50 лет.

На *809-798 км* расположены две смежные *свободные излучины* (рис. 4.45). Для нижней характерно интенсивное продольное смещение, происходящее на фоне

поперечного: с конца 50-х годов XX в. к 2013 г. ее вершина сместилась на 1,7 км вниз по течению, степень развитости *l/L* увеличилась с 1,3 до 1,6. Вершина верхней излучины сместилась вниз на 600 м, а *l/L* не изменилась (1,2). Наиболее интенсивное смещение нижней излучины приходилось, вероятно, на многоводный период 1980-х – начала 2000-х гг.; с 1959 г. к 1999 г. излучина сместилась на 1,1 км (27 м/год), тогда как к 2013 г. ещё на 600 м (42 м/год), при этом скорости размыва вогнутого берега в ее вершине сокращались и составили за те же периоды – 17,5 м/год (700 м) и 14 м/год (200 м).

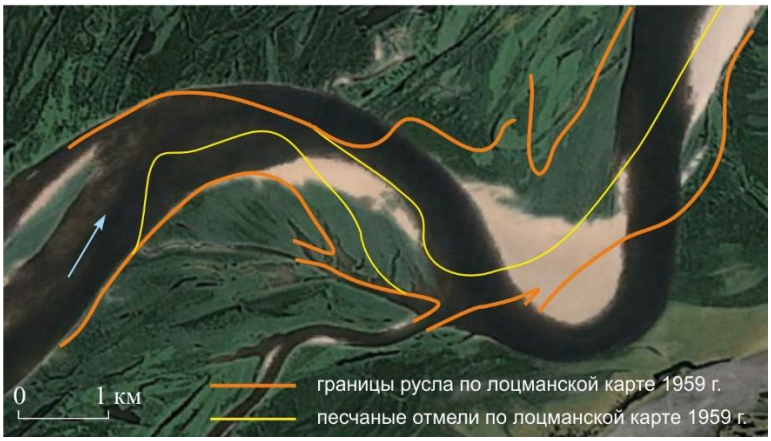


Рисунок 4.45 – Переформирования свободных излучин на 809-798 км; снимок 2013 г.

В *узле слияния* с р. Лыжей на *798-792 км* происходит периодическое изменение положения динамической оси потока (рис. 4.46): в маловодные годы происходит рост правобережного побочня, прижимающего поток к стрелке (1963, 1971, 2013 гг.), в годы с повышенной водностью побочень отторгается, и стрежень потока проходит на удалении от стрелки вдоль правого берега (1999 и 2007 гг.).

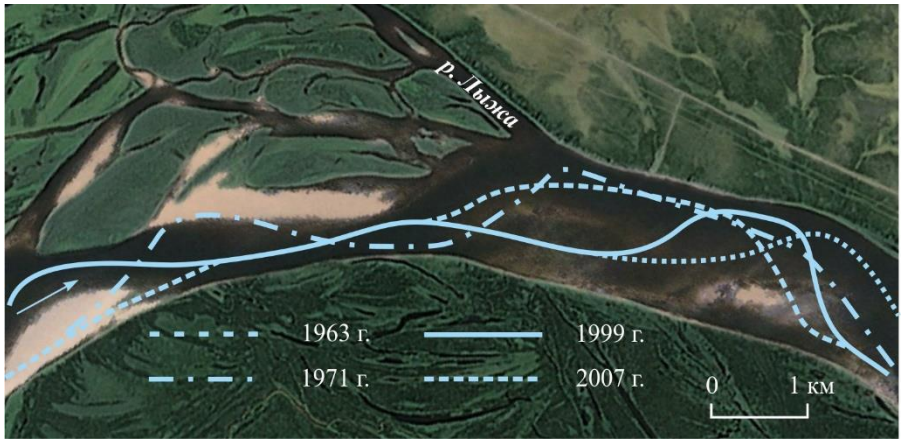


Рисунок 4.46 – Изменение положения динамической оси потока в узле слияния с р. Лыжей на 798-792 км; снимок 2013 г.

В верхней части участка *относительно прямолинейного русла (792-771 км)* динамическая ось потока стабильно располагается вдоль левого коренного берега, в нижней – динамическая ось периодически меняет свое положение относительно образующихся здесь отмелей.

В *пойменно-русловом разветвлении* непосредственно перед слиянием с р. Усой (*771-762 км*) (рис. 4.47), образованном о. Кыдзьрасди, главное течение (бóльшая часть расхода воды) переходит из одного основного рукава в другой с периодичностью 8-10 лет. С конца 50-х гг. XX в. переход основного потока в смежный рукав происходила 4 раза: 1963 г. – правый, 1971 г. – левый, 1999 г. – правый, 2007 г. – левый. При этом положение основного расхода воды не зависит от водности периода, а определяется расположением побочней перекатов на заходе в рукава.

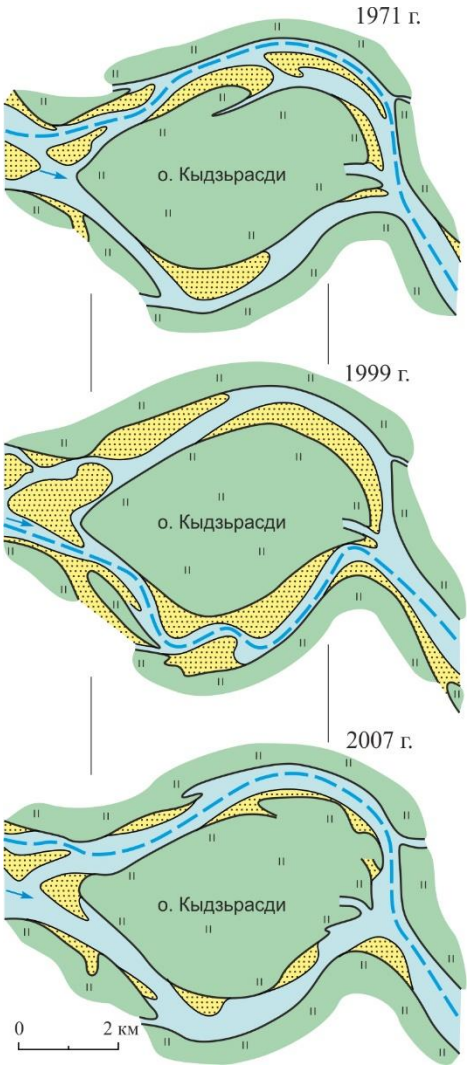


Рисунок 4.47 – Смена значимости рукавов в пойменно-русловом разветвлении на 771-762 км

Рукава этого пойменно-руслового разветвления представлены излучинами, степень развитости *l/L* которых постепенно увеличивалась в течение второй половины XX в. с 1,24 до 1,32 в левом рукаве и с 1,27 до 1,32 – в правом. При этом вогнутые берега излучин размывались, у выпуклых происходила аккумуляция наносов, отмели постепенно закрепляясь растительностью, становясь частью пойменного массива. В результате ширина пояса руслоформирования в самой широкой части разветвления увеличилась за 50-летний период в 1,2 раза. В начале 2000-х гг. незакрепленные растительностью отмели в правом рукаве размылись, что сказалось на степени развитости излучины: она сократилась до 1,26.

Слияние с р. Усой – устье р. Цильмы (757-423 км). В расположенном ниже слияния Печоры с Усой *пойменно-русловом разветвлении* (*754-727 км*) тенденцию к развитию имеет второй рукав – Новик-Шар. В 1959 г. заход в него перекрывала крупная песчаная отмель (рис. 4.48). В начале 1980-х гг., с началом многоводного периода, поток размыл в тыловой части побочня побочневый проток, отделяя его от берега и спрямляя заход в рукав. К 2007 г. образовавшийся осередок зарастает и превращается в небольшой остров у оголовка о. Тыняди, образуя разветвление 2-го порядка. Протока Новик Шар с начала 1980-х гг. к началу 2000-х гг. становится более полноводной, чему способствует общее повышение водности реки. Её ширина за 30-летний период увеличилась в 2 раза, а доля расхода воды в ней составляет уже 39% от общего расхода воды реки.

Оба рукава этого пойменно-руслового разветвления меандрируют, создавая серии из 3-х излучин. В левом (главном) рукаве с конца 1950-х до начала 2000-х гг. спрямилась 1-ая излучина, чему в том числе способствовал переход основного потока в левобережную протоку вторичного разветвления, образованного о. Ошкади, следующая за ней 2-я излучина, будучи асимметричной до середины 1970-х гг., приобретает форму близкую к сегментной за счет размыва вогнутого берега (250 м за 33 года). 3-я излучина смещалась вниз по течению и в дальнейшем спрямилась; ее переформирования связаны с развитием поперечной протоки между главным рукавом и протокой Новик-Шар, впадающей в главный рукав в верхнем крыле излучины. В период с 1974 по 1986 гг. вершина излучины сместилась на 1 км

вниз по течению со средней скоростью около 90 м/год. В связи с активизацией протоки Новик-Шар в начале 1980-х гг., поток на спаде половодья стал направлялся по поперечной протоке из протоки Новик-Шар в главный рукав, в остальные фазы водного режима – в обратном направлении. Это привело к увеличению кривизны поперечной протоки и активизации смещения излучины. На фоне повышенной водности 1980-х – 2000-х гг. сильно размывался левый берег о. Игади, отступив с 1974 г. к 2013 г. на 600 м. При этом скорости размыва с 1974 г. к 1986 г. достигали 25 м/год, а затем они сократились почти в 2 раза, составив с 1986 к 2013 г. 11 м/год.

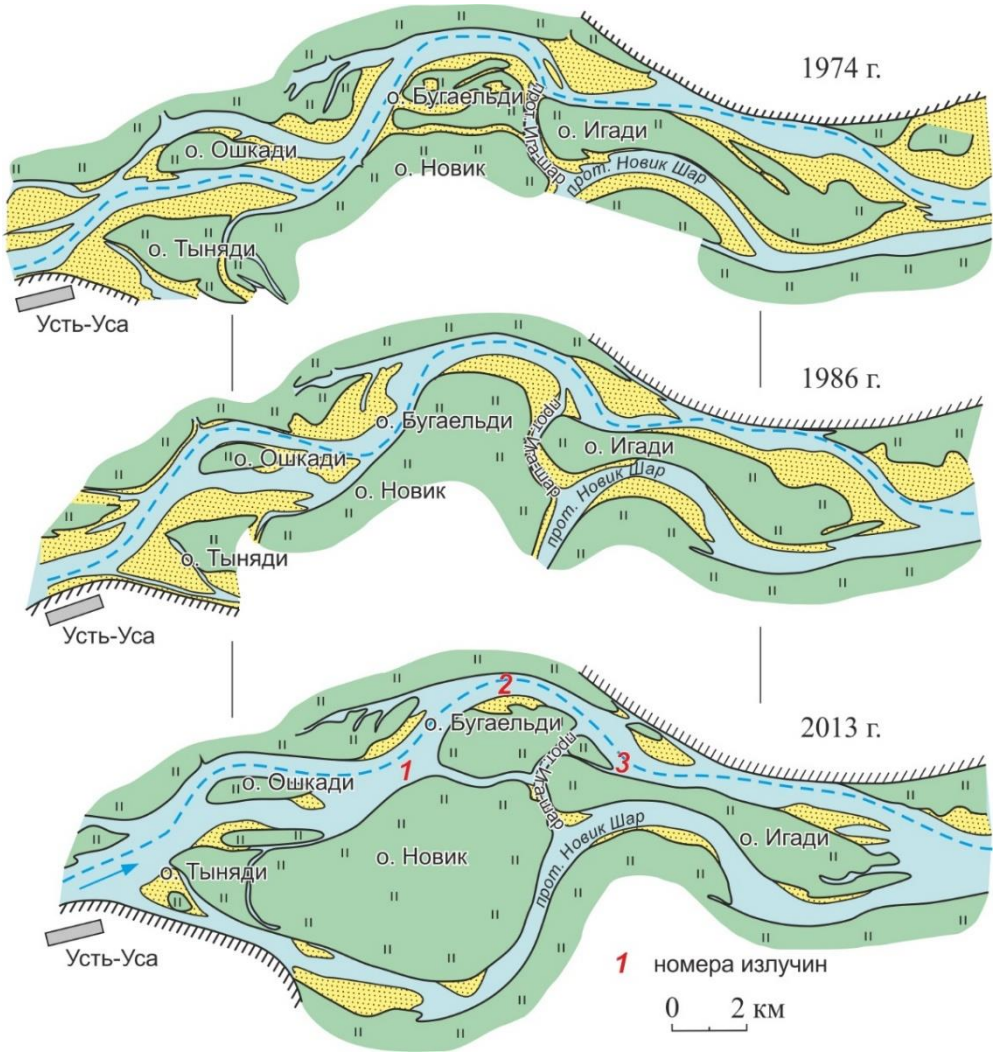


Рисунок 4.48 – Переформирования пойменно-руслового разветвления на 754-727 км

Переформирования *разветвлено-извилистого русла* (*727-680 км*), образованного островами Шальди, Ыжди и Воргади, проявляются в тенденции развития второго рукава, спрямляющего излучину (рис. 4.49). Со второй половины 1970-х гг. стало проявляться направляющее воздействие левого коренного берега

напротив расположенного выше по течению о. Игади. Аккумуляция наносов ниже его выступа и рост отмели вызвали искривление динамической оси потока и ее отклонение к правому берегу. В результате была размыта коса в ухвостье о. Игади (рис. 4.48), чему способствовала повышенная водность реки. Поток стал направляться в правый рукав у о. Шальди – протоку Ипат-Шар. При этом поперечная протока, разделяющая острова Шальди и Ыжди постепенно теряла свою значимость, тогда как ранее заход во второй рукав осуществлялся через нее. В течение почти 40-летнего периода в этом разветвлении наблюдается зарастание отмелей между островами и в рукавах и, как следствие, увеличение площади островов.

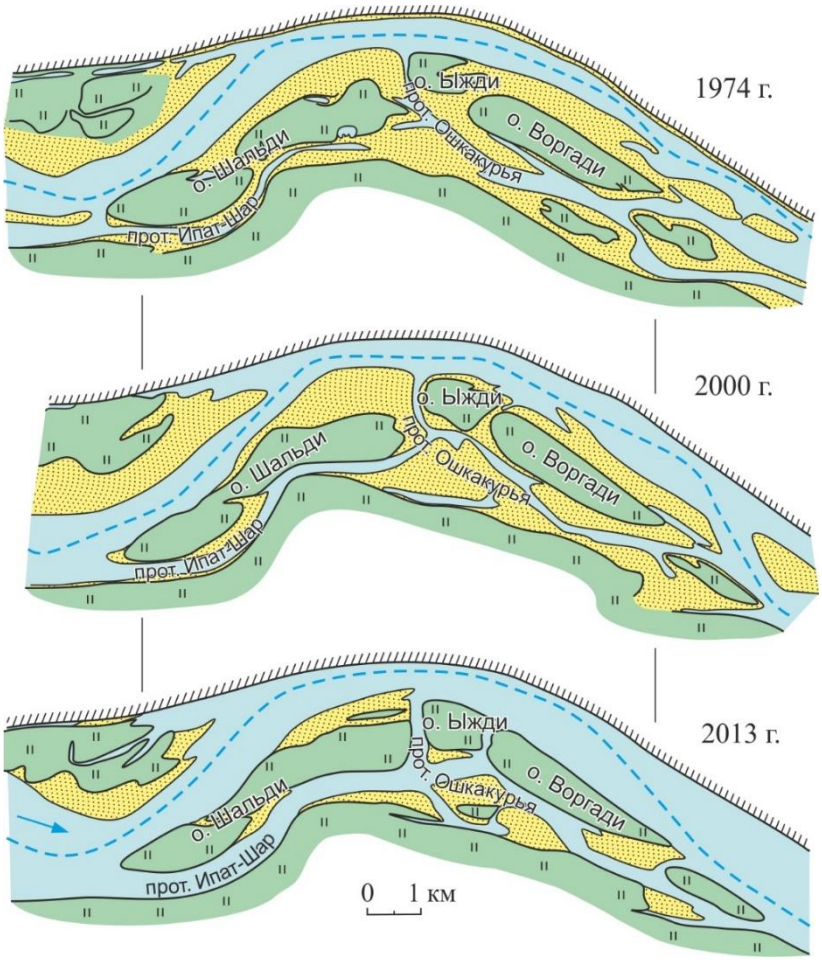


Рисунок 4.49 – Переформирования разветвленно-извилистого русла на 727-680 км

В *пойменно-русловом разветвлении*, образованном о. Лебедь (*647-633 км*), выступ правого коренного берега направляет поток в левый рукав (рис. 4.50),

обеспечивая устойчивое положение в нем основного потока на протяжении длительного периода.

Рисунок 4.50 – Влияние выступа коренного берега на поток в пойменно-русловом разветвлении на 647-633 км

Разветвленно-извилистое русло на *583-573 км* и *541-528 км* (рис. 4.51), имея сходную морфологию, различается тем, что в первом случае оно широкопойменное, во втором – адаптированное. Шпоры излучин образованы островами Серди (рис. 4.51, А) и Бол. Брыкаланский Песок (рис. 4.51, Б), соответственно. В широкопойменном русле спрямление излучины по узкой протоке произошло более 60 лет назад и с тех пор излучина испытывает продольное смещение: почти за 60 лет ее вершина сместилась на 1,8 км вниз по течению, а вогнутый берег отступил на 500 м. В адаптированном русле плечо коренного берега направляет основную часть потока к левому вогнутому берегу, но, несмотря на это на фоне периода повышенной водности 1980-х – начало 2000-х гг. шпора излучины размывалась, и к концу 1-го десятилетия XXI в. произошло отторжение пойменного массива от выпуклого берега и превращение его в остров.

В *относительно прямолинейном русле* на *499-497* (рис. 4.52) в многоводный период 1980-х – начало 2000-х гг. происходил постепенный размыв обширной отмели, расположенной посреди русла в ухвостье о. Домашнего, образующего разветвление второго порядка, сам остров сместился на расстояние равное его длине, а в его ухвостье образовлся небольшой новый остров; к концу 2000-х гг.

произошло смещение потока из левой протоки у пойменного берега в правую возле коренного.

А

Б

Рисунок 4.51 – Переформирования разветвленно-извилистого русла на 583-573 (А) и 541-528 (Б) км

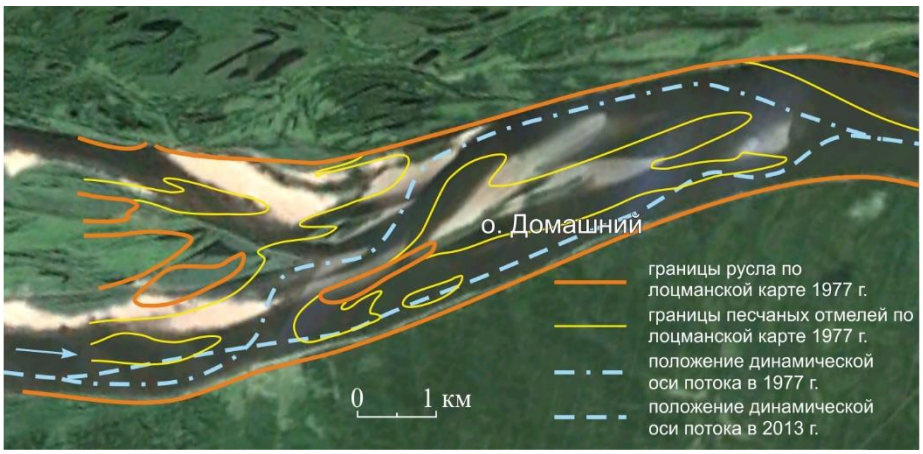


Рисунок 4.52 – Изменение положения основного потока в разветвлении второго порядка на 499-497 км

Устье р. Цильмы – вершина устьевой области (423-195 км). Существующее сейчас *параллельно-рукавное разветвление*, образованное островами Верхним, Верх. Еловским, Еры и Печорским (*393-376 км*) (рис. 4.53) в конце 50-х годов XX века представляло собой два звена сопряженных разветвлений. В 1970-е гг. основной расход воды в нижнем звене перешел из левого рукава в правый, а поперечная протока между островами Верх. Еловским и Еры, по которой ранее осуществлялся перевал потока от правого к левому берегу, стала заноситься наносами. С конца 1980-х гг. стал активно разрабатываться левый рукав, в который к началу 2000-х гг. переместилось основное течение, хотя правый не потерял своей значимости. В настоящее время соотношение расходов воды в рукавах этого вновь образовавшегося параллельно-рукавного разветвления при руслоформирующем расходе составляет 51 и 49% в левом и правом рукавах, соответственно.

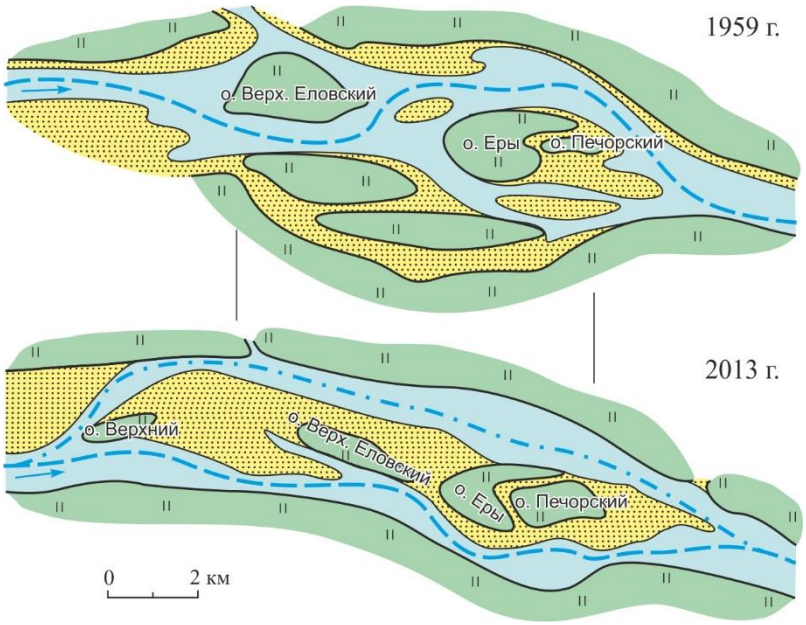


Рисунок 4.53 – Смена морфодинамического типа русла на 393-376 км: 1959 г. – сопряженное; 2013 – параллельно-рукавное разветвление

Перераспределение расходов воды между смежными рукавами происходят в *одиночном разветвлении*, образованном о. Каменкой (*347-339 км*); однако период перехода основного течения из одного рукава в другой здесь более продолжительный, чем аналогичные деформации выше слияния с Усой, – около 25 лет, что определяется большей устойчивостью русла (Λ=20), при этом

расположение основного расхода воды в относительно более прямолинейном правом рукаве соответствует периодам повышенной водности, в левом – пониженной.

Система *сопряженных разветвлений* протяженностью 26 км (*269-243 км*) в конце 50-х гг. XX века состояла из четырех звеньев, образованных островами Овечьим, Сиговец, Камгортским, Сторожевым (рис. 4.54). К концу 1970-х годов произошла перестройка их морфологии. Рост отмели в ухвостье о. Сиговец вызвал отклонение потока к правому берегу, ниже по течению стал развиваться правый рукав у о. Камгортского. К концу 1980-х гг. при повышенной водности реки разрослась отмель в ухвостье о. Бол. Овечьего, и основная часть потока стала направляться к левому берегу, размывая песчаную отмель между ним и о. Сиговец, который с этого момента стал элементом верхнего звена. В результате система из четырех звеньев трансформировалась в систему из двух звеньев, каждое из которых представлено несколькими островами, соответственно, четырьмя и двумя. Перевал потока от левого к правому берегу происходит между островами Сиговец и Камгортским.

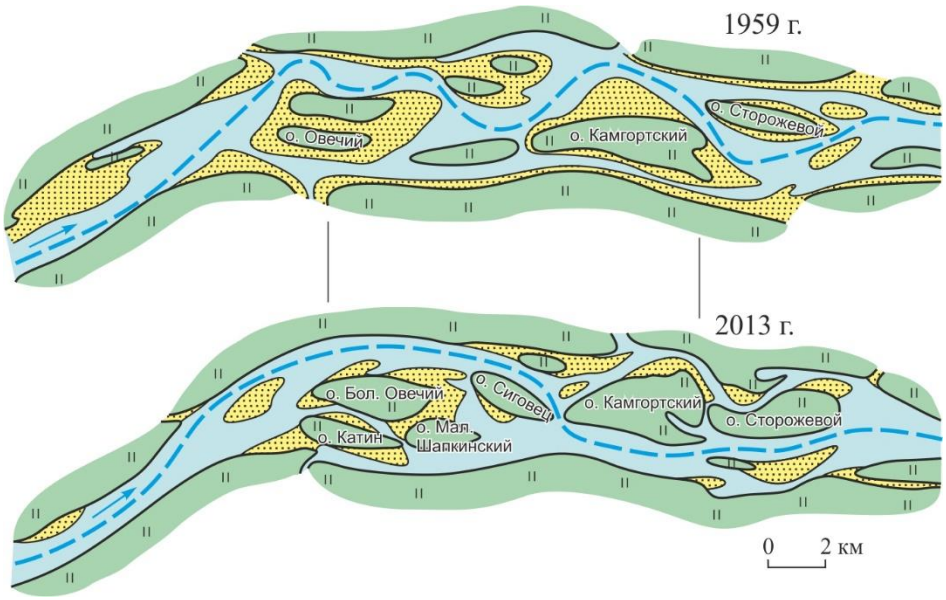


Рисунок 4.54 – Трансформация сопряженных разветвлений на 269-243 км

Анализ космических снимков позволяет предположить, что ранее (до середины XX века) система сопряженных разветвлений протягивалась вплоть до вершины устьевой области Печоры [Завадский, Львовская и др., 2015]. Её

образовывали острова Щучий (232 км), Мархидский-Лосинец (222 км), Чурвинские (211 км), Зашарье (Омулевец) (201 км). Однако со временем вторые рукава заносились наносами, удлинялись, становились более извилистыми и превращались в пойменные протоки. Из-за причленения островов к пойме между сопряженными разветвлениями образовались участки прямолинейного русла, и система сопряженных разветвлений перестала существовать.

Основные закономерности многолетних переформирований русла Печоры. От верхнего к нижнему участку Печоры происходит увеличение устойчивости русла и водности реки. В связи с этим несмотря на то, что одни и те же морфодинамические типы русла встречаются на разных участках, им свойственны различные темпы и направленность деформаций. Так, для сопряженных разветвлений в слабоустойчивом русле на верхнем участке характерна лишь тенденция развития вторых основных рукавов в течение второй половины XX – начала XXI в. при повышении водности реки, тогда как на нижнем участке, характеризующимся гораздо бóльшими величинами Λ, за тот же временной период происходит укрупнение звеньев системы сопряженных разветвлений, и изменение морфодинамического типа русла в сторону его усложнения (сопряженные разветвления → параллельно-рукавные разветвления). Следует отметить, что описанные переформирования происходили при отсутствии антропогенного воздействия на русло реки.

Наряду с такими изменениями, как смена морфодинамического типа русла, в разветвленном русле Печоры происходит периодическая смена значимости рукавов в результате перераспределения стока воды в них. При этом на нижнем участке период перехода основного расхода воды из одного рукава в другой в 2-3 раза превышает продолжительность аналогичного периода на верхнем.

Повышение водности реки в конце XX в. активизировало развитие вторых основных рукавов пойменно-русловых разветвлений, спрямляющих проток в шпорах излучин разветвленно-извилистого русла. На некоторых участках отмечается обмеление пойменных проток и причленение островов к пойме (например, в современном параллельно-рукавном разветвлении на 393-376 км).

Излучины рукавов разветвлений так же, как и излучины русла (на верхнем участке) характеризуются поперечным и продольным смещением, темпы которого возрастают в периоды повышенной водности. При этом наблюдается обратная зависимость темпов размыва вогнутых берегов свободных излучин русла и рукавов разветвлений от водности: в целом они снижаются по мере роста водности реки, очевидно, из-за смещения оси потока к вогнутому берегу, т.к. $r = f(Q)$.

Участки относительно прямолинейного неразветвленного русла распространены на Печоре преимущественно вдоль коренного берега. Их положение квазистабильно, переформирования в их пределах связаны со смещением побочней перекатов и изменением положения основного потока. Деформации проявляются в зарастании отмелей и образовании разветвлений второго порядка, в которых происходит перераспределение расходов воды по протокам возле небольших островов и перемещение основного потока от одного берега к другому.

Относительной стабильностью на протяжении всего рассматриваемого периода отличаются участки русла, испытывающие направляющее воздействие выступов коренного берега.

4.5 Общие закономерности изменения русел за исторический период и их связь с изменениями водности

Основные переформирования русла на больших реках Севера ЕТР за период, охваченный съемками, заключались (табл. 4.4): 1) в перераспределении стока, развитии и обмелении рукавов в системах разветвлений и соответствующих изменениях статуса рукавов (главного – второго основного); 2) в изменении положения основного потока на участках относительно прямолинейного русла и относительно островов разветвлений второго порядка; 3) смещении и спрямлении излучин; 4) трансформации русла, главным образом, разветвленного, заключающейся в смене морфодинамического типа, вызванной как естественными причинами, так и антропогенным вмешательством; 5) формировании новых островов.

Таблица 4.4 – Переформирования русел рек Севера ЕТР за период с конца XVIII в. до начала 2010-х гг.

Тип русла	Переформирования русел рек	Основные факторы	Период водности	Особенности переформирований	Примеры переформирований
1	2	3	4	5	6
РАЗВЕТВЛЕННОЕ	Развитие одного и обмеление других рукавов и соответствующие изменения статуса рукавов (главный – второй основной)	Периодическое перераспределение стока по рукавам в системах разветвлений	Многоводный	Спрямление динамической оси потока в рукавах; Перемещение основного расхода воды в относительно прямолинейный рукав или в рукав вдоль коренного берега	*Северная Двина:* разветвления, образованные о-вами Пустой (612-610 км), Канзский (588,5-581 км), Кодимский (401-393 км – до смены морфодинамического типа), Малютка (374-369 км), Пинегшское параллельно-рукавное разветвление (197-188 км) и др. *Вычегда:* пойменно-русловое разветвление, образованное о.Лукаполойским (325-315 км), одиночное – Кырский (276-273 км), Айкинский (272-268 км) (до перекрытия дамбами левого рукава) *Мезень:* у о.Чаповецкого (131-127 км) *Печора:* одиночное разветвление, образованное о. Каменка (347-339 км), в узле слияния с р.Лыжей (798-792 км); сопряженные разветвления (862-813 км) – тенденция развития вторых основных рукавов.
			Маловодный	Искривление динамической оси потока в рукавах; Перемещение основного потока в относительно более извилистые рукава	
		Смещение побочней и изменение скорости их смещения в зависимости от колебаний водности	Многоводный	Спрямление динамической оси потока; Сокращение периодов перераспределения расходов воды по рукавам	Разветвления, образованные островами: *Северная Двина:* о.Рубежский (489-485 км) *Мезень:* о.Виловатая Роща (137-135 км) *Печора:* о. Кыдзьрасди (771-762 км)
			Маловодный	Искривление динамической оси потока; Увеличение продолжительности периодов перераспределения расходов воды по рукавам	
	Трансформация русла, заключающаяся в смене морфодинамического типа	Направленный тренд изменения водности и продолжительности затопления поймы (естественные причины)	Многоводный	Усложнение морфологии русла, увеличение разветвленности русла	*Мезень:* образование острова второго порядка Чаповецкого (130-128 км) *Печора:* сопряженные → параллельно-рукавные разветвления (393-376 км), образование островов второго порядка: перед 5-м звеном сопряженных разветвлений (827-824 км), в рукаве у оголовка о.Тыняди ниже слияния с Усой (754-753 км)
			Маловодный	Упрощение морфологии русла	*Северная Двина:* сопряженные → одиночное Телеговское разветвление (581-561 км); одиночные → сопряженные разветвления (257-241 км)

Таблица 4.4 – продолжение

1	2	3	4	5	6
РАЗВЕТВЛЕННОЕ	Трансформация русла, заключающаяся в смене морфодинамического типа	Антропогенное воздействие	Многоводный	Упрощение морфологии русла вследствие закрепления положения основного потока в русле	*Северная Двина:* одиночное → одностороннее Телеговское разветвление (581-561 км), сопряженные → одиночные разветвления (257-241 км) *Вычегда:* одиночные → односторонние разветвления и относительно прямолинейное русло вдоль коренного берега (145-122 км)
			Маловодный		Не наблюдалось
ОТНОСИТЕЛЬНО ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ	Изменение положения динамической оси потока относительно берегов и побочней перекатов	Смещение перекатов и их побочней	Многоводный	Спрямление динамической оси потока	*Вычегда:* относительно прямолинейное русло на 388-381 км и 145-58 км (до проведения дноуглубительных работ) *Мезень:* относительно прямолинейное русло на 162-159 км и 116-105 км
			Маловодный	Искривление динамической оси потока	
	Развитие и обмеление проток относительно островов разветвлений второго порядка		Многоводный	Спрямление динамической оси потока; Перемещение основного расхода воды к берегу с относительно более прямолинейными очертаниями	*Печора:* вторичное разветвление, образованное о.Домашним (498 км)
			Маловодный	Искривление динамической оси потока	
	Трансформация русла, заключающаяся в смене морфодинамического типа	Направленный тренд изменения водности и продолжительности затопления поймы (+антропогенное воздействие)	Многоводный	Формирование разветвлений второго порядка за счет отчленения части пойменного массива, высоких побочней перекатов	*Северная Двина:* о-ва Прутняк (500-486 км) и Антушевский (94 км) *Вычегда:* о.Кырский (277-273 км)
				Зарастание осередков и превращение их в острова в условиях совокупности факторов русловых процессов (дополнительное поступление наносов, расширение дна долины и др.)	*Северная Двина:* относительно прямолинейное русло и одиночное разветвление → Паячно-Ягрышское параллельно-рукавное разветвление (500-479 км)

Таблица 4.4 – продолжение

1	2	3	4	5	6
ОТНОСИТЕЛЬНО ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ	Трансформация русла, заключающаяся в смене морфодинамического типа	Направленный тренд изменения водности и продолжительности затопления поймы (+антропогенное воздействие)	Маловодный	Зарастание осередков и превращение их в острова	*Северная Двина:* относительно прямолинейное русло → Слудско-Липовецкое параллельно-рукавное разветвление (393-378 км); относительно прямолинейное русло → одиночное разветвление, образованное о.Могучим (326-320 км), относительно прямолинейное русло → одиночное разветвление в узле слияния с р.Вагой, образованное о.Шилингским (318-312 км) *Мезень:* о-ва Ванин (105-104 км), Губенец (115-114 км)
				Искривление динамической оси потока → развитие излучин	*Вычегда*: увеличение кривизны извилин динамической оси потока на 388-381 км
ИЗВИЛИСТОЕ	Развитие и смещение излучин	Саморазвитие (+антропогенное воздействие)	Многоводный	Рост скоростей размыва вогнутых берегов в нижних крыльях излучин – продольное смещение и развитие излучин; Развитие разветвлений второго порядка на крыльях излучин	*Северная Двина:* Толоконская (531-518,5 км), Ботовская излучина (518,5-511 км); разветвления второго порядка, представленные о-вами Новым и Пяндским (301-293 км) *Вычегда:* излучины рукавов пойменно-руслового разветвления на 158-145 км; разветвления второго порядка на крыльях излучин в районе с. Вожем (191-171 км), представленные о-вами Верх. и Ниж. Жешартскими, Башлыковским (237-230 км) *Печора:* свободные излучины на 809-798 км, излучины главного рукава пойменно-руслового разветвления на 754-727 км
			Маловодный	Размыв вогнутых берегов в вершинах и на крыльях излучин → развитие излучин; Развитие вторичных изгибов на крыльях излучин	
	Трансформация русла, заключающаяся в смене морфодинамического типа: спрямление излучин		Чередование периодов пониженной и повышенной водности	Развитие спрямляющей протоки в шпоре излучины с последующим отмиранием излучины	*Северная Двина:* спрямление серии излучин на 586-555 км *Вычегда:* излучины Белоборская (410-394 км), Часовская (368-365 км), Яренская (208-203 км), Емышевская (46-41 км), Сольвычегодская (31-22 км)
		Направленный тренд изменения водности и продолжительности затопления поймы (+антропогенное воздействие)	Многоводный	Формирование пойменно-русловых разветвлений или разветвленно-извилистого русла	*Северная Двина:* Ботовская излучина (518,5-511 км) *Вычегда:* пойменно-русловые разветвления, представленные о-вами Шардаполойским (420-413 км) и Нидзьяс (409-394 км), разветвленно-извилистое русло – о.Ликанди (248-243 км) *Печора:* разветвленно-извилистое русло, представленное о-вами Шальди, Ыжди и Воргади (727-680 км), Серди (583-573 км) и Бол. Брыкаланский Песок (541-528 км)

Таблица 4.4 – продолжение

1-2	3	4	5	6
Объединение островов	Снижение обеспеченности руслоформирующих расходов воды верхнего интервала (+антропогенное воздействие)	Маловодный	Занесение наносами и отмирание второстепенных рукавов между отдельными островами или группами островов	*Северная Двина:* о-ва Слудский и Средний Песок (393-378 км) *Вычегда:* о-ва пойменно-руслового разветвления у г. Сыктывкара *Печора:* о-ва Шальди и Ыжди (727-680 км), Еры и Печорский (383-377 км).
Расширение пойменных массивов за счет присоединения к ним островов и отмелей			Отмирание вторых основных и второстепенных рукавов вследствие сокращения расхода воды в них	*Северная Двина:* отмель у с.Челмохта (188-154 км) *Вычегда:* обмеление Айкинского полоя на 272-268 км (антропогенное воздействие), объединение островов у г.Сольвычегодска (31-21 км) *Печора:* присоединение к пойме о.Маслянка (413-409 км)

Деформации русла носили как периодический характер, так и имели направленную тенденцию. Основными факторами, обусловливающими переформирования, являются многолетние колебания стока, смещение побочней перекатов, как макроформ грядового движения наносов, периодически перекрывающих заходы в рукава и протоки, вызывая их обмеление вплоть до причленения островов к берегам, а также изменение степени развитости излучин, ее переход через критические значения l/L>1,4-1,7, последующее спрямление и образование прорванных излучин.

Чередование многоводных и маловодных периодов влияет на интенсивность смещения побочней и, следовательно, на скорость перераспределения стока между рукавами. Для Северной Двины, Мезени и Печоры (выше устья р. Усы) из-за слабой устойчивости русла характерны высокие скорости смещения побочней, в связи с чем они не успевают закрепиться растительностью, и изменения водности в рукавах носит периодический характер – 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 Северной 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 основных и второстепенных рукавов параллельно-рукавных разветвлений и проток возле осередков (на относительно прямолинейных участках) наблюдается практически повсеместно. На Печоре периодическое перераспределение стока воды между смежными рукавами наблюдается реже: за период вторая половина XX – начало XXI вв. полные циклы зафиксированы только в двух разветвлениях: пойменно-русловом разветвлении, образованном о. Кыдзьрасди (непосредственно выше слияния с р. Усой) и одиночном разветвлении, образованном о. Каменка (нижнее течение).

Изменение положения основного потока наблюдается не только в разветвлениях, проявляясь в его переходе из одного рукава в другой, но и на

участках относительно прямолинейного русла, где оно обусловлено взаимным расположением побочней перекатов и их смещением. При наличии коренного берега динамическая ось потока обычно закрепляется вдоль него на долгие годы, русло здесь углубляется и стабилизируется [Проектирование…, 1964; Чалов, 1979; Иванов, 1989; Чалов, 2011]. Учет этой закономерности позволил закрепить динамическую ось потока вдоль правого коренного берега в слабоустойчивом русле нижней Вычегде при помощи дамб, перекрывающих вторые рукава у противоположного пойменного берега, а сам прием регулирования русла получил название «правило ведущего берега» [Вильперт, 1963; Чалов, 1979, 2011]. В результате это положение динамической оси потока сохранилось даже после прекращения дноуглубительных работ на реках. Однако в естественных условиях это правило выполняется не всегда. Так, если в годы повышенной водности реки происходит спрямление динамической оси потока за счет отторжения побочней и развития рукавов, расположенных вдоль ведущего берега, то в маловодные периоды динамическая ось потока искривляется, огибая побочни перекатов, располагающиеся в шахматном порядке, и следуя направляющему воздействию 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 переходу основного потока в системе рукавов параллельно-рукавных разветвлений от одного берега к другому (из системы правых рукавов разветвлений в левые и наоборот). Такие участки встречаются на верхнем участке Печоры (г. Печора – устье р. Усы), нарушая правило «восьмерки» в нижнем (пятом) звене сопряженных разветвлений (828-813 км); на среднем участке Печоры мыс правого коренного берега определяет стабильное положение основного расхода воды в левом рукаве у о. Лебедь (647-633 км) и в районе с. Брыкаланска (536 км), на Северной Двине – у д. Кодима (394 км) и др. Направляющее воздействие выступов коренных берегов в ряде случаев нейтрализуется смещением побочней. 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 расположенных ниже параллельно-рукавных разветвлений у о. Комарова Роща (143-141 км).

Зарастание прирусловых отмелей, образующихся ниже выступов коренных берегов, способствует закреплению положения основного потока на Мезени, хотя в спрямляющие их побочневые протоки отвлекается значительная доля расхода воды. Вместе с тем высокие скорости смещения побочней перекатов на перевалах от одного коренного берега к другому препятствуют их закреплению. Поэтому русловые деформации носят периодический характер, что типично для слабоустойчивого русла Мезени.

Развитие излучин как самого русла, так и рукавов разветвлений носит на реках Севера ЕТР направленный характер, выражаясь в постепенном увеличении их кривизны за счет размыва вогнутых берегов в их вершинах и на крыльях. Как правило, многоводные периоды способствуют наиболее интенсивному отступанию размываемых берегов излучин как самого русла, так и рукавов разветвлений. Так, в многоводный период 1950-х гг. на Северной 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 l/L увеличивалась; в многоводные периоды наиболее активно размывался вогнутый берег в нижнем крыле излучины, способствуя интенсификации ее продольного смещения.

Маловодные периоды способствуют увеличению извилистости динамической оси потока и развитию вторичных извилин на крыльях излучинах, особенно это касается адаптированных излучин, в шпорах которых формируются острова второго порядка (например, на Вычегде у с. Усть-Пожег на 345-335 км).

Многоводные периоды способствуют спрямлению излучин (с конца XVIII в. на нижней Вычегде спрямилось пять излучин), в том числе при антропогенном вмешательстве, которое, однако, лишь ускоряет этот процесс, не нарушая направленности переформирований. Спрямление излучин является завершающим этапом саморазвития излучины при достижении ею критической величины степени развитости $l/L_{кр}$, причем в многоводные годы отмечается спрямление излучин на более ранних стадиях ее развития (при меньших значениях $l/L_{кр}$).

На продолжительные многоводные периоды (когда повышается величина и обеспеченность $Q_ф$) приходятся наиболее существенные деформации русла. Таково спрямление серии излучин на Северной Двине между населенными пунктами Федотовская – Красноборск [Каргаполова, 2006] (рис. 4.55) и переход русла от правого к левому борту долины на 590-555 км. Основные переформирования узлов слияния рек Сысолы и Вычегды, Вычегды и Северной 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 полой на Северной Двине, ряд полоев на Вычегде – Лука, Иртовский, Ленский, Прось) зафиксированы в конце XVIII в. и в 1940-е гг., когда сток воды характеризовался глубоким многолетним минимумом средних годовых расходов воды и снижением обеспеченности половодий. В последние годы тенденция к сокращению водности вновь активизировавшихся на фоне многоводного периода второй половины XX в. рукавов (полоев) на Вычегде возобновилась, что свидетельствует о сокращении 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 общем фоне повышения 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.

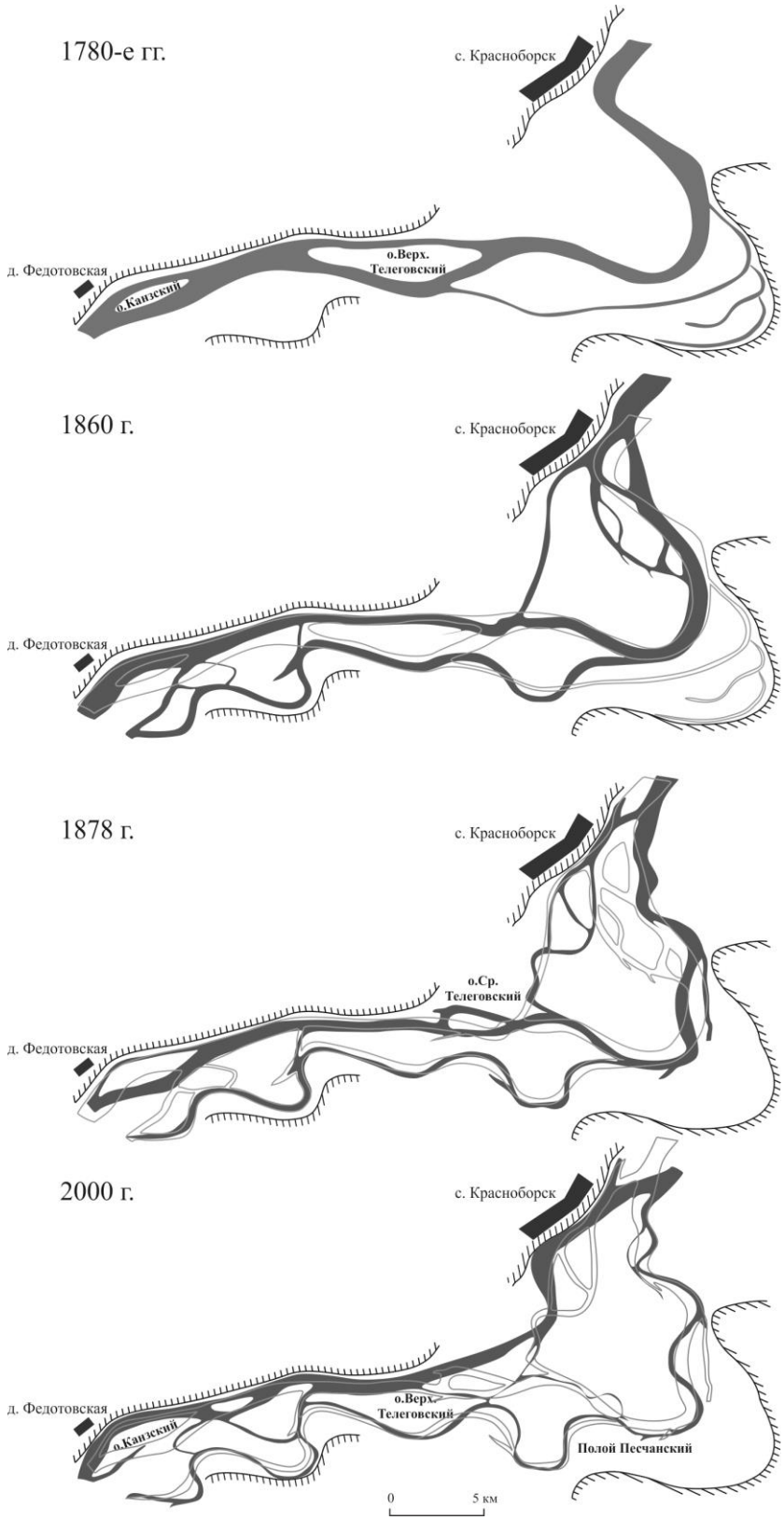


Рисунок 4.55 – Переформирование русла Северной Двины (по И.Н. Каргаполовой [2006]) на участке Федотовская – Красноборск

В то же время на фоне повышения водности и в условиях низкой устойчивости произошло упрощение системы разветвлений (сопряженные → одиночное → односторонние) в районе с. Телегово на Северной Двине, которое

было вызвано активным вмешательством антропогенного фактора. Это же привело к упрощению морфологии русла нижней Вычегды: одиночные и односторонние разветвления → относительно прямолинейное русло.

Вместе с тем направленное развитие может быть связано и с другими факторами русловых процессов. На Северной Двине на переформирования русла влияет строение ее долины (чередование сужений и расширений) [Сахарова, 1960]. В расширениях перед сужениями дна долины происходит наиболее активная аккумуляция наносов. Дополнительным источником наносов является Толоконная гора, влияние которого прослеживается вплоть до устья Ваги. В результате многолетних переформирований русла образовались параллельно-рукавные Паячно-Ягрышское, Слудско-Липовецкое и Конецгорское разветвления, произошел рост острова Шилингского и формирование дельтового разветвления в узле слияния с Вагой.

Повсеместно на 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 (в силу отмеченных ранее условий его прохождения) выходит на пойму, активизируя уже существующие или новые (более характерно для Вычегды) пойменные протоки, которые в дальнейшем превращаются во вторые основные рукава разветвлений, а отчлененный пойменный массив становится островом, образующим разветвление, как правило, пойменно-русловое или разветвленно-извилистое (в результате спрямления излучины). В маловодные периоды, когда выход воды на пойму не происходит, острова образуются за счет зарастания осередков, которые остаются незатопленными в периоды пониженной водности. Таковы многие острова одиночных и односторонних разветвления. При достаточно большой продолжительности периода пониженной водности вновь образовавшиеся острова объединяются и причленяются к пойменному массиву. Наоборот, при быстрой смене маловодного периода многоводным, система разветвлений усложняется (развитие Слудско-Липовецких параллельно-рукавных разветвлений на Северной Двине). Таким образом, увеличение разветвленности

русла происходит не только в периоды повышенной, но также и в периоды пониженной водности. При этом более чем в 50% случаев образования островов разветвлений происходит за счет отчленения части пойменного массива.

В результате отчленения частей пойменных массивов образовались о-ва Прутняк (500-486 км) и Антушевский (94 км) на Северной Двине в период повышенной водности последнего десятилетия XX в., Кырский (277-273 км), Башлыковский (237-230 км) на Вычегде – в многоводный период 1940-1950-х гг. Острова, образовавшиеся в результате спрямления излучин, представляют пойменно-русловые разветвления в извилистом русле Вычегды: Шардаполойский (420-413 км) и Нидзьяс (409-394 км), активизация пойменных проток произошла в период повышения водности 1940-1950-х гг. В один из многоводных периодов XIX в. на Вычегде образовались острова Ликанди (248-243 км) – разветвленно-извилистое русло, Верх. и Ниж. Жешартские (237-230 км) – разветвления второго порядка на крыльях излучины. На Печоре в результате спрямления излучин образовались о-ва Шальди, Ыжди и Воргади (727-680 км), Серди (583-573 км) и Бол. Брыкаланский Песок (541-528 км), в настоящее время представляющие собой участки разветвленно-извилистого русла, активизация пойменных проток в шпорах излучин наблюдалась в многоводный период 1980-2000-х гг.

В результате зарастания осередков на Северной Двин в маловодный период 1960-х гг. образовались о-ва Слудский и Средний Песок, впоследствии объединившиеся (393-378 км), Могучий и Лотовочный Песок (326-320 км), в периоды конца XIX – начала XX в. – Шилингский (318-312 км), в начале 1940-х гг. – Новый и Пяндский (301-293 км), на Вычегде в маловодные 1930-е гг. образовался остров в вершине излучины в районе с. Вожем (191-171 км), в маловодный период начала 2010-х гг. на Печоре образовались острова перед пятым (последним) звеном сопряженных разветвлений и в рукаве у оголовка о. Тыняди ниже слияния с Усой (754-753 км); на Мезени в маловодный период начала 2010-х гг. – о. Губенец (115-114 км).

Объединение островов Слудского и Средний Песок зафиксировано на Северной Двине (386-379 км) в маловодные годы начала XXI в.; на Вычегде

объединились острова пойменно-руслового разветвления у г. Сыктывкара в маловодные 1960-е гг., в русле Печоры в конце 1970-х гг. объединились о-ва Шальди и Ыжди (727-680 км), Еры и Печорский (383-377 км).

Расширение пойменных массивов за счет присоединения к ним островов и отмелей отмечалось на Северной Двине у с. Челмохта (188-154 км) в маловодный период 1960-х – 1970-х гг.; в тот же период на Печоре к пойменному массиву примкнул о. Маслянка (413-409 км); результатом антропогенного воздействия в период пониженной водности 1980-х гг. стало обмеление Айкинского полоя на Вычегде (272-268 км), а также переход потока к противоположному правому берегу с причленением острова к пойменному массиву и образованием нового острова у г. Сольвычегодска (31-21 км).

ГЛАВА 5 ВОЗМОЖНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА

5.1 Изменение гидрологических условий в ближайшие 100 лет (существующие модели и сценарии)

В настоящее время наиболее вероятным сценарием глобального изменения климата считается его потепление, начавшееся в 80-е гг. XX в. При этом, прогнозируя водность рек на ближайшее столетие, специалисты расходятся во мнении. Одни исследователи придерживаются точки зрения, что значительных изменений водности рек не ожидается [Эколого-географические последствия…, 2011], другие считают, что одинаково вероятны как тенденции повышения, так и понижения стока (последнее – на юге Европейской территории России [Будыко, 1980; Глобальное потепление, 1993]). При этом возможны несколько сценариев перераспределения стока по сезонам: 1) увеличение стока половодья и снижение летней межени; 2) повышение стока летней межени и снижение стока половодья. С точки зрения русловых процессов, оба сценария приведут к изменениям величины, обеспеченности и условий прохождения руслоформирующих расходов воды $Q_ф$ и, как следствие, к трансформации русел рек, которые будут приспосабливаться к новым условиям стока воды. В первом случае увеличение стока половодья вызовет рост величины и продолжительности воздействия $Q_ф$ на русло, а при прохождении $Q_ф$ верхнего интервала при затопленной пойме, также и на пойму, обеспечив более активные переформирования, в том числе активизацию пойменных проток, спрямление излучин, преобразования разветвлений в более сложные, возникновение новых. При реализации второго сценария обеспеченность руслоформирующих расходов воды $Q_ф$ верхнего интервала, проходящих преимущественно в период половодья и отвечающих за горизонтальные деформации русла, снизится, что вызовет уменьшение продолжительности затопления поймы, и, следовательно, времени воздействия на нее водного потока. При этом возможный рост обеспеченности $Q_ф$ среднего и нижнего интервалов, отвечающих за переформирования излучин, рукавов разветвлений и перекатов в

пределах пойменных бровок, скажется, вероятно, в активизации переформирований последних, увеличении темпов перераспределения расходов воды между основными рукавами разветвлений.

Согласно исследованиям М.И. Будыко [1980], водность рек Европейского Севера России увеличится в течение ближайшего столетия на 10-15%. По другим данным [Шикломанов, Георгиевский, 2007; Оценочный доклад…, 2008] на северных реках ожидается увеличение стока на 4-8%. Последние оценки изменений гидрологического режима исследуемых рек [Эколого-географические последствия…, 2011] показали, что в бассейнах рек Севера ЕТР водные ресурсы к 2050 г. изменятся незначительно: в бассейне Северной Двины (по данным разных реализаций модели) уменьшатся на 14% или возрастут на 2%; в бассейне Мезени – уменьшатся на 12% или возрастут на 6%; в бассейне Печоры – аналогичные изменения составят, соответственно, 11% и 8%. Тенденция к увеличению стока воды усилится к 2100 г.

Внутригодовые колебания водности также претерпят изменения: уже к середине XXI в. прогнозируется уменьшение слоя стока половодья, которое становится менее значительным к северо-востоку территории [Эколого-географические последствия…, 2011], и к концу XXI в. тенденция уменьшения весеннего стока сохранится. Вместе с тем ожидается снижение максимальных расходов воды весеннего половодья.

Изменения водности рек определенно сказываются на русловых деформациях, при этом масштабы и уровень проявления этих деформаций зависят от величины отклонения прогнозируемых величин стока рек от современного состояния, а также характера этих изменений – направленные тренды или периодические колебания. При этом следует учитывать инерционность изменений русел по сравнению с изменениями активного фактора русловых процессов – стока воды тем большую, чем больше устойчивость русла: неустойчивые и слабоустойчивые русла, особенно широкопойменные, трансформируются быстро, что проявляется в их постоянной реакции на периодические колебания стока воды;

наоборот, врезанные устойчивые русла могут сохраняться в течение не только исторических, но и геологических периодов времени без изменений.

Многочисленные исследования [Коукова, 1955; Калинин 1968; Кузин, 1970; Дружинин и др., 1976; Раткович, 1976; Жук, Скорняков, 1984; Евстигнеев и др., 1999 и др.] показали, что водности рек свойственно чередование периодов повышения и понижения их основных характеристик в течение определенных периодов времени: короткие колебания накладываются на более продолжительные. Даже в течение последней четверти XX в. на фоне отмечающейся общей тенденции к повышению водности выделяются периоды как повышения, так и ее понижения, т.е., понятие направленности трендов относительно и отвечает определенному временному периоду.

С точки зрения русловых процессов, важно оценить масштабы переформирований, возможные при реализации сценариев, описывающих условия, предельно отличающиеся от современных. С другой стороны, учитывая хозяйственное использование рек, необходимо понимание того, каковы критические значения изменений водности для переформирований руслел на разных структурных уровнях (от перекатов – крупных гряд-макроформ до морфологии русла). В связи с этим ниже рассматриваются различные сценарии изменения водности и возможные соответствующие им изменения морфологии и динамики русел больших рек Севера ЕТР на основе *QI*-диаграмм, гидролого-морфологических зависимостей, связывающих параметры русловых форм с показателями водности рек, и выявленных закономерностей режима перекатов в многолетнем и сезонном планах.

5.2 Методика анализа

В основе изучения и разработки прогнозных оценок русловых процессов лежат соотношения между характеристиками потока и русла, составляющие гидролого-морфологический анализ речных русел. Его элементами являются [Львовская, Чалов, 2013]: 1) выявление зависимостей между характеристиками потока и русла (гидролого-морфологические зависимости), с одной стороны, и

показателями факторов руслоформирования – стоком воды и наносов, с другой [Чалов, 2008; Чалов, Алабян и др., 1998]; 2) построение *QI*-диаграмм, на которых точки, соответствующие различным морфодинамическим типам русла занимают определенное поле относительно разделяющих их линий, что позволяет оценивать условия их формирования в зависимости от водности потока (*Q* – расхода воды) и уклона *I* свободной поверхности [Чалов, Алабян и др., 1998]; 3) анализ эпюр руслофомирующих расходов воды $Q_ф$ для периодов разной водности [Маккавеев, 1955; Чалов, 2008]; 4) сопоставление разновременного картографического (планового) материала, фиксирующего состояние русел на определенные временные срезы, и увязка русловых деформаций с изменением гидрологических характеристик [Чалов, 1995] – ретроспективный анализ; 5) оценка изменений параметров перекатов в зависимости от водности [Чалов и др., 2003].

В соответствии с **гидролого-морфологическими зависимостями**, увеличение или уменьшение водности (точнее – характерного расхода воды) сопровождаются ростом или снижением параметров излучин или рукавов, островов создающих разветвления и параметров самих разветвлений [Чалов, Алабян и др, 1998; Чалов, 2011], и, как следствие, направленности и темпов размыва речных берегов в рукавах или на излучинах, смещения, спрямления последних и т.д. При этом для разветвленных русел такие зависимости были в основном разработаны впервые [Львовская, в печати].

Прогнозная оценка изменений речных излучин в большинстве случаев основывается на экстраполяции данных о величинах и направленности их смещения, полученных при сопоставлении разновременных картографических материалов. В этом случае речь идет об эволюции излучин, трансформации их формы по мере их саморазвития в связи с изменениями скоростного поля потока при увеличении степени развитости, радиусов кривизны и шагов излучин. Вместе с тем существуют расчетные методы, основанные на эмпирических зависимостях, связывающих скорости смещения излучин со скоростями потока, а также различные параметры излучин (*r*, *L*) с характеристиками водности и стока наносов. Кроме того, в ГГИ были разработаны аналитические [Замышляев, 1983] и

эмпирико-аналитические формулы [Попов, 1965; Кондратьев, 1954, 2000], позволяющие определять скорости размыва берегов на излучинах в зависимости от их формы и соответствующих ей гидравлических характеристик потока. Однако эти подходы могут применяться лишь при прогнозировании текущих изменений излучин на данной стадии их развития и не могут использоваться при оценках возможных долгосрочных их изменений при изменениях факторов русловых процессов.

Одним из первых гидролого-морфологические зависимости для свободных излучин получил Н.И. Маккавеев [Маккавеев, Советов, 1940]:

$$r = k\frac{\sqrt{Q_{\text{ф}}}}{I}. \qquad (5.1)$$

Подобные исследования впоследствии проводились многими отечественными и зарубежными учеными [Маккавеев, 1955; Розовский, 1957; Попов, 1965; Carlston, 1965; Schumm, 1967, Кондратьев, 1968; Ромашин, 1968; Антроповский, 1969; Hickin, 1977; Callender, 1978; Milne, 1983; Carson, 1984; Матвеев, 1985а,б; Сидорчук, 1992; Завадский, Чалов, 1996; Завадский и др., 1997], также указывающими на то, что связи параметров излучин с показателями водности имеют степенной характер. Все они получили значения показателя степени от 0,39 до 0,66 в зависимости от условий руслоформирования.

Исследования последних 20-30 лет выявили региональный характер гидролого-морфологических зависимостей [Завадский, Чалов, 2000; Завадский, 2001б]. Так, различаются величины параметров излучин близких по водности рек разных регионов; например, средний шаг излучин рек бассейна Дона в 2-2,25 раза меньше, чем излучин Восточной Сибири [Чалов, 2011]. Для оценки влияния особенностей гидрологического режима были получены [Завадский, Чалов, 2000; Завадский, 2001б; Чалов и др., 2004] гидролого-морфологические зависимости между характерными параметрами излучин (r, L) и среднемаксимальными расходами воды $Q_{\text{макс}}$ рек различных регионов России. Показано, что для каждой реки характерна своя зависимость, аппроксимирующаяся линейной функцией:

$r=aQ_{макс}+c$, $L=aQ_{макс}+c$, где коэффициент a зависит от внутригодовой неравномерности стока.

Определять возможные изменения морфологии разветвленных русел, делать выводы о темпах и направленности их деформаций при увеличении (уменьшении) водности реки позволяют связи параметров рукавов и островов с водностью рукавов разветвлений или русла в узле разветвления. Впервые разработанные гидролого-морфологические зависимости для разветвленных русел больших рек Севера ЕТР [Львовская, Чалов, 2015; Завадский, Львовская и др., 2015; Львовская, в печати] представляют собой связи между шириной рукавов $b_{рук_ф}$ при руслоформирующем расходе воды от руслоформирующего расхода воды в них $Q_{ф_{рук}}$, относительной ширины островов $B_о/b_р$ от удельного среднемаксимального расхода воды $q_{макс}$, а также зависимости основных параметров излучин рукавов разветвлений ($r_{рук}$ – радиус кривизны, $L_{рук}$ – шаг) от руслоформирующего расхода воды в рукаве. Зависимости неодинаковы для основных рукавов разветвлений, различаясь по морфодинамическим типам разветвленного русла и условиям их формирования.

Эти зависимости так же, как и гидролого-морфологические для меандрирующих русел, имеют региональный характер, и их можно применять только для оценок переформирования русел конкретных рек при возможных изменениях водности. Подтверждением тому являются различия в коэффициентах уравнений зависимости относительной ширины островов $B_о/b_р$ от удельного среднемаксимального расхода воды q (3.1) и взаимном расположении линий тренда, соответствующих разветвлениям разного морфодинамического типа для больших рек Севера ЕТР и полученным ранее аналогичным зависимостям для р. Лены [Чалов, 2011].

Пространственное изменение параметров русел в зависимости от водности реки может служить моделью временны́х изменений. Можно предположить, что при изменении водности в будущем параметры разветвлений будут увеличиваться или уменьшаться в соответствии с полученными гидролого-морфологическим

зависимостями. Анализ таких зависимостей разветвленных русел больших рек Севера ЕТР показал, что с ростом водности реки вниз по течению происходит увеличение параметров рукавов и островов разветвлений. При этом соотношение морфометрических параметров островов (L_o/B_o) для каждого морфодинамического типа разветвлений больших рек Севера ЕТР остается неизменным. То есть, на разных участках одной реки, различающихся величиной расхода воды, форма острова в разветвлениях одного и того же морфодинамического типа, выражаемая соотношением L_o/B_o, остается подобной и сохраняется при всех изменениях острова: размыве его оголовка и берегов, объединении нескольких более мелких островов, роста со стороны ухвостья и причленения побочней.

Оценивая параметры разветвлений следует учитывать распределение расходов воды по рукавам, которое изменяется вследствие русловых деформаций в рукавах (их углубления или расширения и наоборот); кроме того, необходимо принимать во внимание смену морфодинамического типа русла, в результате которой параметры разветвления будут изменяться по зависимости, соответствующей «новому» типу русла.

Экстраполируя полученные изменения водности на прогнозируемый период можно по прямой аналогии устанавливать параметры русел при соответствующих характеристиках водности реки в будущем. Гидролого-морфологический анализ, таким образом, является не только методом исследования русловых процессов прошлого, но и одним из основных для прогнозирования трансформаций русел разного морфодинамического типа в будущем. Зная прогнозные условия формирования русла (водность, сток наносов и др.), по имеющимся гидролого-морфологическим зависимостям можно оценить его возможные «новые» основные параметры [Львовская, Чалов, 2013].

Метод ***QI*-диаграмм** позволяет оценить условия формирования русел разных типов, при увеличении водности рек устанавливать возможную смену морфодинамического типа русла, его усложнение или упрощение благодаря смещению точки, соответствующей данному гидрологическому посту. Это происходит в результате повышения или понижения водности реки. При этом

изменения уклонов в результате врезания или аккумуляции равнинных рек пренебрежимо малы, в связи с чем принимается допущение, что они практически неизменны.

Различия природных условий регионов находят отражение в *QI*-диаграммах, имеющих свой вид на реках Алтая [Смирнова, 2002], бассейнов Северной Двины [Резников, Чалов, 2005], Амура [Борщенко, Чалов, 2011], Оки [Баровский, 2007, 2008] и др. Полученная *QI*-диаграмма (рис. 3.8) для больших рек Севера ЕТР [Львовская, Чалов, 2013; Львовская, в печати] подтверждает эти заключения: каждая точка на диаграмме отражает совокупность определенных условий руслоформирования на данном конкретном участке реки. Поэтому *QI*-диаграмма может быть использована для оценок возможных изменений морфологии русла только для тех рек, для которых она получена.

Использование *QI*-диаграмм возможно для оценок трансформации русел рек, подверженных антропогенным воздействиям как непосредственно на русла, так и на факторы русловых процессов (гидроузлы, разработка карьеров, сплошное выправление и т.д.). При этом в русловом режиме реки происходят изменения, аналогичные естественным (природным), но в значительно более короткие сроки. Поэтому смена условий при антропогенном воздействии может рассматриваться как модель влияния возможных климатических изменений на русло реки. В «новых» условиях ниже плотин ГЭС русла рек трансформируются на участках большой длины вниз по течению. Например, за годы эксплуатации Новосибирского гидроузла на р. Оби (с конца 50-х гг. XX в.) в нижнем бьефе произошли существенные русловые переформирования, выразившиеся во врезании реки, которое привело к снижению уклонов (с 0,09-0,11‰ до 0,03‰ до и после строительства ГЭС) и росту глубин [Беркович и др., 2008]. Вместе со снижением величины $Q_ф$ во время половодья и увеличением $Q_ф$ в меженный период это отчетливо проявилось в постепенном уменьшении числа рукавов, на приплотинном участке – образовании прямолинейного неразветвленного русла, а на 100-километровом участке ниже г. Новосибирска – к смене сопряженных разветвлений пологими излучинами русла. Лишь там, где в отмирающих рукавах

разрабатывались карьеры стройматериалов, разветвления сохранились [Беркович и др., 1981, 2008; Виноградова, Рулева, 1982]. На других участках Оби и ее притоков проявляется тенденция к изменению преобладающего типа русла – разветвленного на прямолинейное, обусловленное не регулированием стока гидроузлом, а массовой разработкой карьеров и выправлением русла (нижнее течение р. Томи и р. Катуни) [Беркович и др., 1992; 2000; Баула и др., 1995; Сурков, 2001].

Основные переформирования русла происходят в многоводные сезоны, но зависят также от повторяемости **руслоформирующих расходов воды** $Q_{ф}$ в многолетнем плане [Маккавеев, 1955; Чалов, 2008]. Изменения водности рек приводят к изменениям величины, обеспеченности и условий прохождения $Q_{ф}$ и, соответственно, вместе с изменением стока воды и наносов к трансформации русел рек, направленности и интенсивности русловых деформаций.

При наличии $Q_{ф}$ верхнего интервала (Северная Двина, Вычегда, Ока), проходящего при затопленной пойме, определяющую роль в развитии русла играют высокие половодья, приходящиеся на многоводные годы. Колебания водности вызывают изменения величины и повторяемости руслоформирующих расходов воды. В многоводные периоды увеличивается продолжительность затопления поймы и активных ее переформирований (разработки пойменных проток). Именно на эти отрезки времени приходится наибольшее число случаев перемещения основного расхода воды одного рукава в другой или спрямления излучин. Напротив, в маловодные годы обеспеченность руслоформирующего расхода воды верхнего интервала снижается, в отдельные наиболее маловодные годы выход воды на пойму вообще может не происходить, что сопровождается обсыханием пойменных проток, снижением интенсивности русловых переформирований.

Ретроспективный анализ в прогнозировании русловых деформаций отражает изменения русла, происходящие за период, охваченный документальными материалами, в основном – картами рек и планами перекатов и перекатных участков. Сопоставление картографических материалов, фиксирующих состояние русла в разные временные интервалы, позволяет выявить

происходящие переформирования, увязать их с изменениями водности рек за эти же временные интервалы и выявить тенденции их развития, связанные с эволюцией форм русла и руслового рельефа, влиянием колебаний водности, антропогенных воздействий и т.д. Экстраполируя полученные связи между морфологией русла и характеристиками водности на перспективу, можно в первом приближении давать прогнозные оценки русловых деформаций.

Поскольку русловые деформации осуществляются в течение отрезков времени разной продолжительности (например, развитие излучины от сегментной пологой формы до её спрямления в слабоустойчивом русле составляет от нескольких десятилетий до нескольких столетий), применение гидролого-морфологических методов для ретроспективного анализа связано с определенными трудностями. Во-первых, период наблюдений за расходами воды начался сравнительно недавно (в основном с конца XIX – первой половины XX века) [Ресурсы…, 1972]; во-вторых, картографические и плановые (промерно–съемочные) материалы, позволяющие оценить параметры русла, ограничены таким же отрезком времени, либо отличаются малой точностью (карты XVIII – первой половины XIX вв.), позволяя давать только качественные оценки. Проблема решается с помощью аэро– и космических снимков, на которых хорошо дешифрируются сохранившиеся в рельефе поймы следы древних русел и формы, образовавшиеся в ходе их эволюции. Их исследования, дополненные определением возраста заполняющих их отложений, позволяют оценить сток воды в прошлом.

Морфологические данные (фрагменты разновозрастных палеорусел с размерами большими или меньшими, чем у современных рек) свидетельствуют о значительной изменчивости стока воды в прошлом, за период, охватывающий время формирования поймы (позднеледниковье и голоцен). В основе палеометода лежит, таким образом, анализ форм рельефа на разновозрастных участках пойм, позволяющих оценить морфометрические характеристики древних русел (их ширину, радиусы кривизны и шаги излучин), восстанавливаемые с достаточной точностью по космическим снимкам, и определить морфодинамический тип русла, а, следовательно, судить о водности рек в реконструируемый период. Для оценки

влияния внутригодовой изменчивости стока воды применяется принцип палеогеографической аналогии, поскольку гидрологический режим прошлого может не совпадать с современным из-за изменения ландшафтно-климатических условий [Сидорчук и др., 1999]. Он заключается в том, что гидрологический режим рек соответствующей природной палеообстановки в пределах бассейна может быть близок к современному гидрологическому режиму рек иной территории, и, наоборот, современный водный режим реки может быть аналогом для палеорек другой природной зоны.

Подобные палеогидрологические реконструкции русел в позднеледниковье и голоцене выполнены А.Ю. Сидорчуком с соавторами [Сидорчук и др., 1999; Сидорчук, 2003, 2009; Сидорчук и др., 2010] для Вычегды. По особенностям их трансформации в голоцене меандрирующие в настоящее время русла разделены ими на две группы: 1) испытавшие смену русла на разветвленное и обратно; 2) сохранившие извилистое русло, но средние размеры параметров излучин существенно изменялись в ту или другую сторону в зависимости от уменьшения или увеличения водности. Используя разработанные им связи среднегодовых и среднемаксимальных расходов воды с шириной русла, а также соотношения ширин современного и древнего русла можно, зная прогнозную оценку увеличения/уменьшения $Q_{ср}$, рассчитать возможные изменения параметров русла в будущем [Львовская, Чалов, 2013].

Подобный подход в отечественной литературе впервые использовал Н.И. Маккавеев [Экспериментальная геоморфология, 1969], но он оперировал радиусами r и шагами L излучин. Действительно, ширина русла является более неопределенным параметром [Львовская, Чалов, 2013], зависит от стадии развития излучины и, что более весомо, от того, измерена она в бровках поймы или с учетом обсыхающих в межень прирусловых отмелей, что установить по сохранившимся старицам практически невозможно (либо очень субъективно).

Восстановление порядка водности реки для исторического периода русла по старинным картам было выполнено И.Н. Каргаполовой [2006]. На основе полученных связей между водностью и параметрами излучин р. Вычегды,

аппроксимируемых уравнениями регрессии $Q_{ср}=0{,}02r^{1{,}47}$ и $Q_{ср}=0{,}004L^{1{,}52}$, где r – радиус кривизны, L – шаг излучин, $Q_{ср}$ – среднегодовой расход воды, была определена водность реки второй половины XVIII в.

О возможных трансформациях разветвлений можно судить по тем их изменениям, которые происходят на отдельных этапах переформирований при периодических колебаниях водности. Так, например, сопряженные разветвления, в которых главное течение реки и преимущественное развитие получают последовательно левые–правые–левые–и т.д. рукава возле островов, следующих цепочкой друг за другом по длине реки, в многоводные периоды на всем протяжении превращаются в параллельно-рукавные разветвления с примерно равноценным развитием (по водности и морфометрическим характеристикам) правых и левых рукавов. В маловодный период сопряженное развитие восстанавливается, но с зеркальным расположением основных по водности рукавов [Львовская, Чалов, 2013]. Подобные периодические трансформации русла отмечены на такой крупной реке, как Лена выше слияния с Алданом, где русло характеризуется слабой устойчивостью (Λ=1,5-2,5 [Водные пути…, 1995]): на рис. 5.1 1974 г. фиксирует состояние русла в маловодный период, 1992 г. – многоводный, 2010 г. – начало нового маловодного цикла. Можно полагать, что при последовательном увеличении водности рек в ходе глобальных гидроклиматических изменений возможно формирование параллельно-рукавных разветвлений на Лене от г. Покровска (выше Якутска) до устья Алдана; в районе Якутска (от Табагинского утеса до Кангаласского мыса) это уже произошло. Ниже устья р. Алдана параллельно-рукавные разветвления являются преобладающим типом русла вплоть до п. Жиганска.

Оценка деформаций перекатов основана на учете переформирований в течение предшествующих лет. При этом период прогнозирования ограничивается временным интервалом, в течение которого морфология русла на участке, где расположен перекат, остается относительно неизменной. Смена типа русла, а также положения переката относительно его форм, влечет за собой изменения в режиме переката. Поэтому оценки деформаций перекатов можно давать на сравнительно

короткие периоды, в основном в пределах десятилетия. Поскольку перекатам свойственны сезонные деформации, при оценке их переформирований важно учитывать внутригодовое распределение водности, влияющее на их режим.

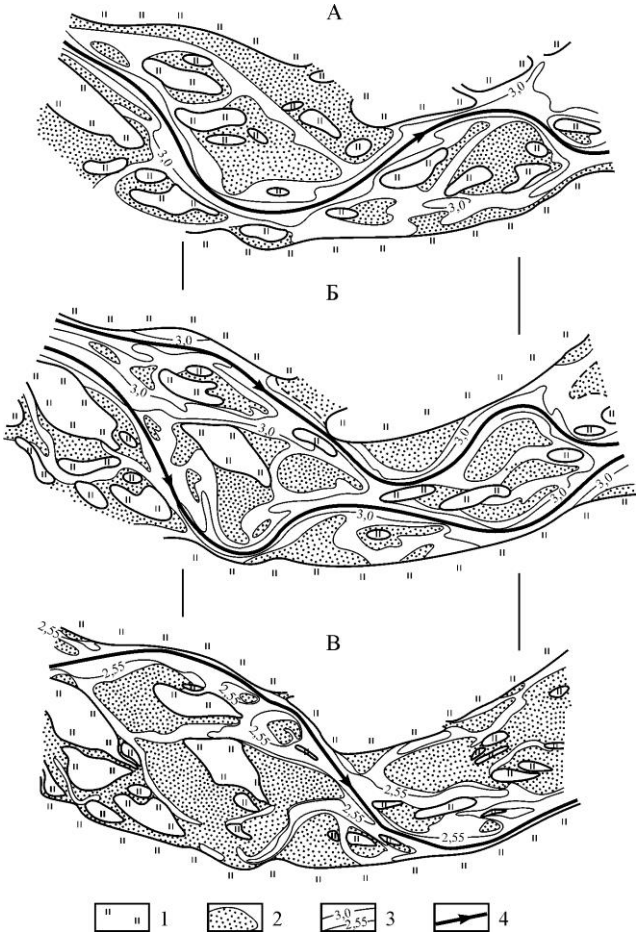


Рисунок 5.1 – Вре́менная трансформация разветвленного русла средней Лены при периодических колебаниях водности реки: А – 1974, Б – 1992, В – 2010 год; 1 – пойма, 2 – прирусловые отмели, 3 – изобаты, 4 – положение главного течения реки [Чалов, Кирик и др., 2014]

Полученные зависимости $h_г = f(h, \Delta H)$ [Михайлова, Львовская, 2013; Михайлова, 2014] для перекатов Северной Двины позволяет оценивать глубину потока на перекате (на стрежне) при изменении уровня воды, что имеет большую практическую значимость при планировании дноуглубительных работ. Зная срезку ΔH в определенный момент времени и, следовательно, глубину потока в плесовой лощине h, можно по зависимости установить высоту гряды $h_г$ и вычислить глубину потока на перекате $h_п$ (см. врезку на рис.3.23).

Одним из методов оценки изменения глубины на перекатах в разные фазы водного режима [Чалов и др., 2003] является совместный анализ кривых $Q=f(H)$ и

графиков глубин на перекатах от уровня воды на опорном гидрологическом посту $h_{прк}=f(H)$. Существуют расчетные формулы, позволяющие оценить в первом приближении изменения глубин на перекатах ($h_{прк}$) при уменьшении или увеличении водности рек [Чалов и др., 2003]: модифицированная формула Х.М. Полина [Маккавеев, 1949; Седых и др., 1978]

$$h_{прк} = 0{,}5\sqrt[3]{K_п Q_{пр}}, \qquad (5.2)$$

где $K_п$ – коэффициент плеса, характеризующий устойчивость русла; $Q_{пр}$ – расход воды при проектном уровне;

К.В. Гришанина [1972]

$$const = M = \frac{h_{ср}(gB)}{Q^{0,5}}; \quad h_{ср} = \frac{MQ^{0,5}}{(gB)^{0,5}}, \qquad (5.3)$$

где M – постоянная для устойчивых аллювиальных участков рек; Q – среднесуточный расход воды; B – ширина русла;

Г. Лэсея [Lacey. 1930]

$$h_{прк} = 0{,}47\left(\frac{Q}{8\sqrt{d}}\right)^{1/3}, \qquad (5.4)$$

где d – крупность руслообразующих наносов;

а также формула Н.И. Маккавеева, позволяющая рассчитать радиус кривизны динамической оси потока на перекате (r),

$$r = kQ_ф^{1/2}I, \qquad (5.5)$$

где $Q_ф$ – руслоформирующий расход воды; I – уклон; k – коэффициент, определяющий местоположение на перекате зон наибольшей глубины и саморазмыва их гребней. Если предположить, что водность увеличится равномерно по всем сезонам, то $Q_ф$ возрастет пропорционально среднегодовому расходу воды: при росте $Q_ф$ на 10% радиусы кривизны увеличатся на 5% (по формуле 5.5), при росте на 15% – на 7%.

Расчеты, проведенные по формулам 5.2–5.4 для рек регионов России, в том числе для рек Севера ЕТР [Чалов и др., 2003], показали, что в разных регионах повышение водности по-разному отразится на изменении глубин на перекатах относительно современной гарантированной глубины, от их повышения в

маловодную фазу на реках Севера ЕТР, бассейна средней и нижней Оби, среднего и нижнего Енисея, до понижения на юге ЕТР.

5.3 Оценка возможной трансформации русел при изменениях водности рек

Рассматриваемые ниже возможные переформирования русел (табл. 5.1) ожидаются при реализации сценариев повышения или понижения водности при отсутствии антропогенного воздействия на реки за исключением эксплуатационного дноуглубления и уже имеющихся в русле капитальных выправительных сооружений.

Ожидаемое общее **повышение стока** рек Севера Европейской территории России в течение XXI в. приведет, в первую очередь, к увеличению обеспеченности $Q_ф$ верхнего интервала, продолжительности и глубины затопления поймы.

Возрастет вероятность активизации пойменных проток и превращения некоторых из них в основные рукава пойменно-русловых разветвлений как разветвленного русла Северной Двины и Печоры, так и меандирующего русла Вычегды. На Печоре это приведет к переходу основного расхода воды в протоку Новик-Шар – второй основной рукав пойменно-руслового разветвления на 754-727 км, получивший развитие в многоводный период 1980-х – начала 2000-х гг. и забирающий в настоящее время около 40% расхода воды реки. На Вычегде ожидается восстановление полоев Прось и Ленского, представляющих собой еще в середине XX в. вторые рукава пойменно-русловых разветвлений. В широкопойменном русле Вычегды вероятна разработка новых пойменных проток в связи с отмеченной И.Н. Каргаполовой [2006] невозможностью развития бывших основных рукавов.

Таблица 5.1 – Возможные переформирования русел рек Севера ЕТР при изменениях водности

Тип русла	Повышение водности		Понижение водности	
	Возможные переформирования	Примеры возможных переформирований	Возможные переформирования	Примеры возможных переформирований
1	2	3	4	5
РАЗВЕТВЛЕННОЕ	Спрямление динамической оси потока, связанное с переходом основного расхода воды в относительно более прямолинейный рукав или в рукав вдоль коренного берега	*Северная Двина*: правый рукав у о. Пустого (612-610 км), левый рукав у о. Рубежского (489-486 км); *Печора*: переход основного потока в правый – у о.Каменка (348-339 км), во вторые основные рукава сопряженных разветвлений (862-813 км); переход основного потока в спрямляющие протоки в разветвленно-извилистом русле, образованном о-вами Шальди, Ыжди и Воргади (727-680 км), Серди (583-573 км); переход основного расхода воды в протоку Новик-Шар – второй основной рукав пойменно-руслового разветвления (754-727 км)	Искривление динамической оси потока; Перемещение основного потока в относительно более извилистые рукава	Переход основного потока в: *Северная Двина*: левый рукав у о. Пустого (612-610 км), правый рукав у о. Рубежского (489-486 км); *Печора*: левый – у о.Каменка (348-339 км) Сокращение водности спрямляющих проток в разветвленно-извилистом русле: *Вычегда*: полой Ликанди (248-243 км); *Северная Двина*: Ботовская протока (518,5-511 км); *Печора*: протоки Ипат-Шар и Ошкакурья (727-680 км), Сершар (583-573 км), Брыкаланская (541-528 км
	Сокращение периодов перераспределения расходов воды по рукавам, связанное с периодическим перекрытием рукавов побочнями перекатов	*Печора*: пойменно-русловое разветвление перед слияния с р. Усой, образованное о. Кыдзьрасди (771-762 км)	Увеличение продолжительности периодов перераспределения расходов воды по рукавам	*Печора*: пойменно-русловое разветвление перед слияния с р. Усой, образованное о. Кыдзьрасди (771-762 км)
	Усложнение морфологии русла, увеличение разветвленности русла за счет активизации пойменных проток; изменение морфодинамического типа русла в сторону более сложного	*Северная Двина*: продолжится развитие спрямляющих проток в шпоре Ботовской излучины (518,5-511 км) *Вычегда*: восстановление полоев Ленского (190-168 км) и Прось (158-145 км), активизация полоя Ликанди (248-243 км), развитие полоя Шарда (420-413 км) – вторых основных рукавов пойменно-русловых разветвлений; развитие полоя Серт (409-394 км), отмирание спрямившейся Белоборской излучины *Мезень*: развитие и переход основного потока в левый рукав у о.Тоострова (Лындовскую протоку) на 116-105 км *Печора*: трансформация сопряженных разветвлений (269-243 км) в параллельно-рукавные	Упрощение морфологии русла за счет сокращения водности и отмирания пойменных проток, присоединения к пойме островов и отмелей; изменение морфодинамического типа русла в сторону более простого	Сокращение водности вплоть до полного обмеления вторых основных рукавов пойменно-русловых разветвлений: *Северная Двина*: протоки Барчаха (394-378 км); Вычегда: Лукаполойского (325-318 км), Иртовского и Ленского (190-168 км), Прось (158-145 км), *Печора*: протоки Новик-Шар (754-727 км), Старая Печора (305-289 км) Обмеления второстепенных рукавов односторонних и чередующихся односторонних разветвлений: *Северная Двина*: образованных о-вами Тулгасским, Новым, Пяндским *Печора*: трансформация параллельно-рукавных разветвлений в сопряженные (393-376 км)

Таблица 5.3 – продолжение

1	2	3	4	5
ОТНОСИТЕЛЬНО ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ	Спрямление динамической оси потока и перемещение основного расхода воды к берегу с относительно более прямолинейными очертаниями в т.ч. в разветвлениях второго порядка	*Мезень*:в относительно прямолинейном русое на 116-105 и 67,5-48,5 км *Печора*: у о.Домашнего (498 км)	Искривление динамической оси потока и последующее развитие излучин (за исключением врезанного русла)	*Вычегда*: относительно прямолинейное русло на 388-381 и 145-58 км *Мезень*: 116-105 км и 67,5-48,5 км (без развития излучин)
	Формирование разветвлений второго порядка за счет отчленения части пойменного массива, высоких побочней перекатов	*Мезень*: отчленение частично заросшего обширного правобережного побочня и вновь образованного о.Губенец (116-105 км); *Печора*: отчленение правобережного побочня (798-792 км)	Зарастание осередков и превращение их в острова	*Мезень* – повсеместно
ИЗВИЛИСТОЕ	Рост скоростей размыва вогнутых берегов в нижних крыльях излучин - продольное смещение и развитие излучин; Развитие разветвлений второго порядка на крыльях излучин	*Печора*: продольное смещение нижней в серии из двух свободных излучин (809-798 км)	Размыв вогнутых берегов в вершинах и на крыльях излучин - развитие излучин русла и рукавов; Развитие вторичных изгибов на крыльях излучин русла и рукавов	*Северная Двина*: размыв Толоконской излучины; излучин рукавов разветвленно-извилистого русла, образованного образованного о-вами Ботовскими (518,5-511 км) *Вычегда*: излучин рукавов разветвлений, образованных о-вами Лукаполойским (325-318 км), Шономским (158-145 км), Ликанди (248-243 км) *Печора*: развитие нижней в серии из двух свободных излучин (809-798 км), излучин рукавов, образованных о-вами Кыдзьрасди (770-762 км), группой о-вов на 754-727 км, Шальди, Ыжди и Воргади (727-680 км), Серди (583-573 км), Бол. Брыкаланский Песок (541-528 км)
	Развитие спрямляющей протоки в шпоре излучины с последующим отмиранием излучины	В широкопойменных руслах Северной Двины, Вычегды, Печоры.		
	Формирование пойменно-русловых разветвлений или разветвленно-извилистого русла	В широкопойменных руслах Северной Двины, Вычегды, Печоры.		

Ожидается формирование разветвленно-извилистых русел и перераспределение стока между рукавами за счет активизации пойменных проток в шпорах излучин с последующим переходом в них основного расхода воды, при этом вторые (более извилистые) рукава сохранят за собой статус вторых основных. В частности продолжится развитие спрямляющих проток в шпоре Ботовской излучины Северной Двины (518,5-511 км), на Вычегде – активизация полоя Ликанди (248-243 км), а также спрямляющих излучины проток – полоев Шарда (420-413 км) и Серт (409-394 км), образующих пойменно-русловые разветвления. В последнем случае несмотря на увеличение водности, скорее всего, произойдет отмирание спрямившейся Белоборской излучины (409-394 км), имеющей омеговидную форму и экстремально большую для нижнего течения Вычегды l/L=3,4. На Печоре произойдет перераспределение расходов воды по рукавам в разветвленно-извилистом русле, образованном островами Шальди, Ыжди и Воргади (727-680 км), Серди (583-573 км), ожидается переход основного потока в спрямляющие протоки.

На участке разветвленно-извилистого русла Печоры (541-528 км), представленного о. Бол. Брыкаланский Песок, основной поток вероятнее всего останется в левом более извилистом рукаве, поскольку его положение определяется выступом правого коренного берега. Одновременно продолжится развитие спрямляющей протоки, которая забирая всё бóльшую долю расхода воды остается вторым основным рукавом.

Таким образом, ожидается увеличение разветвленности русла за счет отчленения части пойменных массивов и превращения их со временем в острова пойменно-русловых разветвлений и разветвленно-извилистого русла и последующим перераспределением расходов воды по основным рукавам.

В одиночных, сопряженных, параллельно-рукавных и пойменно-русловых разветвлениях ожидается перераспределение расходов воды между основными рукавами. В общем случае в многоводные годы основной поток сосредоточится в относительно более прямолинейных (правый рукав у о. Пустого на 612-610 км, левый рукав у о. Рубежского на 489-486 км Северной Двины; правый – у о. Каменка

на 348-339 км Печоры) или расположенных вдоль коренного берега рукавах. При наличии того и другого условий в разных рукавах в многоводные годы основной поток будет располагаться в относительно более прямолинейном рукаве, как, например, это происходило в одиночном разветвлении, образованном о. Канзским (588,5-581 км), на Северной Двине до искусственного закрепления основного расхода воды в левом рукаве вдоль коренного берега. Возможно дальнейшее развитие и переход основного потока в левый рукав у о. Тоострова (Лындовскую протоку) на 116-105 км Мезени, который в настоящее время забирает 38% расхода воды реки. В сопряженных разветвлениях слабоустойчивого русла Печоры (862-813 км), где вторые основные рукава получили тенденцию к развитию в многоводный период второй половины XX в., ожидается переход основного потока в них с запаздыванием процесса перехода в нижних звеньях относительно верхних на несколько лет. При направленном тренде увеличения водности система сопряженных разветвлений (269-243 км) в относительно устойчивом русле Печоры, где в многоводный период второй половины XX в. произошло укрупнение звеньев, скорее всего трансформируется в параллельно-рукавные разветвления в течение 40-50 лет. Если продолжительный многоводный период сменится маловодным, то такие трансформации будут носить временный характер, с понижением водности реки, система вновь станет развиваться сопряженно, при этом изменится статус рукавов, как это произошло на р. Лене в районе Якутска (от Табагинского утеса до Кангаласского мыса).

Зачастую прохождение основного расхода воды в том или ином рукаве не зависит от водности, определяясь положением побочней перекатов, периодически перекрывающих заходы в рукава, как, например, в пойменно-русловом разветвлении Печоры перед слияния с р. Усой, образованном о. Кыдзьрасди (771-762 км), оба рукава которого образуют излучины. В данном случае увеличение скоростей смещения перекатов и их побочней, 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 и относительно прямолинейного русла с разветвлениями второго порядка ожидается спрямление динамической оси потока за счет формирования побочневых проток в тыловых частях побочней. В узле слияния Печоры с р. Лыжей (798-792 км) в многоводные годы ожидается отчленение правобережного побочня и прохождение основного потока на удалении от стрелки. Можно ожидать отчленение частично заросшего обширного правобережного побочня и вновь образованного о. Губенец у с. Кеслома на участке относительно прямолинейного русла Мезени (116-105 км) и формирование второй ветви течения с дальнейшей трансформацией русла из относительно прямолинейного в разветвленное.

Переформирования излучин проявится в активизации их продольного смещения за счет размыва вогнутых берегов преимущественно в их нижних крыльях. Например, нижняя в серии из двух свободных излучин Печоры (809-798 км), которой присущи высокие скорости продольного смещения, при сохранении тенденции к повышению водности и скорости размыва вогнутого берега в нижнем крыле (около 40 м/год), сместится к середине XXI столетия на 1,5 км вниз по течению, если раньше не произойдет ее спрямление.

При повышении водности на реках региона ожидается изменение морфологии русла в сторону ее усложнения или смена морфодинамического типа русла. Последнее иллюстрирует *QI*-диаграмма (рис. 5.2), на которой показана возможная смена типа русла при максимально возможном, согласно существующим прогнозам, увеличении водности рек региона (до 15% [Будыко, 1980; Глобальное потепление…, 1993]). Возможные пути подобных трансформаций показаны стрелками. При пренебрежимо малых величинах изменения уклонов в новых условиях ожидается трансформация относительно прямолинейного русла ниже с. Козьмино (145 км) на Вычегде (№9 на диаграмме) в разветвленное; увеличение разветвленности врезанного русла Северной Двины ниже устья Ваги (№2): трансформация простых форм разветвлений (одиночных, сопряженных) в параллельно-рукавные; за пределами исследуемых участков – массовое спрямление крутых (петлеобразных и сегментных) излучин (в верхнем

течении Вычегды – №4, Мезени – №11); формирование вторичных разветвлений на крыльях врезанных излучин в верхнем течении Печоры (№15). В остальных случаях ожидается усложнение морфологии русла без изменения его типа.

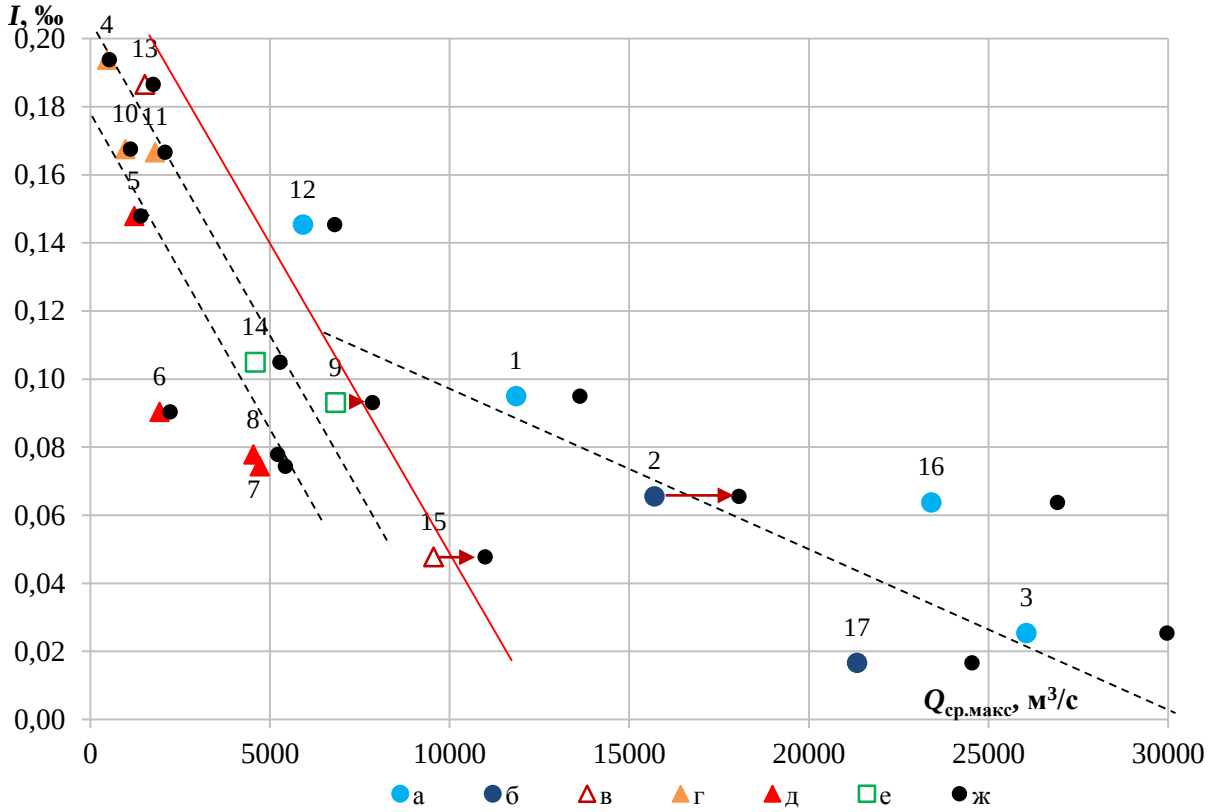


Рисунок 5.2 – Изменение положения точек на *QI*-диаграмме для рек Севера ЕТР при увеличении водности (номера точек соответствуют номерам в табл. 3.6). Условные обозначения: а – сложные разветвления (параллельно-рукавные, пойменно-русловые), б – одиночные и односторонние разветвления; излучины: в – врезанные, г – петлеобразные и сегментные развитые, д – сегментные пологие и прорванные; е – относительно прямолинейное неразветвленное русло; ж – положение точек при увеличении водности

Согласно одному из сценариев возможного **понижения водности** рек [Эколого-географические последствия…, 2011] следует ожидать уменьшения расходов воды в половодье. Если предположить, что $Q_ф$ изменяется пропорционально среднегодовому расходу воды, то заложив в расчет прогнозируемые величины понижений водности, получим оценку $Q_ф$ верхнего интервала в новых условиях (табл. 5.2). Сценарий предполагает снижение водности в бассейнах всех трёх рек с наиболее значительным в бассейне Северной Двины (на 14%). Величина $Q_ф$ верхнего интервала уменьшится, а на Северной Двине и нижней Вычегде в период половодья он будет проходить до выхода воды на пойму. На

остальных реках изменения условий прохождения $Q_ф$ верхнего интервала при сокращении водности не ожидается, однако сократится его обеспеченность и, соответственно, продолжительность затоплений поймы. На русловых процессах это может отразиться в сокращении скоростей деформаций и увеличении периодов их проявления.

Таблица 5.2 – Изменение $Q_ф$ при реализации сценария МОЦАО – уменьшения водности

Река	Пост	Q выхода воды на пойму, м^3/с	$Q_ф^*$, м^3/с (современный)	Сценарий по МОЦАО (уменьшение водности)	
				Уменьшение водности, %	$Q_ф^*$, м^3/с
Северная Двина	Абрамково	8500	**9500**	14%	**8 170**
	Звоз	10000	**19065**	14%	**16 396**
	Усть-Пинега	25000	**28055**	14%	**24 127**
Вычегда	Мал.Кужба	1500	**2131**	14%	**1 833**
	Сыктывкар	3300	–	14%	–
	Федяково	4800	**5575**	14%	**4 795**
Мезень	Б.Пысса	1500	**1810**	12%	**1 593**
	Малонисогорская	5000	**6520**	12%	**5 738**
Печора	Усть-Щугор	9000	**13580**	11%	**12 086**
	Усть-Цильма	9000	**20800**	11%	**18 512**

Примечание: * Зеленым шрифтом выделены расходы воды, проходящие при затопленной пойме, красным цветом – до выхода на пойму

Наступление маловодного периода проявится в сокращении водности до первых процентов от общего расхода реки вплоть до полного обмеления пойменных проток, вторых основных рукавов пойменно-русловых разветвлений меандрирующего русла Вычегды – Лукаполойского (325-318 км), Иртовского и Ленского (190-168 км), Прось (158-145 км), разветвленного русла Северной Двины – протоки Барчаха (394-378 км), и Печоры – протоки Новик-Шар (754-727 км), Старая Печора (305-289 км) и некоторых других.

Понижение водности сведет к минимуму число случаев спрямления излучин, особенно на стадии развитой и крутой. Таким образом, сократится вероятность развития разветвленно-извилистого русла Северной Двины, Вычегды, Печоры и некоторых пойменно-русловых разветвлений Вычегды в меандрирующем русле за счет сокращения водности спрямляющих проток. При этом в пойменно-русловом разветвлении Вычегды, образованном в результате спрямления Белоборской

излучины (409-394 км), не следует ожидать перехода основного потока в прежнее русло, скорее всего основной расход воды сосредоточится в спрямляющей протоке – полое Серт, тогда как излучина будет отмирать, поскольку уже достигла экстремально больших значений степени развитости. В существующем в настоящее время разветвленно-извилистом русле будет наблюдаться сокращение водности спрямляющих проток (полой Ликанди на Вычегде, Ботовская протока на Северной Двине, протоки Ипат-Шар и Ошкакурья, Сершар, Брыкаланская на Печоре), при направленном тренде понижения водности возможно объединение островов этих разветвлений с поймой.

Повсеместно будет наблюдаться консолидация небольших островов с дальнейшим присоединением их к пойменному массиву в частности за счет обмеления второстепенных рукавов односторонних и чередующихся односторонних разветвлений, образованных островами Тулгасским, Новым, Пяндским и рядом островов более мелких размеров на Северной Двине.

Процесс зарастания осередков и побочней в маловодный период будет наблюдаться на реках повсеместно, в наибольшей степени это проявится в русле Мезени, где по оценкам [Чалов и др., 2010] только за последние 50 лет около 50-60% обсыхающих в межень побочней и осередков превратились в молодые пойменные массивы.

Перераспределение расходов воды в рукавах проявится в увеличении продолжительности периодов перераспределения расходов воды по рукавам за счет снижения скоростей смещения перекатов и побочней; в одиночных разветвлениях в маловодные годы основной поток будет располагаться в относительно более извилистых рукавах (левый рукав у о. Пустого на 612-610 км, правый рукав у о. Рубежского на 489-486 км Северной Двины; левый – у о. Каменка на 348-339 км Печоры).

Деформации излучин русла и рукавов пойменно-русловых разветвлений (образованных островами Лукаполойским на 325-318 км, Шономским на 158-145 км Вычегды, Кыдзьрасди на 770-762 км, группой островов на 754-727 км Печоры), а также разветвленно-извилистого русла (образованного островами Ботовскими на

518,5-511 км Северной Двины, Ликанди на 248-243 км Вычегды, Шальди, Ыжди и Воргади на 727-680 км, Серди на 583-573 км, Бол. Брыкаланский Песок на 541-528 км Печоры) будут проявляться в развитии излучин за счет размывов вогнутых берегов преимущественно в их вершинах, а также развитии вторичных извилин на их крыльях.

С наступлением маловодного периода на участках относительно прямолинейного русла Мезени и нижней Вычегды ожидается увеличение извилистости динамической оси потока вследствие обтекания потоком побочней перекатов, располагающихся в шахматном порядке, и динамично смещающимися в слабоустойчивом русле, вызывая постоянное изменение положения стрежня потока.

В нижнем течении Печоры во второй половине XX в. в период повышенной водности (с постепенным увеличением) зафиксирована направленная трансформация разветвлений из сопряженных в параллельно-рукавные [Завадский, Львовская и др., 2015]. Можно предположить, что с наступлением маловодья произойдет обратная перестройка системы печорских разветвлений в сопряженные, но с зеркальным расположением главных рукавов, аналогично тому, как это произошло на Лене [Львовская, Чалов, 2013]. Это подтверждает анализ *QI*-диаграммы (рис. 5.3), которая иллюстрирует изменение положения точек при уменьшении водности.

Уменьшение водности принято для каждой реки согласно рассмотренным выше сценариям изменения водности. Для нижнего течения Печоры водность уменьшится на 11%. Согласно *QI*-диаграмме произойдет упрощение систем разветвлений в нижнем течении Печоры (№3), где расположены параллельно-рукавные разветвления. Также ожидается изменение морфодинамического типа разветвлений в среднем течении Северной Двины (№1) в сторону их упрощения.

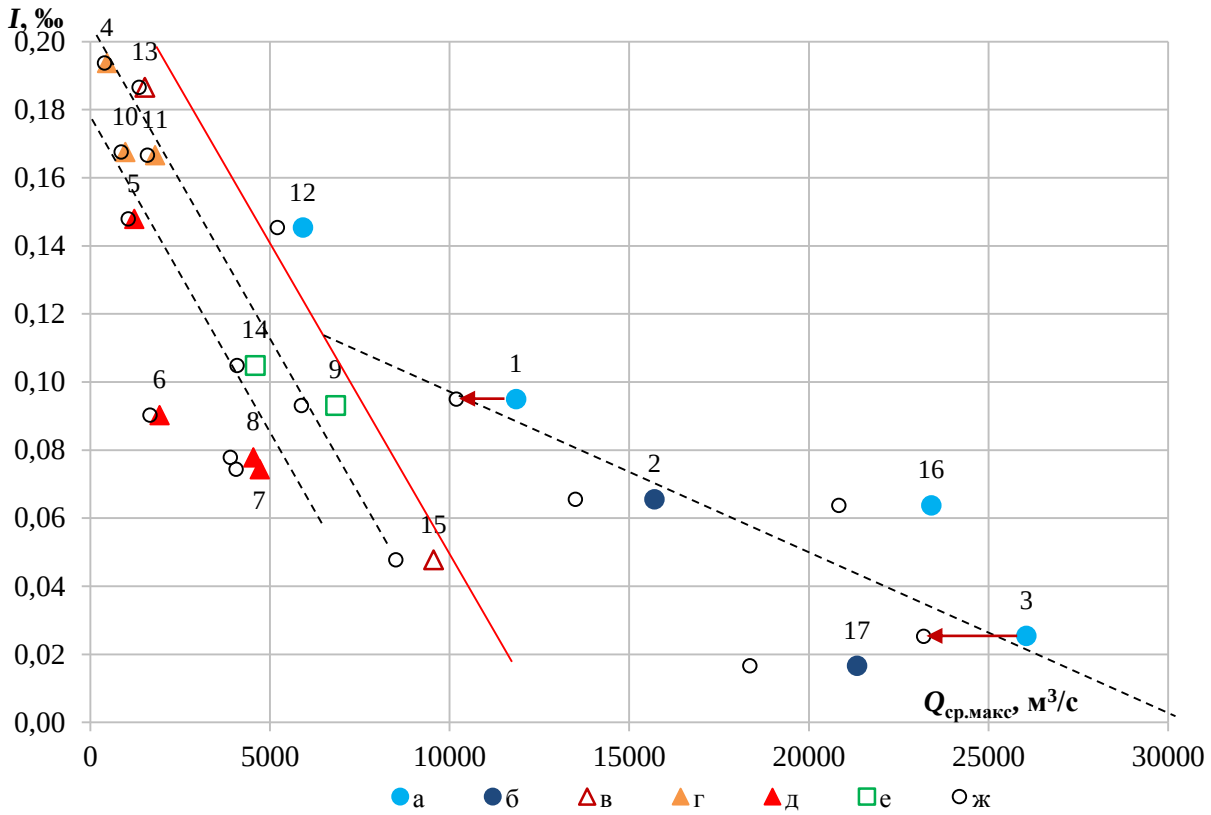


Рисунок 5.3 – Изменение положения точек на *QI*-диаграмме для рек Севера ЕТР при уменьшении водности (номера точек соответствуют номерам в табл. 3.6). Условные обозначения: а – сложные разветвления (параллельно-рукавные, пойменно-русловые), б – одиночные и односторонние разветвления; излучины: в – врезанные, г – петлеобразные и сегментные развитые, д – сегментные пологие и прорванные; е – относительно прямолинейное неразветвленное русло; ж – положение точек при уменьшении водности

Особую роль в переформированиях русла играют выступы (мысы) коренных берегов, преимущественно определяющие направление основного потока. На нижней Мезени таких выступов 16, на Северной Двине выступ левого коренного берега отклоняет поток в правый рукав одиночного разветвления, образованного о. Марковским (605-595 км), выступ правого коренного берега – в левый рукав одностороннего разветвления, образованного о. Тулгасским (363-354 км). На Печоре выступ правого коренного берега обеспечивает устойчивое положение основного расхода воды в левом рукаве пойменно-руслового разветвления, образованного о. Лебедь (647-633 км), и разветвленно-извилистого русла, образованного о. Бол. Брыкаланский песок (541-528 км) и др. В целом в периоды повышенной водности ожидается усиление направляющего воздействия выступов коренного берега, в маловодные периоды, напротив, поток будет обтекать их, не испытывая направляющего воздействия. Однако, эта закономерность выполняется

не всегда и определяется положением основного потока выше по течению: чем меньше угол подхода основного потока к коренному берегу непосредственно выше выступа, тем больше проявляется его направляющее воздействие. Кроме того, большую роль играет расположение побочней перекатов, которые, особенно в маловодные периоды, могут корректировать направление потока.

По полученным гидролого-морфологическим зависимостям для разветвленных русел в первом приближении можно оценить изменение ширины рукавов $b_{\text{рук}_\text{ф}}$ (табл. 5.3) и относительной ширины островов $B_\text{о}/b_\text{р}$ (табл. 5.4) разветвлений при реализации сценариев повышения или понижения водности, приняв допущение, что изменение водности основных рукавов произойдет пропорционально. Кроме того, необходимо принимать во внимание, что расчет не учитывает перераспределение расходов воды между рукавами, происходящее в ходе переформирований русла (изменение морфометрии рукавов) и при изменении морфодинамического типа русла.

Таблица 5.3 – Относительное увеличение (уменьшение) $b_{\text{рук}_\text{ф}}$ в зависимости от изменения водности

Изменение водности	Увеличение водности		Уменьшение водности	
Тип разветвления / Статус рукава	Главные	Вторые (второстепенные)	Главные	Вторые (второстепенные)
Параллельно-рукавные	13-19%	7-14%	23-28%	6-13%
Одиночные	17-20%	10-14%	28-32%	10-13%
Пойменно-русловые	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%

Значительное изменение ширины произойдет в главных рукавах всех типов разветвлений. При этом сокращение водности приведет к бóльшему изменению ширины рукавов несмотря на то, что по сценариям процент увеличения водности превышает процент ее уменьшения. Наибольшее увеличение ширины ожидается в главных рукавах односторонних разветвлений, ширина которых в некоторых случаях изменится почти в 2 раза при незначительных изменениях ширины второстепенных рукавов. Увеличение ширины главных рукавов одиночных, пойменно-русловых и сопряженных разветвлений составит от 17 до 27%,

уменьшение – 28-37%, при этом ширина вторых основных рукавов одиночных и пойменно-русловых разветвлений изменится лишь на 6-14%, а изменения ширины вторых основных рукавов пойменно-русловых разветвлений вообще не произойдет. Наименьшими величинами изменений ширины рукавов характеризуются параллельно-рукавные разветвления. При увеличении водности произойдет примерно одинаковое увеличение ширины основных рукавов, при уменьшении водности ширина главных рукавов сократится сильнее.

Увеличение и уменьшение относительной ширины островов разветвлений B_o/b_p (табл. 5.4) при изменениях водности будет сопоставимо. В наименьшей степени величина этого параметра изменится в пойменно-русловых разветвлениях разветвленного русла (первые проценты), т.к. рост острова в ширину будет происходить практически пропорционально увеличению ширины русла в узле разветвления и наоборот. В пойменно-русловых разветвлениях извилистого русла B_o/b_p претерпит значительные изменения (до 80%). Это значит, что ширина островов будет увеличиваться (или уменьшаться) значительно больше, чем ширина русла в узле разветвления. Для остальных типов разветвлений изменение B_o/b_p будет находиться в диапазоне от 20 до 60%.

Таблица 5.4 – Относительное увеличение (уменьшение) B_o/b_p в зависимости от изменения водности

Тип разветвления	Изменение водности	
	Увеличение водности	Уменьшение водности
Пойменно-русловые (разветвленное русло)	4-7%	4-6%
Сопряженные	19-27%	14-20%
Параллельно-рукавные	20-30%	18-28%
Одиночные (второго порядка в относительно прямолинейном русле)	20-48%	19-44%
Односторонние	20-53%	19-50%
Одиночные (разветвленное русло)	23-60%	21-56%
Пойменно-русловые (извилистое русло)	44-79%	41-74%

Оценки переформирований перекатов [Чалов и др., 2003] в зависимости от колебаний водности показали, что в случае равномерного повышения водности в течение всего года существенного обмеления перекатов на реках Севера ЕТР в период весеннего половодья не ожидается, тогда как во время летне-осенней

межени перекаты будут размываться, а глубины на них расти. Если принять сценарий увеличения среднегодового расхода воды за счет незначительного увеличения стока зимнего периода, то при прочих равных условиях, никаких изменений в режиме перекатов не будет; если произойдет увеличение водности летнего меженного периода, то это, скорее всего, вызовет рост глубин на перекатах. Напротив, при повышении водности половодья, можно ожидать обмеления перекатов в меженный период: чем выше и продолжительнее будет половодье, тем больше в это время будут намываться перекаты, и при неизменном летнем меженном стоке размывы гребней перекатов не смогут достигнуть современных значений; в результате перекаты обмелеют.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые для больших рек Севера ЕТР выполнен сравнительный анализ русловых процессов и условий формирования их русел, установлены гидролого-морфологические зависимости, дана оценка их изменений в прошлом, современное состояние и возможные изменения в будущем вследствие как саморазвития русловых форм, так и переформирований в результате изменений (повышения/понижения) водности рек. При этом для р. Печоры характеристика руслового режима является пионерной. Показано, что, за исключением р. Вычегды, на больших реках Севера абсолютно преобладают разветвленные русла.

2. Разветвленные русла на реках региона представлены практически всеми известными морфодинамическими типами, встречающимися на равнинных реках. При этом широко распространены наиболее сложные их разновидности – параллельно-рукавные (на р. Мезени абсолютно преобладают), пойменно-русловые, сопряженные. Выявлены различия между пойменно-русловыми разветвлениями в разветвленном (Северная Двина, Печора) и извилистом (Вычегда) русле. Выделены не упоминавшиеся ранее в классификациях двусторонние и прибрежные разветвления. Последние, однако, не образуют морфологически однородные участки, но встречаются повсеместно в выбоинах берегов, возле больших островов и между звеньями сопряженных разветвлений. Относительно прямолинейное русло преимущественно располагается вдоль коренного берега и осложнено разветвлениями второго порядка. Наименее распространены на реках региона излучины (преобладают только на Вычегде, встречаясь в виде отдельных форм на других реках), причем нередко они представляют собой разветвленно-извилистое русло (шпоры излучин образованы группами островов) либо также осложнены разветвлениями второго порядка. Среди излучин впервые выделен специфический морфодинамический тип – «обтекающие» излучины.

3. Впервые установлены гидролого-морфологические зависимости для разветвленных русел, общие для больших рек Севера ЕТР, отражая условия их формирования на реках региона. Зависимости дифференцируются по

разветвлениям разного морфодинамического типа, отражая тенденцию их усложнения от одиночных разветвлений к параллельно-рукавным. При этом связи ширины рукавов $b_{\text{рук}_\text{ф}}$ с их водностью при прохождении руслоформирующего расхода воды определяются не только типом разветвления, но также и статусом рукава (главный, второй основной, второстепенный). Относительная ширина островов $B_\text{о}/b_\text{р}$ изменяется в зависимости от удельного расхода воды неодинаково, отражая в то же время различия в условиях формирования разветвлений одного и того же морфодинамического типа (пойменно-русловых, одиночных). Зависимости основных параметров излучин рукавов (r, L) также дифференцируются по типам разветвлений и рекам. С ростом водности реки вниз по течению и увеличением размеров (водности, ширины) рукавов и островов разветвлений соотношение морфометрических параметров островов ($L_\text{о}/B_\text{о}$) для каждого морфодинамического типа разветвлений и реки остается неизменным. Достигая предельных значений $L_\text{о}/B_\text{о}$ отдельные острова объединяются в более крупные островные массивы, либо частично размываются, сохраняя при этом оптимальную для данной реки форму. Разброс величин $L_\text{о}/B_\text{о}$ отражает разнообразие типов разветвлений на реках региона: наибольший – на Печоре и Северной Двине, наименьший – на Мезени и Вычегде.

4. Ретроспективный анализ позволил выявить общие закономерности переформирований русел, установить влияние на трансформацию русел многолетних колебаний водности и антропогенного фактора (Северная Двина, Вычегда), который, однако, не нарушает общей направленности переформирований, а лишь ускоряет или замедляет их. Показано, что при повышении водности происходила направленная трансформация русла вплоть до смены морфодинамического типа в сторону его усложнения (укрупнение звеньев системы сопряженных разветвлений на Печоре). В наиболее продолжительные многоводные периоды отмечены наиболее существенные деформации русла (спрямление серии излучин и формирование вместо них разветвлений и прямолинейного неразветвленного русла на Северной Двине, трансформация сопряженных разветвлений в параллельно-рукавные на Печоре). Влияние

антропогенного фактора на фоне периодов повышенной водности проявилось в упрощении морфологии русла путем искусственного закрепления определенного положения основного потока в одном рукаве или системе рукавов (сопряженные → одиночные → односторонние разветвления на Северной Двине; одиночные и односторонние разветвления → относительно прямолинейное русло на Вычегде). Показано, что увеличение разветвленности русла может происходить как в многоводные (за счет активизации пойменных проток и отчленения частей пойменных массивов), так и в маловодные (за счет зарастания осередков и превращения их в острова) периоды.

5. Разработаны оценки возможных переформирований русел в будущем при изменениях водности. Ожидаемые трансформации русел подтверждаются изменением положения в поле *QI*-диаграммы точек, соответствующих тому или иному морфодинамическому типу русла (извилистые – относительно прямолинейные – разветвленные) в пределах морфологически однородных участков.

6. По гидролого-морфологическим зависимостям установлены величины изменения параметров разветвлений при повышении или понижении водности (в зависимости от выбранного сценария изменений).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алабян А.М. Типы русел равнинных рек и факторы их формирования // Геоморфология. – 1992. – № 4. – С. 37–40.

2. Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 202 с.

3. Алексеевский Н.И., Чалов С.Р. Гидрологические функции разветвленного русла – М.: Географ. ф-т МГУ, 2009. – 240 с.

4. Алексеевский Н.И., Чалов С.Р. Структура русловых разветвлений // Геоморфология. – 2004. – № 3. – С. 57–66.

5. Антроповский В.И. Гидроморфологические зависимости и их дальнейшее развитие // Труды ГГИ. – 1969. – Вып. 169. – С. 34–86.

6. Антроповский В.И. Связь типов руслового процесса с определяющими факторами // Труды ГГИ. – 1970. – Вып. 183. – С. 70–80.

7. Арэ Ф.Э. Влияние мерзлого состояния горных пород на размыв берегов рек криолитозоны // Региональные криолитологические исследования в Сибири. Якутск: Изд. ин-та мерзлотоведения СО АН СССР. – 1979. – С. 107–117.

8. Баровский Н.А. Гидролого-морфологическая оценка условий формирования и трансформации широкопойменных русел: автореф. дис. … канд. геогр. наук: 25.00.27 – М.: МГУ, 2008. – 25 с.

9. Баровский Н.А. Оценка условий формирования свободно меандрирующих русел (на примере рек бассейнов Волги и Оби) // География и природные ресурсы. – 2007. – № 4. – С. 124–130.

10. Баула В.А., Рулева С.Н., Чалов Р.С. Опыт выправления участка разветвленного русла Средней Оби // Речной транспорт. – 1995. – №3. – С. 24–27.

11. Белый Б.В., Иванов В.В., Никитина Л.Н., Чалов Р.С., Чернов А.В. Морфология и динамика русла нижнего течения Вычегды в период активных дноуглубительных работ и после их прекращения // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Географ. ф-т МГУ. – 2001. – Вып. 13. – С. 146–183.

12. Беркович К.М. Географический анализ антропогенных изменений русловых процессов. – М.: ГЕОС, 2001. – 164 с.

13. Беркович К.М., Векслер А.Б., Донненберг В.М., Маккавеев Н.И., Чалов Р.С. Формирование русла Оби в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС// Труды ЗапСибИПИ Госкомгидромета.– 1981. – Вып. 52. – С. 3–20.

14. Беркович К.М., Виноградова Н.Н., Завадский А.С., Рулева С.Н., Сурков В.В., Чалов Р.С. Нижний бьеф Новосибирской ГЭС в прошлом, настоящем и будущем (опыт исследования формирования природно-техногенной системы) // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Географ. ф-т МГУ. – 2008. – Вып. 16. – С. 132–147.

15. Беркович К.М., Гаррисон Л.М., Рулева С.Н., Сурков В.В., Чалов Р.С. Русловые процессы, антропогенные изменения Русла Нижней Катуни и их влияние на ландшафты поймы // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Географ. ф-т МГУ. – 2000. – Вып. 12. – С. 130–157.

16. Беркович К.М., Рулева С.Н., Чалов Р.С. Как Катунская ГЭС повлияет на русло реки // Природа. – 1992. – №5. – С. 42–45.

17. Борщенко Е.В. Морфодинамика русел рек бассейна Амура (Российская часть) и ее трансформация под влиянием естественных и антропогенных факторов: автореф. дис. … канд. геогр. наук: 25.00.27 – М.: МГУ, 2013. – 30 с.

18. Борщенко Е.В., Чалов Р.С. Региональный анализ условий формирования речных русел с разным морфодинамическим типом (на примере рек российской части бассейна Амура) // Геоморфология. – 2011. – № 1. – С. 30–37.

19. Будыко М.И. Климат в прошлом и будущем. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 352 с.

20. Великанов М.А. Русловой процесс. – М.: Госфизматиздат, 1958. – 395 с.

21. Вильперт А.С. Выправление рек Северного бассейна // Речной транспорт. – 1963. – № 9.

22. Вильперт А.С. Из опыта коренного улучшения судоходных условий и увеличения габаритов пути// Речной транспорт. – 1970. – № 3. – С. 35–37.

23. Виноградова Н.Н., Рулева С.Н. Влияние изменений гидрологического режима и хозяйственной деятельности на состояние русла р. Оби в нижнем бьефе

Новосибирской ГЭС // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. – 1982. – №1. – С. 38–44.

24. Власов Б.Н., Чалов Р.С. Районирование Европейской территории СССР по условиям прохождения руслоформирующих расходов на реках // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. – 1991. – № 6. – С. 32–42.

25. Водные пути бассейна Лены. – М.: МИКИС, 1995. – 600 с.

26. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И.А. Шикломанова; Федер. агентство вод. ресурсов. – СПб.: Гос. гидрол. ин-т, 2008. – 600 с.

27. Гидрология устьевой области Северной Двины / Под. ред. М.И. Зотина и В.М. Михайлова. – М.: Гидрометеоиздат, 1965. – 376 с.

28. Глобальное потепление. Доклад Гринпис. / Под ред. Дж. Деггета. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1993. – 272 с.

29. Гришанин К.В. Теория руслового процесса. – М.: Транспорт, 1972. – 216 с.

30. Давыдов Л.К. Гидрография СССР. Т. 1. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1953. – 600 с.

31. Дебольский В.К., Катков В.М. Особенности динамики дефицитных форм в поступательных потоках // Метеорология и гидрология. – 1977. – № 10. – С. 67–71.

32. Добровольский С.Г. Глобальные изменения речного стока. – М.: ГЕОС, 2011. – 660 с.

33. Дружинин И.П., Смага В.Р., Шевнин А.Н. Динамика многолетних колебаний речного стока. – М.: Наука, 1976. – 176 с.

34. Евстигнеев В.М. Речной сток и гидрологические расчеты: Учебник. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 304 с.

35. Евстигнеев В.М., Акименко Т.А., Евсеева Л.С. Географические закономерности межгодовых колебаний речного стока // Проблемы гидрологии и гидроэкологии. М: Географический факультет МГУ. – 1999. – Вып.1. – С. 95–118.

36. Жук В.А., Скорняков В.А. Оценка синхронности многолетних колебаний годового стока на основе анализа корреляционной матрицы //Расчеты

речного стока (Методы пространственного обобщения). – М: Изд-во МГУ, 1984. – С. 7–21.

37. Завадский А.С. Асимметрия формы сводных излучин на примере Вычегды и Чулыма // Геоморфология. – 2001а. – № 3. – С. 101–109.

38. Завадский А.С. Гидролого-морфологический анализ свободного меандрирования русел равнинных рук: автореф. дис. … канд. геогр. наук: 25.00.27 – М.: МГУ, 2001б. – 26 с.

39. Завадский А.С. Условия формирования и морфология свободных излучин на реках Северной Евразии // Геоморфология. – 2000. – № 4. – С. 4–15.

40. Завадский А.С., Каргаполова И.Н. Чалов Р.С. Стадии развития свободных излучин и их гидролого-морфологический анализ // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. – 2002. – № 2. – С.17–22.

41. Завадский А.С., Львовская Е.А., Рулева С.Н., Чалов Р.С. Морфодинамика русла р. Печоры (от г. Печоры до устья на фоне его характеристики по всей длине) // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Географ. ф-т МГУ. – 2015. – Вып. 19. – С. 211–236.

42. Завадский А.С., Никитина Л.Н., Чалов Р.С. Особенности свободных излучин на реках в различных природных условиях (на примере Вычегды, Чулыма, Вилюя) // География и природные ресурсы. – 1997. – С. 85–92.

43. Завадский А.С., Чалов Р.С. Гидролого-гидроморфологические характеристики свободных излучин на реках в различных природных условиях // Современная география и окружающая среда. Казань: изд-во Казан. ун-та. – 1996. – С. 73–74.

44. Завадский А.С., Чалов Р.С. Условия формирования свободных излучин на реках Северной Евразии // Геоморфология. – 2000. – № 4. – С. 88–95.

45. Завадский А.С., Чалов Р.С., Рулева С.Н. Опыт оценки изменения глубин на перекатных участках рек России при потеплении климата // География и природные ресурсы. – 2003. – №3. – С. 86–92.

46. Зайков Б.Д. Высокие половодья и паводки на реках СССР за историческое время. – Л.: Гидрометеоиздат, 1954. – 135 с.

47. Зайков Б.Д. Очерки гидрологических исследований в России / Под ред. А. П. Доманицкого. – Л.: Гидрометеоиздат, 1973. – 325 с.

48. Замышляев В.И. Математическая модель плановых переформирований речных русел // Труды ГГИ. – 1983. – Вып. 288. – С. 53–72.

49. Знаменская Н.С. Грядовое движение наносов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1968. – 188 с.

50. Иванов В.В. Условия формирования, гидролого-морфометрические зависимости и деформации относительно прямолинейных, неразветвленных русел: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.27. – М.: МГУ, 1989. – 23 с.

51. Ильина Л.Л., Грахов А.Н. Реки Севера. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987. – 128 с.

52. Инженерная геология СССР. Т.1. Русская платформа. / Под ред. И.С. Комарова. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. – 528 с.

53. Калинин Г.П. Проблемы глобальной гидрологии. – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1968. – 378 с.

54. Карандеева М.В. Геоморфология Европейской части СССР. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1957. – 315 с.

55. Каргаполова И.Н. Реакция русел рек на изменения водности и антропогенное воздействие за последние столетия: дис. … канд. геогр. наук: 25.00.27. – М.: МГУ, 2006. – 224 с.

56. Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М., Соколихина Н.Н., Суркова Г.В., Торопов П.А., Чернышев А.В., Чумаченко А.Н. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 292 с.

57. Кондратьев Н.Е. Гидроморфологические основы расчетов свободного меандрирования // Труды ГГИ. – 1968. – Вып. 155. – С. 5–38.

58. Кондратьев Н.Е. Русловые деформации в меандрирующих руслах // Труды ГГИ.– 1954. – Вып. 44 (98). – С. 5–13.

59. Кондратьев Н.Е. Русловые процессы рек и деформации берегов водохранилищ. – СПб.: Знак, 2000. – 258 с.

60. Кондратьев Н.Е., Ляпин А.Н., Попов И.В., Пиньковский С.И., Федоров Н.Н., Якутин Н.А. Русловой процесс. – Л.: Гидрометеозидат, 1959. – 372 с.

61. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Снищенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982. – 272 с.

62. Кочукова Т.Н. Колебания годового стока рек СССР //Труды ГГИ.– 1955. – Вып.50. – С. 56–116.

63. Кузин П.С. Циклические колебания стока рек Северного полушария. – Л.: Гидрометеоиздат, 1970. – 178 с.

64. Ламакин В.В. Об остаточно-речных и вообще остаточных поверхностных отложениях // Изв. АН СССР. Сер. геологич. – 1943. – №2. – С. 79–87.

65. Ламакин В.В. Динамические фазы речных долин и аллювиальных отложений // Землеведение. Т.2 (42). М.: Изд-во АН СССР. – 1948. – С. 154–187.

66. Ламакин В.В. Об отклонении течения рек их притоками // Природа. – 1951. – №6. – С. 22–29.

67. Лапшенков В.С. Прогнозирование русловых деформаций в бьефах речных узлов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979. – 240 с.

68. 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.

69. Львовская Е.А. Гидролого-морфологический анализ разветвленных русел рек Севера Европейской территории России // Маккавеевские чтения – 2014. – М.: Географический факультет МГУ, 2015. – С. 63–74.

70. Львовская Е.А. Разветвления русел рек Севера Европейской территории России: условия формирования, типизация и гидролого-морфологические зависимости // География и природные ресурсы (в печати).

71. Львовская Е.А., Чалов Р.С. Гидролого-морфологический анализ разветвленного русла р. Печора // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. – 2015. – № 1. – С. 78–86.

72. Львовская Е.А., Чалов Р.С. Методические аспекты прогнозирования русловых процессов при изменении водности рек // Геоморфология. – 2013. – № 3. – С. 78–88.

73. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 347 с.

74. Маккавеев Н.И. Русловой режим рек и трассирование прорезей. – М.: Речиздат, 1949. – 201 с.

75. Маккавеев Н.И., Останин В.Е., Сахарова Е.И. Геоморфологические исследования для обоснования проектов улучшения судоходных условий рек // Вопросы географии. – 1961. – № 52. – С. 100–104.

76. Маккавеев Н.И., Советов В.С. Трассирование землечерпательных прорезей на перекатах равнинных рек Европейской части СССР // Труды ЦНИИРФ. – Л., М.: Речиздат, 1940. – Вып. 3. Вопросы пути. – 60 с.

77. Маккавеев Н.И., Чалов Р.С. Русловые процессы. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 264 с.

78. Марютин Т.П. О режимах уровня в Архангельском порте. – Л.: Гипроводтранс, 1932. – 36 с.

79. Матвеев Б.В. Влияние геолого-геоморфологических факторов на образование и морфологию речных излучин // Геоморфология. – 1985а. – №3. – С. 51–57.

80. Матвеев Б.В. Морфология и геолого-геоморфологические факторы развития врезанных и свободных излучин: автореф. дис. … канд. геогр. наук: 25.0027. – М.: Изд-во МГУ, 1985б. – 20 с.

81. Материалы для описания русских рек и истории улучшения их судоходных условий. Вып. 32. Отчет по исследованию в 1910 г. нижней части р. Вычегды. Сост. инженер путей сообщ. А.Н. Старицкий. – СПб.: Типогр-я Мин-ва Путей Сообщения, 1912. – 104 с.

82. Михайлова Н.М. Режим деформаций перекатов и его влияние на условия судоходства р. Северной Двины: дис. … канд, геогр. наук: 25.00.27. – М.: Изд-во МГУ, 2014. – 215 с.

83. Михайлова Н.М. Учет особенностей морфологии перекатов при проведении дноуглубительных работ // Водные пути и русловые процессы / Под ред. Р.С. Чалова – СПб.: СПГУВК, 2007. – С. 105–114.

84. Михайлова Н.М., Львовская Е.А. Количественная оценка сезонных переформирований перекатов (на примере Северной Двины) // География и природные ресурсы. – 2013. – № 3. – С. 139–142.

85. Монин А.С., Сонечкин Д.М. Колебания климата по данным наблюдений: тройной солнечный и другие циклы. – М.: Наука, 2005. – 191 с.

86. Морфология и динамика русел рек Европейской территории России и сопредельных государств. Масштаб 1:2 000 000. – Федеральная служба геодезии и картографии РФ, 1999. – 4 л.

87. Отчет об исследованиях русловых процессов на р. Мезени (нижнее течение). Географический факультет МГУ, НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева. – Москва, 2010. – 70 с.

88. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т.1. Изменения климата. – М.: Росгидромет, 2008. – 228 с.

89. Попов И.В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство. – Л.: Гидрометеоиздат, 1965. – 328 с.

90. Порочкин Е.М., Зарбаилов А.Ю. Внутренние водные пути СССР. – М.: Транспорт, 1975. – 432 с.

91. Проектирование судовых ходов на свободных реках // Труды ЦНИИЭВТ. Вып. 36. / Под ред. Н.И. Маккавеева. – М.: Транспорт, 1964. – 262 с.

92. Раткович Д.Я. Многолетние колебания речного стока. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 256 с.

93. Резников П.Н. Сток наносов и его проявления в морфодинамике речных русел: дис. … канд. геогр. наук: 25.00.27. – М.: Изд-во МГУ, 2007. – 140 с.

94. Результаты рекогносцировочного обследования русла р. Печоры на участке от г. Печоры (п. Путеец) до г. Нарьян-Мара (июнь–июль 2008 г.).

Географический факультет МГУ, НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева. – Москва, 2009. – 22 с.

95. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т3. Северный край. – Л.: Гидромеоиздат, 1972. – 644 с.

96. Родевич В.М. Обзор произведенных до 1923 г. исследований рек России // Изв. Рос. гидрол. ин-та. – 1923. – №5

97. Розовский И.Л. Движение воды на повороте открытого русла. – Киев: Изд-во АН УССР, 1957. – 188 с.

98. Ромашин В.В. Типы руслового процесса в связи с определяющими факторами // Труды ГГИ. – 1968. – Вып. 155. – С. 56–63.

99. Рулева С.Н., Чалов Р.С. Русловые деформации в узле слияния рек Вычегды и Сысолы и их влияния на инфраструктуру г. Сыктывкара // Труды Академии проблем водохозяйственных наук. – 2003. – Вып. 9. – С. 171–181.

100. Русловой режим рек Северной Евразии (в пределах бывшего СССР) / Под. ред. Р.С. Чалова – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1994. – 386 с.

101. Русловые процессы и водные пути на реках бассейна Северной Двины. / Под ред. Р.С. Чалова. – М: ООО "Журнал "РТ", 2012. – 492 с.

102. Русловые процессы на реках СССР. Масштаб 1:4 000 000. – М.: ГУГК СССР, 1990. – 4 л.

103. Сахарова Е.И. Геоморфологические исследования при изучении русловых процессов на Северной Двине. // Методы географических исследований. – М., Географгиз, 1960. – С. 101–109.

104. Седых А.И., Чернышов Ф.М., Кабанов А.В. Путевые работы на свободных реках. – М.: Транспорт, 1978. – 328 с.

105. Сидорчук А.Ю. Малые староречья на поймах малоизученных рек как показатель этапа пониженной водности // Маккавеевские чтения – 2009. – М.: Географ. ф-т МГУ, 2010. – С. 64–80.

106. Сидорчук А.Ю. Морфология, динамика и структура речного русла: автореф. дис….докт. геогр. наук: 11.00.07. – М.: Изд-во МГУ, 1992. – 58 с.

107. Сидорчук А.Ю. Основные результаты палеогидрологического исследования палеорусел перигляциальной зоны последнего оледенения Русской равнины // Маккавеевские чтения – 2003. – М.: Географ. ф-т МГУ, 2004. – С. 62–70.

108. Сидорчук А.Ю., Борисова О.К., Ковалюх Н.Н., Панин А.В., Чернов А.В. Палеогидрология нижней Вычегды в позднеледниковье и в голоцене // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. – 1999. – № 5. – С. 35–42.

109. Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К. Климатические изменения стока воды на южном склоне Восточно-Европейской равнины в позднеледниковье // Древние и современные долины и реки: история формирования, эрозионные и русловые процессы – Волгоград: Перемена, 2010. – С. 118–141.

110. Смирнова В.Г. Гидролого-морфологический анализ разветвленных русел рек Алтайского региона: автореф. дис. … канд. геогр. наук: 25.00.27. – Иркутск: ИГ СО РАН, 2002. – 20 с.

111. Современные глобальные изменения природной среды. Т.1 // Моск.гос.ун-т им.М.В.Ломоносова, Рос.акад. естеств.наук / Отв.ред.: Н.С.Касимов, Р.К. Клиге. – М.: Науч.мир, 2006. – 696с.

112. Спиридонов А.И. Геоморфология европейской части СССР. – М.: «Высшая школа», 1978. – 331 с.

113. Сурков В.В. Влияние дноуглубительных работ на эволюцию разветвленных участков р. Оби // Геоморфология. – 2001. – №4. – С. 37–45.

114. Тарбеева А.М. Формирование и эволюция островов в русле Оби // Эрозионные, русловые процессы и проблемы гидроэкологии. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – С. 202–208.

115. Хмызников П.К. Гидрология бассейна реки Яны. – Л.: Изд-во АН СССР, 1934. – 252 с.

116. Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. – М.: Изд-во МГУ, 1979. – 232 с.

117. Чалов Р.С. Многолетний и сезонный режимы перекатов и их учет при проведении путевых работ на судоходных реках // Журнал университета водных коммуникаций. – 2010. – № 2 (6). – С. 31–45.

118. Чалов Р.С. Показатели устойчивости русел, их использование для оценки интенсивности русловых деформаций и пути их совершенствования // Динамика русловых потоков. – Л.: Изд-во ЛПИ, 1983. – С. 46–53

119. 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.

120. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т.2. Морфодинамика речных русел. – М.: КРАСАНД, 2011. – 960 с.

121. Чалов Р.С. Русловые исследования. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 106 с.

122. Чалов Р.С. Руслоформирующие расходы воды // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. – 2006. – № 1. – С. 11–19.

123. Чалов Р.С., Алабян А.М., Иванов В.В., Лодина Р.В., Панин А.В. Морфодинамика русел равнинных рек. – М.: ГЕОС, 1998. – 288 с.

124. Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В. Речные излучины. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 371 с.

125. Чалов Р.С., Завадский А.С., Рулева С.Н. Прогнозная оценка изменений глубин на перекатных участках рек России при потеплении климата // География и природные ресурсы. – 2003. – №3. – С. 86–92.

126. Чалов Р.С., Завадский А.С., Рулева С.Н., Чалов С.Р. Морфология, переформирования русла и перекатов р. Мезени (нижнее течение) // Географический вестник. – 2010. – №3 (14). – С. 11–23.

127. Чалов Р.С., Кирик О.М., Ильясов А.К., Ботавин Д.В. Временная трансформация сложноразветвленного русла крупнейшей реки (на примере приалданского участка р. Лены) // Геоморфология. – 2014. – № 1. – С. 92–103.

128. Чалов Р.С., Лю Шугуан, Алексеевский Н.И. Сток наносов и русловые процессы на больших реках России и Китая (Северная Двина, Обь, Лена, Хуанхэ, Янцзы). – М.: МГУ, 2000. – 212 с.

129. Чалов Р.С., Резников П.Н. Сток наносов и условия формирования русел на реках бассейна Северной Двины // Геоморфология. – 2005. – № 2. – С. 73–85.

130. Чалов С.Р., Федоровский А.Е. Разветвления рек бассейна Северной Двины // Водное хозяйство России. – 2009. – № 6. – С. 37–52.

131. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю. Влияние изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек России // Гидрологические последствия изменения климата. – Новосибирск, 2007. – С. 192–204.

132. Шнитников А.В. Внутривековая изменчивость компонентов общей увлажненности. – Л.: Наука, 1969. – 244 с.

133. Шнитников А.В. Изменчивость общей увлажненности материков Северного полушария // Зап. Географ. об-ва. Нов. сер. Т. 16. – М., Л.: Изд-во АН СССР, 1957. – 339 с.

134. Эколого-географические последствия глобального потепления климата XXI века на Восточно-Европейской равнине и в Западной Сибири / Под ред. Н.С. Касимова и А.В. Кислова. – М.: МАКС Пресс, 2011. – 496 с.

135. Экспериментальная геоморфология. Вып. 2. – М.: Изд-во МГУ, 1969. – 173 с.

136. Baker V.R. Stream-channel response to floods with examples from central Texas // Geol. Soc. Am. Bull. Vol. 88. – 1977. – №8. – P. 1057–1071.

137. Butler C.J., Johnston D.J. A Provisional Long Mean Air Temperature Series for Armagh Observatory // J. Atmosph. and Terrestrial Phys. Vol. 58. – 1996. – P. 1657–1672.

138. Callender R.A. River meandering // Ann. Rev. Fluid Mech. Vol. 10. – 1978. – P. 129–158.

139. Carlston C.W. The relation of the meander geometry to stream discharge and its geometric implications // J. Amer. Science. Vol. 263. – 1965. – №10. – P. 864–885.

140. Carson M.A. The meandering-braided river threshold: a reappraisal // J.Hydrol. Vol. 73. – 1984. – P. 315–334.

141. Climate Change 2001: IPCC Third Assessment Report: Working Group I: The Scientific Basis – Cambridge: Cambridge University Press, 2001. – 98 p.

142. Climate Change 2007: IPCC Fourth Assessment Report: Working Group I: Report «The Physical Science Basis» – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 52 p.

143. Hickin E.J. The analysis of river-platform responses to changes of discharge // River Channel Changes. – 1977. – P. 249–263.

144. Jovanović, B.D. The influence of solar activity on the Danube river flow, II // Astronomical & Astrophysical Transactions. – 1997. – 13:2 – P. 183–189.

145. Komar P.D. Shape of streamlined island on Earth and Mars: Experiments and analyses of the minimum-drag form // Geology. – 1983. – № 11. – P. 651–654.

146. Lacey G. Stable channels in alluvium // Minutes Proc. Instit. Civ. Eng. Vol. 229. – London, 1930. – P. 259–292.

147. Leopold L.B., Wolman M.G. River channel patterns – braided, meandering and straight // U.S. Geological Survey Professional Paper. 282-B. – 1957. – P. 1–85.

148. Mann M.E., Park J., Bradley R.S. Global Interdecadal and Century-Scale Climate Oscillations During the Past Five Centuries // Nature. Vol. 378. – 1995. – P. 266–270.

149. Milne J.A. Patterns of confinement in some stream channels of upland Britain. // Geogr. Ann. Vol. A-65. – 1983. – №1-2. – P. 67–83.

150. Schaffernak F. Grundriss des Flussmorfologie und des Flussbaues. – Wien: Springer, 1950.

151. Schumm S.A. Meander wavelength of alluvial rivers // Science. Vol. 157. – 1967. – № 3796. – P. 1549–1552.

152. Schlesinger M.E., Ramankutty N. An oscillation in the global climaste system of period 65-70 years // Nature. Vol. 367. – 1994. – P. 723–726.

СПИСОК АРХИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1. Меркаторская карта рек Печоры, Ижмы, Илыча, Вычегды, Северной и Южной Мылвы. Рук. М. 25 в. 1846 г. РГВИА. Фонд № 846, Оп. 16. № 23932.

2. Карта находящейся в Архангелогородской губернии реки Двины со впадающими в нее реками с показанием имеющегося по оным. Рук. Составил Обер Квартирмейстер Василий Двечков. 1765 г. РГВИА. Фонд № 846, Оп. 16. № 24059.

3. Атлас реки Северной Двины. Составлен по изысканиям 1858, 59 и 60 гг. под руководством Инженер Штабс Капитана А. Василовского. Ч.1. Общие карты. Изд. Главным управлением путей сообщения и публичных зданий. Отпечатано в литографии Полторацкого Ильина и Ко. 1861 г. РГВИА. Фонд № 846, Оп. 16. № 24063.

4. Подробные планы участка реки Северной Двины от устья р. Ваги до Белого моря. По исследованиям С.-Двинской описной партии, произведенным в 1879-1881 гг. Изданы Статистическим отделом Министерства Путей Сообщения. СПб. Картографическое заведение Ильина. 1888 г. ГИМ. Отдел картографии. № 7220.

5. Подробные планы участка реки Северной Двины от устья р. Вычегды до устья р. Ваги. По исследованиям С.-Двинской описной партии, произведенным в 1877-1879 гг. Изданы Статистическим отделом Министерства Путей Сообщения. СПб. Картографическое заведение Ильина. 1888 г. ГИМ. Отдел картографии. № 7219.

6. Сокращенные планы участка реки Северной Двины от устья р. Ваги до Белого моря. По исследованиям С.-Двинской описной партии, произведенным в 1879-1881 гг. Изданы Статистическим отделом Министерства Путей Сообщения. СПб. Картографическое заведение Ильина. 1888 г. ГИМ. Отдел картографии. № 7222.

7. Сокращенные профили участка реки Северной Двины от устья р. Ваги до Белого моря. По исследованиям С.-Двинской описной партии, произведенным в 1879-1881 гг. Изданы Статистическим отделом Министерства Путей Сообщения.

СПб. Картографическое заведение Ильина. 1888 г. ГИМ. Отдел картографии. № 7222.

Приложение А

Таблица А.1 – Распределение морфодинамических типов русла р. Северной Двины от г. Котласа до устьевой области

№	Тип русла	Протяженность, км / % от общей длины участка			
		Большая Северная Двина, 546,5 км	г.Котлас – с.Ягрыш, 134 км	с.Ягрыш – устье р.Ваги, 165 км	Устье р.Ваги – устье р.Пинеги, 247,5 км
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Разветвления – 47%					
1	Одиночные, в т.ч.	74,5 / 14	26,5 / 20	14,5 / 9	33,5 / 14
	Широкопойменные	33,5 / 6	26,5 / 20	7 / 4	–
	Адаптированные	21,5 / 4	–	4,5 3	17 / 7
	Врезанные	19,5 / 4	–	3 / 2	16,5 / 7
2	Односторонние, в т.ч.	66,5 / 12	20,5 / 15	30 / 18	16 / 6
	Широкопойменные	25,5 / 5	20,5 / 15	5 / 3	–
	Адаптированные	16 / 3	–	12 / 7	4 / 2
	Врезанные	25 / 5	–	13 / 8	12 / 5
3	Односторонние чередующиеся, в т.ч.	8 / 1	–	–	8 / 3
	Врезанные	8 / 1	–	–	8 / 3
4	Двусторонние, в т.ч.	9 / 2	–	9 / 5	–
	Адаптированные	9 / 2	–	9 / 5	–
5	Сопряженные, в т.ч.	11 / 2	–	–	11 / 4
	Врезанные	11 / 2	–	–	11 / 4
6	Разветвленно-извилистые*	7,5 / 1	7,5 / 6	–	–
7	Пойменно-русловые, в т.ч.	7 / 1	–	7 / 4	–
	Врезанные	7 / 1	–	7 / 4	–
8	Параллельно-рукавные, в т.ч.	61 / 11	21 / 16	31 / 19	9 / 4
	Широкопойменные	30 / 5	21 / 16	–	9 / 4
	Врезанные	31 / 6	–	31 / 19	–
9	Дельтовые, в т.ч.	12 / 2	5 / 4	7 / 4	–
	Широкопойменные	5 / 1	5 / 4	–	–
	Адаптированные	7 / 1	–	7 / 4	–

Таблица А.1 – продолжение

1	2	3	4	5	6
Прямолинейное, неразветвленное – 25%					
10	Относительно прямолинейное неразветвленное	65,5 / 12	–	4 / 2	61,5 / 25
	Врезанное	65,5 / 12	–	4 / 2	61,5 / 25
11	Относительно прямолинейное неразветвленное вдоль коренного берега, в т.ч.	71 / 13	41 / 31	27 / 16	3 / 1
	Широкопойменное	47,5 / 9	41 / 31	6,5 / 4	–
	Адаптированное	19,5 / 4		16,5 / 10	3 / 1
	Врезанное	4 / 1		4 / 2	
Прямолинейное с разветвлениями второго порядка – 7%					
12	Относительно прямолинейное вдоль коренного берега с разветвлениями второго порядка, в т.ч.	39 / 7	–	22 / 13	17 / 7
	Широкопойменное	17 / 3	–	–	17 / 7
	Адаптированное	22 / 4	–	22 / 13	–
Извилистое (меандрирующее) – излучины – 21%					
13	Свободные	5 / 1	5 / 4	–	–
14	Вписанная (Толоконная гора)	7,5 / 1	7,5 / 6	–	–
15	Врезанные	102 / 19	–	13,5 / 8	88,5 / 36
	Общий итог	**546,5**	**134**	**165**	**247,5**

Примечание: При отсутствии указания на геоморфологические условия русло является широкопойменным

Таблица А.2 – Распределение морфодинамических типов русла р. Вычегды от устья р. Сысолы до устья

№	Тип русла	Протяженность, км / % от общей длины участка		
		устье р.Сысолы – устье, 420 км	устье р.Сысолы – устье р.Выми, 118 км	устье р.Выми – устье, 302 км
Разветвления – 43%				
1	Одиночные, в т.ч.	46 / 11	–	46 / 15
	Широкопойменные	28 / 7	–	28 / 9
	Адаптированные	18 / 4	–	18 / 6
2	Односторонние, в т.ч.	60 / 14	–	60 / 20
	Широкопойменные	21 / 5	–	21 / 7
	Адаптированные	39 / 9	–	39 / 13
3	Разветвленно-извилистые	16 / 4	–	16 / 5
4	Пойменно-русловые	59 / 14	35 / 30	24 / 8
Прямолинейное, неразветвленное – 18%				
5	Относительно прямолинейное неразветвленное в пойменных берегах	18 / 4	–	18 / 6
6	Относительно прямолинейное неразветвленное вдоль коренного берега, в т.ч.	59 / 14	17 / 14	42 / 14
	Широкопойменное	6 / 1	6 / 5	–
	Адаптированное	53 / 13	11 / 9	42 / 14
Прямолинейное с разветвлениями второго порядка – 13%				
7	Относительно прямолинейное вдоль коренного берега с разветвлениями второго порядка, в т.ч.	53 / 13	13 / 11	40 / 13
	Широкопойменное	7 / 2	–	7 / 2
	Адаптированное	46 / 11	13 / 11	33 / 11
Извилистое (меандрирующее) – излучины – 26%				
8	Свободные излучины	65 / 15	33 / 28	32 / 11
9	Адаптированные излучины	9 / 2	4 / 3	5 / 2
10	Вынужденные излучины, в т.ч.	19 / 5	–	19 / 6
	Широкопойменные	4 / 1	–	4 / 1
	Адаптированные	15 / 4	–	15 / 5
11	Вписанные излучины	9 / 2	9 / 8	–
12	Обтекающие излучины	7 / 2	7 / 6	–
	Общий итог	**420**	**118**	**302**

Таблица А.3 – Распределение морфодинамических типов русла р. Мезени от устья р. Вашки до устья р. Пёзы

№	Тип русла	Протяженность, км / % от общей длины участка устье р.Вашки – устье р.Пёзы, 113,5 км
Разветвления – 54%		
1	Односторонние, в т.ч. Адаптированные	8 / 7 8 / 7
2	Параллельно-рукавные, в т.ч. Врезанные	53,5 / 47 53,5 / 47
Прямолинейное с разветвлениями второго порядка – 29%		
3	Относительно прямолинейное вдоль коренного берега с разветвлениями второго порядка, в т.ч. Адаптированное Врезанное	33 / 29 30 / 26 3 / 3
Извилистое (меандрирующее) – излучины – 17%		
4	Вынужденные, в т.ч. Адаптированные Врезанные	19 / 17 5 /4 14 / 12
	Общий итог	**113,5**

Таблица А.4 – Распределение морфодинамических типов русла р. Печоры от Кожвинского порога до устьевой области

№	Тип русла	Протяженность, км / % от общей длины участка			
		Нижнее течение, 670 км	Кожвинский порог – устье р.Усы, 108 км	Устье р.Усы – устье р.Цильмы, 332 км	Устье р.Цильмы – вершина устьевой области, 230 км
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Разветвления – 58%					
1	Одиночные, в т.ч.	55 / 8	–	24 / 7	31 / 13
	Широкопойменные	39 / 6	–	8 / 2	31 / 13
	Врезанные	16 / 2	–	16 / 5	–
2	Односторонние	9 / 1	–	9 / 3	–
3	Сопряженные, в т.ч.	89 / 13	49 / 45	–	40 / 17
	Широкопойменные	75 / 11	49 / 45	–	26 / 11
	Адаптированные	14 / 2	–	–	14 / 6
4	Разветвленно-извилистые, в т.ч.	61 / 9	–	61 / 18	–
	Широкопойменные	48 / 7	–	48 / 14	–
	Врезанные	13 / 2	–	13 / 4	–
5	Пойменно-русловые	68 / 10	9 / 8	41 / 12	18 / 8
6	Параллельно-рукавные, в т.ч.	94 / 14	–	57 / 17	37 / 16
	Широкопойменные	67 / 10	–	30 / 9	37 / 16
	Врезанные	27 / 4	–	27 / 8	–
7	Дельтовые, в т.ч.	12 / 2	7 / 6	5 / 2	–
	Широкопойменные	7 / 1	7 / 6	–	–
	Врезанные	5 / 1	–	5 / 2	–
Прямолинейное, неразветвленное – 21%					
8	Относительно прямолинейное в пойменных берегах, в т.ч.	54 / 8	8 / 7	–	46 / 20
	Широкопойменное	48 / 7	8 / 7	–	40 / 17
	Адаптированное	6 / 1	–	–	6 / 3
9	Относительно прямолинейное вдоль коренного берега, в т.ч.	87 / 13	24 / 22	22 / 7	41 / 18
	Широкопойменное	77 / 11	24 / 22	12 / 4	41 / 18
	Врезанное	10 / 1	–	10 / 3	–

Таблица А.4 – продолжение

1	2	3	4	5	6
Прямолинейное с разветвлениями второго порядка – 12%					
10	Относительно прямолинейное вдоль коренного берега с разветвлениями второго порядка, в т.ч.	83 / 12	–	83 / 25	–
	Широкопойменное	20 / 3	–	20 / 6	–
	Адаптированное	25 / 4	–	25 / 8	–
	Врезанное	38 / 6	–	38 / 11	–
Извилистое (меандрирующее) – излучины – 9%					
11	Свободные	11 / 2	11 / 10	–	–
12	Вписанные	9 / 1	–	–	9 / 4
13	Вынужденные, в т.ч.	8 / 1	–	–	8 / 3
	Адаптированные	8 / 1	–	–	8 / 3
14	Обтекающие, в т.ч.	30 / 4	–	30 / 9	–
	Широкопойменные	25 / 4	–	25 / 8	–
	Врезанные	5 / 1	–	5 / 2	–
	Общий итог	670	108	332	230

Приложение Б

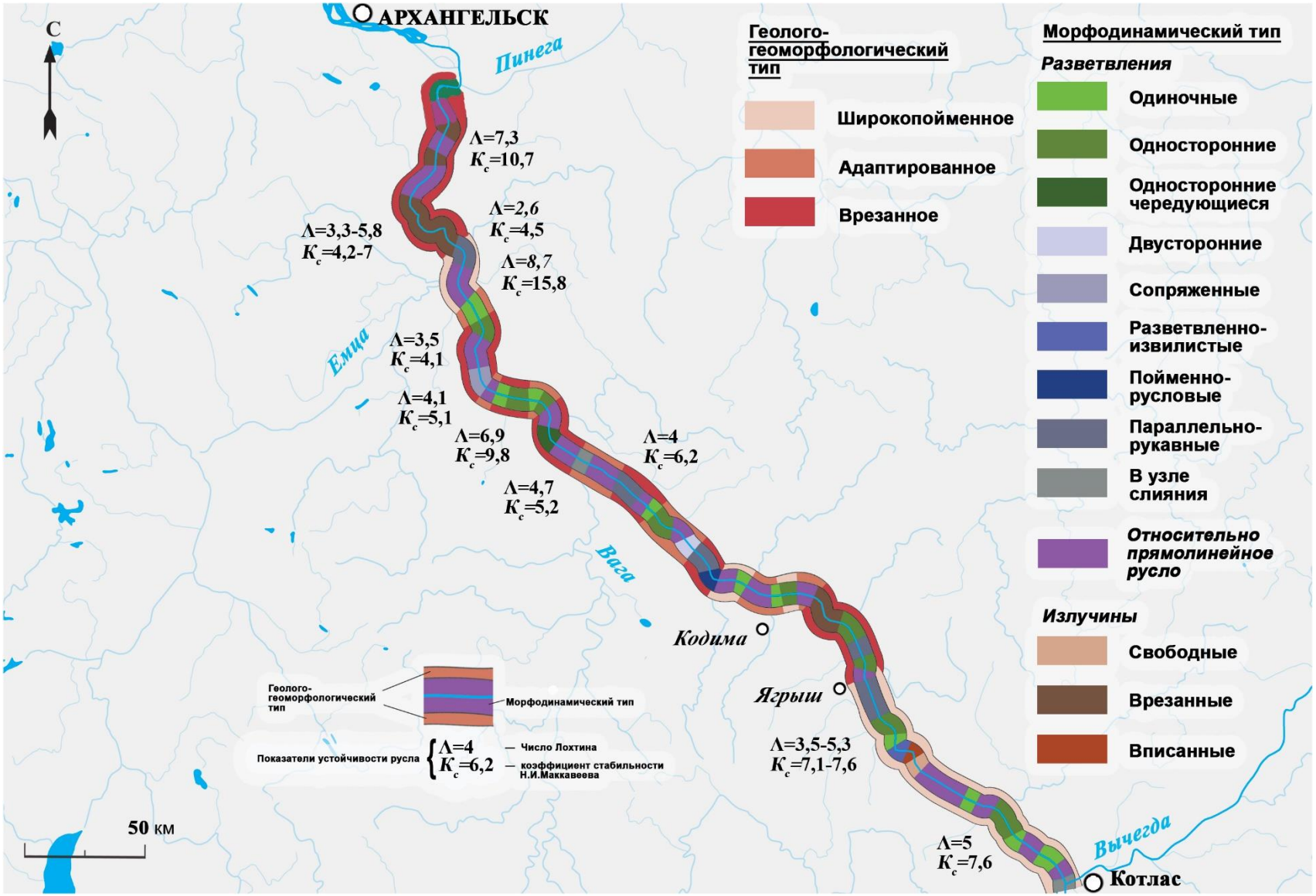


Рисунок Б.1 – Схема распространения морфодинамических типов русла Северной Двины от устья Вычегды до устья Пинеги

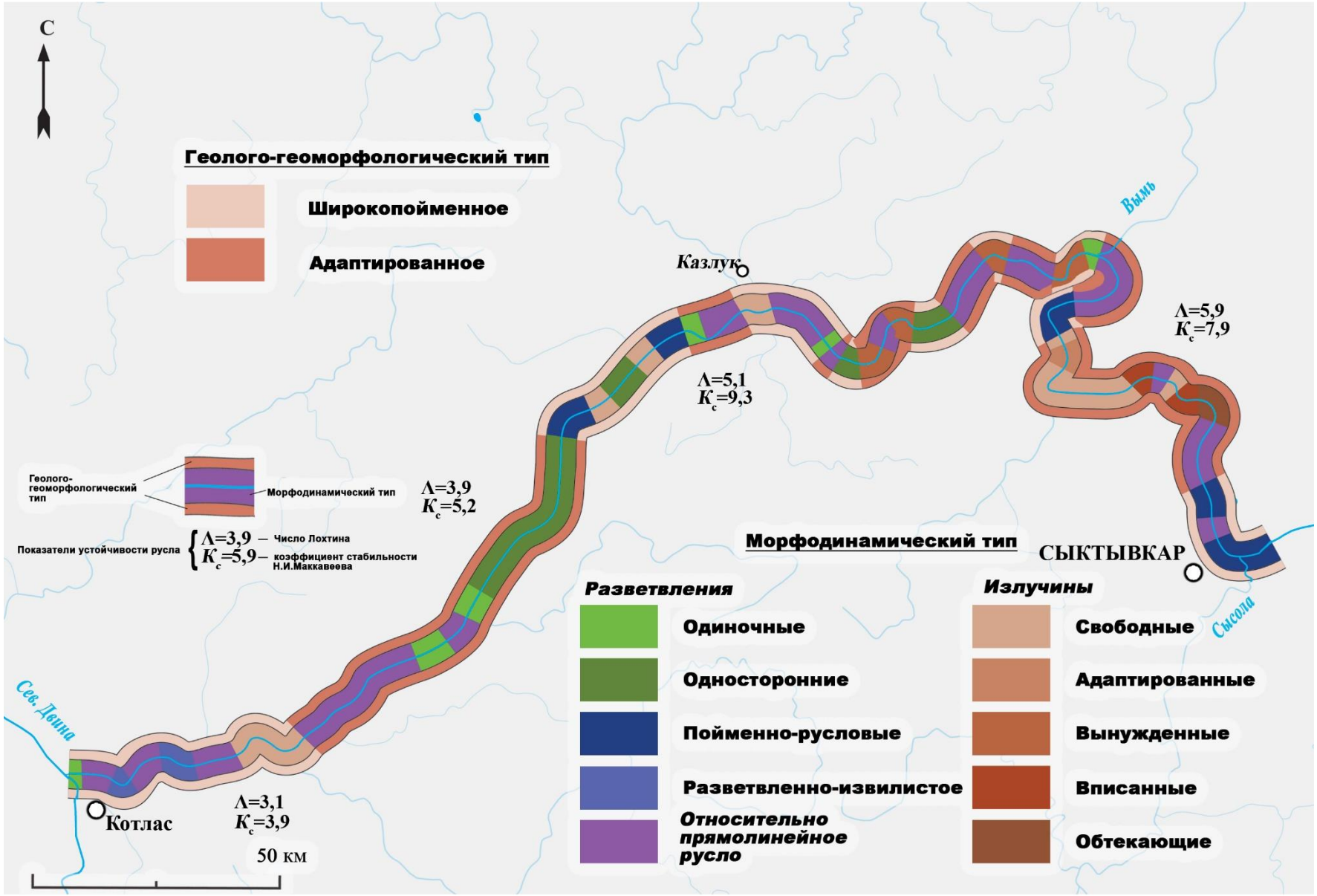


Рисунок Б.2 – Схема распространения морфодинамических типов русла Вычегды от устья Сысолы до устья

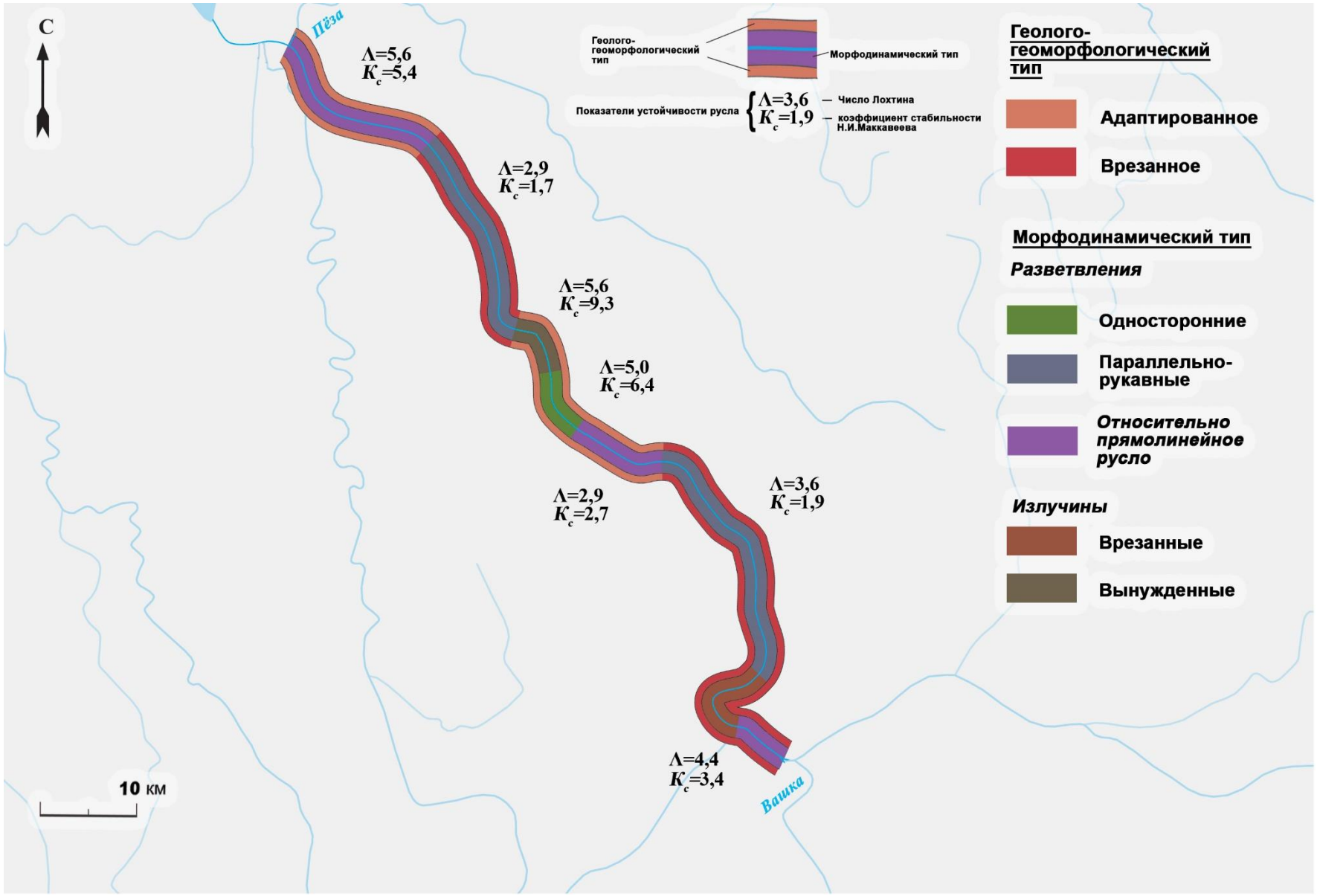


Рисунок Б.3 – Схема распространения морфодинамических типов русла Мезени от устья Вашки до устья Пёзы

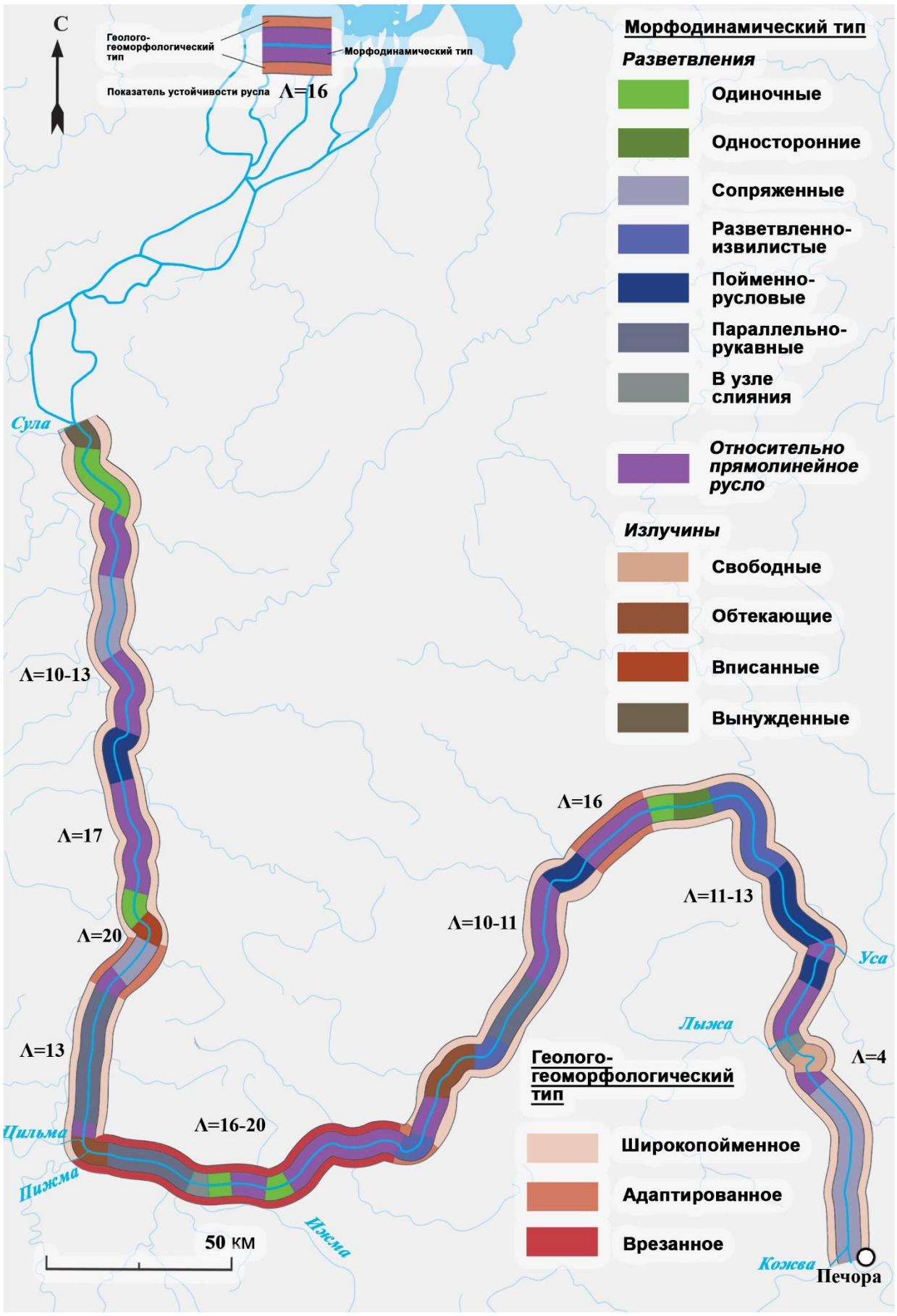


Рисунок Б.4 – Схема распространения морфодинамических типов русла Печоры от г. Печоры до устья Сулы

Приложение В

Таблица В.1 – Перекатные участки на реках Севера ЕТР

№	Участок	Км с/х	Протяженность l, км	Кол-во перекатов n	$\eta=n/l$, прк/км	Морфодинамический тип русла	Условия формирования	Λ
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Северная Двина								
1	Верх. Усть-Курский – Ниж. Марковский	605,5-596	10	5	0,5	Широкопойменное / Одностороннее многорукавное разветвление	Расширение русла, рассредоточение потока по рукавам разветвления	5,0
2	Туровецкий – Верх. Канзский	593-586	7	4	0,6	Широкопойменное / Относительно прямолинейное неразветвленное русло	Несовпадение направления руслового и пойменного потоков	5,0
3	IV Ракульский – Ниж. Ягрышский	503-477	26	13	0,5	Широкопойменное / Параллельно-рукавные разветвления	Расширение дна долины, перед сужением дна долины, перед изменением направления дна долины, наличие местного источника поступления наносов	4,6-3,5
4	Верх. Шоромский – Второй Верх. Тоемский	465,5-452,4	13	7	0,5	Врезанное / Параллельно-рукавные, односторонние разветвления	Перед изменением направление дна долины	–
5	Верх. Слудский – Ниж. Липовецкий	387-375,5	12	5	0,4	Врезанное / Параллельно-рукавные разветвления	Перед сужением дна долины	–
6	Нюма – Кургоменский	361,3-347,9	13	5	0,4	Адаптированное / Односторонние и одиночные разветвления	Перед сужением дна долины	–
7	Верх. Монастырский – Шипеловский	255-235	20	7	0,4	Врезанное / Относительно прямолинейное с разветвлениями второго порядка, сопряженные разветвления	Перед изменением направление дна долины	4,1-2,3
8	Первый Конецгорский – Ниж. Усть-Вагский	342,7-308,5	34	16	0,5	Врезанное, адаптированное / Пойменно-русловое разветвление, относительно прямолинейное с разветвлениями второго порядка, одиночное в узле слияния	Расширение дна долины, перед сужением дна долины, слияние с крупным притоком (р. Вага)	4,0-4,7
9	Первый Хаврогорский – Хоробрицкий	210-183,4	27	11	0,4	Широкопойменное / Относительно прямолинейное русло вдоль коренного берега с разветвлениями 2-го порядка, параллельно-рукавные разветвления	Расширение дна долины, впадение притока (р. Емца), изменение направления дна долины	2,6

Таблица В.1 – продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вычегда								
1	Верх. Дырносский – Сред. Слободской	412,2-394,1	18,1	9	0,5	Широкопойменное / Пойменно-русловое разветвление	В рукаве разветвления, перед изменением направления дна долины	5,9
2	Примостовой Слудский – Ниж. Слудский	364,6-358,7	5,9	4	0,7	Широкопойменное / Излучины (прорванная и пологие)	Перед изменением направления дна долины	5,9
3	Ниж. Оквадский – Ниж. Айкинский	286-266	20	6	0,3	Широкопойменное, адаптированное / Относительно прямолинейное с разветвлениями второго порядка, одиночные разветвления	Расширение дна долины, перед изменением направления дна долины	5,9
4	Вездинский – Ниж. Гамский	255-245	10	6	0,6	Широкопойменное, адаптированное / Односторонние разветвления, вынужденные излучины	Несовпадение направления руслового и пойменного потоков, перед изменением направления дна долины	5,9
5	Сред. Жераштский – Чернокурский	235-215	20	9	0,5	Широкопойменное / Вынужденные излучины, односторонние разветвления, относительно прямолинейное неразветвленное русло	Расширение дна долины, перед сужением дна долины, перед изменением направления дна долины	5,9
6	Ошлапье – Ниж. Княжинский	156-147	9	4	0,4	Широкопойменное / Пойменно-русловое разветвление	В рукаве разветвления	5,1
7	Верх. Шулегский – Бердышевский	115-101	14	7	0,5	Адаптированное / Односторонние и одиночные разветвления	Перед изменением направления дна долины	3,9
8	Верх. Рычковский – Новинский	71,5-65,1	6,4	4	0,6	Адаптированное / Относительно прямолинейное, неразветвленное (вдоль коренного берега)	Перед сужением дна долины, перед изменением направления дна долины	3,9
9	Заостровский – Ципушкинский	54,5-48,2	6,3	4	0,6	Широкопойменное / Излучины	Расширение дна долины, перед изменением направления дна долины	3,9
10	Верх. Коряжемский – Глубоковский	39,2-29,5	9,7	6	0,6	Широкопойменное / Относительно прямолинейное неразветвленное (вдоль коренного берега)	Несовпадение направления руслового и пойменного потоков, перед изменением направления дна долины	3,1
11	Сольвычегодский – Осиевский	21,2-12,7	8,5	4	0,5	Широкопойменное / Относительно прямолинейное неразветвленное, разветвленно-извилистое русло	Несовпадение направления руслового и пойменного потоков	3,1

Таблица В.1 – продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Мезень								
1	Ущельский – Мал. Нисогорская Курья	159,3-144	15,3	9	0,6	Адаптированное / Врезанная излучина	Изменение направления дна долины	4,4
2	Воздвиженский – Бугаевский	133,5-126,2	7,3	6	0,8	Врезанное / Параллельно-рукавные разветвления	Перевал потока от левого коренного берега к правому коренному	3,6
3	Защельский – Ниж. Кесломский	121,7-107,7	14	9	0,6	Врезанное, адаптированное / Параллельно-рукавные разветвления, относительно прямолинейное русло	Перед изменением направления дна долины, перевал потока от левого коренного к правому, затем к левому коренному берегу	2,9
4	Верх. Палугский – Азапольский	106,6-97,2	9,4	5	0,5	Адаптированное / Односторонние разветвления	Перед изменением направления дна долины, перевал потока от правого к левому коренному берегу	5,0
5	Мелегорский – Ниж. Целегорский	94,4-88,9	5,5	4	0,7	Адаптированное, врезанное / Вынужденная излучина, параллельно-рукавные разветвления	Перед изменением направления дна долины, перевал потока от правого коренного берега к левому коренному	5,6
6	Кижменский – Погорельский	88-79,8	8,2	5	0,6	Врезанное / Параллельно-рукавные разветвления	Перевал потока от правого к левому, затем к правому коренному берегу	2,9
7	Кашин – Пустынский	73,5-68,3	5,2	4	0,8	Врезанное / Параллельно-рукавные разветвления	В рукаве разветвления, перед изменением направления дна долины	2,9
8	Лиственичный – Забор	61,2-45,7	15,5	8	0,5	Врезанное / Относительно прямолинейное русло вдоль коренного берега с разветвлениями 2-го порядка	Перед изменением направления дна долины, перед впадением крупного притока (р. Пёза)	5,6

Таблица В.1 – продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Печора								
1	Кожвинский – Сотчемкурьинский	872-806	66	21	0,3	Широкопойменное / Сопряженные разветвления	В рукавах разветвлений	4,0
2	Мачинский – Ниж. Лыжинский	797-784	13	4	0,3	Широкопойменное / Разветвление в узле слияния, относительно прямолинейное с разветвлениями 2-го порядка	Впадение притока, изменение направление дна долины	4,0
3	Князьшорский – Усинский	779-758,2	20,8	7	0,3	Широкопойменное / Относительно прямолинейное неразветвленное русло, пойменно-русловое разветвление	Рассредоточение потока по рукавам разветвления, перед впадением крупного притока, перед изменением направления дна долины	4,0
4	Воргашорский – Ниж. Праскаканский	711-679,5	31,5	7	0,2	Широкопойменное / Разветвленно-извилистое, односторонние разветвления	Расширение русла и дна долины, рассредоточение потока по рукавам разветвления, изменение направления дна долины, впадение притока	12,0
5	Кыкашорский – Базырский	608,2-585,5	22,7	7	0,3	Широкопойменное / Параллельно-рукавные разветвления	Перед изменением направления дна долины, рассредоточение по рукавам разветвления	10,5
6	Верх. Сосновский – Гаревский	442-434,3	7,7	4	0,5	Врезанное / Параллельно-рукавные разветвления	В рукаве разветвления	18,0
7	Мызовский – Ниж. Еловский	391-377,7	13,3	4	0,3	Широкопойменное / Параллельно-рукавные разветвления	В рукаве разветвления	13,0