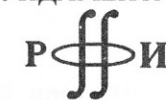


**Р.С.Чалов, А.М.Алабян, В.В.Иванов,
Р.В.Лодина, А.В.Панин**

Морфодинамика русел равнинных рек



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. М.В.ЛОМОНОСОВА
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



**Р.С.Чалов, А.М.Алабян, В.В.Иванов,
Р.В.Лодина, А.В.Панин**

Морфодинамика русел равнинных рек

Ответственный редактор
профессор *Р.С. Чалов*

Москва
ГЕОС
1998

УДК 551.4
ББК 26.222.5
М 80

Чалов Р.С., Алабян А.М., Иванов В.В., Лодина Р.В., Панин А.В., Морфодинамика русел равнинных рек. Под ред. проф. Р.С.Чалова – М.: изд-во МГУ. 1998. -288 с.
JSBN 5-89118-044-8

В монографии обосновывается морфодинамическая классификация речных русел. Рассматриваются особенности динамики потока и русловые деформации в руслах разного типа, выявляются факторы развития меандрирующих (извилистых) и разветвленных на рукава русел, определены условия формирования относительно прямолинейных неразветвленных русел при неустойчивости прямолинейного движения речного потока. На основе гидролого-морфологического анализа устанавливаются критерии развития русел рек разных типов. Предлагаются методы прогнозов русловых деформаций и излагаются принципы регулирования речных русел. Дается анализ географического распространения русел разных типов на реках Северной Евразии (в границах бывшего СССР).

Предназначена для научных работников, преподавателей вузов и аспирантов, занимающихся проблемами гидрологии, геоморфологии и русловых процессов.

Работа выполнена и опубликована при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РАН (проекты № 95-05-14006 и № 97-05-78164).

Рецензенты:

доктор географических наук, профессор Н.Б.Барышников
кандидат географических наук К.М.Беркович

ББК 26.222.5
М 80
ISBN 5-89118-044-8

© Коллектив авторов. 1998
© МГУ, 1998
© ГЕОС, 1998

Введение

Становление учения о русловых процессах как отрасли гидрологии произошло сравнительно недавно – в 50-ые годы XX в., хотя его зарождение относится к концу XIX столетия. К настоящему времени выполнен большой объем натурных исследований речных русел (главным образом, в Московском государственном университете и Государственном гидрологическом институте), накоплен обширный материал в производственных и проектных организациях, связанных с использованием водных ресурсов, проектированием гидротехнических сооружений и водохозяйственных мероприятий на реках. Предложен ряд классификационных схем, отличающихся по принципам построения и заложенным в них признакам. Наибольшую известность и распространение получили схемы ГГИ и МГУ. Однако первая не является достаточно полной и включает в себя лишь свободные (широкопойменные) русла, вторая – недостаточно обоснована критериально и гидроморфологическими зависимостями. Вместе с тем большой объем натурных исследований позволил разработать региональные схемы развития русловых деформаций, широко применить географический подход к изучению русловых процессов, разработать картографический метод исследований.

За рубежом наиболее крупные исследования морфологии и динамики речных русел связаны с именами Р.Кеннеди, Г.Лейси, Л.Леополда, М.Волмана, Е.Лейна, С.Шумма и др. Предложенные ими схемы и модели в целом соответствуют разработанным в России. Однако при достаточной глубине проработок физики явлений и их количественных характеристик, они опираются на сравнительно ограниченный объем исходной информации, что определяется однообразием природных условий формирования русел, отсутствием целого класса больших и крупнейших рек и т.д. Многие работы являются узко региональными: таковы, например, монографии З.Бабинского по

Висле, немецких и китайских ученых, которые содержат не только характеристику русловых процессов на конкретных реках, но и обстоятельный гидролого-морфологический и морфодинамический анализ русел в условиях многолетнего их регулирования.

Настоящее исследование опирается на 40-летний (1957–1996 г.г.) опыт изучения русловых процессов на равнинных реках России, которые были поставлены и в течение многих лет возглавлялись профессором Н.И.Маккавеевым. Именно им было обосновано и получило права гражданства географическое направление в русловедении, ставшее методологической основой проведенных исследований. Авторы книги, представляющие эту школу в изучении русловых процессов и являющиеся учениками Н.И.Маккавеева, участвовали и проводили крупномасштабные исследования на Лене и Вилюе, Енисее и Оби, Северной Двине и Вычегде, Алдане и Витиме, Яне и Индигирке, Днестре и Немане, Оке и Волге, Амуре, Амударье, Белой, Киренге – всего около 30 средних и крупных рек, а также на малых реках отдельных регионов России и сопредельных стран (Закавказья, Алтай, Европейской части). Результаты исследований в основном опубликованы в виде большого количества статей, в которых дан анализ русловых процессов на конкретных реках и на реках отдельных регионов. Предложены классификационные схемы, составлены и изданы карты "Русловые процессы на реках СССР". Масштаб 1:4000000 (М., ГУГК, 1990 г.) и "Русловые процессы на реках Алтайского края", Масштаб 1:1000000 (М., 1991), опубликована монография "Русловой режим рек Северной Евразии" (М., 1994), в которой обобщен не только огромный собственный фактический материал по морфологии и динамике русел рек бывшего СССР, но и имеющаяся по этому вопросу литература.

Накопленный фактический материал по морфологии и динамике русел рек Северной Евразии позволил разработать единую морфодинамическую классификацию речных русел, предложить критерии существования и развития прямолинейных неразветвленных, меандрирующих и разветвленных на рукава русел в свободных (широкопойменных) и врезанных условиях, определить закономерности формирования руслообразующих наносов, влияния их состава и крупности на развитие типов русел, интенсивность русловых деформаций, выявить условия и механизм формирования прямолинейных неразветвленных русел в условиях неустойчивости прямолинейного

движения потока, показать роль величины стока речных наносов в трансформации прямолинейного русла в меандрирующее или разветвленное, установить стадии развития различных форм и комплексов форм речных русел в зависимости от их устойчивости, водоносности рек, изменчивости стока, условий прохождения руслоформирующих расходов воды, геолого-геоморфологических и других факторов, предложить математические модели формирования различных типов русел.

Наряду с этим для различных морфодинамических типов русел установлены гидролого-морфологические характеристики в разных стадиях развития их форм, а также соотношение последних с особенностями динамики потока, предложены принципиальные схемы их деформаций. Предложены модели прогноза и расчета русловых деформаций для русел каждого морфодинамического типа, формулируются основные принципы их регулирования при различных видах использования водных ресурсов рек.

Конечным результатом исследований явилось выявление географических закономерностей распространения морфодинамических типов речных русел, пространственная характеристика их устойчивости, интенсивности деформаций и, наконец, определение типов русловых режимов, позволившие, с одной стороны, разработать районирование территории Северной Евразии по этому показателю, а, с другой, наметить основы создания региональных схем регулирования русел.

Авторами разделов монографии являются сотрудники научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов, кафедр гидрологии суши, геоморфологии и палеогеографии Московского государственного университета. Введение написано профессором Р.С.Чаловым, осуществлявшим общее руководство работой, глава 1 – кандидатом географических наук В.В.Ивановым и Р.С.Чаловым (разделы 1.1 и 1.2), Р.С.Чаловым (1.3), глава 2 – кандидатом географических наук А.М.Алабяном, глава 3 – А.М.Алабяном и В.В.Ивановым (3.1), кандидатом географических наук Р.В.Лодиной (3.2) и Р.С.Чаловым (3.3), глава 4 – В.В.Ивановым и Р.С.Чаловым, глава 5 – кандидатом географических наук Б.В.Матвеевым и Р.С.Чаловым (5.1; 5.3; 5.4;), А.С.Завадским, Б.В.Матвеевым и Р.С.Чаловым (5.6) и Б.В.Матвеевым (5.2; 5.5; 5.7), глава 6 – А.М.Алабяном и Р.С.Чаловым (6.1), А.М.Алабяном (6.2; 6.3; 6.5) и Р.С.Чаловым (6.4; 6.6), глава 7 – кандидатом географических наук

А.В.Паниным и Р.С.Чаловым (7.1; 7.5) и А.В.Паниным (7.2; 7.3; 7.4), глава 8 – Р.С.Чаловым (8.1; 8.2; 8.4) и Б.В.Матвеевым (8.3).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект N 95-05-14006).

Глава 1

Типизация речных русел

1.1. История исследований и развитие представлений о морфодинамике речных русел

Учение о русловых процессах (русловедение), как и любая другая наука, прошло несколько этапов своего развития: 1) эпизодического накопления эмпирических сведений о руслах рек и применения их для практической деятельности; 2) систематических наблюдений за изменениями речных русел и разработки первых теоретических представлений о русловых процессах; 3) развития нескольких направлений изучения речных русел; 4) создания общей теории русловых процессов и становления русловедения как самостоятельной отрасли знаний.

Исторически сложилось, что одной из первых областей применения сведений о русловых процессах стала мелиорация. Устройство обводнительных каналов в Древнем Египте и Азии потребовали определения наиболее выгодных профилей каналов и оптимального расположения их головных сооружений. Остатки древних гидротехнических систем показывают, что строители тех времен правильно находили место для возведения головных сооружений – в вершинах излучин рек, со стороны вогнутого берега, что обеспечивало наименьшее поступление наносов в каналы при максимальном поступлении воды. Кроме того, данные о руслах рек накапливались и при градостроительстве, возведении фортификационных сооружений. Так, в Древнем Киеве в начале XI века возле крепостных сооружений создавались обводняющие рвы и производились работы по берегоукреплению. Практически повсеместно освоение рек было связано с их использованием как транспортных магистралей. В исторических документах России было зафиксировано, что еще в XIII веке проведено искусственное спрямление излучин р.Сухоны путем строительства канала длиной в 2 км. Регулирование речных русел в целях су-

доходства впервые было осуществлено при Петре I в ходе строительства Вышневолоцкой судоходной системы. Тогда же адмиралом Крюсом выполнена съемка русла Дона для обеспечения походов Петра I на Азов. Почти в это же время был прорыт целый ряд каналов, в том числе известный Ладожский. Во многих русских городах еще ранее существовал лоцманский промысел, способствующий проводке купеческих караванов по наиболее сложным участкам рек.

Следующим этапом развития учения о русловых процессах стал период систематических наблюдений и исследований русел рек. Этот этап совпадает с началом развития водного транспорта в прошлом веке, превращения рек во внутренние водные пути сообщения. В это время в России создаются специализированные "описные" партии. Материалы их работ легли в основу очерков и картографических атласов для многих судоходных рек. Аналогичные исследования стали проводиться и за рубежом, поскольку для обеспечения безопасного плавания требовалось обоснование проложения трассы фарватера.

С началом бурного развития водного транспорта в конце XIX века – начале XX века связано заложение основ современной теории русловых процессов. В трудах инженеров-путейцев, к которым относятся работы В.М.Лохтина, Н.С.Лелявского, Л.Фаржа, Г.Жирардона, Н.Н.Жуковского, В.Е.Тимонова, В.М.Родевича и др., были подведены итоги фундаментальных исследований гидрологии и геоморфологии рек, описаны закономерности происходящих на них процессов. Немалую роль в становлении теории русловых процессов сыграли съезды русских деятелей по водным путям и ряд международных конгрессов по судоходству. На них были приняты решения о стандартизации данных по рекам, а в дискуссиях о способах улучшения условий судоходства вырабатывались первые научные представления о русловых процессах.

Большое значение для становления русловых процессов как науки сыграл инженер-путеец В.М.Лохтин, обладающий крупным опытом в улучшении условий судоходства на реках и прекрасно осведомленный о процессах, происходящих в них. Именно ему принадлежит мысль о зависимости руслоформирующей деятельности рек от природных условий. В 1897 г. он опубликовал первую крупную научную работу "О механизме речного русла", в которой излагались основные представления о формировании русел рек. В.М.Лохтин считал, что

для познания русловых процессов необходимо изучать их независимые факторы – сток воды и наносов, "скат местности", слагающие ее породы. Он же впервые ввел понятие устойчивости русел и предложил соответствующий показатель.

Среди зарубежных исследователей конца XIX – начала XX столетия необходимо отметить работы Г. Жирардона, в которых предложена первая классификация речных перекатов, и Л.Фарга, установившего ряд закономерностей формирования излучин рек, расположения в их пределах плесов и перекатов.

В эти же годы выправлением многих рек занимался Н.С.Лелявский. В докладе III съезду русских деятелей по водным путям в 1896 г. он писал: "форма русла находится в тесной взаимной связи с расположением и скоростями различных струй, и поэтому для полного изучения движения воды в реках с подводным дном необходимо, параллельно с изучением речных струй, делать исследования перемен в конфигурации русла". По существу в трудах В.М.Лохтина, Н.С.Лелявского и других был впервые четко сформулирован принцип взаимодействия потока и русла и высказаны мысли о взаимосвязи выбора методов выправления (регулирования) русел с особенностями условий руслоформирования. Данный подход тогда же был принят на вооружение русскими гидротехниками и не утратил своей актуальности до настоящего времени. Суть его сводится к тому, что воздействию на речное русло и проводимые мероприятия по его регулированию должны основываться на закономерностях естественных природных процессов руслоформирования, обуславливая тем самым их положительный эффект, что создает предпосылки сохранения реки как природного объекта и обеспечивает экологическую безопасность этих мероприятий. Однако гидродинамика того времени не была способна выйти за пределы качественных обобщений в отношении механизма русловых течений и объяснения русловых деформаций, хотя исследования Н.Е.Жуковского, относящиеся к началу XX века, существенно обогатили познания с структуре потоков. Только в 30-е годы, когда был опубликован ряд работ по моделированию и натурным исследованиям речных потоков А.И.Лосиевского, А.Я.Миловича, М.В.Потапова, Н.Ф.Данелии, А.А.Большакова и др., сложный пространственный характер течения воды был достаточно хорошо исследован. В частности был решен ряд задач, связанных с особенностями скоростного поля потока (А.Я.Милович), разработан прак-

тический подход к решению задачи двухмерного движения потока (Н.М.Бернадский). В последующем, используя полученные данные и личные разработки и исследования, М.А.Великанов создал теоретические основы гидродинамического направления в теории русловых процессов. Ему же принадлежит и само понятие "русловые процессы", которое он предложил в 1946–1948 гг. Помимо М.А.Великанова, большой вклад в разработку теоретических основ динамики русловых потоков был сделан В.Н.Гончаровым, В.М.Маккавеевым, И.И.Леви, К.В.Гришаниным и др. В конечном счете это направление в учении о русловых процессах превратилось в самостоятельную научную дисциплину, в которой, наряду с вопросами динамики потоков рассматривались методы расчета движения наносов и русловых деформаций (И.И.Леви, Г.И.Шамов, В.Н.Гончаров, В.Г.Глушков, М.А.Великанов, К.В.Гришанин).

Большое значение для развития гидродинамического направления в учении о русловых процессах имели работы российских гидротехников. Их исследования были посвящены в большей мере гидравлике открытых потоков, связанных с сооружением ГЭС. Так, Н.Н.Павловский и Б.А.Бахметьев создали методы расчета неравномерного движения в каналах и естественных руслах, а С.А.Христанович и И.В.Егиазаров распространили эти расчеты на неустановившееся движение. Вместе с тем крупное гидротехническое строительство потребовало также обоснования прогнозов возможных русловых деформаций в результате регулирования стока. Одной из первых работ по русловому режиму рек с зарегулированным стоком была статья Б.В.Полякова, опубликованная в 1933 г. В последующем в рамках решения этих задач внимание исследователей сосредотачивается на вопросах, связанных с размывом русел в нижних бьефах гидроузлов (работы К.И.Россинского, И.Л.Розовского, Б.Г.Федорова, В.С. Лапшенкова, А.Б.Векслера и В.М.Доненберга).

Однако гидродинамическое направление, несмотря на свое явное преобладание в учении о русловых процессах в 30–50-е годы, не смогло полностью его поглотить. Наряду с ним продолжались исследования морфологии речных русел и их изменений под действием водных потоков в многолетнем и сезонном планах, с учетом специфики гидрологического режима рек и различий в стоке наносов. Эти исследования, которые составили морфодинамическое направление, продолжались в связи с решением вопросов выправления речных ру-

сел для улучшения условий судоходства (работы А.И.Лосиевского, Н.И.Маккавеева, Н.А.Ржаницына и др.), разработкой прогнозов изменений морфологии русел рек при регулировании их стока водохранилищами ГЭС (Н.И.Маккавеев, А.В.Серебряков), учета их при различных видах водохозяйственного использования, строительства инженерных объектов на берегах и переходов через реки (И.В.Попов, Н.Е.Кондратьев).

С конца 40-ых и в 50-ые годы происходит быстрое сближение гидродинамического и морфодинамического направлений. Одним из первых исследователей, высказавших мысль о необходимости этого, был М.А.Великанов. Он указывал, что синтез двух направлений имеет первостепенное значение для создания учения о русловых процессах. Огромную роль в этом процессе сыграли обобщающие труды Н.И.Маккавеева, Н.Е.Кондратьева, И.В.Попова, Н.А.Ржаницына, К.В.Гришанина, И.Ф.Карасева. Особое место в теории русловых процессов занимает опубликованная в 1955 г. книга Н.И.Маккавеева "Русло реки и эрозия в ее бассейне", где впервые русловые процессы рассматривались как часть единой системы эрозионно-аккумулятивных процессов. Н.И.Маккавеев показал, что руслоформирующая деятельность рек имеет географические закономерности и зависит от всей совокупности эрозионных процессов в пределах своих бассейнов. Ему же принадлежит детализация и конкретизация представлений о строении русел равнинных рек, разработка принципиальных схем развития меандрирующих и разветвленных русел, формирования перекатов и т.д. При этом морфодинамика русел рассматривалась им как результат взаимодействия потока и русла, с одной стороны, и стока наносов – с другой. Такой подход привел впоследствии (Маккавеев, Чалов, 1986) к определению русловых процессов как совокупности явлений, обусловленных взаимодействием потока с грунтами ложа реки, эрозией, транспортом и аккумуляцией наносов, определяющих размывы и намывы берегов и дна рек, образование различных форм русла и форм руслового рельефа, режим их сезонных, многолетних и вековых изменений. Эта формулировка, с одной стороны, отражает синтез морфодинамического и гидродинамического направлений, а с другой – акцентирует внимание на самом русле реки как объекте исследований, подчеркивая приоритетность морфодинамики в учении о русловых процессах. Отсюда, естественным стало само определение отрасли знаний, занимающейся

изучением речных русел, как русловедения, развивающегося на стыке гидрологии, геоморфологии и гидродинамики.

С середины 50-х годов изучение русловых процессов проводилось в Государственном гидрологическом институте, где новое морфодинамическое направление получило название "гидроморфологической теории русловых процессов". В разработку этой теории большой вклад был внесен Н.Е.Кондратьевым, И.В.Поповым, Б.Ф.Снищенко, В.И.Антроповским, которые, показав многообразие морфологических проявлений русловых процессов, установили количественные связи между типами русла и факторами русловых процессов. При этом в ГГИ разрабатывались многие аспекты теории русловых процессов. Так, Н.С.Знаменская предложила новые методы расчета деформаций русла, исходя из ведущей роли грядового движения наносов в формировании русел. Под руководством А.В.Караушева впервые были проведены географические исследования речных наносов и их стока. И.Ф.Карасевым были рассмотрены вопросы применения теории русловых процессов для анализа закономерностей формирования и расчета искусственных русел.

За рубежом в конце 50-х годов получили широкую известность работы Л. Леополда и М. Волмана, Е. Лейна, посвященные вопросам формирования различных типов русел и поиску количественных оценок их разделения. Дальнейшее развитие исследований в этом направлении проводили Р. Колландер, Р. Гриффитс, С. Шумм и ряд других, рассмотревших проблему формирования русел рек различных типов с позиции их устойчивости. Позднее, с середины 70-х годов, зарубежные исследователи уделяют большое внимание математическим моделям формирования русел рек (Г. Паркер, Ф. Энгелунд, И. Фредсо), поиску гидролого-морфометрических связей для отдельных типов русел и их разновидностей (З. Бегин, Х. Чанг, Т. Накагава, П. Аккерс).

1.2. Принципы классификаций речных русел

В проблеме классификации речных русел намечается несколько основных подходов, в основу которых кладутся разные признаки: 1) устойчивость русла, т.е. интенсивность развития русловых деформаций независимо от морфологического типа русла и вида его перестроений; 2) развитость и формы грядового аккумулятивного

рельефа русла; 3) морфология перекатов как наиболее крупных форм рельефа русла, связанных с грядовым перемещением наносов, развитие которых определяется гидравлическими характеристиками потока, особенностями формирования наносов и формой самого русла; 4) кинематика потока, уклон русла и формы транспорта наносов; 5) морфология самого русла и соответствующий вид горизонтальных русловых деформаций (морфодинамический подход).

Классификации первой группы (по устойчивости русла) основываются на различных показателях устойчивости, определенные интервалы значений которых соответствуют типам русла, отличающимся по интенсивности перестроений. Они, как правило, самостоятельного значения не имеют, так как не могут применяться без классификации русла по виду русловых деформаций. Впервые сравнительная устойчивость русел рек была охарактеризована коэффициентом устойчивости, предложенным В.М.Лохтиным, представляющим частное от деления средних линейных размеров частиц наносов на величину среднего уклона. Возможность численного определения устойчивости русел посредством числа Лохтина позволила создать ряд классификаций. Первая из них была предложена М.И.Львовичем (30-е годы), который, используя значения числа Лохтина, выделил устойчивые и неустойчивые реки. Впоследствии число Лохтина использовали для этих же целей М.А.Великанов (1948), Н.И.Маккаев (1955), Р.С.Чалов (1979) и другие. Некоторые исследователи предлагали собственный коэффициент, выражающий устойчивость русла, и в ряде случаев давали его численные значения для разных типов русел. Таковы классификации М.А.Великанова (1948), З.И.Гринберг (1950), С.Т.Алтунина (1962), А.В.Караушева (1969), А.Д.Курдюмова (1977) и ряда других.

Существенным недостатком этих классификаций является то, что не для всех типов русел были получены численные значения коэффициентов, выражающих их устойчивость. Достаточно часто встречаются и противоречащие друг другу оценки устойчивости русел, особенно прямолинейных. Так, в классификации З.И.Гринберг (1950) меандрирующие русла отнесены к устойчивым, тогда как в других классификациях подчеркивается, что устойчивыми являются меандрирующие русла (Алтунин, 1962; Караушев, 1969).

По степени развитости грядовых аккумулятивных форм руслового рельефа (классификации второй группы) наиболее общим является

выделение на реках перекатных и плесовых участков, образование которых связано с изменением форм транспорта руслообразующих наносов, — преимущественно влекомой или взвешенной — во время прохождения руслоформирующих расходов воды. Отдельные перекаты в пределах перекатных участков непрерывно перемещаются, но в общем границы участков по длине реки почти не изменяются, так как вверху участка на смену спустившимся вниз образуются новые перекаты, а те из перекатов, которые сместились за нижнюю границу предела устойчивого плесового участка, наоборот, размываются. На реках со слабо устойчивым руслом разделение его на плесовые и перекатные участки выражены плохо.

В настоящее время существует большое число классификационных схем для перекатов, в которых типы перекатов (или крупных грядовых форм, соизмеримых по ширине и высоте с шириной и глубиной самого русла) выделяются по различным признакам (размерам, морфологии, генезису, скорости перемещения вдоль русла, режиму переформирования, сезонным изменениям глубины и т.д.). В известной классификации ГГИ (Кондратьев и др., 1982) выделение побочного и ленточногрядового типов русел ("типов руслового процесса") также по существу представляет собой типологию по преобладающей форме грядовых образований, составляющих в совокупности перекаты. В основе некоторых классификаций (Н.И.Маккаева в книге "Проектирование судовых ходов на свободных реках", 1964, Р.С.Чалова, 1979) лежит связь перекатов с формами самого русла (излучинами, рукавами, прямолинейными участками), поскольку главные особенности их режима определяются гидравлическими характеристиками потока и его структурой на излучинах, в узлах разветвления и слияния рукавов и т.д.

В четвертой группе классификаций за основу принимается то обстоятельство, что продольный уклон реки является важнейшей энергетической характеристикой водного потока, и поэтому он оказывает влияние на морфологию и динамику речных русел не только через их устойчивость и величину руслоформирующего расхода, но и благодаря тому, что им определяется степень кинетичности потока, а через нее — форма транспорта наносов. Гидравлический режим рек, изменяясь в широких пределах в зависимости от изменения продольного уклона, обуславливает большое разнообразие условий развития русловых форм и транспорта наносов, т.е. специфику взаимо-

действия потока и русла. Поскольку от истока реки до ее устья происходит закономерное изменение уклонов, в этом же направлении изменяются главные особенности руслоформирующей деятельности рек.

В равнинных областях, где разница в отметках истока и устья главной реки бассейна не превышает первых сотен метров при протяженности реки в сотни и тысячи километров, изменение уклонов по длине невелико, и водный поток на всем протяжении рек в большинстве случаев сохраняет спокойный режим. В этих условиях изменения руслоформирующей деятельности рек от верховьев до устьев определяются, главным образом, транспортирующей способностью потока, которая, в свою очередь, зависит от его водоносности, относительной ролью других факторов (развития водной растительности, шероховатости русла и т.д.), а также самой водоносностью потока. Изменения последней создают предпосылки для образования тех или иных русловых форм, поскольку ее величина определяет, при прочих равных условиях, ширину и глубину русла, его кривизну и другие морфометрические параметры. Вместе с тем, находясь в рамках спокойного режима течения, но в условиях закономерно уменьшающейся крутизны продольного профиля, сначала, в верховьях, достаточно быстрой и заметной, а затем очень постепенной, потоки характеризуются неодинаковой степенью кинетичности. Поэтому параметр кинетичности (число Фруда) входит во многие гидролого-геоморфологические зависимости, отражающие условия развития русловых форм.

Наиболее ярко изменение руслоформирующей деятельности рек сверху вниз по течению проявляется у рек, берущих свое начало в горах. Закономерное уменьшение их уклонов с образованием вогнутой формы продольного профиля является при этом не столько следствием изменения кинетической энергии по длине потока, сколько отражением геолого-геоморфологического фактора. Большие уклоны рек в горах, на несколько порядков превышающие уклоны равнинных рек, и высокая кинетичность потоков обуславливают специфику их руслового режима, морфологии и динамики речных русел, механизма и форм транспорта наносов. В.М.Родевич (1932), первым обративший внимание на различия горных и равнинных рек, проявляющиеся в особенностях гидрологического режима, уклонах и скоростях течения, указывал на то, что эти различия должны сказываться на руслоформирующей деятельности рек. Впоследствии

Н.И.Маккавеев (1955) и С.Т.Алтунин (1962) обосновали необходимость выделения трех классов речных русел – горных, полугорных и равнинных, основываясь на различной степени кинетичности водных потоков, неодинаковой их морфологии и принципиальном отличии руслоформирующей деятельности водных потоков в горах и на равнинах. Большой диапазон уклонов горных рек позволил разделить их на три основных класса (Чалов, 1968): порожисто-водопадные, с неразвитым и развитым аллювиальными формами. К аналогичному выводу в отношении классификации русел горных рек пришел А.Н.Крошкин (Талмаза, Крошкин, 1968), выделивший высокогорный, среднегорный (безгрядовый), горно-предгорный (грядовый) и предгорно-равнинный типы русел.

Последняя пятая группа объединяет морфодинамические классификации, в которых увязаны морфология русла и характер русловых деформаций. Эта группа классификаций наиболее многочислена. К ней относятся схемы, предложенные К.И.Россинским и И.А.Кузьминым (1947), Н.И.Маккавеевым (1949), Л. Леополдом и М. Волманом (Leopold, Wolman, 1957), О.В.Андреевым и Н.А.Ярославцевым (1958), И.В.Поповым (1965; Кондратьев и др., 1982); К.В.Гришаниным (1972), Р.С.Чаловым (1979), Н.А.Ржаницыным (1985), и многими другими. К.И.Россинским и И.А.Кузьминым (1947) были выделены три типа деформаций русел рек (периодическое расширение, меандрирование и блуждание) и соответствующие им типы русел: прямолинейное, извилистое и разветвленное на рукава, причем процесс периодического расширения русла присущ прямолинейным (слабоизогнутым) руслам.

Причины развития каждого вида деформаций К.И.Россинский и И.А.Кузьмин видели в определенном сочетании геолого-геоморфологических факторов и гидравлических характеристик потока. Так, по их мнению, развитию процесса периодического расширения русла способствует слабая податливость размыву берегов в сочетании с неравномерностью смещения скоплений донных наносов, вследствие чего этот процесс наблюдается на реках с развитыми и смещающимися побочными. Такой подход имел основание для критики, так как описываемый процесс в большей степени дает представление о динамике побочной и их местных переформирований, чем о развитии форм русла (Петровский, Сахарова, 1958; Чалов, 1979). Однако важно то, что К.И.Россинский и И.А.Кузьмин были первыми, кто рас-

сматривал все три главные типа русел рек как самостоятельные русловые образования, характеризующиеся специфическими закономерностями формирования и развития.

Довольно близкой является классификация речных русел, предложенная О.В.Андреевым и Н.А.Ярославцевым (1958). Изучая характер развития горизонтальных деформаций равнинных рек, они выделили три основных типа русел – разветвленные на рукава, меандрирующие и немеандрирующие. Под последними авторы понимали "... реки или участки рек, характеризующиеся побочной формой движения наносных скоплений внутри слабоизменяющейся во времени и плане русловой зоны" (с. 352). Ими было отмечено, что тип русла и интенсивность русловых процессов каждого конкретного водотока зависит от водности последнего, уклона (общего ската речной долины), характера грунтов и ряда вторичных факторов, особенно наличия растительности. Для немеандрирующих рек, по их мнению, характерна высокая транспортирующая способность потока, в отличие от других типов русел, что объясняется относительно большими уклонами дна долины и повышенной водоносностью. Кроме того, они считали, что образование скоплений аллювия в виде осередков характерно для немеандрирующих русел, называя их островной формой перемещения наносов.

К рассмотренным двум классификациям примыкают схемы, предложенные Л. Леополдом и М. Волманом (Leopold, Wolman, 1957), К.В.Гришаниным (1972), Н.А.Ржаницыным (1985). В первой из монографий ГГИ по русловым процессам (Кондратьев, Ляпин и др., 1959) классификация речных русел на основании оценки плановых (горизонтальных) деформаций также близка к указанным схемам. В ней выделены русла меандрирующие, немеандрирующие одорукавные, разбросанные и блуждающие. В этой классификации отмечается ее расширение по сравнению с предыдущими за счет разветвленного типа русел – разбросанные и блуждающие. Следует обратить внимание на неудачность термина "одорукавное русло": согласно "Толковому словарю..." В.И.Даля, словарям А.П.Евгеньева и др., рукав представляет собой ответвление от реки, и поэтому одорукавность либо означает наличие одного рукава у реки помимо основного русла, либо является бессмысленным определением, к сожалению, нередко употребляемым.

В ряде других классификаций используется несколько иной подход для разграничения морфодинамических типов русла. Н.И.Маккавеев (Проектирование судовых ходов..., 1964) русла рек предложил делить по их плановым очертаниям на неразветвленные и разветвленные, причем в категорию неразветвленных были включены как извилистые, так и слабоизвилистые, прямолинейные. Следует отметить, что в более ранних и более поздних работах Н.И.Маккавеев (1955, 1971), не составляя классификационной таблицы, выделял излучины, разветвленные и прямолинейные русла, указывая на их различия в структуре потока и описывая присущий каждому из них режим деформаций. Ему же (1971) принадлежит очень подробное деление излучин рек по своим плановым очертаниям, основанное на различиях в формах их развития и деформаций. Таким образом, внешне формальный признак – очертания излучин в плане – имеет, по Н.И.Маккавееву, глубокий физический смысл. Правомерность выделения разветвленных и неразветвленных типов русел объяснялась тем, что в этом случае сохраняется однозначность критериев, так как прямолинейные и меандрирующие русла различаются по извилистости, а разветвленные выделяются из-за наличия нескольких рукавов (Chitale, 1970). Б.Раст (Rust, 1981) предложил делить реки на однорусловые и многорусловые по показателю разветвленности, причем, по его мнению, одноруловым малоизвилистым рекам отвечает понятие прямолинейных русел, а осередковые малоизвилистые русла отнесены к многорукавным. Характерно, что многие исследователи (Schumm, Khan, 1977; Kellerhals, Church, Bray, 1976; Miall, 1977) осередковые русла относят к разветвленным. Однако при этом возникает терминологическая путаница, так как осередки – это формы грядового движения наносов, а разветвления связаны с островами, лишь основа образования которых создается осередками в случае их закрепления растительностью и изменения роли в русловых деформациях. В целом такие подходы характерны для чисто морфологических классификаций, где только качественно даются различия во внешнем облике русла, без анализа динамики потока и режима русловых деформаций.

Широко известны попытки создать классификации русел на основе сочетания морфологической типизации с условиями транспорта наносов. В них русла также делились на однорукавные и многорукавные (Schumm, 1977; Miall, 1977; Brotherton, 1979). При этом в

классификациях учитывалась транспортирующая способность потока. По мнению их авторов, прямолинейные русла характеризуются преобладанием стока донных наносов, наличием большого уклона и высокой распластанностью русла, по мере снижения значений этих характеристик наблюдается переход к меандрирующим и разветвленным руслам. Различия между предложенными классификациями заключались только в том, что С.Шумм (S.Schumm) и Д.Бразертон (D.Brotherton) относили русла с осередками к прямолинейным. Кроме того, все русла они подразделяли на стабильные, врезающиеся и аккумулярующие.

В классификации ГГИ (Попов, 1965; Кондратьев и др., 1982) также была предпринята попытка учесть способность потока переносить наносы. В качестве ведущего признака в ней принималась извилистость русла, тесно связанная, по мнению ее авторов, с транспортирующей способностью потока. При этом прямолинейные русла не выделяются в особый тип, и только использование опознавательных признаков дает возможность отнести к ним ленточно-грядовый, побочной и осередковый типы процесса. Существенным является и то, что, согласно этим признакам, указанные "типы руслового процесса" развиты в беспойменных руслах, то есть их можно отнести к "врезанным". Хотя данная классификация достаточно полно охватывает разновидности форм речных русел в плане (кроме указанных типов процессов она включает в себя свободное меандрирование, ограниченное меандрирование, незавершенное меандрирование, пойменную и русловую многорукавность), она критиковалась с позиции нарушения ведущего признака: в ней в один ряд поставлены русловые формы различного порядка и механизма формирования (побочни, осередки, ленточные гряды – формы руслового рельефа, отражающие грядовое движение наносов, и излучины, русловая и пойменная многорукавность – формы самого русла) (Чалов, 1979).

Н.С.Знаменская (1976) предложила усовершенствовать структуру классификации ГГИ путем введения "активных" и "пассивных" процессов. По ее мнению, "активными" являются формы грядового движения наносов, отвечающие ленточно-грядовому, побочному и осередковому процессам. Развитие и чередование таких процессов обусловлены трансформацией форм гряд при изменении соотношения расходов воды и влекомых наносов. К "пассивным" процессам было отнесено формирование различных типов русел при уменьше-

нии расходов воды в межень, происходящее на базе "активных" процессов. Эти предложения Н.С.Знаменской дают возможность четко разделить грядовое перемещение наносов и типы русла, т.е. сопоставлять русловые формы разных порядков. Б.Ф.Снищенко (Кондратьев и др., 1982) на основе проработки большого количества натуральных материалов установил численные значения критерия для разграничения типов русел в рамках классификации ГГИ.

Некоторые исследователи пытались классифицировать реки одновременно и по устойчивости русла, и по его морфологии. Так, в классификации И.Ф.Карасева (1975), близкой по структуре к классификации ГГИ, все семь типов русел, по ГГИ, отнесены к динамически устойчивым руслам. Дополнительно рассматриваются два типа динамически неустойчивых русел – с глубинной эрозией и аккумуляцией.

В классификации Х. Шена и др. (Shen, Schumm, Doehring, 1979) по степени стабильности прямолинейные русла занимают два первых места и подразделяются на два подтипа. Самыми нестабильными, по их мнению, являются разветвленные русла, меандрирующие занимают промежуточное положение. Г.А.Куколевский (1988) в основу типизации положил морфологический облик русел (прямолинейные, меандрирующие, разветвленные), но русла каждого типа рассматривал как аллювиальные или в унаследованных (неаллювиальных) грунтах. Аллювиальные русла он дополнительно разделил по устойчивости. Такой подход существенно исправляет недостаток классификационных схем первой группы (по степени устойчивости), но отсутствие коэффициентов, выражающих устойчивость русел, позволяет судить только о качественной стороне русловых деформаций.

1.3. Морфодинамическая классификация русел рек

Несмотря на большое число уже предложенных и применяемых классификационных схем, вопросы классификации речных русел периодически поднимаются в отечественной и зарубежной литературе. Это связано как с развитием теории русловых процессов и, соответственно, с разработкой гидромеханических основ формирования русел, так и с расширением географии русловых исследований, получением новой информации о формах проявления русловых процессов. Последнее сказывается в том, что региональные исследования

русловых процессов приводят к выявлению новых разновидностей речных русел, характеризующихся своеобразной морфологией и динамикой, уточнению ранее предложенных типизаций форм русел и, наконец, разработке новых классификационных схем.

В основе типизации русловых процессов лежит закон ограниченности морфологических комплексов. Формулируя его, М.А.Великанов (1958, с. 58) писал: "Взаимоуправление потока и русла приводит в результате всех деформаций к определенным, наиболее вероятным комбинациям между морфометрическими характеристиками русла и гидравлическими характеристиками потока". Ранее он же указывал, что "в природе из бесчисленного количества возможных русловых образований осуществляется лишь ограниченное число относительно устойчивых форм таковых, что создает возможность геоморфологической классификации естественных русловых комплексов" (1948, с. 13). По Н.И.Маккаеву (1976), ограниченность морфологических комплексов и относительная устойчивость возникающих в процессе взаимодействия русловых форм обуславливается тем, что последние, будучи производной от воздействия потока на подстилающую его поверхность, возбуждают в самом потоке явления и процессы, способствующие их возобновлению, т.е. предопределяют формирование той или иной кинематической структуры потока. Так, в излучине русла и в узле разветвления возникают циркуляционные течения и такое скоростное поле потока, которые способствуют сохранению или росту кривизны излучины, или развитию острова посередине русла; то же касается относительно прямолинейных, неразветвленных русел. В природе, однако, приходится иметь дело с вариациями форм русла, соответствующими различным стадиям их развития. Поэтому классификация русел должна опираться не только на их внешний облик, но и на всю совокупность возможных изменений форм русел в процессе эволюции – от зарождения до отмирания, т.е. увязывать их морфологические и динамические характеристики. Отсюда морфологическая (по внешним признакам) классификация русел является одновременно динамической, а любая ячейка в классификационной схеме, будучи названной морфологически, соответствует определенной схеме русловых деформаций; наоборот, если такую ячейку называть динамическим термином, то под этим должен подразумеваться вполне определенный морфологический тип русла. Например, извилистое русло и меандрирование, разветвленное русло

и разветвление русла на рукава. Классификация такого рода является морфодинамической, а составляющие ее элементы – морфодинамическими типами русел.

Однако в зависимости от уклонов и скорости потока, его кинетичности (спокойный или бурный), крупности наносов и их количества возникают различные формы транспорта наносов (грядовые или безгрядовая) и механизмы взаимодействия потока и русла. Это обуславливает выделение типов русловых процессов (Чалов, 1996), соответствующих равнинным, полугорным и горным рекам. Благодаря им на равнинных, полугорных и горных реках возникают либо присущие только каждому из них морфодинамические типы русел (например, порожисто-водопадные и селевые русла горных рек), либо последние получают специфическое развитие. Поэтому часто к названию типа русла добавляется дополнительная характеристика; обычно это делается для русел горных рек: например, горная пойменная многорукавность (Копалиани, Цхададзе, 1972), горная русловая многорукавность (Прокачева и др., 1982) и т.д.

При таком подходе к типизации русловых процессов меандрирование, разветвление и формирование относительно прямолинейных, неразветвленных русел представляют собой не типы русловых процессов, а русловые деформации как формы проявления русловых процессов, которым соответствуют морфодинамические типы русел. Действительно, согласно данному выше определению русловых процессов, их типизация должна основываться на различиях в механизмах взаимодействия потока и русла, эрозии дна и берегов (ложе) реки, транспорта наносов и их аккумуляции, что соответствует выделению горных, полугорных и равнинных рек как отражения типов русловых процессов. Эти различия определяют общий фон, на котором происходят русловые деформации и формируется русло того или иного типа.

Выделение равнинных, полугорных и горных рек, соответствующих типам русловых процессов, нельзя смешивать с определениями рек по их орографическому положению, т.е. с понятиями "реки в горах", "реки в предгорьях" и "реки на равнинах". Как каждый термин несет определенную условность в своем определении, так и каждая классификация в известной мере условна. Н.И.Маккавеев писал: "Почти нельзя найти ни одной значительной равнинной реки, которая не имела бы на протяжении своего течения "горных" участков ...

многие реки, равнинные в верховьях, имеют в среднем или нижнем течении участки, где поток становится бурным" (1955, с. 79–80). Действительно, на сравнительно коротких участках рек геолого-геоморфологический фактор создает местные условия для резкого увеличения продольного уклона и повышения степени кинетичности потока, вплоть до проявления бурного характера течения. Таковы порожистые участки крупных равнинных рек, подобные бывшим днепровским порогам, затопленным водохранилищем ДнепроГЭС, существование которых связано с пересечением рекой Украинского кристаллического массива. Кроме того, в верховьях рек, берущих начало на возвышенностях (Средне-Русской, Волыно-Подольской, Приволжской, Северных Увалах и др.), уклоны достигают таких величин, что во время половодья (при руслоформирующем расходе) достигают критических значений, и поток становится бурным. Даже такая крайняя форма развития русловых процессов на горных реках, как сели, может развиваться, при определенных условиях (большая глубина эрозионного расчленения), в пределах равнин. Например, они возникают в руслах водотоков, расчленяющих склоны долины среднего Днестра, врезанного на 100–200 м в Волыно-Подольскую возвышенность. С другой стороны, большие реки с малыми уклонами, являясь по форме транспорта наносов равнинными, могут располагаться среди гор. Таковы, например, реки Среднесибирского плоскогорья и Восточной Сибири – верхняя Лена, Алдан, Витим, Енисей и его притоки, нижняя Яна и др.

Особенности развития русла того или иного морфодинамического типа неодинаковы в разных геолого-геоморфологических условиях. В связи с этим выделяются (рис. 1.1): А – врезанные (беспойменные) русла, соответствующие ограниченному развитию русловых деформаций; среди них можно говорить о двух разновидностях, связанных с различной литологией трудноразмываемых горных пород – в скальных породах и в пластичных породах; Б – адаптированные русла – промежуточный тип между врезанными и широкопойменными руслами, развивающийся в узких долинах; В – широкопойменные русла, соответствующие свободному развитию русловых деформаций.

Таким образом, морфодинамическая классификация речных русел может быть представлена в виде системы блоков (рис. 1.2), каждый из которых соответствует уровню развития русловых процессов и форм их проявления; русловые процессы предыдущего блока обра-

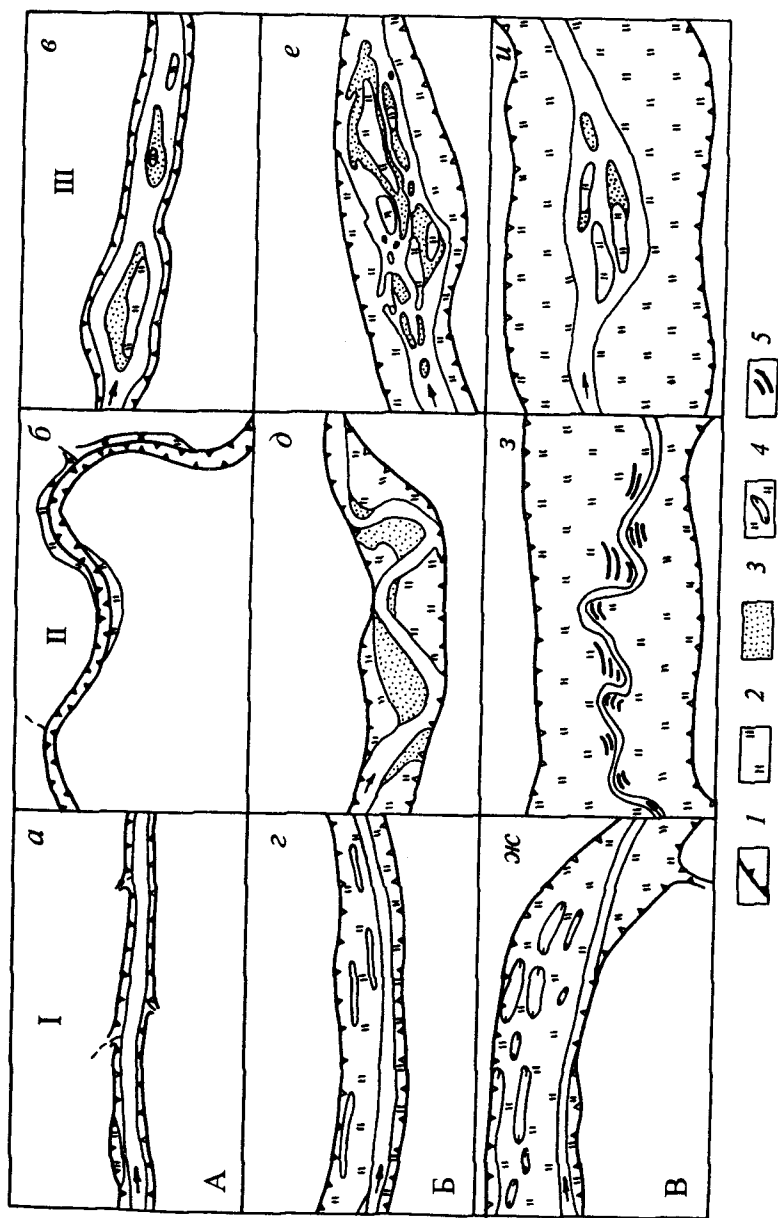


Рис. 1.1. Морфодинамические типы русел в разных геолого-геоморфологических условиях развития русловых деформаций.

А – врезанные, Б – адаптированные, В – широкопойменные

I – относительно прямолинейное, неразветвленное, II – извилистое (меандрирующее), III – разветвленное на рукава. Примеры русел: а – р. Юг у с. Васильево, б – р. Поной у впадения р. Лопенярки, в – р. Сухона у г. Тотьмы, г – р. Дон у с. Куляшовки, д – р. Гауя у г. Цесиса, е – р. Северная Двина выше впадения р. Ваги, ж – р. Ока у г. Шурово, з – р. Жиздра у с. Павлово, и – р. Печора у с. Великановысочного, 1 – борта долины, 2 – пойма, 3 – крупные отмели, обсыхающие в межень, 4 – озера на пойме, 5 – гривистый рельеф на пойме.

зуют фон, на котором происходят процессы руслоформирования каждого следующего блока.

Блок I составляют типы русловых процессов, соответствующие горным, полугорным и равнинным рекам. При этом достаточно детально разработана типизация русловых процессов для горных рек, на которых выделяются русла с развитыми аллювиальными (грязевые), неразвитыми аллювиальными (безгрязевые) формами, аллювиальные порожиисто-водопадные, а также скальные (порожиисто-водопадные и лотковые) и селевые. Для равнинных рек этот вопрос до сих пор практически не ставился, если не считать идентификации русловых процессов с русловыми деформациями и отнесения к ним разновидностей последних, как это принято в классификации ГГИ. В порядке первого приближения можно предложить следующую схему типизации русловых процессов на равнинных реках: русловые процессы на малых реках (возможно, с выделением водотоков I порядка – ручьев), русловые процессы на средних и больших реках (с выделением песчаных, галечно-валунных и, по-видимому, скальных), русловые процессы на устьевых барах. Для первых характерна параболическая форма живого сечения с небольшой величиной отношения ширины русла к его глубине h/b_p (от 1:2 до 1:10) и быстрым его изменением вплоть до рек X – XI порядков в гумидных областях (Ржаницын, 1985). На средних и больших реках это отношение становится практически постоянным, составляя величину около 0,001 и менее; русло при этом на прямолинейных плесовых участках распластано и имеет вид трапеции с очень малыми размерами боковых сторон. Такие различия в форме живого сечения и отношении h/b_p определяют неодинаковые условия движения и кинематическую структуру потока и, соответственно, его взаимодействие с дном и берегами рек.

На устьевых барах специфика русловых процессов определяется растеканием водного потока и непосредственным воздействием на него морских факторов (Михайлов, 1971).

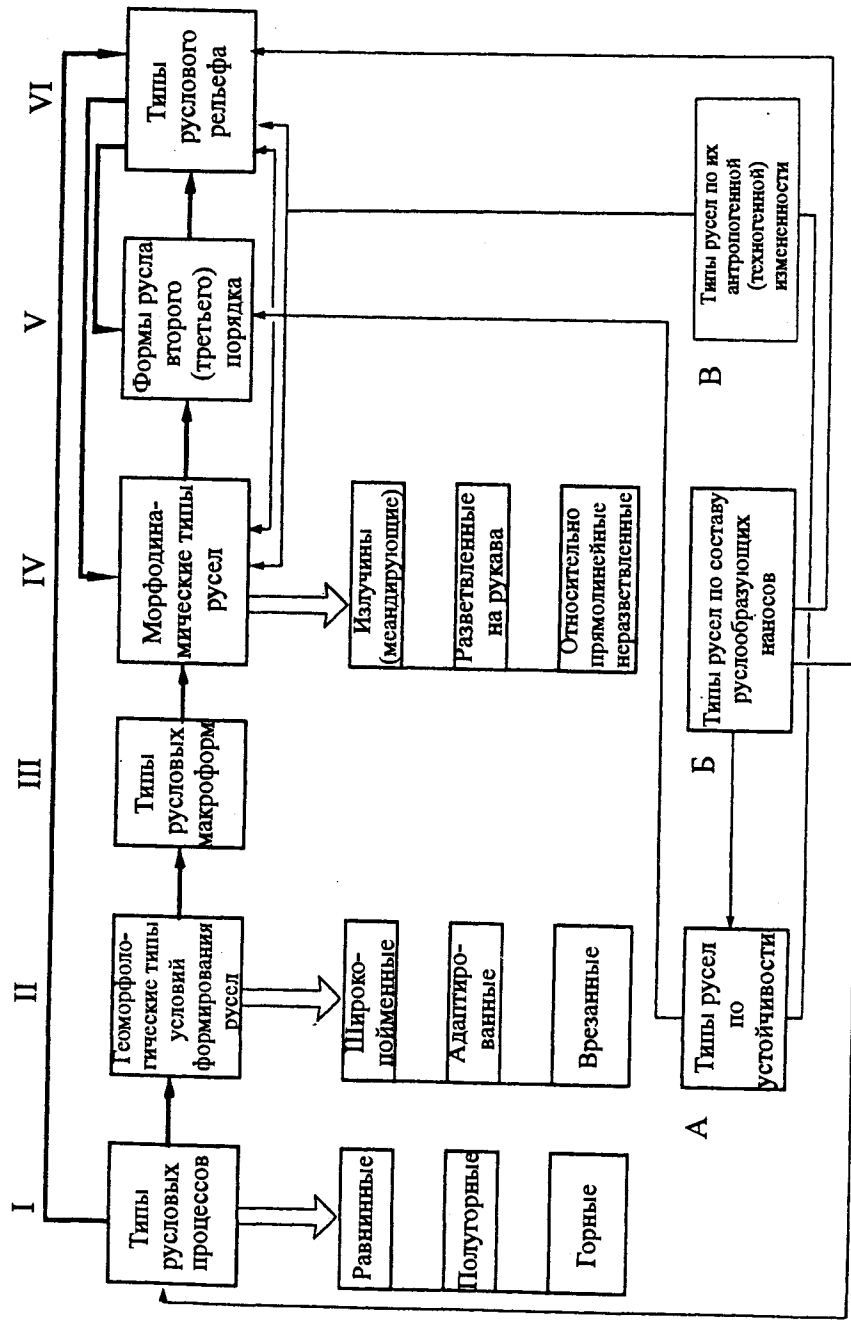


Рис. 1.2. Структура морфодинамической классификации речных русел: I, II ... - основные блоки; А, Б, В - дополнительные блоки.

Блок II классификации включает "геоморфологические" типы русел – широкопойменные, адаптированные и врезанные, выделение которых основывается на геолого-геоморфологических факторах русловых процессов; каждому из них соответствует определенное соотношение между шириной русла b_p и шириной поймы B_n . Н.И.Маккавеев (1955) это соотношение принимал в качестве косвенного показателя преобладания глубинной эрозии (врезания) реки ($B_n < b_p$) или преимущественного развития боковой эрозии (горизонтальных русловых деформаций) ($B_n > 2-3b_p$). Действительно, врезание реки осуществляется в том случае, если сток наносов меньше транспортирующей способности потока, т.е. на реке имеет место дефицит наносов. Благодаря последнему энергия потока затрачивается на размыв дна; с другой стороны, дефицит наносов не способствует развитию грядовых форм руслового рельефа и, следовательно, уменьшает возможности проявления горизонтальных деформаций, т.е. расширения дна долины. В результате, чем больше дефицит наносов, тем интенсивнее врезание, тем уже дно долины и вероятнее образование беспойменного врезанного русла. Особенно отчетливо эта закономерность проявляется в условиях ограниченного развития русловых деформаций.

При отсутствии дефицита наносов (сток наносов соответствует транспортирующей способности потока) или при их избытке (в этом случае происходит направленная аккумуляция наносов) в русле образуются разнообразные грядовые формы рельефа (побочки, осередки, косы), которые способствуют его блужданию и формированию широкопойменного русла. Наиболее наглядно это проявляется в условиях свободного развития русловых деформаций, когда поток легко размывает берега, сложенные рыхлыми породами.

Адаптированные русла (дефицит наносов невелик, их количество еще недостаточно для образования мощных скоплений аллювия, $b_p < B_n < 2-3b_p$) обычно встречаются в пограничных геоморфологических областях (Вилой между Среднесибирским плоскогорьем и Центральнойкутской низменностью, Днестр ниже Дубоссар, где река пересекает склоны Воляно-Подольской возвышенности, вступая в пределы Причерномоской низменности), либо в долинах, наследующих линейно вытянутые морфоструктуры, где узкое их дно заключено между крутосклонными, сложенными скальными породами бортами, ограничивающими возможный размах горизонтальных де-

формаций. Величина стока наносов и степень развитости грядовых форм рельефа при этом определяющей роли не играют, обуславливая только интенсивность русловых деформаций.

Другим критерием выделения геоморфологических типов русла является соотношение между шириной дна долины B_d (пойма + русло) и пояса блуждания русла (меандрирования, разветвления) $B_{M(p)}$. Если $B_d = B_{M(p)}$, то при условии $l = 1,6L$ русло является адаптированным (здесь l – длина русла, L – шаг излучины или узла разветвления); при $B_d > B_{M(p)}$ – широкопойменным, $B_d < B_{M(p)}$ – врезанным.

Блок III классификации включает макроформы русла, которые прямо не связаны горизонтальными русловыми деформациями, превышают предельные размеры русловых форм при современной водности реки, величине стока, крупности наносов, ширине русла, но в то же время оказывают влияние на их развитие. Этот блок наименее разработан и поэтому на схеме (рис. 1.2) не расшифровывается. Для типизации макроизлучин может быть предложен подход, аналогичный выделению геоморфологических типов, т.е. с подразделением макроизлучин на свободные, адаптированные (с одним коренным берегом) и врезанные. При этом все макроизлучины могут быть: 1) унаследованными от свободно меандрирующего русла; 2) наследующими регулярные (нормальные) врезанные излучины, соответствующие параметрам потока, но в своем заложении и размерах испытывающие влияние геолого-геоморфологических факторов; 3) предопределенные геологическими и структурно-тектоническими условиями. Последние, в свою очередь, подразделяются на формирующиеся под влиянием активной тектоники (например, при огибании руслом растущих тектонических поднятий типа Самарской луки на Волге) и обусловленные пассивным приспособлением русла к рельефу и геологической структуре.

Врезанные макроизлучины развиваются благодаря возникновению в их вершинах динамических явлений, присущих изгибу потока, смещению русла в сторону вогнутого берега в соответствии с закономерностями развития русел с односторонней поймой и накоплению морфологических изменений, происходящих под влиянием экстремальных половодий (паводков). Макроизлучины широкопойменных русел (свободные) рассматриваются как реликтовые образования или изгибы пояса меандрирования реки, развитие которых происходит на протяжении исторических и геологических отрезков вре-

мени через последовательное накопление происходящих морфологических изменений. Таково, в частности, сложение или вычитание центробежных сил на нормальных излучинах и на излучинах пояса меандрирования в зависимости от соотношения знаков их изгибов.

Подобный подход, очевидно, может быть применен к типизации макроформ разветвленного и относительно прямолинейного неразветвленного русла. Врезанные макроразветвления, образованные коренными высокими островами, имеют размеры, соизмеримые с макроизлучинами (например, на Ангаре, о-в Хортица на Днепре). Для разветвлений аналогом излучин поясов меандрирования широкопойменных рек служит пойменная многорукавность. Отсутствие того или другого (в обоих случаях пойма представляет собой единый консолидированный массив) свидетельствует о существовании прямолинейной широкопойменной макроформы русла.

Блок IV представлен собственно морфодинамическими типами русла: излучинами (меандрирование), разветвлениями (русловая многорукавность, фуркация), относительно прямолинейным, неразветвленным руслом со всеми их разновидностями. Каждый из типов может развиваться на фоне тех или иных макроформ, быть широкопойменным (для излучин широко используются термины "свободные излучины" или "свободное меандрирование"), адаптированным (соответственно "вынужденные", "адаптированные" и "вписанные излучины") или врезанным (для излучин – "врезанные излучины"). При этом горные и равнинные реки характеризуются специфическими особенностями развития морфодинамических типов русел. Наиболее полно и многообразно формы русла представлены на равнинных реках в условиях свободного развития русловых деформаций, где они являются широкопойменными.

Каждый морфодинамический тип русла представлен различными модификациями (подтипами). В классификационной схеме, разработанной для равнинных рек (рис. 1.3), эти модификации (подтипы) соотносятся со свободными, адаптированными или ограниченными условиями развития русловых деформаций, поскольку последние во многом определяют возможность развития тех или иных форм излучин, разветвлений или прямолинейного, неразветвленного русла. Их определение обосновано и даются соответствующие характеристики в специальных работах (Маккаев, Чалов, 1986; Чалов, 1987), однако в данном варианте схема содержит некоторые дополнения. К ним

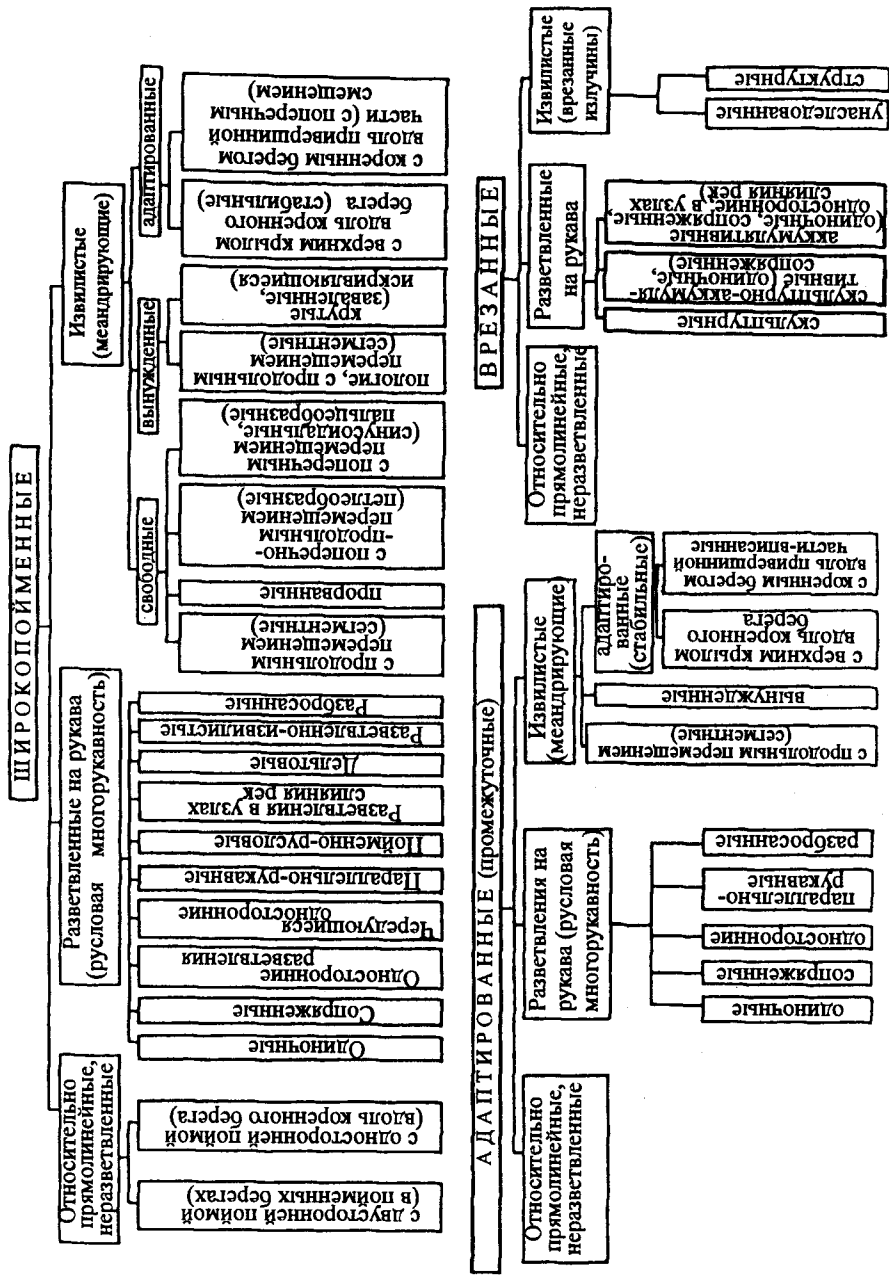


Рис. 1.3. Морфодинамические типы русел равнинных рек и их разновидности (блок IV в классификации рис. 1. 2).

относятся, например, пойменно-русловые разветвления, описанные на Амуре и идентифицированные с аналогичными разветвлениями на других реках (Машинов и др., 1994). Среди широкопойменных русел впервые выделены вынужденные излучины, которые в виде одиночных форм встречаются там, где меандрирующее русло подходит к коренному берегу реки (или отклоняется от него). Собственно адаптированные излучины как тип русла дополнены вписанными излучинами (Букреев, 1987), привершинные части которых повторяют изгибы коренных берегов, образующих чередующиеся фестоны, и пологими смещающимися излучинами, вершины которых лишь касаются коренных берегов. Последние известны по работам ГГИ (Кондратьев и др., 1982) как ограниченное меандрирование.

Среди широкопойменных разветвленных русел в схеме фигурирует ячейка "разбросанные русла". Это – сборный подтип, включающий большую группу русел, слабо или практически не изученных в отношении их морфологии и динамики. Именно из него чаще всего происходит выделение новых ячеек сложных разновидностей разветвленного русла.

Блок V классификации включает в себя формы русла второго и третьего порядков, осложняющие излучины, разветвления или относительно прямолинейное неразветвленное русло. Чем меньше устойчивость русла, больше сток наносов и количество руслоформирующих расходов Q_{ϕ} , тем вероятнее образование иерархии вложенных друг в друга форм русла, в том числе развивающихся в разные фазы гидрологического режима. На реках со свободно меандрирующим руслом при прохождении Q_{ϕ} только одного интервала возникают излучины наиболее простой формы, при которой динамическая ось потока в целом повторяет очертания излучины. Если на реке проходят Q_{ϕ} двух или трех интервалов, то возникает все более сложная иерархия излучин: сложные излучины, состоящие из нескольких смежных излучин с меньшим шагом и радиусом кривизны, которые, в свою очередь, осложнены извилинами динамической оси потока, огибающей побочни перекатов.

В разветвленном русле рукава могут меандрировать, причем возникает закономерная последовательность излучин, развитых внутри разветвленного русла: сложные излучины, соответствующие основным рукавам; излучины второго порядка, которые образует русло каждого рукава; извилины динамической оси потока. Такое соотношение является аналогом иерархии излучин меандрирующего русла, и его структура также может определяться количеством Q_{ϕ} . Более распространено разделение рукавов небольшими островами на сеть относительно коротких, благодаря чему рисунок разветвленного русла представляет собой запутанный лабиринт рукавов разных размеров. Отдельные острова – в начале и в конце рукава – могут составлять единую цепочку с островами, развивающимися внутри рукава, образуя вместе с ними сопряженную систему разветвлений второго порядка. В свою очередь, каждый рукав второго порядка может разделяться небольшим островом на протоки третьего порядка. Таким образом, возникает иерархия разветвлений, каждый порядок которой соответствует определенному интервалу Q_{ϕ} .

В прямолинейном неразветвленном русле возможно образование излучин лишь третьего порядка – извилины динамической оси потока, которые разрушаются по мере смещения побочной. В противном случае прямолинейное русло трансформируется в меандрирующее. В то же время в зависимости от соотношения параметров русла и островов связанная с ними разветвленность может иметь второй или третий порядок, либо второй порядок, осложненный разветвлениями третьего порядка, хотя русло в целом как форма первого порядка остается прямолинейным неразветвленным. Если принять, что разветвление второго порядка образовано островом ширина которого $B_{OII} < 0,4b_p$, то в разветвлении рукава, имеющего для русла в целом третий порядок, $B_{OIII} < 0,4b_{рук}$; соответственно, в прямолинейном русле остров, образующий разветвление только третьего порядка, будет иметь $B_{OIII} < 0,12b_p$.

В районах ограниченного развития русловых деформаций, где блужданию русел препятствуют трудноразмываемые или скальные породы, слагающие берега и дно рек, а количество руслообразующих наносов сравнительно невелико, формируются врезанные типы русел, набор форм (иерархия) которых минимален. При этом они нередко имеют нерусловой генезис, будучи связанными с геологической структурой, или отражают геологическую историю развития

речной долины, что характерно для иерархии врезанных излучин, особенно в районах распространения скальных пород. Чаше формы русла второго или третьего порядка встречаются во врезанном разветвленном или прямолинейном русле, где они имеют аккумулятивное происхождение.

Блок VI классификации образуют формы руслового рельефа и русловые деформации, связанные с грядовым движением наносов, или скульптурные, обусловленные неровностями коренного ложа реки. Сюда же могут быть отнесены морфодинамические типы русел малых рек, обусловленные их заилием и зарастанием – бочажинные (плавневые) и др., поскольку эти явления связаны с трансформацией руслового рельефа. Их также можно рассматривать как одну из разновидностей широкопойменных русел, присущих только малым рекам (это говорит в пользу выделения последних как соответствующих одному из типов русловых процессов на равнинных реках).

Дополнительные (параллельные) блоки классифицируют русла по степени устойчивости (блок А), дающей интегральную оценку интенсивности переформирований (в соответствии с градациями числа Лохтина или коэффициента стабильности русла Н.И.Маккавеева), по составу руслообразующих наносов (блок Б), определяющих отличие в морфологии и динамике песчано-илистых, песчаных и галечно-валунных русел, и по степени антропогенной (техногенной) измененности русел (блок В). Первый из них (А) сказывается в развитии русел на четвертом, пятом и шестом уровнях (блоках) морфодинамической классификации. Вторым (Б) является одним из важных условий, определяющих тип русловых процессов, устойчивость русла и одновременно грядовую структуру руслового рельефа. Третий (В) связан с формированием русла и руслового рельефа, включая различные их трансформации вплоть до превращения русел в каналы, бетонированные лотки, запаханые русла малых рек и т.д. Они могут быть дополнены блоками, в которых дается оценка пересыхания, промерзания рек и других явлений, также оказывающих воздействие и обуславливающих специфику проявлений русловых процессов.

Подобный подход к разработке классификаций речных русел Н.И.Маккавеев (1976) сопоставлял с принципом построения минералогических комплексов, выдвинутым А.Е.Ферсманом. Он позволяет, с одной стороны, представить в единой схеме все многообразие русел рек и их деформации, а с другой – постоянно включать в нее но-

вые элементы (ячейки) в каждом из блоков по мере расширения знаний о морфологии русел и режиме их деформаций. Каждый блок (ячейка) может быть индексирован, что позволит формализовать классификацию для последующей машинной обработки численных значений гидроморфологических характеристик.

Глава 2

Гидролого-морфологический анализ условий формирования русел разного типа

2.1. Анализ QI -диаграмм и морфометрических параметров

В настоящее время одним из наиболее распространенных методов исследования условий формирования русла того или иного морфодинамического типа является анализ зависимостей между характеристиками потока и русла, с одной стороны, и факторами руслоформирования, с другой. Наиболее показательными в отношении дифференциации типов русла являются диаграммы, по координатным осям которых нанесены значения расхода воды и уклона (русла или днища долины) – так называемые QI -диаграммы. Впервые этот метод был применен Е.Лейном (Lane, 1957), Л.Леополдом и М.Волманом (Leopold, Wolman, 1957). Ими было отмечено, что точки, отвечающие разветвленным руслам, располагаются в верхней части диаграммы, меандрирующие – в нижней. Линия раздела описывается, по Л.Леополду и М.Волману, уравнением:

$$Q^{0,44} I = 0,012; \quad 2.1$$

здесь за характерное значение Q принимался расход воды в бровках пойменных берегов, I – уклон русла.

Согласно Е.Лейну, средняя линия, отвечающая разветвленным руслам, описывается выражением

$$\bar{Q}^{0,25} I = 0,0041, \quad 2.2 \text{ а}$$

извилистым руслам –

$$\bar{Q}^{0,25} I = 0,0007. \quad 2.2 \text{ б}$$

В отличие от Л.Леополда и М.Волмана, Е.Лейн в своих построениях использовал среднемноголетние значения расхода воды \bar{Q} . И в том, и в другом случаях разброс и дисклассификация точек были значительными, на основании чего Л.Леополдом и М.Волманом была предложена идея "континуума типов русла".

Пытаясь уменьшить разброс точек на диаграмме Л. Леополда и М.Волмана, Ф.Хендерсон (Henderson, 1966) предложил рассматривать, наряду с водоносностью и уклоном, еще один фактор руслообразования – характер руслообразующих наносов. Он видоизменил зависимость (2.1), введя в нее средний диаметр донных наносов d :

$$\bar{Q}^{0,44} I = 0,000196 d^{1,14} \quad 2.3$$

Однако значительного уменьшения разброса точек не получилось, а проверка на независимом материале, выполненная С.Читейлом (Chitale, 1970), не дала удовлетворительного результата для использования формулы (2.3). Более удачным оказался способ учета d , предложенный В.Остеркампом (Ostercamp, 1978). На основе анализа обширного и надежного материала по рекам штата Канзас (США) им была установлена связь не только со средним диаметром аллювия, но и с его сортированностью s :

$$\text{при } d < 0.1 \text{ мм} \\ \bar{Q}^{0,25} I = 0,005 \quad 2.4 \text{ а}$$

$$\text{при } d = 0.1-2 \text{ мм, } s < 3 \\ \bar{Q}^{0,25} I = 0,0013 \quad 2.4 \text{ б}$$

$$\text{при } d = 0.1-2 \text{ мм, } s > 3 \\ \bar{Q}^{0,25} I = 0,0009 \quad 2.4 \text{ в}$$

Разброс точек при этом оказался незначительным, хотя можно полагать, что это связано с узким региональным характером исследования.

З.Бегин (Begin, 1981) предложил учитывать характер руслообразующих наносов через соотношение соответствующих им фактических τ_0 и критических $\tau_{кр}$ значений донных касательных напряжений:

$$\bar{Q}^{0,327} I = 0,00506 \frac{\tau_0}{\tau_{кр}} \quad 2.5$$

Значение отношения $\frac{\tau_0}{\tau_{кр}}$ увеличивается от 0,56 у меандрирующих рек

до 1,7 у разветвленных. Полученную зависимость З.Бегин связывает с ростом интенсивности размыва берегов при переходе от меандрирования к разветвленности. Такой вывод не представляется бесспорным, как и само использование донного касательного напряжения τ_0 , зависящего от значений Q и I . Многочисленные наблюдения, в частности, свидетельствуют об обратном: на излучинах скорость отступления вогнутых берегов вследствие их размыва больше, чем в разветвленном русле при образовании изгибов потока возле островов.

В.В.Ромашин (1968), указав на нецелесообразность рассмотрения данных об аллювии ввиду их недостаточной надежности и репрезентативности, предложил улучшить качество связи за счет более детальной типизации русел (в рамках классификации ГГИ). Им было рассмотрено более 250 участков (длиной 30–70 км) горных, предгорных и равнинных рек, отвечающих следующим требованиям: 1) близость к гидрологическому посту с длинным рядом наблюдений за стоком воды; 2) отсутствие местных условий, ограничивающих свободное развитие русловых деформаций; 3) выраженность русловых форм на карте масштаба 1:100000 (то есть, в основном это – средние и крупные реки). Значения расходов воды охватывали диапазон 28 – 133000 м³/с, уклонов – 0,01–14,0 ‰. На диаграмме В.В.Ромашина прослеживается довольно четкая дифференциация точек, соответствующих различным морфодинамическим типам русла ("типам руслового процесса", по терминологии ГГИ). Аналитическое выражение линии раздела между свободным и "незавершенным" меандрированием (последнее – извилистые русла с большим числом прованных излучин; первое – извилистые русла с преобладанием петлеобразных излучин):

$$\bar{Q}_{\text{макс}} I_0 = 0,35, \quad 2.6 \text{ а}$$

между "незавершенным" меандрированием и разветвленными руслами:

$$\bar{Q}_{\text{макс}} I_0 = 1,4, \quad 2.6 \text{ б}$$

причем при больших значениях Q преобладает пойменная многорукавность, при больших I – русловая (в данном случае, по-видимому,

разветвления сложные и разветвления простые). Исследования В.В.Ромашина, принявшего за характерные значения Q – максимальный расход 50-процентной обеспеченности \bar{Q}_{\max} , за I_0 – уклон вдоль оси горизонтальных деформаций (уклон, близкий к уклону дна долины), представляются наиболее обстоятельными и корректными в данном направлении.

Работая с тем же рядом исходных данных, В.И.Антроповский (1970, 1972), получил графические зависимости между их гидролого-морфометрическими характеристиками для различных типов русел (по ГГИ). Разработки В.И.Антроповского интересны с точки зрения сопоставления соотношений гидролого-морфометрических характеристик и их комбинаций для различных типов русла, однако условный характер понятий ширины и средней глубины разветвленного русла лишает эти зависимости строгой физической трактовки.

Б.Ф.Снищенко (1979, Кондратьев и др., 1982) предложил оперировать не с абсолютными величинами уклонов, расходов воды и морфометрических характеристик русла и дна долины, а с безразмерными комплексами $\frac{B_D}{b_p}$ – отношением ширины дна долины B_D к ширине русла b_p , $\frac{I_D}{I_p}$ – отношением уклона дна долины I_D к уклону русла I_p и их произведением $\frac{B_D}{b_p} \cdot \frac{I_D}{I_p}$. Русловой многорукавности соответствуют минимальные значения $\frac{B_D}{b_p}$ и $\frac{I_D}{I_p}$, соответственно равные 1,92 и 1,03, и, что естественно, минимум их произведения. Б.Ф.Снищенко делает вывод: "по мере сближения бортов долины типы русел изменяются от свободного меандрирования к незавершенному меандрированию, к пойменной многорукавности, к ограниченному меандрированию, к русловой многорукавности" (1979, с. 21). Однако параметр $\frac{I_D}{I_p}$ для широкопойменных рек есть не что иное как коэффициент извилистости (при рассмотрении достаточно длинного участка), и график для различных типов русла – не более чем иллюстрация общеизвестного факта, что разветвленные реки в

плане значительно более прямолинейны, чем меандрирующие. Что касается параметра $\frac{B_D}{b_p}$, то его следует рассматривать как характеристику условий руслоформирования. Вполне очевидно, что на врезанных реках в узких долинах не может развиваться свободное меандрирование или же сложные формы разветвленности. С другой стороны, причинно-следственные связи таковы, что к оценке значимости применяемых Б.Ф.Снищенко комплексов можно подойти с противоположных позиций: чем больше интенсивность меандрирования и размах поперечных смещений излучин тем больше $\frac{B_D}{b_p}$; во

врезанном русле даже в условиях меандрирования $\frac{B_D}{b_p}$ минимально, вплоть до $B_D = b_p$, а I_D и I_p совпадают. А.В.Чернов (1983), например, установил связь между морфодинамическим типом русла и шириной поймы. Вместе с тем в широкопойменном русле развитие излучин сопровождается увеличением длины реки и, соответственно, уменьшением уклона.

Таким образом, использование подобного рода комплексов для анализа условий формирования русла того или иного морфодинамического типа едва ли можно считать оправданным; для этого целесообразнее использовать абсолютные значения расходов, уклонов и других характеристик. Следует также иметь в виду, что существует несколько причин того, что аналитические выражения для границы раздела разветвленных и извилистых русел варьируют в достаточно широких пределах, а относительно прямолинейные неразветвленные русла располагаются в различных областях QI -диаграммы:

1. Типы русел образуют морфологический континуум, где, как в любой природной системе, нет, и не может быть резких границ.

2. В качестве характерного значения расхода воды разными исследователями принимались: норма стока, средний максимальный, руслонаполняющий (в бровках поймы) расходы и т. п.; в то же время наиболее физически обоснованным является использование руслоформирующего расхода воды Q_{ϕ} . Для рек с паводковым режимом величина Q_{ϕ} обычно близка к среднему максимальному расходу паводья (Маккавеев, 1955; Чалов, 1979).

1. Типы русел образуют морфологический континуум, где, как в любой природной системе, нет, и не может быть резких границ.

2. В качестве характерного значения расхода воды разными исследователями принимались: норма стока, средний максимальный, руслонаполняющий (в бровках поймы) расходы и т. п.; в то же время наиболее физически обоснованным является использование руслоформирующего расхода воды Q_{ϕ} . Для рек с паводковым режимом величина Q_{ϕ} обычно близка к среднему максимальному расходу паводья (Маккавеев, 1955; Чалов, 1979).

3. В некоторых разработках рассматривался уклон русла, а не долины, что делает сопоставление извилистых рек с относительно прямолинейными неразветвленными и разветвленными (также имеющими относительно прямолинейные плановые очертания) не вполне корректным ввиду изначального занижения значений уклона для меандрирующих рек.

4. Не всегда учитывались факторы, ограничивающие русловые деформации, что приводит, в частности, к смещению широкопойменных и врезанных русел.

5. Различно трактовались понятия относительно прямолинейного неразветвленного, извилистого и разветвленного русла. Разделение неразветвленных русел на извилистые и прямолинейные производилось по "критическому" значению коэффициента извилистости K_u , произвольно назначаемому в довольно широких пределах от 1,2 до 2,0; ниже будет показано, что физически наиболее обоснованным является значение $K_u=1,15$, установленное на основе морфодинамического анализа обширного фактического материала. При рассмотрении разветвленных русел происходило смещение различных структурных уровней разветвленности (осередковой, русловой и пойменной), порядка русловых форм, а также не вполне правомерное отнесение к данному типу разветвленно-извилистых русел, прорванных излучин и других форм русла, возникающих на различных стадиях процесса меандрирования.

Анализ данных по широкопойменным рекам с их дифференциацией по структурным уровням позволил построить две обобщенные QI -диаграммы. В основе первой диаграммы (рис. 2.1), на которую нанесены точки, соответствующие извилистым, разветвленным и относительно прямолинейным руслам, а также пойменной многорукавности, лежат данные В.В.Ромашина (1968) и ряда других исследователей. В основе второй (рис. 2.2), рассматривающей область формирования ленточных гряд, побочной и осередков, – данные А.М.Алабяна (1992). Обе диаграммы демонстрируют сходную тенденцию – разветвленность тяготеет к правому верхнему углу диаграммы.

Рассмотрим физический смысл QI -диаграммы. Мощность потока N на единице его длины l (или другими словами – скорость потери потоком потенциальной энергии E_n , в дальнейшем, для краткости, – "мощность потока") выражается формулой

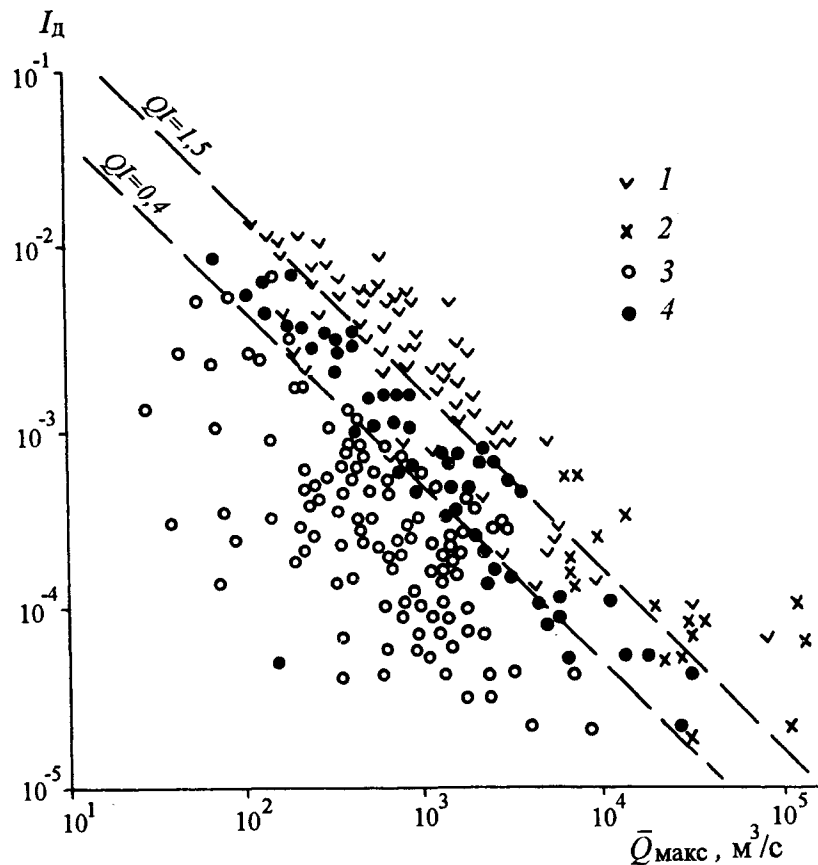


Рис. 2.1. Зависимость морфодинамического типа русла от среднего расхода половодья и уклона дна долины (QI -диаграмма):

1 – русловая многорукавность, 2 – пойменная многорукавность, 3 – извилистое русло, 4 – извилистое русло с преобладанием прорванных излучин.

$$N = \frac{\partial^2 E_n}{\partial l \partial t} = \rho g Q I \approx 10000 Q I \quad [\text{Вт/м}], \quad 2.7$$

где ρ – плотность воды, g – ускорение свободного падения, t – время. Отсюда, чем выше и правее в поле диаграммы лежит точка, тем более мощному потоку она соответствует. Действительно, разветвление русла на рукава свойственно наиболее крупным рекам, что отмечал еще М.А.Великанов (1958). То же, но на уровне форм руслового рельефа характерно для условий образования осередков (но при про-

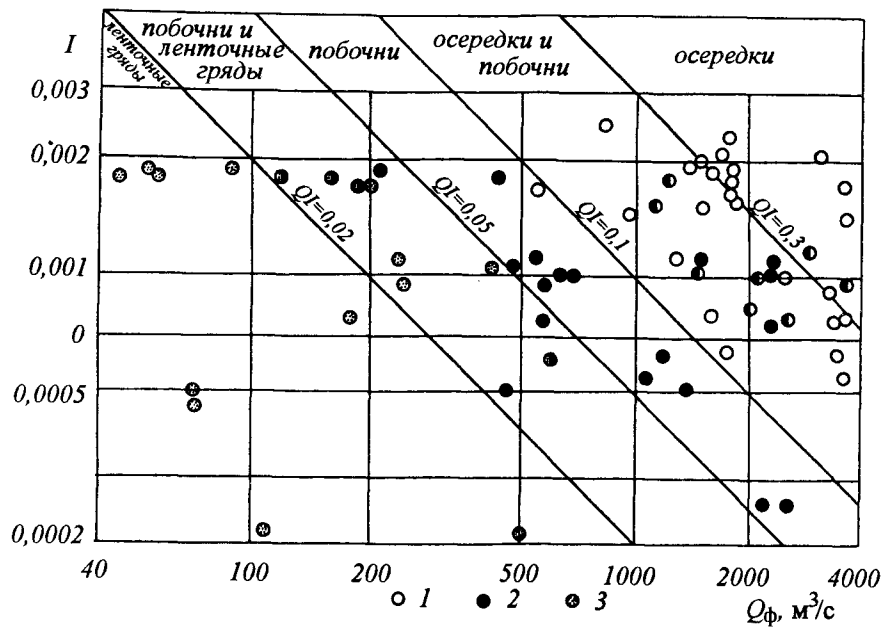


Рис. 2.2. Формы грядового движения наносов в зависимости от руслоформирующего расхода воды и уклона русла (рукава или участка реки) в половодье (верхняя Обь).

1 – осередки, 2 – побочни, 3 – ленточные гряды.

чих равных условиях, так как при этом не учитывается величина стока руслообразующих наносов и их крупность).

Формирование осередковой разветвленности может происходить при значениях мощности потока, превышающих 1 кВт/м, что соответствует $Q_{\phi}I > 0,1$. При меньшей мощности потока осередки сменяются побочнями и далее – ленточными грядами.

При мощности потока более 4 кВт/м, или $Q_{\phi}I > 0,4$, отмечается формирование русловой и пойменной многорукавности; при этом до значений мощности потока ~ 15 кВт/м ($Q_{\phi}I > 1,5$) наряду с разветвленными могут существовать и меандрирующие реки; для последних в этом случае характерно преобладание прорванных излучин ("незавершенное меандрирование", по классификации ГГИ).

Наличие столь широкой переходной области говорит о том, что, хотя мощность потока и является на широкопойменных реках определяющим фактором формирования разветвленности, свои коррективы вносит разнообразие условий руслоформирования: устойчивость берегов к размыву (в частности, их закрепление растительностью, литология), неравномерность стока, ледовые явления, состав руслообразующих наносов и насыщенность ими потока, условия зарастания обсыхающих в межень частей гряд и пр. С условиями недонасыщенности речного потока наносами связано расположение на QI -диаграмме (рис. 2.1) точек, соответствующих относительно прямолинейным неразветвленным руслам, в области формирования многорукавности.

2.2. Математическое моделирование

В 60-е годы получило развитие новое направление в изучении причин формирования различных типов русел – математическое моделирование на основе теории гидродинамической устойчивости. Суть его состоит в исследовании малых волновых возмущений, накладываемых на дифференциальные уравнения, описывающие движение руслового потока. Впервые такая задача была поставлена Р.Колландером (Callander, 1969). Попытка решить двумерную задачу для возмущенного движения из-за многочисленных упрощений привела его к противоречащему фактическим данным выводу о возможности существования разветвлений только с нечетным числом рукавов.

Ф.Энгелунд и О.Сковгор (Engelund, Skovgaard, 1973), используя подход, предложенный Р.Колландером, избежали противоречия. Ими был исследован поток, ширина которого более чем на порядок превышает глубину. Трехмерность течения учитывалась через параболическую эпюру профиля скорости. Гидравлическое сопротивление и расход влекаемых наносов определялись по эмпирическим формулам. С целью определения устойчивости потока рассматривалась его реакция на малое двумерное возмущение в виде деформации дна $\delta(x,y)$, представленной комплексной периодической функцией

$$\delta = \delta_0 \cos[k_2 y + i k_1 x] \quad . \quad 2.8$$

Для решения задачи необходимо получение выражения для критерия устойчивости накладываемых возмущений. С этой целью вводится периодичность возмущений во времени в виде параметра ε

$$\varepsilon = \exp[ik(x - ct)], \quad 2.9$$

где $c = c_r + i c_i$ – комплексная скорость распространения донных волн. Параметр $k_1 c_i$, характеризующий нарастание во времени амплитуды возмущений, принимает максимальные значения при определенных значениях произведений волнового числа k_2 и глубины потока h . При фиксированном сопротивлении дна существует критическое значение

относительной ширины русла $\left(\frac{b_p}{h}\right)_{кр}$, при превышении которого ме-

андрирование сменяется разветвлением на рукава. Этот вывод хорошо согласуется с результатами исследований В.И.Антроповского (1972), И.В.Попова (1965), И.Ф.Карасева (1975) и др.

Весьма убедительны построения Г.Паркера (Parker, 1976), использующего двумерную модель, также сходную с моделью Р.Колландера. В качестве необходимого условия неустойчивости предлагается транспорт наносов и шероховатость. В результате математических преобразований выводятся параметры ε и ε^* , зависящие от числа рукавов m :

$$\varepsilon = \frac{\tau_0 \frac{b_p}{\pi m}}{(\rho v^2)^{0,5} (\rho g h)^{0,5}}, \quad 2.10$$

$$\varepsilon^* = \frac{IB}{\pi Fr h} \quad 2.11$$

Параметр $\varepsilon(m)$ характеризует соотношение работы, необходимой потоку для развития максимальной амплитуды поперечных осцилляций в m рукавах русла к суммарной энергии потока, затрачиваемой на преодоление шероховатости. При оптимальном их соотношении ($\varepsilon \sim 1$) русло прямолинейно и стабильно. В случае, если энергия поперечных осцилляций избыточна ($\varepsilon \ll 1$) по отношению к работе, требуемой на преодоление шероховатости, то она в неразветвленном русле ($m=1$) направляется на эрозию берегов, и начинается развитие меандрирования. В разветвленном русле ($m>1$) значение ε может быть увеличено за счет сокращения числа рукавов. Этим Г.Паркер

объясняет относительную прямолинейность разветвленных русел в плане. В случае $\varepsilon \gg 1$ шероховатость русла препятствует осцилляциям, и увеличение m будет происходить до тех пор, пока ε не уменьшится до оптимального значения.

На основании критерия Г.Паркера ε^* и натуральных данных С.Шумма (Schumm, 1963) Р.Фергусон (Ferguson, 1984) вывел уравнение раздела разветвленных и меандрирующих русел в поле QI -диаграммы, учитывающее, кроме того, содержание в материале, слагающем берега, илстых и глинистых цементирующих частиц – M (в долях единицы):

$$\bar{Q}_{\max}^{0,24} I_0 = 0,0013M \quad 2.12$$

Уравнение (2.12) качественно и количественно мало отличается от аналогичных зависимостей, полученных эмпирическим путем.

Аналогичный подход с различными модификациями применен в работах И.Фредсо (Fredsoe, 1978), А.Е.Михинова (1983), С.Озаки и Т.Хаяши (Ozaki, Hayashi, 1983), К.В.Гришанина и В.И.Замышляева (1985), А.Ю.Сидорчука (1992).

Другое направление в математическом моделировании процессов формирования речного русла различного морфодинамического типа основано на использовании вариационных принципов движения, заимствованных из гидродинамики и впервые примененных в русловом анализе М.А.Великановым (1955). С.Янг (Yang, 1971) предложил использовать принцип минимума скорости потерь энергии по длине, который предполагает, что наиболее вероятен такой путь потока, при котором скорость потери потенциальной энергии единицей массы воды минимальны по длине пути. Им было установлено, что для минимизации скорости потерь энергии необходимо: 1) уменьшение уклона, что достигается меандрированием; 2) увеличение ширины, что приводит к распластыванию потока и, как следствие, формированию разветвлений; 3) уменьшение Q , которое также происходит при разделении потока на рукава.

Приняв за основу принцип минимума диссипации энергии на единицу длины потока и постоянства энергии живого сечения по длине, рассматривая расходы воды и руслообразующих наносов как независимые величины, Х.Чанг (Chang, 1979) пришел к выводу, что речной поток стремится к минимальному уклону, при котором реализуется транспорт наносов. В случае, когда уклон долины превышает это значение, развивается меандрирование; если же радиус кривизны

центральной линии русла становится меньше четырех ширин русла, оно разбивается на рукава.

На основании "теории режима" Г.Лейси (Lacey, 1933) (применяемой для расчетов морфометрических характеристик динамически устойчивых каналов) и с использованием построений С.Янга и Х.Чанга Р.Беттесс и В.Вайт (Bettess, White, 1983) ввели понятие "равновесный уклон" I_1 , являющийся функцией гидролого-морфометрических характеристик водотока и состава руслообразующих наносов. Если фактический уклон русла равен равновесному уклону, то русло относительно прямолинейно в плане и стабильно; то есть, в долине, уклон дна которой I_0 равен I_1 , формируется неразветвленное относительно прямолинейное русло. В случае $I_0 > I_1$ равновесное состояние русла достигается меандрированием (с коэффициентом извилистости $\frac{I_0}{I_1}$) или разветвлением на рукава. При делении потока на

два одинаковых рукава значение равновесного уклона для каждого из них I_2 уменьшится по сравнению с I_1 . Аналогично при делении на три рукава – $I_3 < I_2 < I_1$ и т.д. Таким образом, равновесное состояние достигается формированием определенного числа рукавов. Для случая $I_1 < I_0 < I_2$ больше вероятность формирования неразветвленного русла с коэффициентом извилистости $\frac{I_0}{I_1}$, чем двухрукавного русла.

Хотя мощность потока на единицу его длины в двухрукавном русле $\frac{\rho g Q I_2}{2}$ меньше, чем у меандрирующего неразветвленного русла $\rho g Q I_1$, тем не менее двухрукавное русло имеет дополнительную неустойчивость из-за возможности перераспределения стока между рукавами и трансформации его в неразветвленное.

Данная теоретическая схема с достаточной достоверностью подтверждается результатами лабораторных экспериментов Р.Беттесса и В.Вайта (1983), Л.Леополда и М.Волмана (1957), С.Шумма и Х.Хана (Shcumm, Khan, 1972).

Таким образом, практически все математические модели, вне зависимости от специфики исходных положений и принципов построения, показывают принципиально однозначный результат: развитию разветвлений способствуют повышенные значения мощности потока, определяемой значениями расхода воды и уклона. При этом

все модели такого рода рассматривают свободные условия развития горизонтальных деформаций русла. В условиях естественной реки в зависимости от геологического строения ее долины "избыточная" мощность потока либо расходуется на преимущественную эрозию дна (в случае дефицита наносов, транспортируемых потоком), что приводит к врезанию реки и формированию врезанного русла, либо способствует интенсивному размыву берегов, расширению русла, приводящему к потере потоком плановой однородности, появлению нескольких динамических осей и формированию разветвленности.

Такова общая схема. Однако в природе часто возникают ситуации, когда ключевое значение приобретает тот или иной фактор, в других случаях не являющийся определяющим, а зачастую опосредованно оказывающий влияние на динамику потока.

Глава 3

Факторы формирования русел равнинных рек

3.1. Природные факторы

Классической основой анализа факторов формирования русла того или иного морфодинамического типа принято считать постулат В.М.Лохтина (1897): "Всякая река, если рассматривать ее не на отдельных лишь пунктах, а во всем целом, образуется сочетанием трех основных, друг от друга независимых элементов, а именно:

1) многоводности, определяемой атмосферными и почвенными условиями выпадения осадков на речную область и стока их в реку из притоков, 2) ската или крутизны, обусловливаемой рельефом пересекемой рекой местности, и 3) большей или меньшей размываемости ложа реки, соответствующей свойствам прорезываемых ее течением слоев земли. Эти три элемента определяют характер реки, придают ей те или другие своеобразные черты, которыми она отличается от других рек, и все те гидравлические факторы, которые мы можем наблюдать на каждом отдельном поперечном сечении" (цитируется по изд. 1948; с. 24).

Развивая идеи В.М.Лохтина, Н.И.Маккавеев (1955) сформулировал положение о трех направлениях, по которым определяющие факторы воздействуют на процесс формирования русла: "Эрозионно-аккумулятивные процессы, совершающиеся в сети потоков, текущих по поверхности суши, определяются сложным взаимодействием явлений, одни из которых влияют в основном на механическую силу потоков (топография местности, сток воды), другие – на противозрозионную устойчивость ложа (свойства пород, растительность), третьи – на подготовку материала (выветривание)" (с. 135).

Применительно к формированию русел природные факторы могут быть сгруппированы следующим образом: 1) определяющие мощ-

ность речного потока, повышенное значение которой является гидравлической предпосылкой перехода от меандрирования к разветвленности (водоносность реки, уклон дна долины); 2) способствующие или препятствующие расширению русла за счет размыва берегов при повышенной мощности потока, что обеспечивает реализацию механизма перехода к разветвленности (состав пород, почвенно-растительный покров, неравномерность стока, ледовые явления, мерзлота, ветер и волнение); 3) способствующие или же препятствующие переходу первичных черт меандрирования и разветвленности на более высокий таксономический уровень – закреплению побочной или осередков и их превращению соответственно в пойменный сегмент или остров, а впоследствии – в пойменный массив того или иного генезиса (растительность, неравномерность стока, мутность потока и состав наносов). В "чистом" виде эти факторы проявляются в условиях свободного развития русловых деформаций, обеспечивая формирование широкопойменных русел. Формирование морфологического облика врезанных русел определяется при значительной, а иногда и определяющей роли особенностей геолого-геоморфологического строения долины и самого русла. С выходами в русле скальных и трудноразмываемых пород связаны скульптурные и скульптурно-аккумулятивные разветвления. К местам снижения транспортирующей способности потока (выход реки с гор на равнину, в местах расширения дна долины или при подпоре от коренных мысов и сужений долины) приурочены аккумулятивные разветвления. Врезанные излучины развиваются иными, очень медленными темпами по сравнению со свободными, и имеют часто иное (морфоструктурное) происхождение.

Среди гидрологических факторов наиболее существенную роль в русловом режиме реки играет **сток воды**, характеризующийся водоносностью реки и неравномерностью стока, сезонной и многолетней. Показателем водоносности реки служит средний многолетний расход воды (норма стока). С повышенной водоносностью связывали формирование разветвлений К.И.Россинский и И.А.Кузьмин (1947), М.А.Великанов (1958), Н.И.Маккавеев (1955) и др. Значения нормы стока использовались многими исследователями в качестве характерного расхода воды при построении *QI*-диаграмм (Lane, 1957; Ostercamp, 1978; Begin, 1981), в зависимостях, определяющих параметры форм русла, например, радиусы кривизны излучин

(Маккавеев, 1955) и т.д. Удовлетворительные результаты этих построений определены использованием выборок по регионам с однородными физико-географическими условиями, в пределах которых норма стока хорошо коррелирует с руслоформирующим расходом воды (Carson, 1984; Ободовский, 1987). Влияние различной водоносности на тип русла (при прочих равных условиях) хорошо прослеживается в рукавах одной и той же реки, особенно при наличии пойменной многорукавности. Так, на средней Оби, нижней Лене основное русло характеризуется русловой многорукавностью, в то время как боковые рукава, забирающие 2–10% общего расхода воды, меандрируют; меандрирующими являются пойменные ответвления нижней Оби, нижней Лены и нижней Волги.

Однако использование нормы стока при построении обобщенных гидролого-морфологических зависимостей, выходящих за рамки конкретного региона, часто не приводит к желаемым результатам, поскольку в отношении процессов руслоформирования понятие нормы стока рек носит абстрактный характер, а для временных водотоков – вообще не имеет физического смысла. Поэтому в качестве количественной характеристики, учитывающей как водоносность, так и вариации стока, целесообразно принимать такой расход воды, который в многолетнем плане оказывал бы наиболее существенное воздействие на русло. Первые попытки разработки методики определения величины такого расхода, называемого руслоформирующим (эффективным, доминантным), были предприняты еще в 30-ые годы XX века Ф. Шаффернаком и Л. Людином. Ф. Шаффернак оперировал с уровнями воды, соответствующими им значениями удельной влекущей силы и продолжительностью стояния уровней. Л. Людин в качестве меры воздействия потока на русло предложил вместо влекущей силы рассматривать сток наносов. Однако, предположив линейный характер связи расходов воды и наносов, он получил эквивалентность руслоформирующего расхода среднегодовому.

Критически рассмотрев построения Ф. Шаффернака и Л. Людина, Н.И.Маккавеев (1955) пришел к выводу, что "сама мысль об использовании такого показателя, как твердый сток, не вызывает возражения, так как расход, оказывающий в течение годового цикла максимум механического воздействия на ложе реки, должен, по-видимому, оставлять в рельефе русла наиболее существенные следы по сравнению с другими расходами. Не следует забывать, что наносы, транс-

портируемые потоком, постоянно обмениваются материалом с руслообразующим аллювием, и чем больше содержание наносов в потоке, тем (при прочих равных условиях) с более ощутимыми результатами в отношении формирования аккумулятивных форм рельефа происходит этот обмен" (с. 183). Таким образом, согласно концепции Н.И.Маккавеева, руслоформирующий расход Q_{ϕ} – это расход воды, при котором в многолетнем плане проходит наибольший сток наносов, вследствие чего его влияние на русло оказывается максимальным. Величина Q_{ϕ} определяется по максимуму кривой (названной им условно "эпюрой руслоформирующих расходов"), проведенной в поле координат Q и R_p , где R – соответствующий Q расход наносов, p – повторяемость расхода воды Q ; а для рек с неизученным стоком наносов – Q и $\sigma Q^m I p$, где I – уклон водной поверхности, соответствующий данному расходу воды, $m = 2-3$ – параметр, зависящий от состава руслоформирующих наносов, $\sigma = 0,5-1,0$ – коэффициент, зависящий от ширины разлива воды в половодье по пойме. В последнем случае принимается, что $\sigma Q^m I \approx R$, что и дает основание для построения зависимости.

Для крупных рек Русской равнины с восточно-европейским типом водного режима было установлено (Маккавеев, 1955), что в подавляющем большинстве случаев эпюра имеет два максимума, один из которых соответствует приблизительно среднему максимуму половодья, а второй – несколько выше среднегогодового расхода воды.

Методика Н.И.Маккавеева была применена для рек Сибири (Чалов, 1979) и Средней Азии (Чалов, Белый, 1984), Приморья (Сахарюк, 1980), Европейской части бывшего СССР (Власов, Чалов, 1991), Украины (Ободовский, 1987), Алтая (Белоцкий и др., 1995). О применении аналогичной методики расчета руслоформирующего расхода воды сообщается в работах ряда зарубежных ученых (Neff, 1967; Andrew, 1980; Nolan, Lisle, Kelsey, 1987); при этом ее авторство приписывается М. Волману и Й. Миллеру (Wolman, Miller, 1960).

В результате многолетних исследований было выполнено районирование территории СССР по условиям прохождения руслоформирующих расходов (Русловые процессы на реках СССР, 1990), количество которых изменяется от одного до трех. При этом установлено, что форма эпюры зависит от типа водного режима (например, при алтайском и тянь-шанском типах эпюры имеет трапециевидную фор-

му, что отражает непрерывность активных русловых переформирований во время растянутого многопикового половодья). Генетическая связь формы эпюры руслоформирующих расходов с типом водного режима реки иллюстрируется хорошим соответствием выделенных районов со схемой гидрологического районирования П.С.Кузина и В.И.Бабкина (1979). Таким образом, руслоформирующий расход является интегральной характеристикой, отражающей не только водоносность реки, но и ее гидрологический режим, в том числе особенности транспорта наносов.

Полагая, что руслоформирующая деятельность потока происходит во все фазы водного режима, а произведение Rp (или пропорциональное ему σQ^{mIp}) рассматривая как показатель ее интенсивности в многолетнем разрезе, можно "расчленив" площадь эпюры на секции, соответствующие тем или иным характерным чертам типа русла и русловым формам, образование которых определяется мощностью потока. Этот прием осуществляется посредством проведения в поле координат $Q-Rp$ трех горизонтальных линий, секущих площадь эпюры и соответствующих значениям расхода воды (рис. 3.1), при которых:

1) происходит выход воды на пойму – "линия поймы"; 2) достигается значение $QI = 0,1$, достаточное для формирования осередков – "линия осередков"; 3) достигается значение $QI = 0,4$, достаточное для формирования русловой и пойменной многорукавности, а также образования прорванных излучин – "линия многорукавности". Порядок взаимного расположения данных линий и их соотношение с элементами эпюры руслоформирующих расходов отражает сочетание элементов различных структурных уровней в морфодинамическом облике русла.

Для верхней Оби от слияния Бии и Катунь до впадения Чарыша, где характерно повсеместное развитие осередков и русловой многорукавности, эпюра имеет значительную полноту, причем основная часть ее площади расположена ниже линии затопления поймы (рис. 3.1А). Это показывает, что почти вся руслоформирующая деятельность потока происходит в пределах пойменных бровок. То обстоятельство, что практически вся эпюра лежит выше "линии осередков", свидетельствует о достаточной в половодье и в межень мощности речного потока для формирования осередков. "Линия многорукавности" пересекает эпюру в ее средней части; отсюда следует, что на расходы половодья, когда происходит образование формы русла,

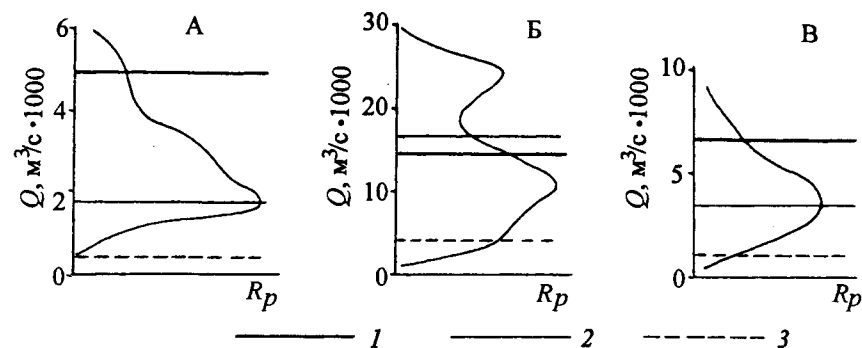


Рис. 3.1. "Эпюры" руслоформирующих расходов воды:
А – верхняя Обь, Б – нижняя Обь; В – Чулым. 1 – линия "поймы"; 2 – линия "многорукавности"; 3 – линия "осередков".

приходится заметная доля руслоформирующей деятельности потока; соответственно, мощность его достаточна для формирования русловой разветвленности. Действительно, для верхней Оби характерны наиболее сложные разновидности разветвленного русла.

Для рек с развитой пойменной многорукавностью, каковой является Обь в нижнем течении, характерно наличие верхнего пика эпюры выше линии затопления поймы, расположенной в свою очередь ниже "линии многорукавности" (рис. 3.1Б). Верхний пик отражает концентрацию руслоформирующей деятельности половодного потока при затопленной пойме, а его положение выше "линии многорукавности" приводит к формированию разветвленности на пойменном уровне, так как достаточная мощность потока достигается лишь после выхода воды на пойму.

Для Чулыма (приток средней Оби), имеющего свободно меандрирующее русло, эпюра практически целиком расположена ниже линии многорукавности (рис. 3.1В). Формирование осередков по гидравлическим условиям возможно лишь в половодье, в то время как при расходах воды 100–300 м³/с, соответствующих продолжительной летней межени, мощность потока оказывается недостаточной. Отражением этого обстоятельства являются хорошо сформированные побочки с заметными признаками их отторжения в половодье (побочневые протоки), причлняющиеся к берегу в межень; русло извилистое, излучины формируются благодаря зарастанию побочней.

Сток наносов важен при анализе морфодинамического типа русла как в комплексе со стоком воды (через эпюру руслоформирующих расходов), так и сам по себе. При дефиците наносов поток непосредственно контактирует с коренным ложем реки или подстилающими русло отложениями. В условиях ограниченного развития русловых деформаций отступление трудноразмываемых берегов, сложенных прочными, вплоть до скальных, породами практически не происходит, и вся энергия потока идет на размыв дна. В результате формируются врезанные русла. При свободных условиях развития русловых деформаций глубинная эрозия (врезание) широкопойменных рек значительно более замедлена из-за образования между коренным ложем и потоком слоя подвижных наносов, в том числе возникающих за счет размыва дна и берегов. Избыточное количество в потоке наносов по отношению к его транспортирующей способности, вне зависимости от источника их поступления, сопровождается аккумуляцией и повышением отметок дна.

Наличие и степень сложности аккумулятивных образований, особенно в местах снижения транспортирующей способности потока, зависит, в первую очередь, от того, насколько насыщен поток наносами, поступающими с вышележащего участка. При этом сток наносов рассматривается как независимый фактор руслоформирования. Однако придание ему именно такого значения, особенно на широкопойменных реках, находящихся в свободных условиях развития русловых деформаций (за исключением дельт), представляется некорректным. Дело том, что сток наносов по генетическому признаку может быть подразделен на сток наносов, поступающих с водосбора в результате эрозионной деятельности водотоков более низких порядков и процессов денудации на склонах, и сток наносов, образующихся в результате эрозии русла и берегов в процессе взаимодействия потока и русла. Количество последних в свою очередь зависит от состава руслообразующих наносов и аллювия, слагающего берега, а также от гидравлических характеристик речного потока, то есть не является независимым фактором.

Подтверждением этого может послужить способность реки восстанавливать первоначальные значения стока наносов при искусственном "осветлении потока" в нижних бьефах гидроузлов. Здесь за счет размыва дна и берегов происходит постепенное нарастание по длине реки стока наносов до тех пор, пока не будут достигнуты его

первоначальные значения, соответствующие веками сложившимся равновесным условиям. Так, в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС (Беркович и др., 1981) на 20-километровом приплотинном участке средние скорости размыва пойменных берегов составляют 5-10 м/год при максимальных значениях 20-40 м/год непосредственно у плотины. Интенсивность нарастания стока наносов составляет здесь около 0,055 млн. м³/км в год. Ниже по течению на 90-километровом участке от г. Новосибирска до с. Дубровино интенсивность нарастания стока наносов уже вдвое меньше – 0,026 млн. м³/км в год, и к концу данного участка величина стока наносов практически достигает бытовых значений.

Интересный результат искусственного изменения стока наносов при неизменной водоносности реки Истуит (Великобритания, Уэльс) описывают Дж.Левин, С.Бредли и М.Маклин (Lewin, Bradley, Macklin, 1983). В XIX веке в результате интенсивной разработки в бассейне реки рудных месторождений в русловую сеть поступило большое количество суспензионных отходов. К началу XX века изначально меандрирующее русло превратилось в разветвленное, при этом слой аккумуляции на пойме достиг 4 м. После прекращения интенсивного поступления наносов извне, русло реки врезалось в пойменные отложения и вновь стало неразветвленным.

Таким образом, можно говорить о стоке наносов и как об активном, и как о пассивном факторе русловых процессов – в отличие от стока воды, выполняющего только активную роль в руслоформировании, и геолого-геоморфологического строения дна долины и русла, являющегося исключительно пассивным фактором. Двойственная роль стока наносов определяется тем, что, с одной стороны, наносы поступают в поток с площади водосбора или вследствие размыва дна и берегов, а с другой – они создают формы аккумулятивного руслового рельефа, с которыми связано образование форм русла, т.е. непосредственно определяется механизм руслоформирования.

Ледовые явления в ряде случаев являются важным фактором формирования русел. Можно выделить следующие аспекты воздействия ледового режима реки на ее русло: механическое разрушение берегов льдинами во время ледохода, способствующее увеличению распластанности потока; образование заторов и зажоров в отдельных рукавах, что вызывает перераспределение стока в узле и способствует развитию других рукавов, свободных от льда; резкое увеличение

расходов воды и наносов при прорыве затора; промерзание рек и образование наледей, способствующих развитию пойменных рукавов потоками, обтекающими наледь, при весеннем увеличении стока; перенос и отложение вмержшего в льдины на вышележащих участках реки и притоках крупнообломочного материала, образующего в местах заторов и остановки льдин россыпи камней-одиночек или каменные орудки, при благоприятных условиях иницирующих формирование осередков; интенсивный ледоход, проходящий при невысоких уровнях, препятствующий росту осередков в высоту и их превращению в острова.

Интенсивное разрушение бровок пойменных яров плывущим льдом описано многими исследователями на различных реках Севера и средней полосы России (Маккавеев, 1955; Петров, 1974; Журавлев, 1987). По наблюдениям на верхней Оби бровки пойменных яров на вогнутых берегах и у оголовков островов разрушаются за период весеннего ледохода на 5–7 м, что соизмеримо со средней скоростью их размыва за весь последующий период открытого русла. Интенсивность разрушающего действия льда усугубляется в тех случаях, когда ледоход проходит практически всегда при уровнях, не превышающих уровни выхода воды на пойму.

Факты формирования разветвлений в результате образования и прорыва заторов и зажоров известны еще со времен В.М.Лохтина (начало XX века), показавшего, что одиночное разветвление русла р. Невы у с. Ивановского вызвано зазорами ниже порогов. Анализируя переформирование Якутского разветвления на р.Лене, А.В.Руднев (1973) установил, что причиной перемещения главного течения реки в правый рукав в конце XVIII века и обмеления левого рукава у г. Якутска – Городской протоки – был прорыв чрезвычайно мощного затора льда. Аналогичная ситуация обнаружена в другом узле разветвления средней Лены – Хайгылаахском (Чалов, 1979). Наличие на Северной Двине у г. Котласа пойменной многорукавности, по мнению Н.И.Маккавеева (1955), также связано с постоянными заторами льда в основном русле реки.

Промерзание рек и образование наледей характерно в основном для малых и средних рек зоны вечной мерзлоты, где их влияние на морфологический облик реки может оказаться определяющим. По наблюдениям Н.И.Маккавеева "огромные наледы – "тараны"... иногда перекрывают русло и пойму слоем льда в несколько метров тол-

щиной и имеют объемы до нескольких миллионов куб. метров. Такие препятствия обычно вызывают блуждание русла" (1955, стр. 168). В ряде работ ГГИ наледная многорукавность выделяется как самостоятельный тип русла (Прокачева и др., 1982).

Неожиданное, на первый взгляд, наличие в русле равнинной реки с песчаным аллювием каменных орудков часто объясняется аккумуляцией крупнообломочного материала, вмержшего в лед в верховьях реки и ее притоков, принесенного на равнину и отложенного в местах массового скопления льдин. Камни-одиночки являются характерным явлением на равнинных галечно-валунных реках Восточной Сибири и Дальнего Востока, протекающих в горном окружении.

Наиболее существенный аспект влияния растительности на морфологию русла – ее определяющая роль в процессе превращения формы руслового рельефа в форму более высокого порядка (форму русла). Действительно, непременным условием превращения побочной в сегмент излучины или осередка в остров является появление на их поверхности растительного покрова достаточной густоты, который, создавая дополнительное гидравлическое сопротивление, способствует аккумуляции влекомых наносов и осаждению взвешенных частиц на его поверхности при затоплении в половодье или паводок.

Интересные данные приведены В.Графом (Graf, 1978), исследовавшим влияние тамариска, завезенного в Северную Америку в начале XIX века, на морфологический облик рек, протекающих по плато Колорадо, где в результате повсеместного расселения этого кустарника побочки превратились в пойменные массивы, а осередки – в острова и массивы островной поймы.

Другой аспект влияния прибрежной растительности заключается в том, что она, произрастая на береговом откосе, препятствует размыву берегов, что, при прочих равных условиях, определяет меньшую ширину русла. По данным В.Блэкбурна, Р.Найта и Дж.Шустера (Blackburn, Knight, Schuster, 1982) в результате расселения тамариска по берегам реки Брэнс (США, штат Техас) ее ширина уменьшилась за 38 лет с 157 до 67 м. Уменьшение ширины препятствует формированию разветвленного русла и может привести к его трансформации в меандрирующее. С другой стороны, некоторые породы деревьев своей корневой системой нарушают устойчивость береговых откосов, способствуя тем самым их размыву.

Ветер как фактор русловых процессов почти никогда не является определяющим, и его влияние заметно лишь на крупных реках. Наиболее существенный аспект руслоформирующей деятельности ветра – это создаваемое им волнение, в результате которого может происходить разрушение берега, на отдельных участках сопоставимое по интенсивности с размывами в половодье. На больших реках деятельность волн заметно разрушает берега даже в межень. На средней Оби разрушение берегов волнами не только в половодье, но и при низком уровне воды было отмечено Н.И.Маккавеевым (1955); это явление широко распространено на широтном участке верхней Оби, на нижней Лене, Амуре.

Систематический эоловый перенос песка в одном направлении может способствовать формированию островов у наветренного берега. По мнению Н.И.Маккавеева и др. (1966), эоловая деятельность является одной из причин формирования на участке р.Оби ниже впадения р.Чарыша односторонних разветвлений и направленного смещения русла в сторону подветренного левого берега.

Существенное влияние ветер может оказывать в устьях рек посредством сгонов и нагонов. Это наиболее характерно для крупных рек, впадающих в моря Северного Ледовитого океана, которые имеют обширные дельты. Перераспределение расходов воды и наносов по рукавам в результате локальных изменений уровня воды может приводить к изменению темпов и направленности русловых деформаций.

3.2. Руслообразующие наносы и устойчивость русла

Анализируя обширный фактический материал, М.Карсон (Carson, 1984) и Р.Фергюсон (Ferguson, 1984) пришли к выводу, что при достижении потоком достаточной для формирования разветвленности мощности, препятствовать этому могут слабая размываемость берегов и повышенная крупность наносов.

Принимая значение мощности потока постоянным, Д.Бразертон (Brotherton, 1979) определил, что главными факторами в этом случае будут размываемость берегов и способность материала, поступающего в русло в результате размыва берегов, быть перенесенным потоком. В качестве количественных характеристик им были приняты

скорость поступления материала в русло и транспортирующая способность потока по отношению к крупности поступающего материала. Формирование разветвленных русел происходит, если легкая размываемость берегов сочетается с небольшой транспортирующей способностью потока, неспособного переработать и удалить за пределы рассматриваемого участка русла весь поступивший в него материал; в противном случае доминирует процесс меандрирования. Этим можно объяснить тот факт, что наиболее сложные русловые разветвления верхней Оби – Усть-Ануйские, Акутихинские – расположены непосредственно ниже участков, где на протяжении нескольких километров главное течение реки проходит вдоль подмываемых высоких надпойменных террас, сложенных крупно- и среднезернистыми песками (в то время как пойменные берега верхней Оби сложены преимущественно супесями и суглинками).

Аналогичные данные приводит Ю Лианьянь (You Lianyan, 1987), анализируя строение русла крупнейших рек Китая. На участках Янцзы, где мощность пойменных глинистых и алевритовых отложений превышает мощность слоя песков, русло меандрирует; если же мощность песчаной толщи превышает мощность слоя глин и алевритов, то формируется разветвленное русло. На Хуанхэ, имеющей, как правило, песчаную пойму, преобладают осередки. Последнее обстоятельство подтверждает предположение, высказанное на основе результатов лабораторного моделирования русловых потоков С.Шуммом и Х.Ханом (Schumm, Khan, 1972), о том, что важную роль в процессе превращения гряд в русловые формы играет достаточная концентрация в потоке тонких частиц, выполняющих функцию цементирующего материала.

Таким образом, весьма существенная роль в формировании того или иного морфодинамического типа русла равнинных рек принадлежит составу руслообразующих наносов и устойчивости русел. Поскольку подвижность русловых образований находится в обратной зависимости от устойчивости, то в таком же соотношении интенсивность русловых деформаций, соответствующих тому или иному морфодинамическому типу русла, находится с крупностью руслообразующих наносов.

Одной из причин формирования разветвленного русла является его слабая устойчивость и относительное снижение транспортирующей способности потока, приводящее к массовому переходу наносов

из взвешенного во влекомое состояние с образованием гряд в виде осередков. Равнинные реки с неустойчивым руслом, как правило, не имеют излучин, поскольку последние быстро разрушаются при блуждании динамической оси потока в пределах широкого русла.

Относительно прямолинейные, неразветвленные широкопойменные русла довольно быстро трансформируются в извилистые при шахматном расположении побочной. При этом скорость этой трансформации зависит от устойчивости русла, проявляющейся в интенсивности смещения побочной: чем медленнее они перемещаются, т.е. чем больше устойчивость русла, тем вероятнее зарождение излучин. Размеры излучин (радиус кривизны, шаг, стрела прогиба и ширина пояса меандрирования) так же находятся в связи с устойчивостью русла: с ее ростом формируются более крутые излучины (Маккаев, Чалов 1986).

Непосредственное влияние состава руслообразующих наносов равнинных рек на формирование морфодинамического типа русла имеет разнообразные проявления. Установлено, что на реках с песчаным аллювием в сужениях разветвленность русла уменьшается, в расширениях – возрастает; на равнинных реках с галечным аллювием наблюдается обратное соотношение (Белый, Беркович и др. 1979). Для извилистых русел установлена прямая связь между размерами свободных излучин и крупностью русловых наносов: при прочих равных условиях излучины песчано-галечных русел в 1,6–2,2 раза больше, чем песчаных (Матвеев, 1988)

Руслообразующие наносы равнинных рек представлены гравийно-галечным или галечным материалом, если река протекает в условиях горного рельефа или распространения моренных или водноледниковых отложений, песчаным материалом с примесью гальки и гравия или без них – в пределах низменных равнин. В верховьях равнинных рек, расположенных на возвышенностях, аллювий также часто галечно-валунный. В среднем и нижнем течении он – песчаный, но при пересечении возвышенностей или горных массивов снова становится галечно-валунным. На больших реках такие изменения, связанные со сложностью рельефа, могут быть неоднократными. В устьевых областях равнинных рек гидравлическая сортировка обуславливает последовательную смену песчаных наносов песчано-илистыми и илистыми. В тех случаях, когда реки пересекают сложенные лессами

или лессовидными отложениями территории (Амударья, Хуанхэ, Терек, Нил), наносы у них также песчано-илистые или илистые.

Пространственное распространение руслообразующих наносов различной крупности обуславливается геологическим строением бассейнов рек, литологией горных пород, с которыми взаимодействует поток, морфологией дна долины, формой русла и впадением притоков. Эти факторы действуют разнонаправленно и, при незначительных уклонах равнинных рек и даже тенденции уменьшения их вниз по течению, определяют отсутствие закономерного убывания средней крупности наносов по длине равнинной реки. При этом на относительно коротких отрезках наблюдается неоднократное изменение крупности и преобладание разных по гранулометрическому составу типов наносов на смежных участках.

В процессе перемещения речные наносы подвергаются истиранию и гидравлической сортировке. Первое описывается законом Штернберга $dx = d_0 e^{-ax}$ (x – дальность перемещения частиц наносов, a – коэффициент, зависящий от петрографического состава), который отчетливо проявляется в горах для частиц наносов, представленных достаточно устойчивыми горными породами (в основном кристаллическими). Однако проявление этого закона более или менее отчетливо лишь на больших равнинных реках, протекающих в горах (Енисей, Лена и их притоки), но это часто заглушается из-за неоднократного пополнения наносов обломочным материалом со склонов и из притоков. На равнинах истирание и измельчение песчаных частиц происходит очень медленно, и поэтому на первый план в изменении состава наносов выдвигаются геолого-геоморфологические условия: непрерывное по длине поступление наносов из подмываемых уступов поймы, аккумулятивных террас и других песчаных образований (флювиогляциальных, лимногляциальных, эоловых и пр.), а также гидравлическая сортировка, связанная с чередованием сужений и расширений дна долины, русла и т.д.

Гидравлическая сортировка руслообразующих наносов обуславливается уклоном

$$d_{cp} = k \cdot I \quad 3.1$$

или мощностью потока

$$d_{cp} = k \cdot \rho \cdot g \cdot V \cdot I, \quad 3.2$$

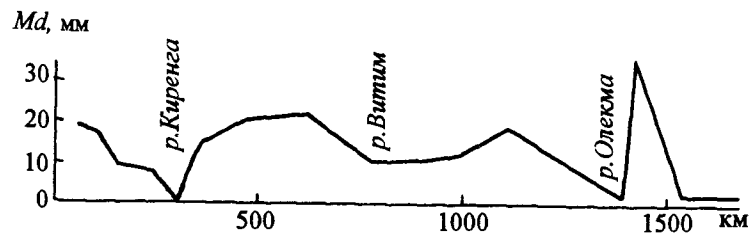


Рис. 3.2. Изменение крупности руслообразующих наносов (Md) в верхнем и среднем течении р. Лены.

где V – средняя скорость течения, I – уклон реки, ρ – плотность воды; она также отчетливо проявляется на реках с галечно-валунным или песчано-галечным составом наносов.

Тем не менее на участках большой протяженности, от верхнего до нижнего течения реки, прослеживается последовательная смена крупно- и среднезернистых песчаных наносов мелко- и тонкозернистыми. Изменение состава наносов от галечного до песчаного на больших реках осуществляется волнообразно через восстановление галечного состава при впадении притоков, особенно если они стекают с гор; между ними происходит закономерное уменьшение крупности наносов вплоть до песка. Это явление наблюдается в верхнем и среднем течении Лены, где выносы правобережных притоков, дренирующих возвышенное плато или горные территории (Киренга, Витим, Олекма), обуславливают существенное повышение средней крупности наносов ниже по течению (рис. 3.2).

Для рек, выходящих из пределов гор и в дальнейшем пересекающих равнины, характерны две формы замещения галечных (галечно-валунных) руслообразующих наносов песчаными: постепенный или скачкообразный. При скачкообразной форме, встречающейся при резком переходе от гор к равнине зависимость (3.2) имеет разрыв функции, соответствующей границе геоморфологических районов и, соответственно, галечного и песчаного русла (рис. 3.3). Отсутствие в зоне перехода источников поступления галечного материала из притоков и с бортов долины обуславливает несоответствие между мощностью потока и крупностью наносов. При этом избыток энергии реализуется в морфологии русла и руслового рельефа: формируются наиболее сложные морфодинамические типы разветвленного русла и многочисленные перекаты. Таково, например, изменение состава наносов и типа русла на Тереке (Лодина, Рашутин и др., 1987).

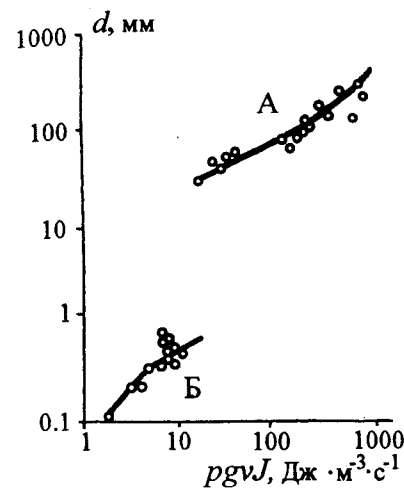


Рис. 3.3. Связь средневзвешенного диаметра руслообразующих наносов с удельной мощностью потока (р. Терек): А – горная часть, Б – равнинная часть

При постепенном переходе от гор к равнине в зависимости от гидравлических условий разные части русла сложены либо песчаным (побочни, отмели), либо галечным (плесовые участки, стрежневая зона потока) материалом с постепенным увеличением площади одних и сокращением других. На больших реках (Лена) русло в переходной области разделяется на лево- и правобережные стороны, различные по составу наносов (песчаную и галечную) на участке длиной в сотни километров. Обычно это наблюдается в условиях, когда большие реки протекают по границе крупных морфоструктур (на средней Лене справа расположено Алданское плато, слева – Лено-Виллюйская низменность).

Во всех случаях перехода от галечного русла к песчаному на равнинных реках процесс смены типов наносов происходит, минуя гравийный тип. Гравий встречается в составе руслообразующих наносов как примесь в песчаных и галечных его разновидностях; при этом доля его в пробах может быть весьма значительной, вплоть до образования гравелистых песков. Одновременно в песчаных и галечно-песчаных руслах встречаются фрагменты участка, выстилаемые гравием. Их образование связано исключительно с гидравлической сортировкой наносов по крупности на перекатах, в узлах разветвления или на крыльях излучин. Чисто гравийные русла на участках протяженностью хотя бы в несколько километров отсутствуют, в то время как песчаные и галечные распространены повсеместно. Выпа-

дение гравия как типа руслообразующих наносов и, соответственно, отсутствие гравийных русел объясняется непрерывно протекающим субаквальным биохимическим выветриванием и отчасти механическим дроблением частиц, которые наиболее интенсивно разрушает гравийную фракцию (Добровольская и др., 1991).

Обычно на равнинных реках со сравнительно однородным геологическим строением долины и русла наблюдается отчетливая связь средней крупности руслообразующих наносов с шириной русла в пойменных бровках $d_{cp} = kV_p^a$, где d_{cp} – средний диаметр наносов, мм; V_p – ширина русла в пойменных бровках, м; коэффициент k и показатель степени a зависят от водоносности реки, уменьшаясь с ее ростом.

В расширениях дна долины прослеживается изменение крупности наносов от их начала к концу. При этом максимальная крупность приходится не на сужение долины, а на начало расширения, где во время половодья уклон увеличивается из-за распластывания потока на пойме.

В пределах расширений долины средняя крупность руслообразующих наносов зависит от степени разветвленности русла, так как разделение потока на несколько рукавов вызывает большее снижение транспортирующей способности потока, чем на два рукава.

На разветвленных участках русла гранулометрический состав наносов служит показателем тенденции развития отдельных рукавов. Укрупнение наносов в одном из рукавов показывает, что по нему проходят в половодье наибольшие расходы воды и что в данный период его возможность конкурировать с другими рукавами относительно повышена. На врезающихся реках укрупнение наносов в одном из рукавов является более чутким показателем его развития, чем на аккумулярующих, где тенденция к укрупнению наносов в развивающихся рукавах проявляется слабее.

Учитывая широкий диапазон условий формирования руслообразующих наносов на реках России, распределение их по крупности неодинаково в различных регионах: в Европейской части, Западной и Восточной Сибири, Дальнем Востоке (рис. 3.4). В Европейской части России реки имеют, как правило, песчаный аллювий. Таковы Онега, Вычегда, Северная Двина, большая часть Печоры, реки Поволжья и самые крупные водные артерии – Волга, Днепр, Дон, Ока. В то же время в пределах этого региона отдельные участки рек характеризуются песчано-галечным, галечным, а иногда и галечно-валунным аллювием. Таковы реки, пересекающие моренные гряды

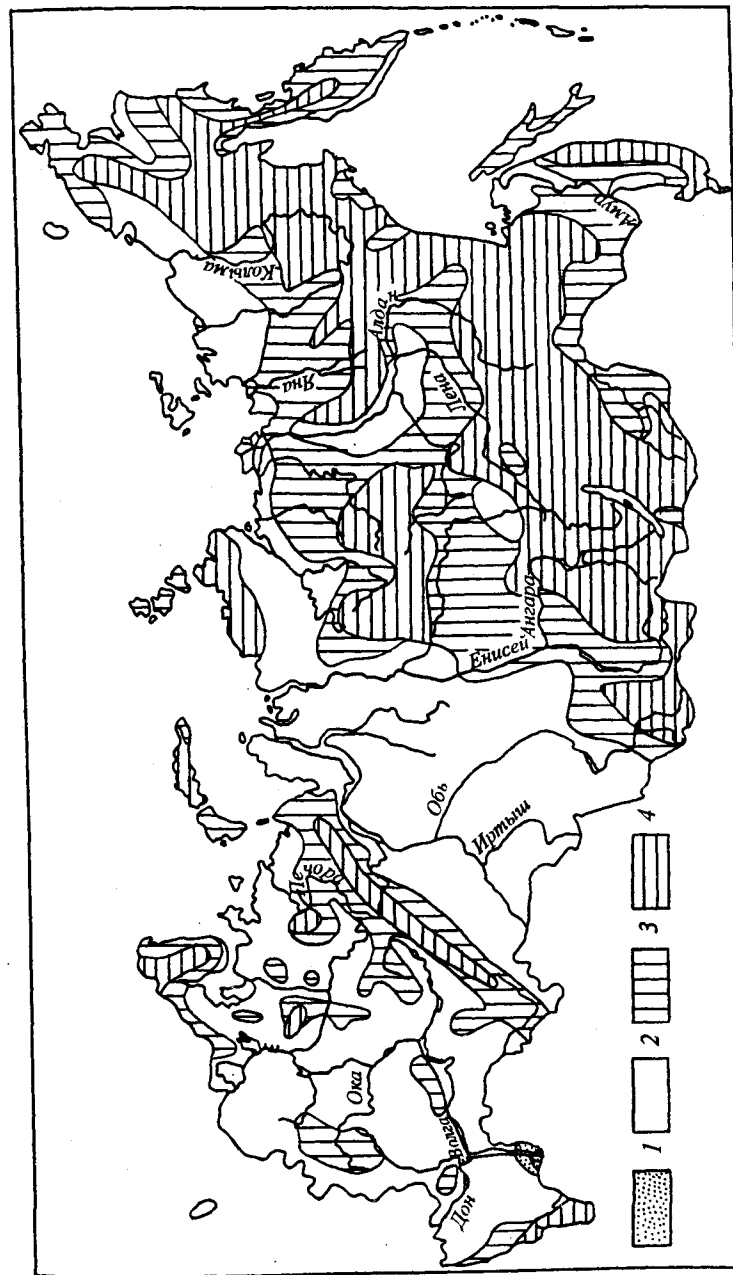


Рис. 3.4. Районирование территории России по типам руслообразующих наносов на реках: 1 – песчано-иллистые; 2 – песчаные; 3 – песчано-галечные; 4 – галечные и галечно-валунные наносы.

валдайского, московского и днепровского оледенений. Ледниковые отложения способствуют формированию песчано-галечного состава наносов в верхнем течении Днепра, Дона, Оки. Ряд рек прорезает области горизонтального залегания трудноразмываемых пород, образуя в них узкие долины с галечным аллювием в руслах: реки Тиманского кряжа, Среднерусской и Приволжской возвышенностей, Донецкого кряжа. Сюда же входят верховья Печоры и Вычегды, правобережные притоки Волги (Сура, Барыш), верховья левобережных притоков Дона (Хопер, Медведица) и ряд других рек.

Западная Сибирь, охватывающая бассейны Оби, Надыма, Таза, Пура и левобережных притоков Енисея, представляет собой единый крупный регион, реки которого имеют исключительно песчаный состав руслообразующих наносов. Обь от слияния Бии и Катунь и до самого устья характеризуется песчаным аллювием. Исключение составляет приплотинный участок нижнего бьефа Новосибирской ГЭС, где в результате глубинной эрозии и дефицита наносов сформировалась галечная отмостка или частично обнажилось коренное дно. К рекам с песчаным аллювием относятся почти все притоки Оби – Бол. Юган, Васюган, нижний Чарыш, Кеть, Вах, устьевая часть Томи, Чулым, нижнее течение Иртыша с притоками Тоболом, Ишимом, Тавдой и др., Таз, Пур, Надым, малые реки, самостоятельно впадающие в Северный Ледовитый океан.

Реки Восточной Сибири образуют наиболее крупный регион с галечно-валунным составом руслообразующих наносов. Здесь выделяются два бассейна – Енисей и Лены. Сам Енисей от истоков вплоть до слияния с Подкаменной Тунгуской выстилается галечно-валунным и галечным аллювием, ниже в его русле преобладают песчаные наносы. Правобережные притоки Енисея также характеризуются галечным аллювием, что соответствует их врезу в Среднесибирское плоскогорье. Лишь в самом верховье некоторое из них, протекая по поверхности траппов и имея широкопойменные долины, характеризуются песчаными наносами.

Лена, пересекая почти всю территорию Восточной Сибири с юга на север и часто меняя направление с субмеридионального на субширотное, отличается сложной и неоднократной сменой типов руслообразующих наносов. Вначале – это типично галечно-валунная река (от истоков до Синска – 1860 км от устья). Но перед устьями Киренги, Витима и Олекмы галечные наносы сменяются песчаными, после чего выносы из притоков восстанавливают галечно-валунный

состав наносов. Ниже на расстоянии примерно 200 км в русле наблюдается поперечная дифференциация аллювия по крупности: здесь русло разделяется на левобережную – песчаную и правобережную – галечную части. Начиная от Покровска, в русле преобладает песчаный аллювий. В нижнем течении Лены, там, где она расположена в "Ленской трубе" между Хараулахскими горами и кряжем Чекановского, руслообразующие наносы вновь становятся галечными. Лишь в вершине дельты Лены происходит смена их песчаными наносами, которые преобладают во всех дельтовых рукавах. Перед выходом на взморье в русле начинают доминировать песчано-илистые наносы.

Основные притоки Лены (Киренга, Витим, Олекма, Алдан, большая часть Вилюя) имеют галечные, а в среднем и верхнем течении – галечно-валунные русла. Более мелкие притоки (Бол. и Мал. Патом) выносят в Лену галечно-валунные наносы. Такой же характер имеют притоки Витима, Киренги, Олекмы, Алдана.

Реки Центрально-Якутской низменности (бассейны нижнего и отчасти среднего Вилюя) – песчаные. Пески выстилают русло Вилюя, начиная от впадения Мархи. Выше по течению оно галечное, так как расположено в пределах Среднесибирского плоскогорья, где река протекает в условиях ограниченного развития русловых деформаций и имеет врезанные русло.

Равнинные реки Дальнего Востока на значительном своем протяжении также имеют галечный состав аллювия. Это прежде всего относится к крупнейшей реке региона – Амуру, который имеет песчаный аллювий только в нижнем течении. Песчаным аллювием характеризуются низовья Амгуни и большая часть Усури.

Равнинные реки Северо-Востока, кроме Яны, Колымы, Индигирки и Анадыря в нижних течениях, галечные. Сюда же относятся реки Камчатки, расположенные среди гор, и некоторые реки Сахалина.

Состав руслообразующих наносов определяет устойчивость русел, проявляющуюся в интенсивности русловых деформаций – скорости перемещения русловых форм (побочней, осередков), размыве берегов, периодичности развития форм русла (спрямлении излучин, активизации одних и отмирании других рукавов и пр.). Эти характеристики меняются по длине рек в зависимости от геолого-геоморфологического строения речных долин, состава наносов, крутизны продольного профиля. Изменение устойчивости русла, как и других факторов русловых процессов, приводит к изменению типов русла.

Для оценки устойчивости рек России был использован наиболее приемлемый по информативности и простоте определения показатель – число Лохтина $L = d_{cp}/I$, где d_{cp} – средний диаметр наносов, мм; I – уклон, ‰. Этот показатель является достаточно репрезентативным для проведения региональных оценок. В основу районирования территории России (рис. 3.5) по степени устойчивости русел рек были положены принятые интервалы показателей устойчивости в классификации: неустойчивые – число Лохтина менее 2, слабоустойчивые – от 2 до 5, относительно устойчивые – от 5 до 10 и устойчивые – число Лохтина более 10. Как правило, наиболее устойчивыми являются русла крупных равнинных рек, протекающих в горных регионах (Витим, верхняя и средняя Лена, Алдан и др.), имеющие наиболее крупный галечно-валунный или галечный аллювий. Естественные деформации русла этих рек проходят очень замедленно и сводятся к периодическому разрушению аллювиальной отмостки, бронирующей русло, при полной стабильности форм русла в плане. Значения числа Лохтина здесь имеют очень большие величины (сотни единиц), а сами русла в классификации по степени устойчивости относятся к абсолютно устойчивым. Реки с такими характеристиками устойчивости формируют, как правило, врезанные относительно прямолинейные, неразветвленные русла или врезанные излучины. Наименьшей устойчивостью русел (слабая устойчивость) характеризуются песчаные реки юга лесной, лесостепной и степной зон Европейской части России и Западной Сибири, где в условиях свободного развития русловых деформаций русловые переформирования протекают наиболее интенсивно. Сюда относятся низовья Волги, правобережные притоки Дона, среднее течение Оки и ее правобережные притоки. Из северных рек Европейской части России слабо устойчивое русло имеют Северная Двина в среднем течении, Вычегда, нижнее течение Печоры. В пределах Западной Сибири слабоустойчивое русло имеют верхняя Обь от слияния Бии и Катунь до Новосибирского водохранилища (отдельные участки ее здесь являются неустойчивыми) и ее левобережные притоки, среднее и нижнее течение Надыма, Таза, Пура. Русла этих рек характеризуются числом Лохтина от 2 до 5, являются равнинными широкопойменными с простыми сопряженными, сложными сопряженными разветвлениями или свободными излучинами.

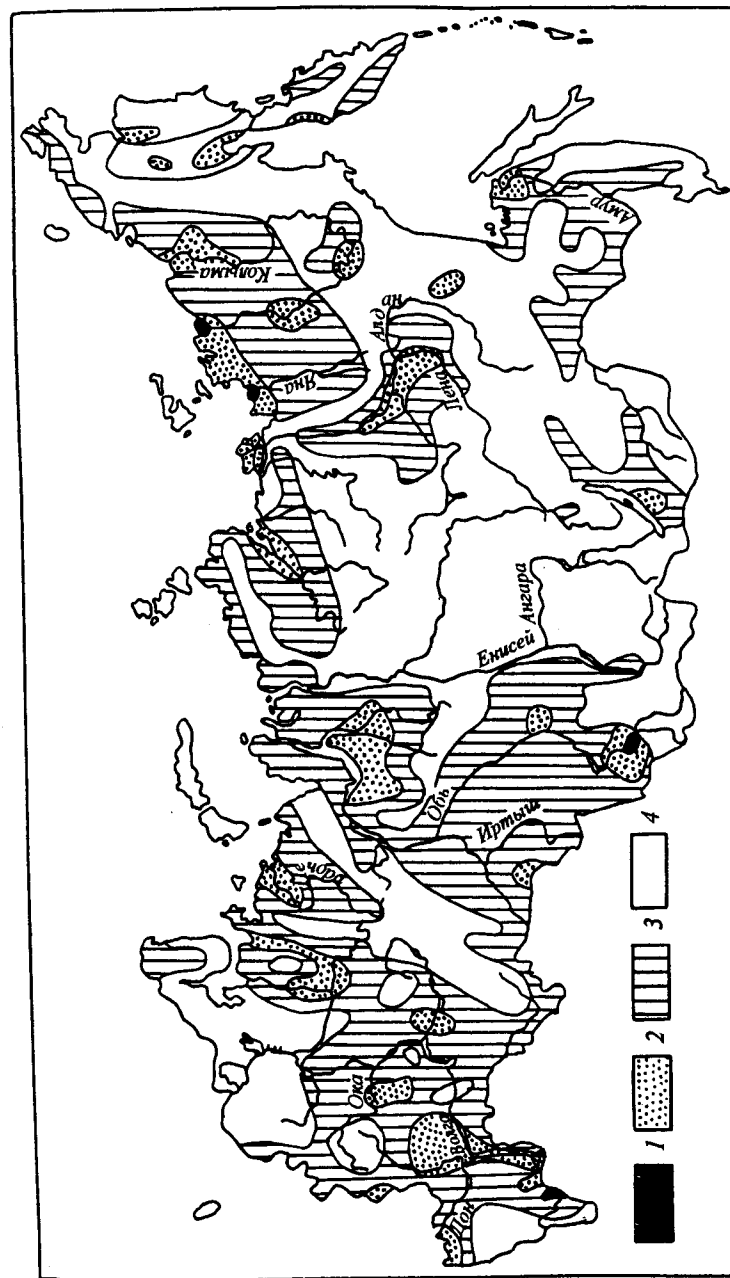


Рис. 3.5. Районирование территории России по степени устойчивости (число Лохтина) речных русел: 1 – неустойчивые ($L < 2$); 2 – слабоустойчивые ($L = 2-5$); 3 – относительно устойчивые ($L = 5-10$); 4 – устойчивые ($L > 10$).

Крайне редко встречаются реки с показателем устойчивости менее 2 (неустойчивые). В Европейской части – это нижнее течение Терека, в Сибири – отдельные участки верхней Оби выше Барнаула, низовья Яны и Индигирки. В последнем случае мерзлота сдерживает темпы деформаций, несмотря на очень низкий показатель устойчивости. Для таких участков рек характерно формирование наиболее сложных типов разветвлений.

Региональные различия устойчивости речных русел в основном соответствуют изменениям состава руслообразующих наносов по крупности. Так, в пределах Европейской части России заметно преобладание рек с относительно устойчивым и слабоустойчивым руслом. Границы довольно близко совпадают с границами распространения песчаных руслообразующих наносов. В то же время в пределах этих районов слабой устойчивостью отличаются равнинные широкопойменные разветвленные русла, а относительной устойчивостью – реки с преобладанием адаптированных излучин.

Западная Сибирь, охватывающая бассейны Оби, Надыма, Таза, левобережных притоков Енисея, почти целиком характеризуется преобладанием рек с относительно устойчивым руслом; их распространение коррелируется с районами, реки которых имеют песчаные наносы. Слабоустойчивые русла имеют ограниченное распространение и являются в основном разветвленными. Юг Западной Сибири, включающий низовья Бии и Катунь (кроме их разветвленных участков), Чарыш и Алей, характеризуются очень высокими показателями устойчивости речных русел из-за повышенной крупности наносов.

Реки Восточной Сибири в большинстве своем очень устойчивые. Здесь выделяются два крупных бассейна – Енисея и Лены. Енисей и его правобережные притоки выстилаются почти на всем протяжении галечно-валунным аллювием и характеризуется устойчивым руслом. Лена, которая отличается неоднократной сменой по длине состава наносов, изменяет характеристики устойчивости почти в полном соответствии со сменой их типа. При этом участки реки со слабоустойчивым руслом отличаются сложными разветвлениями, относительно устойчивым – простыми односторонними разветвлениями, устойчивым – относительно прямолинейным руслом. Основные правобережные притоки Лены, за исключением низовий Алдана и приустьевое отрезка Киренги, имеют очень устойчивое русло. Русло Вилюя в среднем и отчасти нижнем течении относительно устойчиво (за ис-

ключением отдельных участков со слабоустойчивым руслом). Выше слияния с Мархой русло становится галечным, устойчивость его существенно возрастает.

3.3. Антропогенные факторы

Особое значение в процессе руслоформирования имеет хозяйственная деятельность, которая может не только изменить облик реки в результате непосредственного воздействия, но и заметно повлиять на практически любой из важнейших природных факторов. В этом отношении воздействие отраслей экономики, использующих водные и связанные с ними земельные ресурсы, применяющих те или иные технические средства и технологии или возводящих гидротехнические сооружения, является прямым или косвенным (рис. 3.6). Регулируя сток воды и наносов, они изменяют направленность и интенсивность русловых деформаций. С другой стороны, объекты и сооружения на реках испытывают воздействие русловых процессов или зависят от них и для своей защиты и нормального функционирования требуют возведения регулирующих и берегоукрепительных сооружений, проведения специальных мероприятий.

Непосредственное вмешательство в русло приводит к искусственной трансформации живого сечения, перераспределению расходов воды и скоростей течения по ширине, созданию техногенных форм руслового рельефа. Вместе с тем результаты воздействия на русловые процессы инженерных сооружений, мероприятий, технических средств и т.д. зависят от конкретных природных условий, в которых формируется речное русло, размеров реки и соотношения между самими антропогенными факторами при одновременном влиянии нескольких из них.

Во всех случаях антропогенного воздействия ему, при прочих равных условиях, наиболее подвержены малые реки. Чем крупнее река, тем больше сопротивляемость ее русла искусственным преобразованиям и тем меньше время релаксации – установления динамического равновесия в системе поток-русло после прекращения действия антропогенного фактора или после формирования русла с новыми характеристиками. Поэтому при массовом и постоянном воздействии на реки и их бассейны русла малых рек изменяются вплоть до их деградации, тогда как при та-

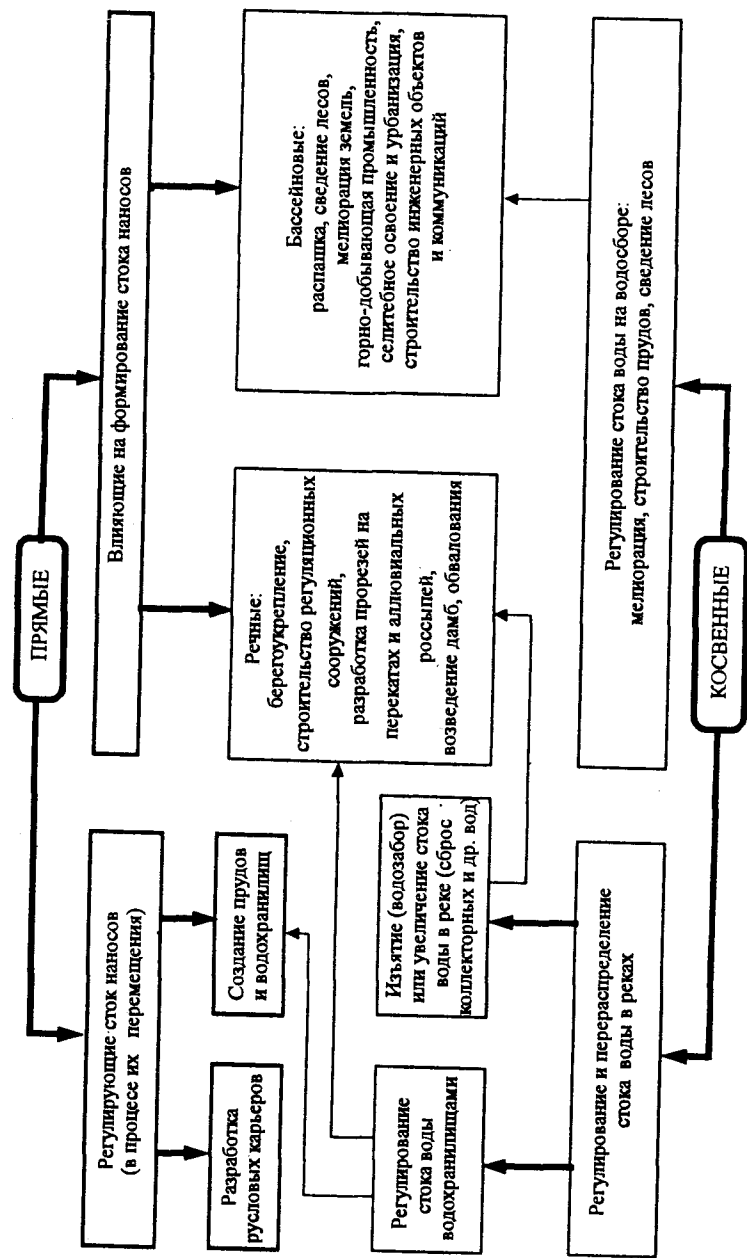


Рис. 3.6. Антропогенные факторы русловых процессов и их взаимодействие.

ком же уровне нагрузки больше реки остаются внешне неизменными, и их полная трансформация начинается лишь при масштабах воздействия, соизмеримых с размерами самой реки (по объемам стока воды и наносов, параметрам русла и т.д.) или превышающих эти размеры, когда изменения приобретают направленный необратимый характер. На больших реках это происходит при крупном гидротехническом строительстве, воздействие которого носит региональный характер. К такому же эффекту приводит воздействие на русло реки любого антропогенного "пресса", влияющего на транспортирующую способность потока. В этих случаях русловые процессы изменяются на всех реках региона или на больших участках крупных рек. К этому приводят сведение лесов и распашка водосборов, водозабор на орошение в больших объемах, строительство дамб обвалования, сплошное выправление русел судоходных рек. В результате происходят существенные изменения русловых процессов вплоть до смены морфодинамического типа русла, интенсивности и режима русловых деформаций. С другой стороны, чем больше антропогенных факторов одновременно воздействует на русло, тем вероятнее его изменения, меньше сопротивляемость и проблематичнее возможность релаксации. Например, глубинная эрозия в нижних бьефах ГЭС приобретает иногда незатухающий характер из-за дноуглубительных работ и добычи песка и гравия из русла, стеснения русла мостовыми переходами и различными береговыми сооружениями.

Важными природными условиями, определяющими сопротивляемость русел антропогенной нагрузке, являются свободные или ограниченные условия развития русловых деформаций и состав руслообразующих наносов. Широкопойменные реки со свободным развитием русловых деформаций наиболее подвержены трансформации, поскольку изменение условий протекания потока, стока воды и наносов практически сразу же сказывается в морфологии и динамике русла (поток управляет руслом). Чем больше устойчивость (по В.М.Лохтину и Н.И.Маккавееву) таких русел, тем консервативнее естественная форма русла по отношению к искусственному воздействию, и с прекращением последнего русло достаточно быстро возвращается в первоначальное состояние. Это не произойдет, если изменения приобрели необратимый характер (при зарастании и полном заилении русла, возведении "тяжелых" сооружений из неразмываемых материалов и т.д.). Врезанные русла, формирующиеся в условиях ограниченного развития русловых деформаций на реках с галечным и га-

лечно-валунным аллювием и особенно – со скальным ложем, наименее подвержены антропогенному воздействию, влияние которого в таких руслах проявляется лишь в течение длительных отрезков времени, незначительно или вообще не сказывается в морфологии русла. Однако при ликвидации фактора, ограничивающего деформации, направленные деформации происходят очень быстро и сказываются на выше- и нижележащих участках реки. Так, уничтожение земснарядом галечно-валунной отстойки на перекате при разработке дноуглубительной прорези приводит к быстрому размыву гребня переката, сопровождающемуся заметной (десятки сантиметров) "посадкой" уровней. Последняя, распространяясь регрессивно, вызывает уменьшение глубины на вышележащем перекате, который не размывается и играет роль бронированной отстойки естественного водослива. Продукты же размыва из прорези поступают на нижележащий перекат и, аккумулируясь на нем, приводят к его обмелению. Подобный противоречивый эффект дноуглубления характерен для перекатов верхней Лены, верхнего Алдана и других рек Восточной Сибири.

С другой стороны, прекращение действия антропогенного фактора в условиях, когда русло управляет потоком, не сопровождается восстановлением первоначальной формы русла или оно происходит в течение "исторических" отрезков времени, т. е. происходящие изменения носят направленный характер, а их результат является необратимым.

Сведение лесов и распашка водосборов изменяют режим стока воды и наносов, что приводит к развитию аккумулятивных процессов, заилению и, нередко, исчезновению малых рек. Скорость роста отметок их дна достигает 10-15 см/год, затухая со временем по мере роста уклона и увеличения транспортирующей способности потока (если при этом не происходит погребения реки собственными отложениями). Процессы обмеления в связи с эрозией почв на водосборах отмечаются даже на таких реках, как средний Дон и верхняя Ока. Б.В.Поляков (1930) зафиксировал обмеление Дона в начале XX века, связав его с интенсификацией эрозии почв и овражной эрозии; впоследствии это было подтверждено Е.Ф.Зориной и др. (1980), по данным которых 1913 г. характеризовался максимальным за последние 300 лет объемом выноса твердого материала из оврагов – около 3 млн. м³/год против 1,5 млн. м³ в конце XVII столетия и 2,5 млн. м³ в настоящее время. На верхней Оке (Беркович, 1993) аккумуляция наносов как следствие сельскохозяйственного освоения бассейна рас-

Таблица 3.1. Пространственные изменения русловых процессов на равнинных реках под влиянием хозяйственной деятельности

Изменения русловых процессов	Виды хозяйственной деятельности
Региональные	Сведение лесов и распашка земель на водосборах; крупное гидротехническое строительство; обвалование рек; сплошное выправление и дноуглубление русел судоходных рек; карьеры стройматериалов; отъем стока в магистральные каналы.
Местные	Мостовые переходы; инженерные сооружения на берегах и в руслах рек; выборочное выправление; дноуглубительные прорези на перекатах (эксплуатационное землечерпание); подводные переходы.
На урбанизированных участках	Комплекс мероприятий и сооружений

пространилась к 40-ым годам XX в. до Серпухова, причем в г. Калуге она имела скорость в отдельные периоды до 1,5 см/год.

Реки с преимущественно снеговым питанием отличаются большей многоводностью по сравнению с такими же по порядку реками с дождевым питанием. Это определяет большую устойчивость русел рек к антропогенным нагрузкам на бассейны северной половины Европейской территории России (далее ЕТР) и Сибири по сравнению с южными степными реками. Первые, несмотря на сведение лесов, мало пострадали от хозяйственной деятельности на водосборах, сохраняясь в естественном или близком к нему состоянии. На юге обмелению малых рек способствует ливневой характер стока, при котором в них поступает огромное количество твердого материала; малые реки не справляются с его транспортом и отмирают, а аккумуляция постепенно распространяется на средние и крупные реки.

Антропогенные изменения русел, связанные с хозяйственной деятельностью на водосборах, являются региональными, т. к. охватывают все малые реки в пределах регионов или большие реки на значительном их протяжении (табл. 3.1). Такой же характер имеют последствия крупного гидротехнического строительства, нарушающего естественные гидрологические факторы русловых процессов и пре-

вышающего транзитный сток наносов. В водохранилище задерживается практически весь сток руслообразующих наносов, причем максимум аккумуляции приходится на зону переменного подпора. Так, на Камских водохранилищах в зоне переменного подпора аккумулируется до 80% стока наносов (Матарзин и др., 1968), на Цимлянском водохранилище – до 50% без учета стока влекомых наносов (Вендров, Клюева, 1972). В зависимости от режима уровней водохранилища в районе впадения в него реки формируется или четко выраженное тело заиления, или же значительно более протяженная зона переменного подпора и регрессивной аккумуляции наносов. На Новосибирском водохранилище, где размах годовых колебаний уровня превышает 5 м, протяженность зоны, где речные условия периодически сменяются озерными, составляет около 200 км (Беркович, Виноградова, 1975). При этом в зоне регрессивной аккумуляции (Шелаболихинские-Кучукские перекаты) произошло заметное увеличение числа островов и осередков.

Не менее существенные изменения руслового режима реки происходят в нижнем бьефе гидроузла, где они связаны с тремя основными причинами: 1) уменьшением значения руслоформирующего расхода воды вследствие снижения повторяемости расходов половодья и увеличения повторяемости расходов высокой межени; 2) уменьшением мутности, а следовательно, изменением зависимости расходов наносов от расходов воды; 3) уменьшением уклона вследствие глубинной эрозии сначала на приплотинном участке, а затем и ниже по течению. В среднем течении Оби до зарегулирования стока в конце 50-х годов Новосибирским гидроузлом среди морфодинамических типов русла преобладали простые сопряженные разветвления. После сезонного перераспределения стока значение руслоформирующего расхода уменьшились на одну треть. Это отразилось в отмирании многих второстепенных (пассивных) рукавов, упрощении рисунка разветвленности и появлении элементов меандрирования главного течения реки.

Последствия регулирования стока Иртыша в нижнем бьефе Бухтарминской ГЭС, где значение руслоформирующего расхода воды уменьшилось почти вдвое, заключаются в том, что обширные массивы осередков заросли густым ивняком и превратились в молодые острова, вследствие чего на бывших относительно прямолинейных перекатных участках русла сформировались разветвления (Дегтярев, 1987). В дальнейшем, однако, здесь возможно приращение островов к берегу и пере-

ход к меандрирующему руслу, как это произошло на реках Арканзас (США, штат Колорадо) (Nadler, Schumm, 1981) и Платт (США, штат Небраска) (Hadley, Eschner, 1982), где в результате регулирования стока с забором воды на орошение разветвленное русло трансформировалось в меандрирующее; при этом ширина реки уменьшилась в 7–10 раз.

Кроме того, в нижних бьефах развивается трансгрессивная глубинная эрозия, а поступивший от размыва материал продвигается вниз по течению в виде "волны" аккумуляции (в отличие от участков реки выше водохранилищ, где развивается регрессивная аккумуляция, сопровождающая заиление водохранилища). Изменения внутригодового и многолетнего распределения стока и неустановившийся режим потока являются еще одной причиной трансформации русла на большом протяжении реки в нижнем бьефе. В то же время конкретные природные условия, в которых протекает река, определяют региональную специфику трансформации русел выше и ниже водохранилищ. Состав и мощность аллювия, геологическое строение дна реки (наличие скальных пород), устойчивость берегов к размыву являются причинами большого диапазона количественных характеристик этих трансформаций: ежегодная посадка уровня, связанная со снижением отметок дна и протекающая в течение нескольких десятков лет, колеблется на разных реках от 3 до 70 см, скорость продвижения трансгрессивной эрозии меняется в пределах 5–25 км/год и т. д. Минимальные величины размывов характерны для рек с устойчивым галечно-валунным или скальным ложем (Енисей, Кама, верхняя Волга).

Выше водохранилищ особенности трансформации русел определяются морфологией и шириной речной долины, величиной стока наносов, величиной и обеспеченностью руслоформирующих расходов воды. На реках с большим стоком и песчаным слабоустойчивым руслом (Обь выше Новосибирского, Дон выше Цимлянского, Неман выше Каунасского, Днестр выше Дубоссарского водохранилищ) скорость распространения регрессивной аккумуляции достигает нескольких километров в год. На реках с относительно малым стоком наносов, текущих в условиях ограниченного развития русловых деформаций и имеющих устойчивые галечно-валунные русла (Волга, Кама, Днепр выше верхних в каскадах водохранилищ), это явление практически не проявляется в течение нескольких десятилетий.

Дамбы обвалования способствуют концентрации максимальных расходов воды в русле на значительных расстояниях, что резко ме-

няет характер руслоформирования. Если руслоформирующие расходы до строительства дамб проходили в пределах пойменных бровок, форма русла и его рельеф не меняется коренным образом. На реках, где руслоформирующие расходы проходили при затопленной пойме, обвалование меняет направленность русловых деформаций. Во всех случаях возрастает роль экстремальных паводков, т.к. они теперь не затопливают пойму, а проходят в пределах русла. В песчаных слабостойчивых руслах рост удельных расходов воды способствует увеличению размеров русловых форм и гидравлических сопротивлений (при малых расходах воды), росту уровней, увеличению ширины русла; последнее сопровождается размывами берегов и самих дамб. В галечном русле рост удельных расходов после разрушения отмостки приводит к размыву и понижению отметок дна и свободной поверхности.

Значительное региональное воздействие на русловые процессы оказывает отъем стока в крупные мелиоративные каналы. Обычно это сопровождается аккумуляцией наносов и общим обмелением русла. На реках с большим стоком наносов формируются огромные песчаные отмели, которые перекрывают рукава и способствуют усилению размывов берегов (дейгиш на Амударье). Подобные явления характерны для многих равнинных рек Северного Кавказа (Кубань, нижний Терек) и Средней Азии (Амударья и Сырдарья).

Многие сооружения и мероприятия при единичном расположении на реке оказывают местное воздействие на русловые процессы; однако, будучи множественными в связи с технологией производства работ, они настолько сильно оказывают влияние, что приобретают региональный характер. К таким видам воздействия относятся русловые карьеры, в которых добываются песчано-гравийные смеси или галечники. В районах добычи естественный русловой рельеф замещается антропогенным, из русла извлекается большое количество аллювиального материала, которое превышает годовой сток руслообразующих наносов. В русле реки образуются обширные переуглубленные акватории, которые аккумулируют значительные объемы воды и перехватывают руслообразующие наносы. В некоторых случаях добывается древний аллювий, подстилающий русло. Следствием этого является снижение уровней воды, особенно значительное при малых расходах. Возникший дефицит наносов вызывает развитие трансгрессивной глубинной эрозии ниже карьера, а посадка уровней, увеличивая уклон водной поверхности выше карьера, — раз-

витие регрессивной эрозии. Заметное влияние карьеры оказывают на переформирования разветвленных участков русла.

Ввиду большей скорости врезания наиболее многоводного рукава, постепенно происходит окончательное перераспределение стока в его пользу и отмирание второстепенных рукавов. Если карьер располагается в одном из рукавов разветвленного участка, привлечение в него дополнительного расхода воды способно изменить естественный ход переформирований в узле разветвления. Такая ситуация в перспективе весьма типична для участка средней Оби от г.Новосибирска до с. Дубровино, где разработка карьеров может привести к нарушению стабильности сложившейся системы сопряженных рукавов, возникшей, в том числе, благодаря выправительным работам по трассе судового хода.

Степень перестройки русла при карьерных разработках зависит от состава руслообразующих наносов (галечных или песчаных) и исходной формы поперечного сечения, являющейся результатом длительного процесса взаимодействия потока и русла. В сравнительно узком и глубоком русле относительное приращение глубины, вызванное добычей, невелико и довольно долго не оказывает влияния на отметки свободной поверхности. Лишь при достижении карьером некоторого критического размера и относительной глубины происходит быстрая посадка уровней — до 20 и более см/год. В галечном русле разработка карьеров приводит к разрушению естественной отмостки и, как следствие, к резкой активизации процессов размыва дна. Вследствие этого, а также благодаря сравнительно большим уклонам, явление посадки уровней выражено здесь отчетливее, чем на песчаных реках, на которых оно, хотя и идет постоянно с самого начала добычи, но слабо выражено и быстро нейтрализуется в ходе русловых деформаций.

Карьерные разработки аллювиальных отложений в руслах рек особенно широко распространены на урбанизированных участках и вблизи крупных промышленных центров. Среди рек, как источников стройматериалов, выделяются Обь в районе Новосибирска, Волга у Нижнего Новгорода, Неман в районе Гродно и ниже Каунаса, Томь в районе Томска, нижняя Катунь, Бия у Бийска, Днестр в пределах Молдавии и Тернопольской области, Ока, Москва-река, Иртыш и многие другие. Аналогичное карьерам воздействие на русло оказывает гидротранспорт наносов из русел на территории, намываемые

под застройку. Однако на крупнейших реках (Лена) подобные мероприятия не сказываются заметно на состоянии русла, но все же способствуют активизации рукавов, в которых они производятся.

Путевые работы при сплошном выправлении русла на участках большого протяжения изменяют форму поперечного сечения и рельеф русла на перекатах за счет увеличения средней глубины, полноты живого сечения, уменьшения ширины русла, уничтожения или отторжения побочной, образования искусственных форм рельефа русла на месте отвалов грунта; одновременно увеличивается крупность руслообразующих наносов, что способствует повышению устойчивости русла. При проведении капитальных выправительных работ осуществляется углубление перспективных в отношении русловых перестроений и расположения трассы судового хода рукавов, спрямление излучин, сужение русла системами дамб и полузапруд. Нередко искусственно спрямляются крутые излучины (Иртыш), русла сужаются системами полузапруд (Белая), в разветвленных руслах искусственно активизируется функционирование развивающихся рукавов. На крупных реках грунт, извлекаемый дноуглубительным снарядом из разрабатываемой прорези, часто складывается в отвалы в непосредственной близости от фарватера на мелководной акватории при значительном удалении от берега. При благоприятных гидравлических условиях отвалы грунта могут стать очагами аккумуляции наносов и формирования осередков, а при их закреплении растительностью – островов. Так, на р. Лене у пос. Мохсоголоох в результате складирования грунта на отмель в центральной части русла резко ускорился рост осередка, а затем началось его зарастание. Образование островов на отвалах грунта отмечено на Оби в верхнем и среднем течении, на верхней Оке и многих других реках.

На малых и средних реках, где прорези на перекатах в состоянии вместить почти весь меженный поток или существенную его часть, землечерпание в комплексе с выправлением, напротив, может привести к отмиранию несудоходных рукавов в узлах разветвлений (Маккавеев, 1955). К подобному же эффекту приводит разработка капитальных прорезей со складированием отвалов в истоках несудоходных рукавов даже на таких крупных реках как Северная Двина, Вычегда.

Степень влияния дноуглубительных и выправительных работ на русловые процессы во многом зависит от того, в какой мере при их

проектировании учитывались закономерности развития русловых процессов. Наименьшее нарушение естественного хода деформаций достигается тогда, когда мероприятия выполняются в соответствии с естественными тенденциями развития русла. Поэтому проектирование такого рода работ обычно осуществляется на основе использования положительного (в отношении конечного результата) эффекта работы самого водного потока, его руслоформирующей деятельности (Проектирование судовых ходов..., 1964; Беркович, Чалов, 1993).

Выполнение капитальных выправительных работ приводит к стабилизации русла, повышению на реке гарантированных глубин (вплоть до обеспечения предельно возможных без изменения уровня режима), закреплению положения главного течения реки, вдоль которого проходит фарватер. На реках Сибири основным приемом выправления является дноуглубление с использованием отвалов грунта для создания грунтовых выправительных сооружений. Лишь в отдельных случаях возводятся тяжелые (каменно-набросные) дамбы и полузапруды. Таким образом увеличены глубины и обеспечены устойчивые судовые хода на верхней и средней (Новосибирск - устье Томи) Оби, где широко использовались при их проектировании закономерности развития сопряженных разветвлений русла, на отдельных участках средней и нижней Лены, на Иртыше – реке с извилистым руслом. На средней Оби это позволило увеличить за 25 лет глубины на перекатах до 2,5–2,7 м при бытовых 1,2–1,5 м.

На извилистых реках Восточной Европы (Белой, Днестре, Немане) главным методом выправления явилось возведение стесняющих поток сооружений – полузапруд, расположенных последовательно вдоль обоих берегов по обе стороны фарватера. Промежуточное положение занимают реки с использованием как сооружений, так и капитального дноуглубления (Северная Двина, Вычегда). В результате строительства выправительных сооружений нередко перекрываются рукава, происходит причленение островов к берегам, мелкие острова объединяются в крупные островные массивы (Обь, Енисей, Северная Двина).

Сооружения и мероприятия, оказывающие местное влияние на речные русла, не изменяют формы русла и общий характер русловых деформаций. В то же время они в большей мере, чем другие, испытывают влияние русловых процессов и требуют при проектировании учета и прогноза русловых деформаций. Ошибочные решения в этих случаях приводят к аварийным ситуациям, разрушениям инженерных

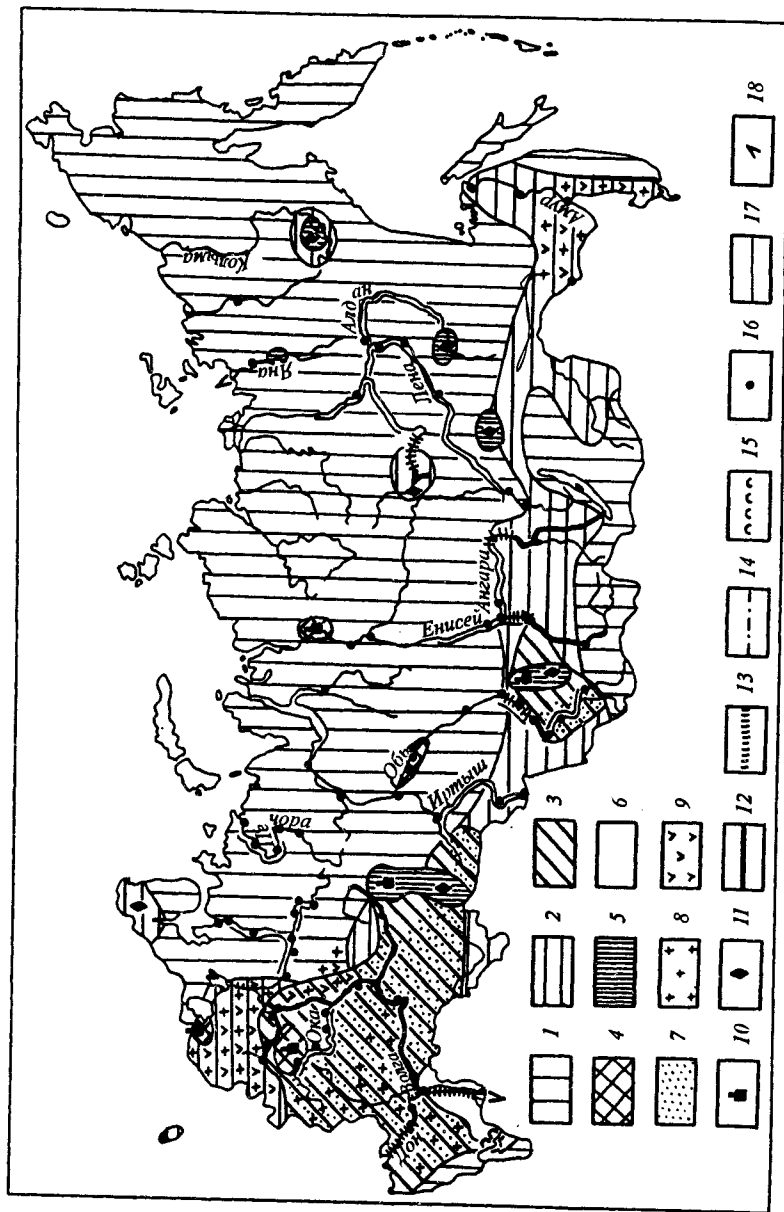


Рис. 3.7. Схема районирования территории России по степени и характеру воздействия антропогенных факторов на русловые процессы (Русловый режим рек Северной Евразии, 1994):

по степени измененности русел малых и средних рек – 1. Неизменные реки (встречаются отдельные участки локально измененных русел, связанных с мостовыми и другими переходами, лесоразработками, лесосплавом и т.п.); 2. Местные изменения факторов и руслового рельефа; 3. Региональные изменения факторов русловых процессов, формы русел и продольного профиля; 4. Полное изменение русел рек под влиянием комплексного воздействия урбанизации, промышленного и сельскохозяйственного производства; 5. Полное изменение русел рек под влиянием горнодобывающей промышленности. 6. Бессточные области;

антропогенные факторы региональных изменений русловых процессов малых и средних рек – 7. Ускоренная эрозия почв. 8. Преимущественно обводнительная мелиорация. 9. Преимущественно осушительная мелиорация. 10. Промышленные узлы и городские агломерации. 11. Районы добычи полезных ископаемых.

Формы воздействия на русловые процессы крупных рек: 12. Водохранилища и их каскады. 13. Нижние бьефы крупных гидроузлов. 14. Водозабор в крупных размерах. 15. Противопаводочное обвалование. 16. Карьеры нерудных стройматериалов. 17. Дноуглубительные и выправительные работы на водных путях. 18. Крупные устьевые каналы.

объектов, затруднениям или прекращению их функционирования и, как следствие, необходимости принятия таких мер, которые объективно направлены против работы самой реки.

Особое место во взаимодействии русловых процессов с хозяйственной деятельностью занимают реки на урбанизированных территориях. Здесь, наряду с концентрацией сооружений, оказывающих местное воздействие, и проведением мероприятий, влияние которых имеет региональный характер, возникает целый ряд специфических явлений, связанных с влиянием сточных вод, загрязнением русла и его зарастанием. Нередко эти процессы имеют физико-химическую природу, что обуславливает появление как нового типа антропогенных речных отложений, так и новых условий транспорта наносов. Влияние всех видов сооружений, мероприятий и явлений взаимно накладывается, приводя к непредвиденным и сложно прогнозируемым последствиям. Положение нередко усугубляется тем, что проектирование инженерных сооружений ведется без учета взаимовлияния всех видов хозяйственной деятельности на русловые процессы. Это приводит к неблагоприятной экологической обстановке на реке и большому материальному ущербу.

На территории России и сопредельных регионов (рис. 3.7) выделяются три группы районов, различающихся по степени и характеру взаимодействия русловых процессов и антропогенных факторов. В первую группу входят наиболее экономически развитые районы, как правило, густо населенные, в пределах которых практически на всех реках в той или иной мере изменены факторы русловых процессов, повсеместно осуществляются различные мероприятия в руслах и на берегах рек. Многие реки превращены в каскады водохранилищ (на малых реках – прудов), а на свободных участках рек русловые процессы развиваются в условиях зарегулированного стока и под влиянием искусственных местных базисов эрозии. Почти сплошная сельскохозяйственная освоенность территории и проведение осушительных или обводнительных мелиораций обуславливают как изменения режима стока воды, так и поступление в реки наносов – продуктов эрозии почв на водосборах. На больших, средних, а также частично на малых реках, являющихся судоходными, в руслах рек в большом объеме выполняются дноуглубительные работы, возводятся выправительные сооружения, на некоторых участках реки канализованы.

К этой группе районов относятся южная половина Европейской части России, юго-запад (Южное Зауралье) и юго-восток Западной Сибири. На этом общем фоне выделяются отдельные районы, где развитие речных русел полностью подчинено техногенному воздействию. Таковы высокоурбанизированные территории и промышленные узлы Москвы и Подмосковья, Санкт-Петербурга, Донбасса (с прилегающими к нему промышленными районами в бассейнах Северского Донца и нижнего Дона), Средний и Южный Урал, Зауралье, Кузбасс и ряд других. С другой стороны, даже в пределах этих районов отдельные речные бассейны остались сравнительно мало измененными хозяйственной деятельностью, что позволило рекам сохранить свой естественный облик и русловой режим. Таковы реки бассейна верхней Оки.

В то же время, если большинство рек ЕТР изменены одновременным воздействием ряда антропогенных факторов, то в других районах такая же, а иногда и большая степень трансформации русел достигнута вследствие гипертрофированного проявления одного из них. Так, в равнинных частях Северного Кавказа таким фактором стала обводнительная мелиорация, сопровождающаяся изъятием большого количества воды из рек в магистральные каналы. Наиболее

яркими примерами такого рода в пределах бывшего СССР служат Амударья и Сырдарья, сток которых к устью практически полностью разбирается на орошение. В бассейне нижнего Дона массовая обводнительная мелиорация и эрозия почв на поливных землях стали главными причинами отмирания и деградации малых рек.

Во второй группе районов большинство рек сохраняет свой русловой режим в естественном или малоизмененном состоянии. К этой группе относятся районы, слабо освоенные в экономическом отношении или отличающиеся локальным, очаговым распространением промышленных и горнодобывающих узлов или сельскохозяйственных земель: бассейны Северной Двины, Мезени и Печеры, Карелии и Кольского полуострова, большая часть Западной и Восточной Сибири, бассейн Лены и Северо-Восток России. Здесь особо выделяются крупные судоходные реки, на которых дноуглубительные и выправительные работы стали важным фактором русловых процессов (Северная Двина, нижняя Вычегда, Печера, верхняя Лена и отдельные участки средней и нижней Лены). Локальное воздействие на состояние русел рек оказывают лесозаготовки, вывоз и сплав древесины, освоение нефтегазовых месторождений, горнопромышленные узлы (типа Норильского) и т. д.

Третья группа районов занимает промежуточное положение по степени воздействия антропогенных факторов на русловые процессы. Она протягивается полосой вдоль юга Сибири и охватывает Приамурье и юг Дальнего Востока. Здесь, хотя и велико использование рек и их ресурсов, многочисленны инженерные сооружения на берегах и переходы через них, все же русловые процессы изменены в целом незначительно, направленные изменения руслоформирующей деятельности рек сравнительно невелики и носят преимущественно локальный характер. Вместе с тем, местами, там, где созданы крупные водохранилища или их каскады (Обь ниже Новосибирского водохранилища, верхний Енисей, Ангара, Зей) и расположены промышленные центры (Новосибирск, Красноярск, Иркутск), реки оказываются достаточно глубоко преобразованными. Как правило, на таких участках имеет место локальное воздействие одновременно многих техногенных факторов. Например, на Оби в районе Новосибирска, помимо влияния ГЭС, создавшей совершенно новый русловой режим реки, существенное влияние на ее русло оказывают дноуглубительные и выправительные работы, карьерные разработки

песка и гравия, промышленный и коммунальный водозабор, несколько мостовых переходов, дюкеры, набережные, причальные стенки и т. д. В то же время даже малые реки – притоки Оби вне зоны, непосредственно прилегающей к городу, находятся в естественном состоянии.

Глава 4

Относительно прямолинейные неразветвленные русла

4.1. Критерии выделения прямолинейных русел

Абсолютно прямолинейные естественные русла в природе встречаются редко, и можно лишь говорить об относительности этого понятия. Как и другие типы русла, они могут выделяться на двух уровнях. Первый соответствует участкам рек большой протяженности, определяемых как морфологически однородные. При этом отнесение на данном уровне русла к тому или иному морфодинамическому типу зависит от преобладающего распространения соответствующих ему форм русла. Обычно считается, что если 70 % длины участка реки занимают формы русла данного морфодинамического типа, а остальные имеют ограниченное распространение, образуя одиночные формы или одиночные серии форм, то морфологически однородный участок необходимо называть по преобладающей совокупности элементарных форм – излучин, разветвлений, прямолинейных отрезков (Попов, 1965; Чалов, 1979). Этим формам соответствует ведущий процесс взаимодействия потока и русла, определяющий развитие самой формы русла. При типизации на данном уровне важно установить четкие границы, отделяющие прямолинейное русло как самостоятельную форму от других типов, а также от прямолинейных отрезков, которые являются вставками между другими формами (излучинами, узлами разветвления), возникающими как следствие неоднозначности гидравлических явлений, присущих этим формам (например, циркуляционных течений на изгибе русла).

Критерием для определения типа русла – прямолинейного или мандрирующего – является "критическое" значение соотношения длины русла l_p к длине прямой L , соединяющей две точки, соответствующие местам перегиба русла. Длина прямой соответствует шагу излучины, а сама величина характеризует степень ее развитости.

Критическое значение степени развитости излучины может быть установлено при сопоставлении его с показателем, характеризующим динамику потока на излучине (или являющимся ее следствием). Таким показателем может быть коэффициент асимметрии поперечного сечения русла (K_{ac})

$$K_{ac} = B_1 / B_2 \quad 4.1$$

где B_1 и B_2 – расстояния от левого и правого берегов до линии максимальных глубин. Граница перехода от прямолинейного русла к извилистому устанавливается по зависимости коэффициента асимметрии (K_{ac}) от показателя его кривизны – степени развитости излучины l_p/L , где l_p – длина русла, L – длина прямой, соединяющей точки перегиба (шаг излучины). Как известно, процесс меандрирования сопровождается образованием определенного поля скоростей (Маккавеев, 1955) и поперечной циркуляции на изгибе, которые обуславливают смещение динамической оси потока и линии максимальных глубин относительно берегов, вызывая асимметрию поперечного сечения русла. Увеличение кривизны русла ведет к дальнейшему увеличению асимметрии его поперечного сечения.

Анализ зависимости $K_{ac} = f(l_p/L)$ (рис. 4.1), полученной для ряда рек, показывает, что при значениях l_p/L выше 1,15 даже небольшое увеличение кривизны русла сопровождается заметным ростом K_{ac} . При меньших значениях смещение стрежня потока к одному из берегов от оси русла невелико, асимметрия поперечного профиля выражена слабо, иногда вообще не проявляется, искривление русла происходит медленно, явно затушевываясь смещением побочной, гряд, влиянием местных условий. Таким образом, значение $l_p/L = 1,15$ является пороговым для начала процесса меандрирования. Участки русла с изгибами, у которых $l_p/L < 1,15$, можно считать в морфологическом отношении относительно прямолинейными.

Обоснование критерия разделения прямолинейных и разветвленных русел связано с вопросом, является ли одиночный остров в пределах прямолинейного участка формой второго порядка или узел разветвления представляет собой самостоятельное русловое образование. Решение его должно основываться на выявлении влияния острова на структуру потока и оптимального соотношения между шириной и длиной острова, которому соответствует минимальное сопротивление движению потока за счет как его формы, так и трения

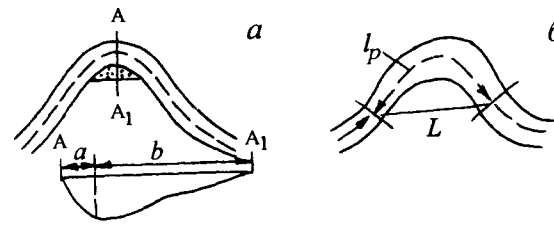
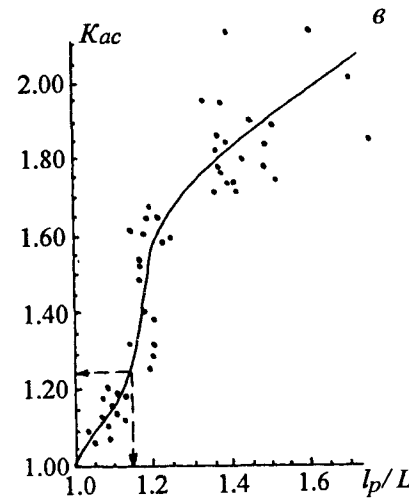


Рис. 4.1. Зависимость коэффициента асимметрии поперечного сечения русла K_{ac} от степени развитости излучины – показателя кривизны русла l_p/L : а, б – способы определения, соответственно, $K_{ac} = b/a$ и величин l_p и L ; в – график связи $K_{ac} = f(l_p/L)$



(по длине). Исследования П.Комара (Комар, 1983) показали, что наименьшее сопротивление движению потока оказывают острова, имеющие соотношение между их длиной (L_0) и шириной (B_0), равное 3–4. Изменение плановой формы русла (его расширение) происходит в результате вызываемого островом изгиба потока, что обуславливает размыв противолежащих ему берегов и возникновение вполне определенной структуры потока (Маккавеев, 1955; Маккавеев, Чалов, 1986). Анализ зависимости относительной ширины русла в пределах разветвления (b_{\max}/b_{cp} , где b_{\max} – максимальная суммарная, вместе с островами, ширина русла в узле разветвления, b_{cp} – средняя ширина русла выше и ниже узла разветвления) и линейных размеров острова (его длины – L_0 и ширины – B_0) показывает, что минимум функции составляет 3,5 – 4,0 (рис. 4.2). Однако этот критерий не является достаточным для оценки морфологической однородности одиночного узла разветвления с прилегающим прямолинейным участком русла

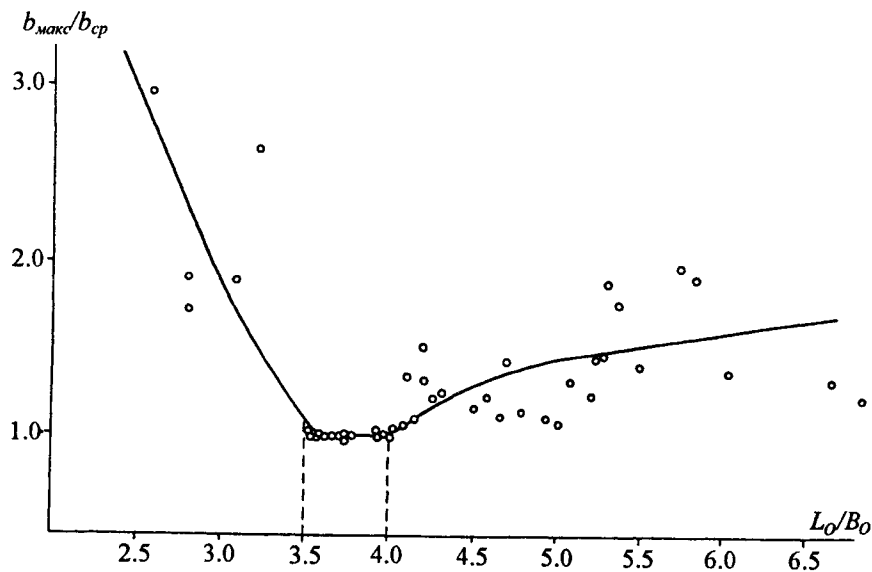


Рис. 4.2. Изменение относительной ширины русла $b_{\max}/b_{\text{ср}}$ в узлах разветвления в зависимости от размеров образующих их островов L_0/B_0 .

без островов. Линейные размеры острова и его расположение по отношению к оси русла создают предпосылки для изменения гидравлической структуры потока как в пределах разветвления, так и на некотором расстоянии выше и ниже по течению вследствие развития поперечной циркуляции. Используя аналогию с обоснованием критерия разделения прямолинейных и извилистых русел, для прямолинейных участков с одиночными разветвлениями, имеющими оптимальное соотношение линейных размеров острова, была получена связь последних с коэффициентом асимметрии $K_{\text{ас}}$ поперечного сечения одного, наиболее многоводного рукава или обоих рукавов при одинаковой их водности (рис. 4.3). Анализ этой связи показывает, что при ширине острова, равной или меньшей 0,4 средней ширины русла (численные значения B_0/b_p на графике), и его длине, превышающей среднюю ширину острова на 0,25–0,30, поперечная циркуляция не наблюдается, и рукава не образуют изгиба. Узел разветвления с островом, имеющим такие параметры по отношению к прилегающему прямолинейному участку, можно рассматривать как форму русла, не вносящую устойчивого изменения в структуру потока по

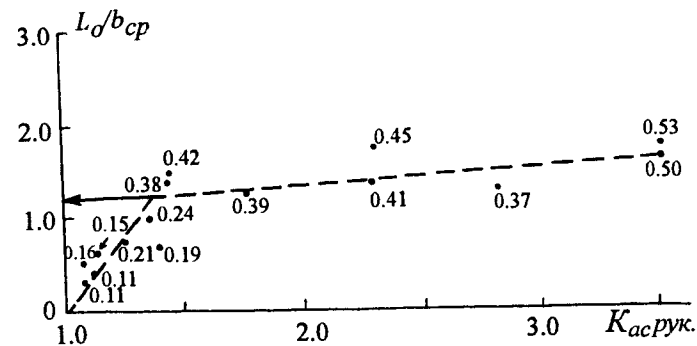


Рис. 4.3. Соотношение длины островов и ширины русла на неразветвленных участках $L_0/b_{\text{ср}}$ и коэффициента асимметрии поперечного сечения русла рукава и ее связь с относительной шириной островов (B_0/b_p , где b_p – ширина русла на смежных неразветвленных участках – показана цифрами).

длине и не вызывающую ее изменение по всей ширине русла. Такую форму русла можно отнести к форме второго порядка, вложенной в форму более высокого уровня (первого порядка) и представляющей участок прямолинейного неразветвленного русла.

Таким образом, к относительно прямолинейному, неразветвленному руслу следует относить участок реки с относительно прямолинейными берегами, имеющий общий пологий изгиб и включающий небольшие острова, не вносящие устойчивого изменения в структуру потока и не вызывающие ее изменения по всей ширине русла. Участок реки можно считать прямолинейным, если отношение его длины по геометрической оси русла к длине по прямой не превышает 1,15; при наличии одиночных островов соотношение характерных размеров последних (длины и ширины) должно составлять 3,5–4,0, причем ширина его не может быть более 0,4 средней ширины прямолинейного русла выше или ниже по течению. В пределах самого узла разветвления ширина острова, образующего разветвление второго порядка, обычно составляет более 0,15–0,20 суммарной (вместе с островом) ширины русла.

4.2. Генезис и типизация прямолинейных русел

Механизм образования и развития прямолинейных русел неразрывно связан с взаимодействием потока и русла. В настоящее время существует достаточно четкое представление о "неустойчивости" прямолинейного движения потока (Кондратьев и др., 1959, 1982), реализуемой в образовании различных типов русел из первоначально прямолинейного. Считается, что "неустойчивость" связана или с действием внешних сил по отношению к потоку, со случайными причинами (Маккавеев, Чалов, 1986), или с внутренними закономерностями потока (Великанов, 1958; Callander, 1969). В результате неустойчивость прямолинейного движения потока часто принимается за одну из главных причин динамической неустойчивости прямолинейных русел в условиях свободного развития русловых деформаций и их трансформации в русла других типов. Она проявляется в извилистости динамической оси (превращение прямолинейного русла в меандрирующее) или ее нескольких ветвей (превращение в разветвленное). Последнее можно оценить с помощью критерия квазиоднородности потока Θ , предложенного И.Ф.Карасевым (1975),

$$\Theta = b_p / h * \sqrt{\lambda}, \quad 4.2$$

где λ – коэффициент гидравлических сопротивлений:

$$\lambda = \frac{2g}{C^2}; \quad 4.3$$

b_p – ширина, h – глубина русла; C – коэффициент Шези. Этот критерий позволяет установить граничные условия возможности ветвления потока. Если показатель квазиоднородности больше 9,0, то в потоке наблюдаются по крайней мере две динамические оси; при значениях меньше 4,5 поток однороден, имеет вид компактной струи; при изменении в интервале от 4,5 до 9,0 наблюдается блуждание динамической оси потока. Проверка этого условия для прямолинейных участков рек обычно показывает, что только в редких случаях поток квазиоднороден. Кроме того, условие существования компактной струи в то же время не означает прямолинейности потока. Согласно исследованиям В.И.Замышляева (1982), благодаря действию силы трения, направленной против течения, реакции берегов, направленной поперек русла, и реакции дна, направленной по нормали к бере-

гу, поток искривляется, образуя серию следующих друг за другом изгибов, с появлением которых возникает центробежная сила. Им разработана математическая модель, расчет по которой приводит к появлению извилистой формы потока (синусоидальной или в виде полуокружности – сегментной). Наличие ветвления или блуждания динамической оси потока еще не достаточно для превращения прямолинейного русла в русло другого типа. Причиной трансформации прямолинейных русел является, как правило, перемещение потоком наносов в виде крупных грядовых образований (побочной, осередков), закрепляющих отклонение движения потока от прямолинейного направления или разделение его на несколько динамических осей (стрешней). В первом случае прямолинейное русло трансформируется в извилистое, во втором – разветвленное на рукава. К такому же эффекту приводит влияние на поток выступов и мысов берегов, крупные оползни и другие внешние по отношению к руслу причины. Однако неустойчивость прямолинейного движения потока может не реализовываться в форме русла. В таком случае прямолинейные русла становятся динамически устойчивыми. Для условия свободного развития русловых деформаций такая динамическая устойчивость может наблюдаться при очень малых уклонах (Schumm, Khan, 1972), при малой распластанности русла, когда $b_p/h < 10$, при усилении эффекта берегового трения (Parker, 1975; Fredsoe, 1978), при наличии ведущего берега (Чалов, 1979; Ikeda, 1981), при малом стоке руслообразующих наносов, не обеспечивающих образование крупных гряд в виде побочной или осередков, при малой высоте последних, вследствие чего они не обсыхают в межень. В условиях ограниченного развития русловых деформаций прямолинейное русло становится устойчивым при превышении транспортирующей способности потока над эрозионной, что определяет дефицит наносов (Brotherton, 1979), а также вследствие слабой размываемости коренных берегов, особенно если они сложены скальными горными породами.

Многообразие и неоднозначность влияния природных факторов руслоформирования находит свое отражение в существовании разновидностей прямолинейных русел. В принятой классификационной схеме (Чалов, 1996) относительно прямолинейные русла равнинных рек могут быть: 1) широкопойменными ($B_n > 2-3 b_p$), соответствующими условиям свободного развития русловых деформаций; 2) врезанными ($B_n < b_p$), формирующимися в условиях ограниченного раз-

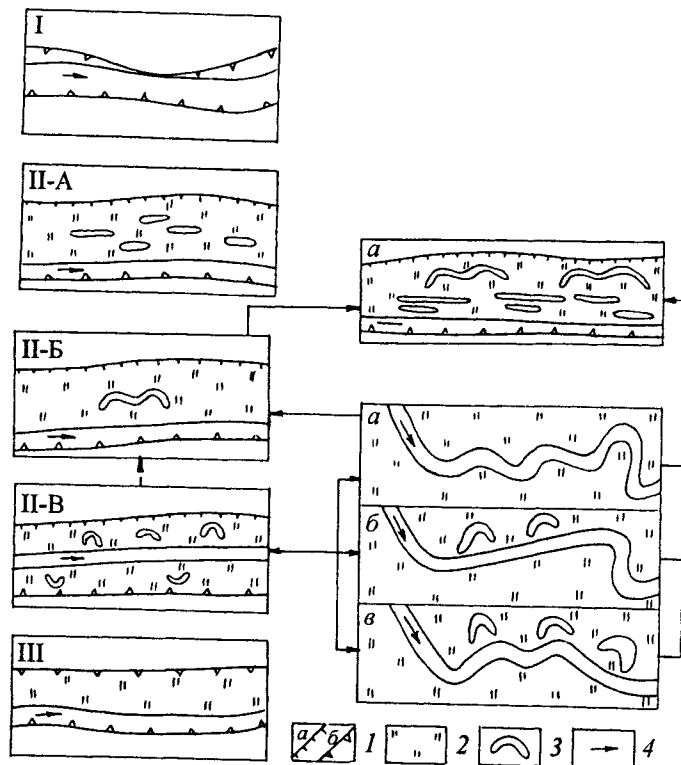


Рис. 4.4. Разновидности прямолинейных неразветвленных русел:

I – врезанное; IIа – широкопойменное нетрансформирующееся; IIб – широкопойменное нетрансформирующееся (в прошлом – трансформирующееся); IIв – широкопойменное трансформирующееся; III – адаптированное. Стрелками показаны возможные пути деформаций. 1 – уступы коренных берегов (а) и поймы (б); 2 – пойма; 3 – старичные озера; 4 – направление течения реки.

вития русловых деформаций; 3) адаптированными ($b_p < B_n < 2-3 b_p$) – промежуточный тип русел между врезанными и широкопойменными, формирующийся в переходных от свободных к ограниченным условиям русловых деформаций (рис. 4.4).

Врезанные русла повторяют относительно прямолинейные очертания часто беспойменной долины, а движение потока в них полностью контролируется высокими незатопляемыми берегами, сложенными коренными трудноразмываемыми породами или, реже, древним сцементированным аллювием. В условиях свободного развития русловых деформаций относительно прямолинейные русла сопрово-

ждаются широкой поймой, в три и более раз превышающей ширину меженного русла, причем их простираение в целом совпадает по направлению с осью долины. Адаптированные русла формируются в узкой пойменной долине, и смещение их ограничивается коренными берегами, которые контролируют общее направление движения потока. Вместе с тем они могут встречаться и в широкопойменной долине (Северная Двина выше г.Котласа), если русло на значительном протяжении проходит вдоль коренного берега, не разветвляясь на рукава.

Образование врезанных прямолинейных русел может идти несколькими путями – при унаследовании плановых форм русла от древних, спрямлении излучин в стадии врезания, формировании русла в зонах трещиноватости и разломов (Экспериментальная геоморфология, 1969; Маккаев, Чалов, 1986; Schumm, 1967). Таковы участки врезанного прямолинейного русла среднего Вилюя, верхнего Алдана, среднего Днестра. Главным условием превращения русла во врезанное является превышение скорости вертикальных деформаций над горизонтальными в областях ограниченного развития русловых деформаций, где высокая противозерозионная устойчивость пород, слагающих берега, обуславливает очень низкие темпы горизонтальных деформаций. Причинами врезания могут быть тектонические движения, климатические изменения, понижение базиса эрозии и др.

Для интенсивного врезания реки необходим дефицит руслообразующих наносов. В этом случае поток контактирует с дном, вызывая его размыв. Энергия потока расходуется на размыв дна, что объясняется приложением сил касательного напряжения; кроме того, контакт потока с дном у потока на порядок больше, чем с берегами (ширина рек много больше, чем их глубина). Высокая противозерозионная устойчивость пород усиливает дефицит наносов благодаря слабой податливости берегов размыву, что приводит к увеличению темпов вертикальных деформаций; поэтому при врезании реки русло сохраняет свою прямолинейную форму в плане. С уменьшением дефицита наносов энергия потока расходуется на их перемещение, в том числе в форме гряд; одновременно уменьшается или полностью исчезает контакт потока с коренным ложем, вследствие чего происходит замедление темпов врезания и возникает вероятность преобразования прямолинейного врезанного русла во врезанные излучины или врезанное разветвленное русло, осуществляемое на протяжении геологических периодов времени.

В условиях свободного развития русловых деформаций, когда поток достаточно легко размывает сложенные рыхлыми породами берега, широкопойменные прямолинейные русла формируются при преобладающем развитии горизонтальных деформаций, которые определяются кинематической структурой потока: скоростным полем, циркуляционными течениями и т.д. Поэтому для формирования широкопойменных прямолинейных русел важными являются и геолого-геоморфологические факторы, влияющие на возможность нейтрализации неустойчивости прямолинейного движения потока. В связи с этим у широкопойменных прямолинейных русел можно выделить две разновидности, которые отличаются друг от друга с точки зрения их генезиса. К первой относятся русла, сформировавшиеся с самого начала как прямолинейные и длительное время сохраняющие свои плановые очертания (II-A на рис. 4.4). Для них характерны параллельно-гивистые поймы, морфология которых связана с параллельным направленным смещением русла относительно своей оси без изменения плановых очертаний, как правило, в сторону одного из коренных берегов. Их можно назвать "нетрансформирующимися", подчеркивая тем самым пространственно-временную устойчивость их плановых очертаний. Эти русла можно рассматривать как динамически устойчивые, считая, что под этим "понимается как приобретенное ими свойство сохранять в течение длительного времени относительно неизменными осредненные характеристики и форму" (Михайлов, 1971, с. 82). Такая трактовка подразумевает, что в русле могут происходить периодические знакопеременные деформации и не исключает возможности смещения русла в целом; у этих русел, согласно закону взаимной обусловленности потока и русла М.А.Великанова-Н.И.Маккавеева, в процессе взаимодействия потока и русла вырабатывается такое соотношение между ними, которое обуславливает динамическую устойчивость формы русла.

Вторая разновидность включает прямолинейные русла, образовавшиеся в результате случайных или закономерных процессов в развитии других морфодинамических типов – спрямлении излучин или переформирования разветвлений (II-B на рис. 4.4). Они относятся к динамически неустойчивым (трансформирующимся), так как спрямление является временным, представляя собой этап в процессе меандрирования или развития разветвлений, который со временем завершится, и восстановится извилистая или разветвленная форма

русла. Длительность такого этапа зависит от литологии пород на участке спрямления, характера растительности на пойме, величины стока руслообразующих наносов и их крупности и т.д., влияющих на устойчивость русел и определяющих интенсивность их переформирования. Однако в ряде случаев повторное развитие излучин или разветвлений не происходит, и трансформирующиеся русла могут превратиться в нетрансформирующиеся. Обычно это бывает при изменении руслоформирующих факторов. Например, при прорыве излучин вдоль коренного берега последний может оказать на поток решающее воздействие, вследствие чего русло приобретает динамическую устойчивость, изменяя свой морфодинамический тип (II-B на рис. 4.4). Расположение потока вдоль коренного берега является наиболее частой причиной формирования прямолинейного русла, поскольку в этом случае ему соответствует определенная структура его скоростного поля и поперечная циркуляция, направленная в сторону пойменного берега и обеспечивающая вынос туда транспортируемого материала. Причинами превращения трансформирующихся русел в нетрансформирующиеся могут быть также глинистый состав пород, слагающих пойменные берега и препятствующих их размыву потоком, огибающим побочни, уменьшение стока руслообразующих наносов, формирование крупных, но подвижных побочней.

Таким образом, условиями динамической устойчивости прямолинейной формы русла (существования нетрансформирующихся русел) являются:

1. Малый сток руслообразующих наносов. В этом случае формы рельефа русла имеют небольшую высоту и не образуют прирусловых отмелей (побочней, осередков), обсыхающих в межень. В результате они не покрываются растительностью и не могут составлять основу для развития пойменных сегментов или элементарных островов, т.е. закреплять изгиб или разделение динамической оси потока формой русла. Поэтому прямолинейные русла чаще всего встречаются в верхнем течении рек, где они не успели еще получить от размыва дна и берегов и с площади водосбора достаточное для образования крупных гряд количество твердого материала, а также на реках с зарегулированным стоком (Нева, Свирь, Сухона между Кубенским озером и слиянием с р. Вологодой).

2. Ограниченность развития русловых деформаций в районах распространения скальных пород, где реки заложены вдоль линейно

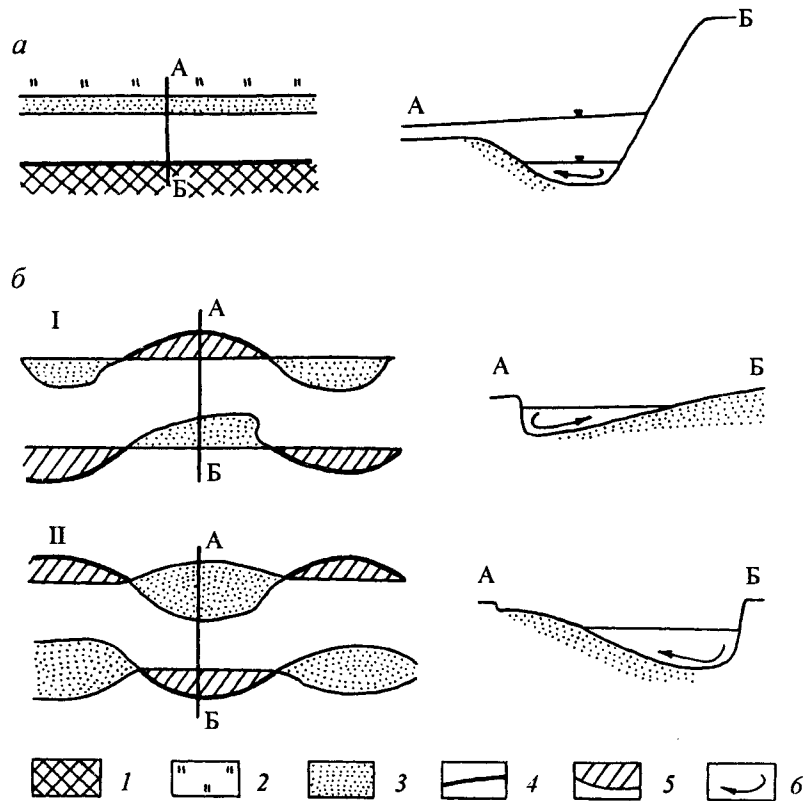


Рис. 4.5. Условия формирования нетрансформирующихся относительно прямолинейных, неразветвленных русел:

а – при расположении вдоль коренного берега; б – при большой подвижности побочной (I, II – сопоставленные планы русла). 1 – коренной берег; 2 – пойма; 3 – побочни; 4 – подмываемые берега; 5 – зона размыва; 6 – циркуляционные течения. А-Б – линия поперечного профиля.

вытянутых разломов, зон трещиноватости горных пород, границ крупных морфоструктур. Неразмываемость коренных берегов обуславливает сохранение прямолинейности русел на большом протяжении рек вне зависимости от развитости побочной и осередков. Поэтому доля прямолинейных врезанных русел заметно больше, чем широкопойменных.

3. Наличие коренного высокого берега и односторонней поймы. При расположении русла вдоль коренного берега возникающие в потоке во время половодья циркуляционные течения, направленные в сторону затопленной поймы, обуславливают устойчивое его положение и направленное параллельное смещение в сторону коренного берега; одновременно происходит постоянный подмыв его основания и перенос наносов к противоположному, пойменному, вызывая обмеление прилегающей к нему зоны русла (рис. 4.5 а). Это условие выполняется при относительной выровненности в плане линии коренного берега. Ниже мысов, отклоняющих поток, крупных оползней или обвалов коренного берега, искривляющих его, происходит образование сначала адаптированной, а затем, в пойменных берегах, свободных излучин, либо формируется узел разветвления.

4. Большая подвижность побочной и осередков, обсыхающих в меженный период. Благодаря этому они не успевают закрепиться растительностью и, смещаясь со скоростью десятки-сотни метров в год, вызывают миграцию зон размыва противоположного берега (рис. 4.5 б). В результате вдоль обоих берегов возникают подвижные прирусловые полосы, периодически размываемые или нарастающие. Суммарная ширина их составляет до $0,5 - 0,7 b_p$, достигая на таких реках, как Ока, Вычегда, Дон 200 – 300 м по каждому берегу. Периодичность смены размыва намывом и наоборот – в среднем 5–7 лет для гумидной зоны, что меньше, чем время необходимое для закрепления прирусловых отмелей густыми зарослями ивняка.

4.3. Критериальные и гидролого-морфометрические зависимости

Влияние комплекса природных факторов на формирование и развитие прямолинейных русел обычно изучается на основании гидролого-морфометрических зависимостей. Критериальные зависимости, дающие возможность оценивать интервал изменений условий руслоформирования, в котором образуются прямолинейные русла, в основном были получены для условий свободного развития русловых деформаций (Leopold, Wolman, 1957; Lane, 1957; Антроповский, 1972; Кондратьев и др., 1982). При этом прямолинейные русла глав-

ным образом исследовались с позиций выявления возможных связей гидравлических и морфометрических характеристик для их устойчивого состояния и без разделения по разновидностям. Сводки зависимостей, полученных до 70-х годов, приведены в работах С. Лелявского (1961) и В.И. Антроповского (1969). Общим недостатком всех полученных зависимостей для прямолинейных русел можно считать то, что в них не учитывались условия развития русловых деформаций. Это приводило к неоднозначному определению области формирования прямолинейных русел. В некоторых классификациях, в частности, в известной классификации ГГИ, прямолинейные русла рассматриваются только на уровне грядовых форм движения наносов, что затрудняет получение гидролого-морфометрических зависимостей для прямолинейного русла как самостоятельного типа. Часто гидролого-морфометрические связи устанавливались без разделения характеристик на зависимые и независимые переменные.

Влияние основных факторов руслоформирования, выраженных через такие показатели как водоносность реки и уклон дна долины, можно проследить для всех разновидностей прямолинейных русел. Дополнительными характеристиками, позволяющими четко определить области формирования их разновидностей, являются: относительная ширина дна долины, указывающая на возможный размах горизонтальных деформаций русла, характеристика горных пород (для врезанных прямолинейных русел), а также устойчивость русла (в понимании В.М.Лохтина–Н.И.Маккавеева). Использование в качестве независимых показателей уклона дна долины, характерного расхода воды (среднемаксимального или руслоформирующего) и относительной ширины дна долины позволяет установить три области формирования основных разновидностей прямолинейных русел – врезанных, адаптированных и широкопойменных.

Врезанные русла имеют самые высокие уклоны дна долины по сравнению с другими разновидностями и характеризуются наибольшей мощностью потока (рис. 4.6). Это обусловлено, в первую очередь, высокой противозерозионной устойчивостью пород, слагающих ложе и берега, большой крупностью руслообразующих наносов (галечники, валуны) и сосредоточением потока половодья в русле (большими удельными его расходами). Область их формирования может быть описана уравнением:

$$I = 0,013\bar{Q}^{-0,445} \quad 4.4$$

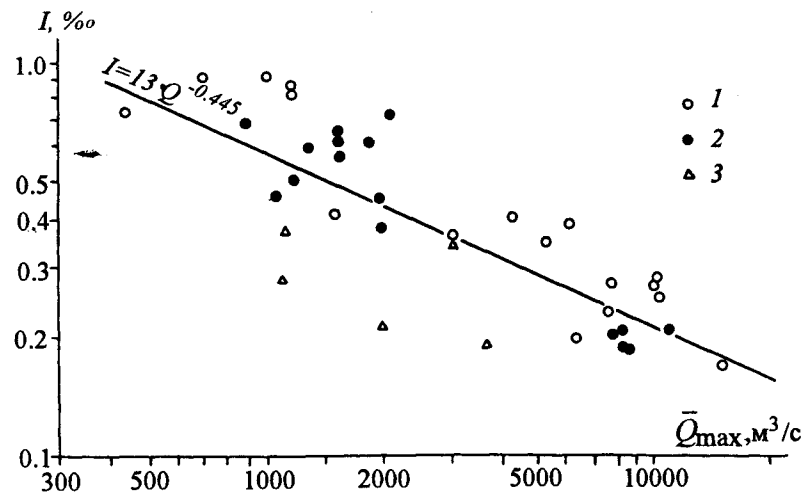


Рис. 4.6. Связь уклона дна долины и среднемаксимального расхода воды для врезанных прямолинейных русел. Коренные породы: 1 – скальные; 2 – полускальные; 3 – морена.

По мере снижения противозерозионной устойчивости пород, слагающих берега, отмечается тенденция к увеличению ширины поймы и снижению уклонов дна долины. Это, в частности, проявляется в расположении на графике точек, относящихся к руслам рек, формирующихся в скальных и полускальных породах, с одной стороны, и пластичных (моренные суглинки), с другой: последние находятся ниже первых, вследствие чего соответствующие им прямолинейные русла имеют при прочих равных условиях (\bar{Q}) меньшие уклоны. В результате русла, врезанные в моренные отложения, характеризуются меньшей крупностью руслообразующих наносов (вплоть до песчаных), по сравнению с врезанными в скальные породы (валунно-галечные наносы).

Адаптированные, формирующиеся в узкой долине, прямолинейные русла в поле QI -диаграммы занимают крайнее верхнее положение по отношению к широкопойменным (рис. 4.7), характеризуясь большими уклонами дна долины при одинаковых руслоформирующих расходах, но ниже врезанных, если сопоставить рис. 4.6 и 4.7. Область их формирования может быть описана уравнением:

$$I = 0,0053\bar{Q}^{-0,456} \quad 4.5$$

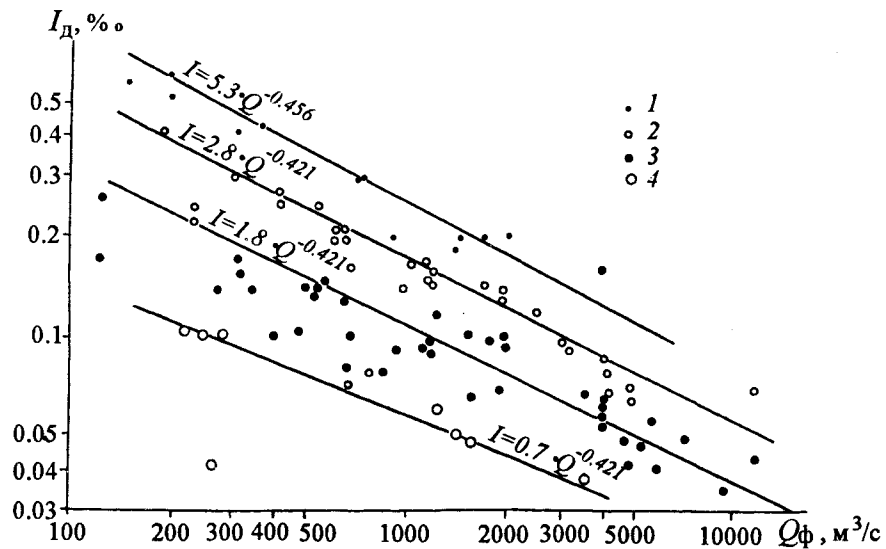


Рис. 4.7. Связь уклона дна долины и руслоформирующих расходов воды для адаптированных (1) и широкопойменных (2-4) русел:

2 – нетрансформирующихся, $3 < B_n/b_p < 10$; 3 – трансформирующихся, $10 < B_n/b_p < 20$; 4 – то же, $B_n/b_p > 20$.

При прохождении руслоформирующих расходов неустойчивость прямолинейного движения потока в таких руслах не проявляется, так как оно контролируется в узкой долине коренными берегами. Кроме того, сужение дна долины и сосредоточение потока половодья между коренными берегами обуславливает высокие удельные расходы воды, что способствует врезанию русла, хотя и более низкими темпами, чем у беспойменных русел. Это ведет к плановой динамической устойчивости данной разновидности прямолинейных русел.

Широкопойменные прямолинейные русла занимают, по сравнению с другими разновидностями, нижнее положение в поле QI -диаграммы. Относительная ширина дна долины (B_n/b_p) для них изменяется от 4 до 20 и более. Снижение уклонов дна долины по мере перехода от ограниченных условий развития русловых деформаций к свободным указывает на то, что геолого-геоморфологический фактор контролирует связь между уклонами дна долины и руслоформирующими расходами воды.

Использование QI -диаграммы и показателя относительной ширины дна долины позволяет выделить две характерные области развития широкопойменных прямолинейных русел. К верхней относятся русла нетрансформирующиеся; область их формирования может быть записана в поле QI -диаграммы как

$$I = 0,0028Q^{-0,421} \quad 4.6$$

Для этой разновидности прямолинейных русел характерны относительно большие уклоны дна долины, повышенная транспортирующая способность потока и небольшая относительная ширина ($2-3 < B_n/b_p < 10$) по сравнению с прямолинейными руслами второй области, соответствующей трансформирующимся руслам. Нетрансформирующиеся прямолинейные русла могут иногда встречаться и на участках с небольшими уклонами дна долины и большой ее относительной шириной, то есть в интервале руслоформирования, характерном для динамически неустойчивых русел. В данном случае динамическая устойчивость прямолинейной формы русла объясняется снижением интенсивности русловых деформаций, связанными с высокой естественной зарегулированностью стока воды, наличием коренного трудноразмываемого берега, малым стоком наносов, поступающих с водосбора в гидрографическую сеть, то есть условиями, препятствующими морфологическому проявлению неустойчивости прямолинейного движения потока, либо не ведущими к ее закреплению.

Крайнее нижнее положение в поле QI -диаграммы для широкопойменных русел занимают прямолинейные русла, сформировавшиеся в очень широких долинах и в устьевых областях рек. Для них характерны большая относительная ширина дна долины ($B_n/b_p > 20$) и небольшие уклоны. Плановая устойчивость таких прямолинейных русел зависит от интенсивности русловых деформаций, которая снижается по мере уменьшения сезонных колебаний уровней воды.

Наличие нескольких разновидностей прямолинейных русел находит свое отражение в гидролого-морфологических зависимостях, связывающих морфометрические характеристики с показателями основных условий руслоформирования (таблица 4.1). Близкие значения показателей степеней в зависимостях глубины, ширины русла и скорости течения от руслоформирующих расходов воды дают возможность утверждать, что четыре разновидности прямолинейных русел принадлежат к типу собственно прямолинейных; трансформирующиеся прямолинейные русла с двусторонней поймой отличаются

Таблица 4.1. Гидролого-морфометрические зависимости для разновидностей прямолинейных русел (параметры уравнения регрессии вида $\alpha Y = \alpha X^\beta$ и коэффициенты корреляции r_{xy}).

Типы и разновидности русла	Независимая переменная	Параметры уравнения регрессии	Зависимые переменные		
			Ширина	Глубина	Скорость
Врезанное	Q_{\max}	α	4,95	0,566	0,345
		β	0,510	0,305	0,185
		r_{xy}	$0,912 \pm 0,03$	$0,757 \pm 0,09$	$0,607 \pm 0,13$
Широкопойменное с двусторонней поймой					
Нетрансформирующееся	Q_ϕ	α	7,83	0,596	0,214
		β	0,510	0,288	0,202
		r_{xy}	$0,916 \pm 0,02$	$0,702 \pm 0,10$	$0,672 \pm 0,11$
Трансформирующиеся	Q_ϕ	α	6,78	0,345	0,427
		β	0,518	0,375	0,107
		r_{xy}	$0,918 \pm 0,02$	$0,865 \pm 0,04$	$0,590 \pm 0,12$
Широкопойменное с односторонней поймой					
Нетрансформирующееся	Q_ϕ	α	6,71	0,650	0,229
		β	0,517	0,293	0,190
		r_{xy}	$0,916 \pm 0,04$	$0,704 \pm 0,130$	$0,634 \pm 0,15$
Трансформирующиеся	Q_ϕ	α	6,58	0,650	0,234
		β	0,506	0,300	0,194
		r_{xy}	$0,915 \pm 0,03$	$0,701 \pm 0,10$	$0,639 \pm 0,11$

от них как по генезису, так и по другому характеру связей между гидравлическими и морфометрическими характеристиками. Показатель степени в зависимости глубины от расхода воды для них значительно больше, чем у остальных разновидностей, а в зависимости скорости от расхода воды существенно меньше. Изменение условий руслоформирования (наличие ведущего коренного берега) приводит к тому, что между морфометрическими и гидравлическими характе-

ристиками трансформирующихся русел вырабатывается соотношение, присущее прямолинейным руслам.

Уклон дна долины, наряду с руслоформирующим расходом воды, влияет на морфометрические характеристики только нетрансформирующихся русел с двусторонней поймой. Согласно полученным зависимостям

$$b_p = 7,23Q^{0,648} \times I^{+0,451}, \quad 4.7$$

$$h = 0,735Q^{0,099} \times I^{-0,577} \quad 4.8$$

повышение уклона дна долины ведет к увеличению ширины русла и снижению его глубины. Это позволяет предположить, что данная разновидность прямолинейных русел является переходной от прямолинейных к разветвленным. Близкие значения зависимостей морфометрических характеристик от уклона и расходов воды были получены Х.Чангом (Chang, 1985) для осередковых русел, т.е. прямолинейных с грядами в виде осередков, которые являются причиной преобразования русел в разветвленные.

Сопоставление областей формирования прямолинейных и других морфодинамических типов русел показало, что прямолинейные русла имеют единую область формирования с разветвленными или извилистыми в зависимости от условий, определяющих их динамическую устойчивость. Исключения представляют врезанные прямолинейные русла, сформировавшиеся в скальных породах. Сохранение прямолинейной формы врезанными руслами обусловлено дефицитом руслообразующих наносов и высокой противозерозионной устойчивостью берегов к размыву. С уменьшением противозерозионной устойчивости пород, слагающих берега, врезанные прямолинейные русла попадают в одну область формирования с извилистыми. В то же время между врезанными прямолинейными и врезанными извилистыми руслами существует граница раздела, обусловленная различием в дефиците наносов.

Область распространения адаптированных прямолинейных русел совпадает с разветвленными, но и здесь прослеживается граница их раздела, обусловленная различиями в интенсивности горизонтальных деформаций: чем уже дно долины, тем больше удельный формирующий расход воды, что способствует усилению врезания русла и сохранению прямолинейных плановых форм; при увеличении относительной ширины дна долины удельный руслоформирующий

расход воды уменьшается, и горизонтальные деформации начинают преобладать над вертикальными, неустойчивость прямолинейного движения потока ведет к формированию излучин (вынужденных и адаптированных).

Широкопойменные трансформирующиеся прямолинейные русла имеют единую область формирования с извилистыми. Такое совпадение вполне закономерно, так как трансформирующиеся прямолинейные русла представляют собой стадию развития в основном извилистых русел, характеризуя временный перерыв в процессе меандрирования. В отношении нетрансформирующихся прямолинейных русел несовпадение области формирования со свободными меандрами свидетельствует о том, что уклоны дна долины, водность и относительная ширина дна долины не являются факторами формирования прямолинейного или извилистого русла, а обуславливают его неразветвленность или разветвленность.

4.4. Деформации прямолинейных русел

Различия в условиях формирования и генезисе прямолинейных русел дают основание разделить присущие им деформации на два основных типа. Первый – трансформации прямолинейных русел в другие морфодинамические типы. Они являются следствием изменений условий руслоформирования (например, стока наносов), влияния на поток неровностей ведущего коренного берега и других причин, обуславливающих нарушение динамической устойчивости прямолинейного русла, и приобретают закономерный характер вследствие возникающего несоответствия между структурой потока и формой русла. Второй тип русловых деформаций – переформирования самих прямолинейных русел, не приводящие к изменению типа русла; они могут иметь направленный или периодический характер.

Сохранение или изменение плановой формы прямолинейных русел определяются их горизонтальными деформациями. В то же время необходимо учитывать эффект проявления других видов деформаций. Так, направленные вертикальные деформации создают общий фон развития горизонтальных, способствуют динамической устойчивости прямолинейных русел (при врезании реки) или, наоборот (при направленной систематической аккумуляции наносов), их

трансформации в другие типы русла. Движение наносов в виде крупных грядовых форм руслового рельефа влияет на деформации прямолинейных участков и, в зависимости от их темпов, определяет условия динамической устойчивости или трансформации в другие типы русла. Кроме того, побочни и осередки, перемещаясь и постоянно переформируясь, затушевывают деформации собственно прямолинейных русел. С этим связана происходящая подмена одного структурного уровня проявления русловых процессов (формы русла) другой (формой руслового рельефа) в классификационных схемах, вследствие чего их место занимают побочный или осередковый процесс (классификация ГГИ), периодическое расширение русел (по К.И.Россинскому и И.А.Кузьмину) и т.д.

Для врезанных прямолинейных русел характерно преобладание вертикальных деформаций над горизонтальными; темпы врезания резко увеличиваются, темпы боковой эрозии – уменьшаются по сравнению с имеющими место для условий свободного развития русловых деформаций. Во врезанных прямолинейных руслах интенсивность горизонтальных деформаций повышается по мере снижения противозерозионной устойчивости пород, слагающих ложе и берега. Трансформация врезанных прямолинейных русел в другие морфодинамические типы не происходит, что обусловлено высокой транспортирующей способностью потока, дефицитом руслообразующих наносов, возможностью образования отмытки из крупного материала и рядом других причин, препятствующих вертикальному росту русловых образований (превращению осередков в острова, формированию закрепленных растительностью малоподвижных побочней). В то же время трансформация в другие морфодинамические типы для врезанных прямолинейных русел может носить характер местных деформаций: на ограниченных по протяженности участках прямолинейное русло в силу действия местных причин может прерываться одиночными разветвлениями или изгибами русла. Такими причинами являются: освоение рекой зон поперечных разломов, впадение притоков, местные переломы продольного профиля (средний Днестр, Алдан), выступы коренных пород посередине русла (Ангара, средняя Лена) и др.

Направленные горизонтальные деформации врезанных прямолинейных русел проявляются в параллельном смещении русел относительно своей оси с сохранением плановых форм. Причины такого

смещения достаточно разнообразны – от гидравлических предпосылок (при наличии односторонней поперечной циркуляции потока) до действия факторов, выступающих по отношению к потоку как внешние: сила Кориолиса, тектонический перекося территории бассейна, наклонное залегание пластов, ветро-волновой режим и ряд других. Длительность воздействия этих факторов может сильно различаться. Сила Кориолиса действует постоянно на протяжении всего периода развития русла на протяжении геологических эпох; условие наклонного залегания пластов – в течение более короткого промежутка времени – до момента их прорезания потоком; ветровой режим – эпизодически, во время преобладания господствующих ветров. В любом случае это воздействие находит свое отражение в распределении глубин в самом русле и как результат длительной (геологической) истории развития русла – в строении долины реки в целом. При параллельном смещении врезанного прямолинейного русла поперечный профиль его приобретает отчетливо выраженную асимметрию. При совпадении направленности действия нескольких факторов асимметрия прослеживается более четко. Один из берегов становится ведущим, вблизи него располагается динамическая ось потока, здесь же располагаются наибольшие глубины. Параллельное смещение русла может наблюдаться и при впадении притоков, отжимающих поток к противоположному берегу. Периодические деформации для врезанных прямолинейных русел не характерны.

Деформации широкопойменных прямолинейных русел в большей мере, чем врезанных, определяются кинематической структурой потока. Но и для них гидравлические предпосылки трансформации в другие морфодинамические типы могут не реализовываться. Расчеты показателя квазиоднородности потока И.Ф.Карасева (1975) показали, что у 46 % исследуемых русел данной разновидности в потоке наблюдается как минимум две ветви, у 42 % – отмечается блуждание динамической оси потока и только у 12 % – поток квазиоднороден. Это объясняется рядом факторов, обуславливающих формирование нетрансформирующихся прямолинейных русел: недостаточное количество (по сравнению с трансформирующимися руслами) руслообразующих наносов при высокой транспортирующей способности потока и повышенная противозерозионная устойчивость пород, слагающих берега и ложе. При недостаточном количестве руслообразующих наносов русловые формы оказываются низкими, не обсы-

Таблица 4.2. Скорости смещения побочной и осередков в нетрансформирующихся прямолинейных руслах ряда рек.

Река – пост	Интервал лет	Скорость смещения, м/год
Пинега – Засурье	1968 – 1980	71
Днестр – Дубоссары	1984 – 1987	50
Припять – Коробы	1960 – 1975	46
Вычегда – Чакула	1910 – 1995	100 – 200

хающими даже в межень, что ограничивает возможность их зарастания и стабилизации. Высокая транспортирующая способность потока также препятствует зарастанию побочной и осередков, обуславливая их перемещение (табл. 4.2), благодаря чему они успевают сместиться на свою длину за несколько лет – срок, недостаточный для образования поймы из прирусловых отмелей, островов – на бывших осередках и т.д.

Кроме того, высокая противозерозионная устойчивость пород, слагающих берега (уплотненные или торфяники, суглинки, глины), ограничивают возможность искривления русла и препятствуют сокращению дефицита наносов. В таких условиях трансформация прямолинейных широкопойменных русел в другие морфодинамические типы не носит общего характера, проявляясь лишь иногда в виде местных деформаций. Обычно это выражается в расширении русла там, где в строении берегов отмечается чередование пород разной противозерозионной устойчивости. Большая подвижность форм руслового рельефа способствует равномерному размыву берегов за счет постоянного изменения положения динамической оси потока, и в то же время препятствует их направленному постоянному размыву.

Наиболее распространенным видом деформаций динамически устойчивых (нетрансформирующихся) русел является их направленное смещение в сторону коренного берега. Благодаря затоплению односторонней поймы во время половодья устанавливается поперечный уклон водной поверхности и развивается поперечная циркуляция, обуславливающая перенос наносов от коренного берега к пойменному. По наблюдениям на Иртыше у г. Омска (Гордилов, Рассомахин, 1961) и на Волге (данные А.М.Фролова 1912 г., приведенные Н.И.Маккаевым, 1955) на пике половодья поперечный уклон мо-

жет сравниваться с продольным, достигая 0,12 ‰ в первом и 0,10 ‰ во втором случаях. В результате возле коренного берега формируется глубокий плес, а у пойменного – отмели. Возникающий при этом дефицит наносов в плесовой части русла способствует активизации размыва коренного берега. На Северной Двине, где он сложен несортированной толщей мергелей, аргиллитов, алевролитов, скорость отступления его составляет (при высоте берега до 30 м) первые сантиметры в год (Маккавеев, 1955); на верхней Оби отступление 80-100-метрового уступа Степного Приобского плато, сложенного легко размываемыми лессовидными суглинками, достигает 0,5 м в год (Трепетцов, 1964). При большом стоке наносов возле коренных ведущих берегов периодически формируются побочни, которые со временем отторгаются, на их месте вновь образуется плесовая ложина, и направленный характер параллельного смещения русла сохраняется.

Согласно расчетам показателя квазиоднородности потока в прямолинейных руслах, которые были отнесены к трансформирующимся, в 27 % случаев поток может ветвиться, в 49 % – отмечается блуждание динамической оси, в 24 % – поток квазиоднороден. Это указывает на то, что трансформация прямолинейных русел данной разновидности может происходить несколькими путями, но в то же время при определенных условиях русло может приобрести динамическую устойчивость.

Одним из возможных путей трансформации прямолинейного русла может быть восстановление первоначального его облика. Такая трансформация достаточно хорошо известна (Маккавеев, 1955; Попов, 1965; Чалов, 1979). Вместе с тем она может происходить и без восстановления предшествующего ему типа русла по схемам: разветвленное – прямолинейное – извилистое; извилистое – прямолинейное – разветвленное. Примерами могут служить трансформирование русел р. Миссисипи в нижнем течении (Senour, 1946), участка р. Манавату (Page, Heerdegen, 1985) и ряд других. Большое значение для трансформации прямолинейного русла в другие типы имеют факторы, которые, при наличии гидравлических предпосылок, способствуют этой трансформации: слабая противозерозионная устойчивость к размыву берегов, сложенных в основном несвязанными грунтами (лессами, супесями, песками), малая подвижность форм руслового рельефа. В этих условиях происходят закрепление извилистости динамической оси потока в форме русла благодаря быстрому размы-

ву берегов и образование в их плановых очертаниях выбоин (вогнутостей) или формирование первичного узла разветвления при превращении осередка в остров.

В ряде случаев трансформирующиеся прямолинейные русла могут приобрести динамическую устойчивость. Это происходит благодаря повышенным скоростям смещения форм руслового рельефа для русел с двусторонней поймой либо закрепления русла вдоль ведущего коренного берега. Однако такая динамическая устойчивость имеет временный характер, хотя и может сохраняться в течении нескольких десятилетий. Обычно она нарушается в циклы маловодных лет, когда происходит периодическое обсыхание в летнюю межень даже невысоких побочней и осередков, либо под влиянием случайных факторов (например, оползня, вызвавшего отклонение потока от коренного берега до тех пор, пока его тело не будет размыто; однако этого времени бывает достаточно для образования излучины или местного расширения русла, в котором формируется остров). "Оползневой" генезис имеют некоторые одиночные узлы разветвления на Днестре ниже Дубоссарской ГЭС, для которого этот тип русла вообще не характерен.

Для трансформирующихся прямолинейных русел с односторонней поймой, как и для динамически устойчивых, деформации являются в основном направленными горизонтальными, выраженными в параллельном смещении русла относительно своей оси. В ряде случаев при большой ширине русла, для участков прямолинейного русла с ведущим коренным берегом показатель квазиоднородности потока может оказаться выше 9,0, что указывает на наличие ветвления потока. В таких случаях происходит реализация гидравлических предпосылок разветвления самого русла – формируются острова у пойменного берега. Типичным примером развития односторонних разветвлений является верхняя Обь ниже устья Чарыша.

4.5. Регулирование прямолинейных русел

Круг практических задач, связанных с учетом формирования и особенностей развития различных типов русел, достаточно широк: улучшение судоходных условий, гидроэнергетическое строительство, возведение инженерных сооружений на берегах, строительство

мостов, трубо-энергопереходов, сельскохозяйственное освоение пойм и т.д. Одним из наиболее емких в отношении практического использования теории русловых процессов является водный транспорт. Обеспечение судоходных путей, особенно в условиях свободного развития русловых деформаций на малоустойчивых реках, требует проведения дорогостоящих мероприятий. Выбор наиболее рационального подхода к улучшению условий судоходства на основе учета условий формирования, закономерностей образования и деформаций русел рек и разработка на этой основе наиболее эффективных мероприятий – главные проблемы, возникающие при регулировании русла в водотранспортных целях.

Установленные различия в генезисе и деформациях для разновидностей прямолинейного русла в условиях как свободного, так и ограниченного развития русловых деформаций, дают возможность определить оптимальные приемы для улучшения условий судоходства и подобрать ведущий метод выправления русла. Системы выправления русла можно при этом разделить на четыре типа: сплошное выправление двусторонним стеснением русла сооружениями; сплошное выправление путем закрепления извилин динамической оси потока и создание искусственных ведущих берегов; выправление путем приведения к высокому берегу с односторонним расположением сооружений; выборочное выправление. По существу эти же системы применимы при стабилизации русла для решения любых инженерных и водохозяйственных задач. Кроме того, для улучшения условий судоходства на наиболее затруднительных участках, а также для обеспечения подходов к портам, водозаборным сооружениям, причалам и т.д. проводят дноуглубительные работы. С развитием современной землечерпательной техники само дноуглубление стало одним из методов выправления русла. Зачастую оно одно, без возведения сооружений, лишь с использованием отвалов грунта, может обеспечить регулирование русла. В условиях преобладающей роли землечерпания специально возводимые сооружения играют часто подсобную роль в выправлении русла.

Для каждой разновидности прямолинейного русла можно подобрать метод выправления, который давал бы наиболее эффективные результаты. Для врезанных прямолинейных русел таковым является выборочное выправление. Объектами выправления становятся те участки, которые создают наибольшие затруднения для судоходства.

В зависимости от природы возникновения затруднительного участка выбирается способ его выправления. В местных расширениях наиболее эффективным является двустороннее стеснение русла. Если выправление русла производится совместно с дноуглублением, то оно обеспечивает устойчивое положение прорези, существенно снижает ее заносимость и полностью или в значительной мере ликвидирует побочный нежелательный эффект разработки прорези – снижение уровней воды. Из-за большой устойчивости врезанных прямолинейных русел и слабой податливости размыву пород, слагающих берега, выправление можно проводить способом одностороннего возведения сооружений.

В условиях свободного развития русловых деформаций для нетрансформирующихся прямолинейных русел, обладающих динамической устойчивостью, но имеющих, благодаря размывам одного или обоих берегов, тенденцию к расширению русла, наиболее эффективным методом выправления может служить сплошное выправление с двусторонним стеснением. Оно не только обеспечивает увеличение глубин, но и устраняет возможность дальнейшего расширения русла, повышая транспортирующую способность потока, приводящую к увеличению глубин за счет саморазмыва русла. В тех случаях, когда берега таких рек сложены породами, обладающими высокой противэрозивной устойчивостью, возможно одностороннее стеснение русла.

Наиболее радикальным способом выправления затруднительного участка как для трансформирующихся, так и нетрансформирующихся русел является приведение его к ведущему коренному берегу (Проектирование судовых ходов ..., 1964). Этот способ сочетает дноуглубительные и выправительные работы: грунт, изымаемый из прорезей, отсыпается со стороны пойменного берега в виде полузапруд. Такие сооружения достаточно устойчивы и не размываются из-за замедления скоростей течения в зоне взаимодействия пойменных и русловых потоков. Кроме того, необходимо проводить работы по выравниванию линии коренного берега, т.е. устранять его неровности – выступы, мысы, выбоины, которые могут привести к трансформации прямолинейного русла в другой морфодинамический тип.

Для трансформирующихся прямолинейных русел с двусторонней поймой и тенденцией к возобновлению другого морфодинамического типа обычно применяется метод сплошного выправления, сочетающий в себе укрепление подмываемых берегов и возведение со-

оружений. Только в этом случае можно обеспечить сохранение прямолинейной формы русла. Особое внимание при этом следует обращать на укрепление подмываемых берегов, так как в трансформирующихся прямолинейных руслах побочни обычно сравнительно малоподвижны, извилистость динамической оси потока быстро закрепляется.

Глава 5 Излучины (извилистые русла)

5.1. Генезис и типизация излучин

Излучины – наиболее распространенная форма русла. Поэтому вопросам их генезиса, типизации, динамики потока в литературе всегда уделяется достаточно большое внимание.

В отношении типов речных излучин предложено большое количество различных терминов, определяющих условия их формирования, плановые очертания, характер деформации, проявляющихся в форме их смещения, степень кривизны. По условиям развития выделяются врезанные, свободные и адаптированные излучины. В пределах врезанных излучин русло контролируется высокими незатопляемыми берегами, сложенными коренными породами или древним аллювием; очертания русла в плане повторяют форму узкой, часто беспойменной долины. Свободные излучины развиваются в пределах широкой поймы, образовавшейся вследствие размывов меандрирующей рекой сложенных легкоразмываемыми породами (песками, супесями, лессовидными суглинками) берегов. Адаптированными (рис. 5.1) являются такие излучины, в пределах которых русло частично контролируется коренными берегами; они формируются при изгибе широкопойменного русла в местах подхода к коренному берегу (вынужденные) или отклонения от него. К этому же классу относятся излучины, своими вершинами касающиеся коренных трудноразмываемых берегов, которые в этом случае ограничивают возможности поперечного их смещения (ограниченное меандрирование, по классификации ГГИ), а также вписанные излучины (Букреев, 1987), привершинные части которых имеют вогнутый коренной (как правило, террасовый) берег, сложенный аллювиальными песками или супесями.

Помимо морфогенетического подхода к классификации речных излучин, отечественными и зарубежными исследователями предложен ряд морфологических классификаций, в которых при помощи

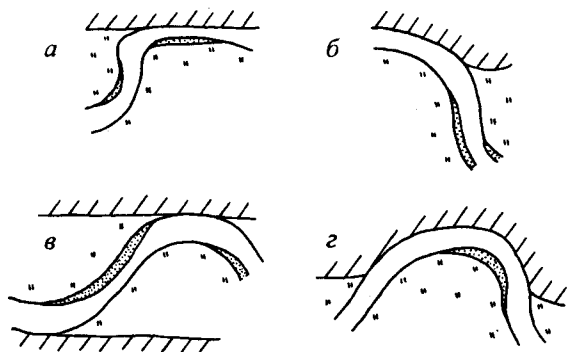


Рис. 5.1. Разновидности адаптированных излучин:

а – вынужденная; б – адаптированная с верхним крылом у коренного берега; в – сегментная, с продольным перемещением; г – вписанная

разнообразных количественных показателей, либо на качественном уровне охарактеризованы плановые очертания излучин (Маккаев, 1971; Гришанин, Замышляев, 1985). Например, Н.И.Маккаев (1971) выделяет сегментные, петлеобразные, синусоидальные, прорванные, заваленные, сундучные излучины, которые по соотношению их морфометрических параметров (радиуса кривизны r и стрелы прогиба h) могут быть пологими ($r > h$) или крутыми ($r < h$). Сундучные излучины представляют комбинацию вынужденных и адаптированных излучин, разделенных короткими отрезками прямолинейного русла возле коренного берега, образующим вставку между нижним крылом одной и верхним крылом другой излучины. Заваленные излучины, у которых вершины смещены относительно стрелы прогиба вверх или вниз, представляют собой гипертрофированные формы, образование которых связано с воздействием дополнительных (внешних по отношению к потоку) факторов: они чаще всего являются вынужденными, т.е. формируются под влиянием коренного берега, встречаются в устьевых областях рек как следствие нагонных или приливных воздействий на динамику потока (Кортаев, Лодина и др., 1978) и т.д. Излучины других форм (сегментные, петлеобразные, синусоидальные) свойственны как широкопойменному, так и врезанному руслу (рис. 5.2), причем, очертания излучин в плане отражают форму их смещения и стадию развития (эволюции) во времени, т.е. в конечном счете являются морфодинамической характеристикой русла. Отличия врезанных и свободных излучин заключаются при этом в скоростях горизонтальных деформаций (проявляющихся в геологические и исторические отрезки времени у врезанных излучин и ежегодном размыве и намыве берегов у свободных) и

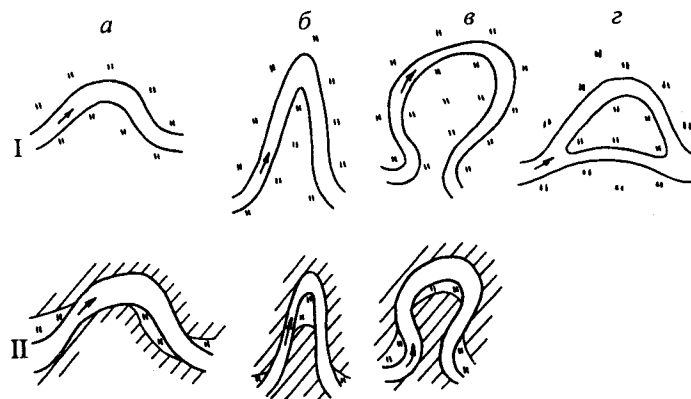


Рис. 5.2. Морфодинамические типы свободных (I) и врезанных (II) излучин:

а – сегментная с продольным перемещением; б – синусоидальная (с поперечным перемещением); в – петлеобразная (с продольно-поперечным перемещением); г – прорванная

различной роли потока половодья в их формировании: у врезанных излучин он практически весь сосредотачивается в русле, тогда как у свободных большая его часть растекается по широкой пойме (до 60-80% общего расхода воды). Прорванные излучины характерны только для широкопойменного русла, являясь, в основном, формой свободного меандрирования.

Таким образом, морфодинамическая классификация извилистого русла может быть представлена в виде взаимосвязанных блоков (рис. 5.3): I блок включает в себя морфогенетические типы излучин, формирование которых определяется геолого-геоморфологическими условиями формирования русла; II блок – собственно морфодинамический, состоящий из двух подблоков (частей), соответствующих форме излучин в плане и характеру их деформации (А) и влиянию на формы и деформации излучин коренного берега (Б). Подблок Б, следовательно, относится только к адаптированному руслу. Излучины могут быть крутыми или пологими, причем петлеобразные или синусоидальные – только крутыми.

Гипотезы относительно причин меандрирования многочисленны. По подсчетам Р.Шпенглера (Экспериментальная геоморфология, 1969), к середине 50-х годов их насчитывалось около 40. С тех пор

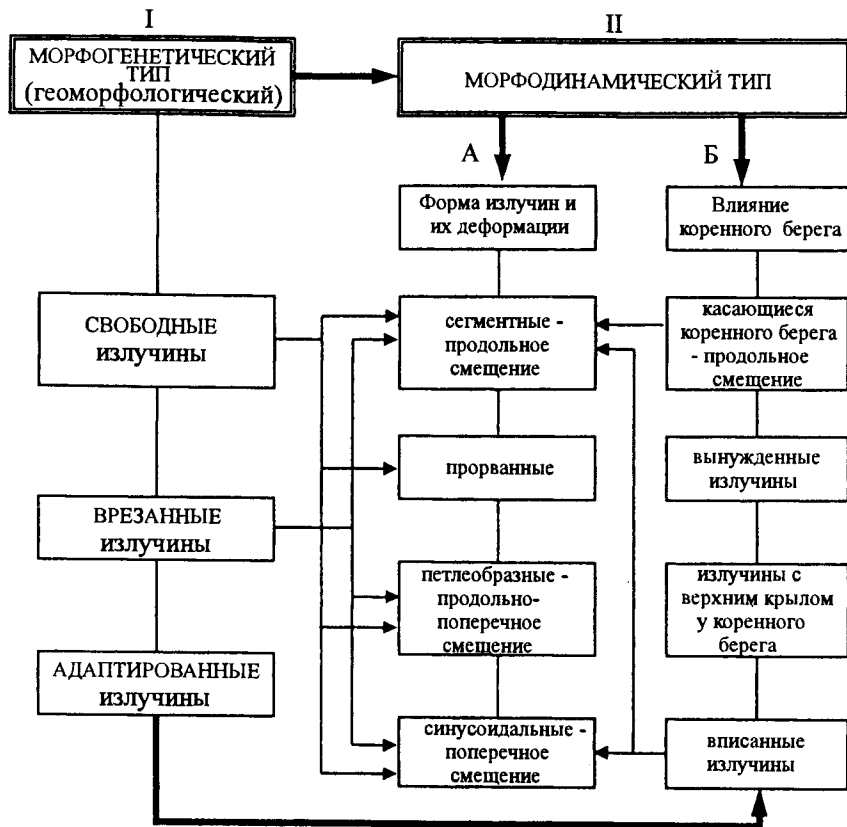


Рис. 5.3. Схема морфодинамической классификации извилистого русла

количество гипотез продолжало увеличиваться, причем в большинстве из них описывалось формирование свободных излучин. Несмотря на существенные различия во времени появления гипотез и в методах исследований, можно определить несколько основных направлений, по которым шло изучение этого вопроса. Наиболее распространенными являются гипотезы, приписывающие возникновение извилистости: 1) вращению Земли, т.е. действию силы Кориолиса (К.Бэр, Х.Икин, А.Энштейн и др.); 2) местным нарушениям течения, под которыми подразумеваются все неупорядоченные движения воды в потоке – колебания уровня воды, вторичные течения, турбу-

лентность и т.д., в том числе те, которые вызваны случайными препятствиями в русле (А.Пенк, В.Дэвис, Ф.Экснер, П.Вернер и др.); 3) проявлению принципов максимизации (М.Джефферсон, А.Шоклич, К.Инглис) или минимизации потерь энергии потока (Л.Леополд, У.Лангбейн); 4) способности потока эродировать берега и откладывать наносы (Д.Фридкин, Г.Метзес, Д.Бразертон).

Часть гипотез представляет сейчас чисто исторический интерес, не соответствуя современному уровню знаний (таковы, например, гипотезы объясняющие возникновение излучин влиянием силы Кориолиса). В большинстве же других гипотез содержатся рациональные положения, в той или иной степени объясняющие некоторые особенности меандрирования. Сложность проблемы в значительной мере увеличивается из-за многообразия форм проявления процесса меандрирования в различных природных условиях, трудностей сопоставления закономерностей, полученных в эксперименте, с особенностями меандрирования естественных речных русел. Следствием этого является отсутствие единого подхода и появление все новых гипотез.

Выход из сложившейся ситуации обычно ищут в использовании физических закономерностей, поисках общего закона, которому подчиняется формирование меандрирующих русел независимо от природной обстановки. Широкую известность получило применение при изучении меандрирования концепция энтропии Л.Леополда и У.Лангбейна (Leopold, Langbein, 1966). По их мнению, меандрирование – это наиболее вероятная форма, которую может принять русло, так как при этом река производит наименьшую работу на повороте. Такому условию отвечает форма русла в виде предложенной авторами "сингенерированной кривой". На концепцию энтропии опирался Ч.Янг (Yang, 1971), сформулировавший в качестве общего для меандрирующих рек "закон наименьшей скорости затрат энергии": стремясь к достижению условий равновесия, природные потоки формируют свое русло таким образом, чтобы скорость затрат потенциальной энергии на единицу массы воды вдоль по течению была бы минимальной. Ч.Янг доказывает, что, согласно этому закону, естественные неразветвленные потоки могут иметь лишь меандрирующее русло. Однако само использование термодинамической концепции энтропии в теории русловых процессов, по мнению некоторых исследователей, неправомерно (Hooke, 1975).

Убедительной представляется точка зрения, согласно которой образование свободных излучин является следствием неустойчивости прямолинейного течения потока (Кондратьев, 1954). Эта гипотеза подтверждена с позиций теории гидродинамической устойчивости (Карасев, 1975; Гришанин, Замышляев, 1985).

Искривление струй потока в прямолинейном русле, возникшее как случайно – вследствие имеющихся в русле препятствий (в том числе под влиянием крупных гряд), впадения притоков, так и закономерно – благодаря наличию в турбулентном потоке соизмеримых с размерами русла вихревых структур (Великанов, 1958), порождает силы, способствующие закреплению изгиба, его развитию и, таким образом, обуславливающие динамическую устойчивость извилистой формы русла. Такими силами являются возрастание эрозионной и транспортирующей способности потока и изменение направленности движения наносов, возникающие из-за образования определенной гидродинамической структуры потока. Транспортирующая и эрозионная способность потока увеличиваются на повороте русла за счет возрастания, по сравнению с прямолинейными участками, неравномерности скоростного поля и, как следствие, местного увеличения кинетической энергии потока (Маккавеев, 1955). Впервые это явление описал в начале XX века А.Я.Миловитч, показавший, что у идеальной жидкости живая сила на повороте удваивается. Реальное увеличение, по экспериментальным данным Н.И.Маккавеева (1955), составляет в среднем около 50%. Более интенсивная эрозия на участке искривления струй создает условия для закрепления извилистости динамической оси потока в рельефе дна прямолинейного русла. Дальнейшее ее развитие обусловлено особенностями транспорта наносов на изгибе потока и условиями размыва берегов.

Извилистость меженного потока, обтекающего расположенные в шахматном порядке побочни, по мнению большинства исследователей, является начальной стадией меандрирования. Это явление изучалась в лабораториях Н.С.Шарашкиной (1959), Н.С.Знаменской (1976), Х.Шеном и С.Комурой (Shen, Komura, 1968), Н.И.Маккавеевым и др. (Экспериментальная геоморфология, 1969), Н.Сукэгавой (Sukegava, 1970), И.Каркзом (Karcs, 1971), в натуральных условиях – Д.Левиным (Lewin, 1976), Р.С.Чаловым (1979) и многими другими. При достаточной устойчивости русла благодаря особенностям гидродинамической структуры потока побочни увеличиваются в

размерах; одновременно, по тем же причинам, размываются противоположные побочням берега; в результате, происходит дальнейшее искривление потока. Рост площади и высоты побочней приводит к их постепенному зарастанию и превращению в пойму, то есть к образованию шпор излучин русла. По мере своего развития они приобретают форму и размеры, соответствующие параметрам потока и другим условиям руслоформирования на данном участке реки. По-видимому, именно таков механизм формирования свободных излучин.

Таким образом, предпосылки для меандрирования заложены в структуре самого потока: неустойчивости прямолинейного движения, турбулентных вихревых образованиях и т.д. Однако реализация этих условий в образовании извилистой формы русла связана с проявлением дополнительных факторов, определяющих закрепление изгиба потока в очертаниях самого русла, что связано с формированием крупных побочней и размывом противоположных берегов, т.е. с грядовым движением наносов, либо с внешними воздействиями на поток (подходом реки к коренному берегу, его мысами и т.д.), создающими первичный изгиб русла. При этом, как было показано выше, излучина развивается как форма русла при соотношении его длины l_p к шагу излучины L (длина по прямой линии, соединяющей соседние точки перегиба русла) При этом, как было показано выше, излучина развивается как форма русла при соотношении его длины l_p к шагу излучины L (длина по прямой линии, соединяющей соседние точки перегиба русла) $l_p \geq 1,15L$.

Влияние коренных (или террасовых) берегов на формирование излучин проявляется в образовании адаптированных излучин трех разновидностей – вынужденных, с верхним крылом у коренного берега (в ряде вариантов морфодинамической классификации они названы собственно адаптированными) и вписанных. Первые две из них – адаптированные и вынужденные излучины – часто рассматриваются как части одной и той же сундучно-трапециевидной излучины, образованной изменением направления-течения потока возле незатопляемых берегов, конусов выноса оврагов, оползней и т.д. Наиболее обычной причиной их формирования является изгиб русла при его подходе к коренным или террасовым берегам и последующий отход от него под влиянием выступа, мыса, оползня и т.д. В относительно узкой долине, где русло, образуя вынужденные и адаптированные излучины, последовательно располагается у противоположных бор-

тов, эти излучины формируют серии, составляющие морфологически однородные участки. В широкопойменной долине они представляют собой одиночные формы, встречающиеся среди свободных излучин или других типов русла.

Относительно формирования врезанных излучин наибольшей известностью пользуется гипотеза, изложенная еще В.Дэвисом (1962). Она связывает извилистость врезанных русел с врезанием рек, ранее меандрировавших в широкопойменных долинах. Иными словами, врезанные излучины рассматриваются как наследующие свободные излучины. Причину врезания реки, как правило, связывают с тектоническим поднятием территории. В целом ряде случаев, однако, конкретные условия формирования врезанного извилистого русла и палеогеографические данные приходят в противоречие с гипотезой о "наследовании"; далеко неоднозначны и причины врезания реки. В качестве таковых, наряду с локальными тектоническими поднятиями, называют снижение базиса эрозии (Cole, 1930; Hack, 1965), изменения климата (Экспериментальная геоморфология, 1969).

Начальная стадия формирования врезанных излучин, наследующих свободные, обнаружена на р. Тереке в 225–212 км от устья, где река пересекает неотектоническое поднятие вдоль поперечного разлома (Рашутин, Чалов, 1995). Связанное с этим поднятием повышение кровли коренных супесчано-суглинистых пород привело к врезанию в них русла, стабилизации его формы (здесь образовались синусоидальные излучины, скорость смещения которых составляет 0,7–0,8 м/год, тогда как на смежных участках деформации сегментных излучин достигают 7–15 м/год), образованию цоколя и повышению уровня поймы.

Сложность проблемы образования врезанных излучин усугубляется терминологической путаницей. В отечественной и зарубежной литературе предложено множество терминов для обозначения разновидностей врезанных излучин, которые обладают разной степенью общности, дублируют друг друга. Наиболее общим является понятие "изгиб долины" – характеристика формы, не имеющая генетического содержания. Термин "врезанные излучины" или "врезанные меандры" целесообразно использовать по отношению к изгибам русла и связанным с ними изгибам долины, развитие которых обусловлено процессом меандрирования, т.е. закономерной трансформацией русла и его плановых очертаний под влиянием определенной динамиче-

ской структуры потока на повороте. Для обозначения крупных изгибов русла и долины, развитие которых (как единого целого) не связано с процессом меандрирования или не сводится лишь к нему, предложен термин "макроизлучины" (Матвеев, 1985; Панин, 1991).

Различия между свободными и врезанными излучинами основаны на разном соотношении между вертикальными и горизонтальными русловыми деформациями; если время, за которое река смещается вниз по долине на расстояние шага излучины, больше, чем время, требующееся для превращения высокой поймы в надпойменную террасу в результате врезания реки, то шпоры излучин в тыловых частях неизбежно будут представлены фрагментами этих террас, то есть свободномеандрирующее русло будет превращаться во врезанное. По оценкам Н.И.Маккавеева и др. (Экспериментальная геоморфология, 1969), данным о темпах врезания рек А.А.Никонова (1973) и исследованиям А.В.Панина (1991), этот вариант развития извилистости речных долин и, в частности, врезанных излучин вполне достоверен.

Наследование врезанными излучинами свободных не означает точного соответствия рисунка врезанного извилистого русла и древней свободно меандрировавшей реки. По мнению Э.Мартона (1945), объяснению образования врезанных излучин с позиций гипотезы В.Дэвиса "повредило то обстоятельство, что оно было некогда сформулировано в таких терминах, которые заставляли думать о врезании меандров на месте, тогда как меандры перемещаются" (стр. 97). Следует отметить, что сам В.Дэвис не утверждал, что рисунок врезанного извилистого русла должен оставаться неизменным; напротив, в его работах рассматривались переформирования врезанных излучин (Дэвис, 1962).

Случай более или менее полного наследования рисунка свободно меандрирующей реки представляют довольно большую редкость. Таковы, по-видимому, участки рек Колорадо и Сан-Жуан в пределах плато Колорадо (Moore, 1926); рек Осейдж, Гасконад и Мерамек в пределах плато Озарк в США (Tarr, 1924). В большинстве же случаев конфигурация террас свидетельствует о том, что горизонтальные деформации русла в процессе врезания столь значительны, что о наследовании можно говорить лишь в отношении первоначальной причины формирования извилистости врезанного русла.

Достаточно интенсивно врезающаяся река может наследовать не свободные излучины русла, а изгибы долины (в том числе и широкопойменной), обязанные своим происхождением приспособлению ре-

ки к неровностям исходного рельефа. И.С.Шукин (1960) назвал их "первичными излучинами". Исходный, предшествующий этапу интенсивного врезания рельеф может иметь самый разный генезис. Примеры заложения речной сети в соответствии с неровностями бывшего дна озер приводят У.Коль (Cole, 1930) и Д.Хак (Hack, 1965). Причиной образования первичных излучин могут служить неровности моренных равнин, к которым приспособливается формирующаяся в процессе отмирания ледникового покрова речная сеть. Таковы, например, долины р.Немана при пересечении им моренной Балтийской гряды. То же происходит при формировании русла на днище бывшего озера, спущенного или заполненного торфами. Излучины такого рода имеются на верхней Сухоне, протекающей по дну пра-Кубенского озера, зарегулированной современным Кубенским озером, практически лишенной руслообразующих наносов и поэтому не могущей образовывать свободные излучины, на Бурле, Кулунде, Барнаулке – реках Степного Предалтайского плато, наследующих ленточные борозды и врезанные в днища бывших ранее здесь озер. Такие русла, вне зависимости от их формы в плане, в том числе излучины, предложено называть пассивно-приспособленными (Русловые процессы на реках Алтайского края, 1991).

Первичные, наследуемые в ходе дальнейшего врезания изгибы долины могут быть связаны со структурно предопределенными неровностями исходного рельефа. Подобные изгибы формируются при огибании реками положительных морфоструктур (Самарская Лука р.Волги), при приспособлении речной сети к ослабленным зонам тектонической трещиноватости (реки бассейнов Алдана, Амги, Нижней Тунгуски и др.), к активным разломам (реки Тянь-Шаня, Кавказа и др.) (Морфоструктурный анализ, 1979).

Изгибы русла и долины формируются и непосредственно в процессе врезания реки. Они образуются за счет эпигенетического или antecedentного врезания, при котором река проецируется на подстилающие породы, рельеф кровли, структура или особенности литологии которых заставляют ее изгибаться (Cole, 1930; Билибин, 1956). Возникновение изгибов долины в период врезания может быть связано не с внешними факторами (древним рельефом, структурой или литологией коренных пород), а определяться гидродинамической структурой потока. Извилистость его динамической оси формируется не только в условиях широкопойменной долины; она наблюдается

во врезанных руслах и при определенных условиях может трансформироваться во врезанные излучины. Пример подобного развития – врезанные излучины рек равнины Онтанагон на южном побережье озера Верхнего в США (Hack, 1965). Начальную стадию этого процесса – извилистость динамической оси потока, огибающей расположенные в шахматном порядке и сложенные коренными породами "побочни" – можно наблюдать на участке интенсивного врезания русла реки Яны при пересечении Куларского хребта (Матвеев и др., 1992).

Врезанные излучины и извилистость речных долин в целом имеют, таким образом, полигенетическую природу; в каждом конкретном случае исходные условия формирования могут быть различными, причем их определение далеко не всегда возможно, так как многие признаки, свидетельствующие об их происхождении, утрачиваются в ходе развития долин.

5.2. Динамика потока на излучинах

Наибольшей известностью пользуются исследования динамики потока в извилистом русле, выполненные Н.Н.Жуковским, А.Я.Миловичем, В.М.Маккаевым, Н.Е.Потаповым, А.К.Ананяном, М.П.Кожениковым, К.И.Россинским и И.А.Кузьминым, Н.Е.Кондратьевым, И.Л.Розовским, К.В.Гришаниным, среди зарубежных исследователей – С.Мокмором, А.Шукри, Г.Эйнштейном, Т.Прус-Часинским, А.Иппеном, П.Дринкером. Результаты этих и других исследований, противоречивы, нередко с трудом согласуются с натурными данными. Подобное положение объясняется тем, что большинство из них основывается на экспериментах, проводившихся на лабораторных моделях (обычно жестких), параметры которых, как правило, не соответствовали принципам геометрического, режимного или силового подобия (Экспериментальная геоморфология, 1969). Число же натуральных исследований структуры потока на излучинах до сих пор остается незначительным. Известны работы Н.С.Лелявского на Днепре, относящиеся к рубежу XIX и XX веков, И.Л.Розовского (1957) на Десне, ГГИ на Юля-Йоки и Мархе (Кондратьев и др., 1959), Полонети (Виноградов, 1970), Иртыше (Ярных, 1978); А.А.Зайцева (1979) на Виллоу, Е. Хайкина (Hickin, 1978) и некоторые другие.

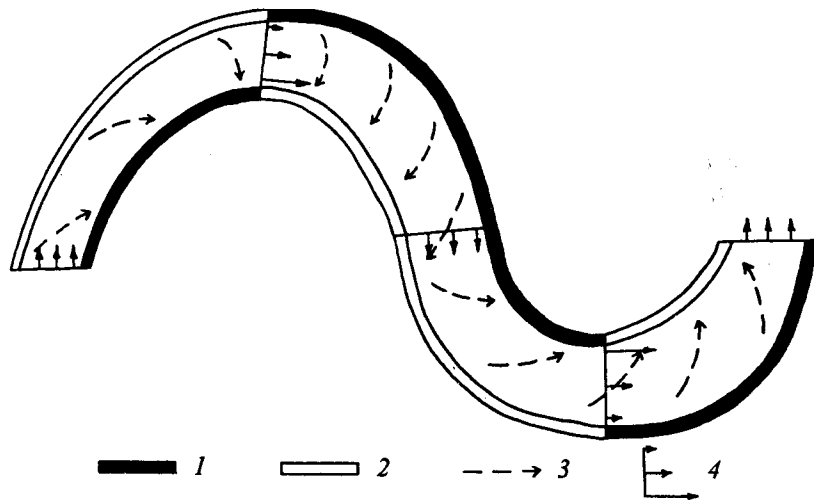


Рис. 5.4. Соотношение скоростного поля потока (зон замедления и ускорения течения) и циркуляционных течений на излучинах русла (по Н.И.Маккавееву, 1955).

1 – зоны ускорения течения; 2 – зоны замедления течения; 3 – направление придонных струй потока; 4 – распределение поверхностных скоростей в характерных сечениях русла.

Главные особенности динамики потока на изгибе, по И.Л. Розовскому (1957), – поперечный уклон водной поверхности и связанная с ним поперечная циркуляция в потоке; перераспределение скоростей по вертикали и по ширине потока с образованием закономерного поля скоростей и зон ускорения и замедления течения (Маккавеев, 1955); возможность отрыва потока от берегов с образованием возле них водоворотных зон; дополнительные потери энергии за счет гидравлических сопротивлений в извилистом русле.

Поперечная циркуляция и скоростная структура потока, накладываясь в своем взаимодействии друг на друга, изменяются по мере развития излучины (рис. 5.4). С ростом ее кривизны увеличивается поперечный уклон водной поверхности на изгибе и, соответственно, активизируются циркуляционные течения. Вместе с тем растет и дифференциация скоростного поля потока, что сопровождается увеличением его кинетической энергии. С другой стороны, чем круче излучина и длиннее русло, тем больше его изгиб, тем больше потери энергии по длине за счет активизации циркуляционных течений,

увеличения турбулентности потока и т.д. Н.И.Маккавеев (1955) установил, что гидравлическая выгодность извилистой формы русла утрачивается в тот момент, когда местный рост кинетической энергии потока за счет неравномерности поля скорости становится равным потерям энергии потока. Это условие Н.И.Маккавеев определил критическим соотношением между длиной русла на излучине l_p и ее шагом L

$$l_p = 1,6 L,$$

переход через которое создает гидравлические предпосылки для спрямления излучины (формирование прорванной излучины) или ее трансформации в излучину другой формы.

Поперечный уклон и циркуляция являются результатом искривления струй потока в плане, неравномерности распределения их скоростей и действия на них центробежной силы. Водная поверхность повышается у вогнутого и понижается у выпуклого берега, причем, величина уклона прямо пропорциональна радиусу закругления. Относительно характера поперечной циркуляции мнения исследователей расходятся. Часть из них описывает движение потока на повороте как спиральное или винтовое, с отклонением поверхностных струй в сторону вогнутого, а придонных – в сторону выпуклого берега (Розовский, 1957; Гришанин, 1972; Brotherton, 1979); другие (Маккавеев, 1955; Великанова, 1969; Чалов, 1979) считают, что отклоняются лишь придонные струи, наименее инерционные и наиболее насыщенные наносами. Г. Метзес (Matthes, 1941) по результатам исследований на р.Миссисипи и других реках пришел к выводу, что в широких и относительно неглубоких руслах крупных рек поперечная циркуляция вообще не имеет сколько-нибудь серьезного значения. По мнению А.А.Зайцева (1979), влияние центробежной силы на поперечные течения отчетливо наблюдается только на малых реках и в лабораторных лотках. В крупных же естественных потоках оно затушевывается на фоне турбулентных пульсаций и случайных отклонений струй различными препятствиями; однако, многолетняя направленная работа центробежной силы должна сказаться на общем плане русла.

Скоростная структура потока на повороте в наиболее общем случае формируется так, что при входе на закругление (в верхнем крыле излучины) максимум скорости смещается к выпуклому берегу, а при выходе из него (в нижнем крыле) – к вогнутому. Таким образом,

стрежень смещается вниз по течению относительно геометрической оси русла. Распределение скоростей по ширине потока, согласно известному закону площадей $V^2 r = const$, относится к частному случаю. Экспериментальные исследования (Маккавеев, 1955; Розовский, 1957) показали, что реальное распределение зависит от относительной кривизны изгиба, формы поперечного сечения русла и его шероховатости. При повышении уровней воды стрежень потока в извилистом русле несколько спрямляется, описывая изгибы с большим радиусом кривизны за счет приближения к выпуклому берегу – явление, получившее название "блуждания динамической оси потока" (Проектирование судовых ходов..., 1964). В целом же, "скоростное поле потока на повороте русла не может быть представлено универсальной схемой, пригодной для всех возможных случаев формы русла и режима потока" (Маккавеев, 1955, стр. 269).

Вопрос об отрыве потока и образовании водоворотных зон на излуцинах изучался еще А.Я.Миловичем, предложившем в качестве критерия начала отрыва соотношение $r/b = 2,5-3,0$, где r – средний радиус кривизны; b – ширина русла. Дальнейшие исследования (Розовский, 1957) показали, что на отрыв потока влияет также соотношение между его шириной и глубиной и форма поперечного сечения. Вероятность отрыва увеличивается с ростом глубины и уменьшением крутизны откосов берега. Водоворотные зоны, как правило, встречаются в местах резкого снижения скоростей: в верхнем крыле изгиба – у вогнутого, в нижнем – у выпуклого берега.

В качестве основного параметра, определяющего величину гидравлического сопротивления потоку воды в извилистом русле, используется относительная кривизна русла (r/b). Для большинства свободно меандрирующих рек это соотношение в среднем близко к 2,0. Его устойчивость ряд исследователей связывает с достижением минимальных значений гидравлических сопротивлений извилистого русла (Leopold, Wolman, 1960; Грачев, 1983), другие, напротив, с максимальным гидравлическим сопротивлением, которое соответствует этому значению (Hickin, 1978; Davies, Sutherland, 1980). Вопрос о гидравлических сопротивлениях в извилистом русле и об их влиянии на процесс меандрирования остается, таким образом, недостаточно изученным.

В ряде исследований (Кондратьев и др., 1982; Грачев, 1983) гидродинамическая структура потока в извилистом русле рассматривается с использованием принципа удара и отражения. Такой подход

применялся ранее Г. Гарбрехтом (Кондратьев и др., 1959), но не получил широкого признания. Модель удара и отражения позволяет объяснить некоторые явления, наблюдающиеся в меандрирующем русле, однако наиболее разработанной в настоящее время остается модель поперечной циркуляции и скоростного поля потока.

5.3. Транспорт наносов, рельеф дна и деформации свободных излучин

Транспорт наносов в извилистом русле – один из наименее изученных аспектов процесса меандрирования. Это связано, в первую очередь, со сложностью постановки исследований в натуральных условиях. Известны попытки доказать, что меандрирование, по существу, не зависит от транспорта наносов. При этом обычно ссылаются на извилистость океанических течений или потоков талой воды на поверхности ледников, однако механизм ее образования имеет принципиальные отличия от меандрирования речных русел (Parker, 1976). Большинство исследователей считает чисто гидродинамические причины недостаточными для объяснения меандрирования; перемещение наносов играет не только пассивную роль, приспособливая дно и берега к извилистому потоку, но и является необходимым условием формирования самой извилистости русла, обуславливая образование скоплений наносов, закрепляющих в форме русла первичный изгиб потока.

Прямым отражением характера движения наносов является рельеф дна меандрирующих русел. Впервые его особенности описаны в прошлом веке французским инженером Л.Фаржом, который на основании своих исследований на р. Гаронне сформулировал ряд эмпирических "законов", определяющих характер расположения плесов и перекатов в меандрирующем русле. Эти закономерности в значительной мере были уточнены и дополнены русским инженером Н.С.Лелявским.

Закономерное сочетание плесов, перекатов и отмелей на излуцинах свидетельствует о размыве русел и выносе материала с участков, прилегающих к вогнутым берегам, отложении наносов у выпуклых берегов (в зонах замедления течения в нижних их крыльях) и в местах перегиба между соседними излуцинами, где происходит выравнивание скоростей по ширине потока и, как следствие, снижение его

транспортирующей способности. В механизме переноса частиц аллювия большинство исследователей важную роль отводит поперечной циркуляции потока. В то же время наблюдения на моделях и речных излучинах показывают, что при определенных условиях, особенно в случаях пологих изгибов и в широких руслах, поперечный перенос от вогнутого к выпуклому берегу отсутствует (Кондратьев, Ляпин и др., 1959). От преувеличения роли поперечной циркуляции в формировании излучин предостерегал Н.И.Маккавеев (1955). Правильнее считать, что циркуляционные течения усложняют формирование отмели у выпуклого берега, но не определяют его. Формирование же самой отмели у выпуклого берега есть следствие неравномерного поля скорости потока, приурочено к зонам ее замедления и, соответственно, снижения транспортирующей способности потока. Интересным представляется в этой связи подход, предложенный Р.Хуком (Hooke, 1975), который на основании тщательного изучения транспорта наносов и распределения донных касательных напряжений на модели излучины пришел к выводу о том, что рельеф дна извилистого русла формируется потоком таким образом, чтобы обеспечить в каждой точке касательное напряжение, необходимое для транспортировки поступающих наносов. Нарушение равновесия в ту или другую сторону вызывает либо размыв, либо аккумуляцию: так возникают и развиваются отмели у выпуклых и плесы у вогнутых берегов. Поперечная же циркуляция способствует размыву плеса, обуславливая дефицит наносов у вогнутого берега, и производит моделировку рельефа отмели. Возникновение асимметрии поперечного профиля русла на излучинах, характер распределения крупности донных наносов в его пределах, а также поперечный расход наносов в ряде современных исследований рассчитывается с использованием различных математических моделей (Сидорчук, Михинов, 1985).

Рост прирусловых отмелей у выпуклых берегов, кроме того, зачастую связан с приращением побочной – прибрежных частей крупных песчаных гряд, перемещающихся в русле (Чалов, 1979). Грядовое движение наносов на модели речной излучины описано З.М.Великановой (1969), которая обнаружила, что под влиянием циркуляционных течений гряды, смещаясь, отклоняются к выпуклому берегу и здесь замедляются, увеличиваясь в размерах.

Нарращивание отмели у выпуклого берега и смещение стрежня потока относительно геометрической оси русла, вызывающее преиму-

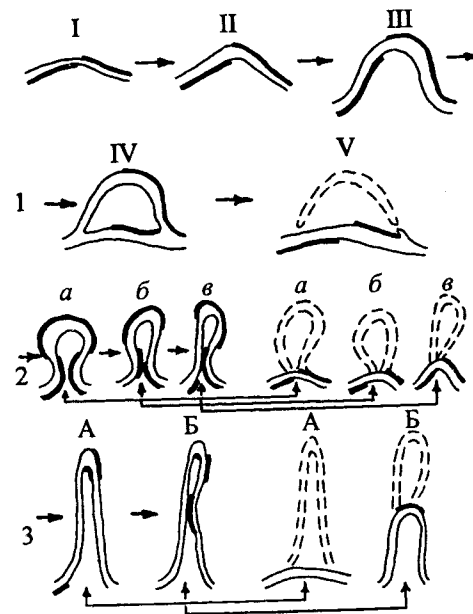


Рис. 5.5. Схема эволюции свободно меандрирующего русла:

I-V – стадии развития излучин; 1, 2, 3 – пути возможной трансформации крутых излучин; а, б, в – варианты трансформации петлеобразных излучин; А, Б – варианты трансформации синусоидальных излучин. Утолщенными линиями показаны зоны размыва берегов

ущественный размыв выпуклого берега в верхнем крыле излучины и вогнутого в нижнем, обуславливают перемещение излучины как в продольном, так и в поперечном по отношению к оси долины направлениях (Экспериментальная геоморфология, 1969). В процессе смещения, как правило, происходит увеличение кривизны излучины и интенсивности ее развития до достижения критического соотношения длины русла на излучине и ее шага (степени развитости излучины), $l_p = 1,6L$, т.е. до тех пор, пока сохраняется гидравлическая выгода извилистой формы русла по сравнению с прямолинейной. Близкие величины получены для показателей средней извилистости свободномеандрирующих русел (Попов, 1965), средней степени развитости спрямляющихся излучин (Лысенко, 1977). При превышении критической величины степени развитости свободные излучины либо спрямляются за счет формирования пойменного протока, либо трансформируются в излучины синусоидальной формы с затухающими по мере их развития деформациями, либо в петлеобразными (омеговидные) также с последующим затуханием деформации (рис. 5.5). Конкретные формы спрямления определяются условиями происхождения руслоформирующих расходов воды, а также высотой,

рельефом, растительностью и строением поймы (Чалов, 1979). При прочих равных условиях прохождение руслоформирующих расходов при затопленной пойме способствует спрямлению русла на стадии крутой сегментной излучины, когда $l_p \sim 1,6L$. В некоторых случаях спрямляется не одна, а серия крутых свободных излучин.

Таким образом, свободные излучины в своем развитии проходят ряд стадий, каждая из которых характеризуется специфическими особенностями их деформации (рис. 5.5). На первой стадии пологая сегментная излучина, степень развитости которой определяется соотношением $1,15 < l_p/L < 1,30$, в основном деформируется за счет размыва выпуклого берега в верхнем крыле и вогнутого в нижнем, что определяет ее преимущественно продольное смещение (т.е. вниз по долине реки вдоль оси пояса меандрирования). Так как кривизна русла при этом невелика (радиус излучины большой), скоростное поле потока слабо дифференцировано, поперечный уклон на изгибе незначителен, циркуляционные течения слабо развиты и искривление излучины происходит очень медленно. Вторая стадия развитой сегментной излучины ($1,30 < l_p/L < 1,50$) отличается активизацией как поперечной составляющей, так и продольного смещения. В третью стадию излучина становится крутой сегментной, степень ее развитости в среднем составляет $(l_p/L)_{cp} \sim 1,6$. Скорости деформаций достигают максимальных величин, излучина, сохраняя продольное смещение, активно искривляется за счет размывов вогнутого берега, причем фронт размыва смещается вверх по отношению к вершине излучины и ее геометрической оси.

Переход через критическое значение степени развитости излучины, когда $l_p/L > 1,6$, означает начало четвертой стадии ее развития, причем пути эволюции излучины в эту стадию могут быть различными. При благоприятных условиях происходит спрямление русла и образование прорванной излучины. Образование спрямляющего протока осуществляется вдоль наиболее понижений (тыловой) части пойменного сегмента, где сосредотачивается большая часть затопивших его вод половодья и устанавливается наибольший продольный уклон, иногда в 2–3 раза превышающий уклон русла по излучине. При этом пойменный поток использует наименее искривленные ложбины, межгрядные понижения и заводь в нижней части сегмента, сформировавшиеся на начальных этапах образования излучины и пойменного сегмента. Для этого варианта эволюции крутой излу-

ны последняя пятая стадия ее развития заключается либо в отмирании старого русла и превращении его в старичное озеро или широкую заболоченную ложбину с нижним концом в виде залива (курьи), либо его включение в систему ответвлений - рукавов, составляющих пойменную междуречную сеть. Последняя характерна обычно для рек, у которых руслоформирующий расход проходит при затопленной пойме (Чалов, 1979).

Залесенность, большая высота поймы или тяжелые глинистые грунты, слагающие ее, препятствуют спрямлению русла при $l_p/L > 1,6$, и дальнейшая эволюция излучины происходит по одной из двух других схем. К такому же эффекту приводит направляющее воздействие на поток коренного берега (его выступа или мыса), если русло выше развивающейся излучины располагается вдоль него, или он составляет тыловую часть сегмента, ограниченного крыльями излучины (одиночные адаптированные излучины).

Второй вариант эволюции крутой излучины на четвертой стадии развития заключается в трансформации ее в излучину петлеобразной формы. При этом происходит преимущественное поперечное смещение всей излучины (поперек dna долины, вдоль геометрической оси излучины) вследствие распространения фронта размыва вогнутого берега на всю привершинную часть излучины, захватывая верхнее ее крыло. Одновременно сохраняется размыв выпуклого берега в верхнем крыле в начале излучины и, вследствие искривления русла в привершинной части, начинается размыв того же выпуклого берега со стороны нижнего крыла излучины. Таким образом, продольное смещение излучины может быть трансгрессивным (верхнее крыло) и регрессивным (нижнее крыло), а для всей петлеобразной излучины характерно поперечно-продольное смещение. Встречный размыв берегов на крыльях излучин приводит к тому, что фактически сегментная излучина расчленяется на три излучины второго порядка, из которых центральная наследует привершинную часть исходной излучины (или совпадает с ней), а две другие развиваются на ее крыльях. Благодаря им происходит встречный размыв берегов на крыльях исходной излучины, что в конечном счете приводит к спрямлению русла и образованию на месте излучины староречья (пятая стадия). В пределах самой излучины петлеобразной формы наблюдается не одна, а две-три плесовые ложины, разделенные побочными, вокруг которых формируется извилистость динамической оси потока.

Рассмотренная схема эволюции свободных излучин является наиболее широко известной: она обычно приводится в учебной литературе не только по теории русловых процессов, но и по гидрологии, геоморфологии и др. Иногда ей придается первостепенное значение, вследствие чего другим формам меандрирования даются особые определения: например, в классификации ГГИ — "незавершенное" (аналог прорванных излучин) или "ограниченное" (аналог адаптированных сегментных излучин с продольным перемещением) меандрирование. Несмотря на это гидродинамическая природа образования петлеобразных излучин остается практически не исследованной.

Н.Е.Кондратьев (Кондратьев и др., 1982) объясняет это явление, применяя принцип отражения потока на повороте. Очевидно, что в этом случае возникновение извилистости объяснимо лишь на коротком отрезке непосредственно ниже вершины излучины, тогда как она часто наблюдается по всей длине излучины. Другое, более общее объяснение связано с тем, что системы отмелей и плесов (крупных гряд в русле) располагаются в реке достаточно равномерно, следуя друг за другом на некотором расстоянии, зависящем от параметров русла и расхода воды, т.е. они имеют определенный для данной реки шаг. Увеличение длины русла в пределах излучины по мере ее развития, по-видимому, способно превысить этот характерный шаг и, тем самым, повлечь за собой увеличение количества отмелей и плесов, приходящихся на излучину (Шанцер, 1951; Keller, 1972; Lewin, 1976). В конечном счете это приводит к формированию вторичной извилистости русла, осложняющей очертания петлеобразных излучин.

Если исходить из концепции динамической устойчивости извилистой формы русла как следствия местного увеличения на изгибе кинетической энергии потока, его эрозионной и транспортирующей способности, то напрашивается следующее предположение. При достижении критического значения степени развитости излучины $l_p/L = 1,6$ потери энергии потока становятся такими же, как выигрыш в живой силе потока за счет неравномерности его скоростного поля. Вследствие этого эрозионная и транспортирующая способность потока падает, и деформации русла должны затухать. Поскольку "поток-русло" представляет собой саморегулирующуюся систему, поток, обеспечивая сохранение кинетической энергии, эрозионной и, главным образом, транспортирующей способности образует дополнительные изгибы, восстанавливая неравномерность скоростного поля потока.

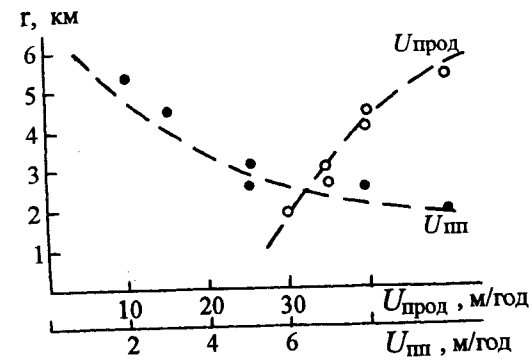


Рис. 5.6. Зависимость скорости продольного $U_{\text{прод}}$ и поперечного $U_{\text{пш}}$ смещения излучин от радиусов их кривизны (в. Виллой)

В зависимости от местных условий петлеобразные излучины могут иметь три модификации. Наряду с рассмотренной, может наблюдаться формирование излучины второго порядка только на верхнем или только на нижнем крыле исходной излучины, тогда соответственно нижнее или верхнее крыло консервируется, деформации в его пределах затухают, а спрямление излучины происходит только за счет одностороннего трансгрессивного или регрессивного размыва берегов в одном из крыльев излучины.

Скорости смещения свободных сегментных и петлеобразных излучин изменяются в зависимости от стадии их развития. Как правило, наиболее интенсивно и преимущественно в продольном направлении смещаются относительно пологие излучины. Характер изменения соотношения темпов продольного и поперечного смещения излучины по мере ее развития можно продемонстрировать на примере серии смежных свободных излучин нижнего Виллоя (рис. 5.6): чем меньше радиус кривизны русла на излучине, тем меньше скорость продольного и больше скорость поперечного смещения. Скорость деформаций излучин при прочих равных условиях зависит от их кривизны и водности потока, степени его кинетичности и уклона dna долины; существенное влияние оказывает развитие смежных излучин, а также недавние перестройки русла. Так, например, средние темпы смещения свободных излучин нижнего течения р. Сеяхи (полуостров Ямал) составляют 0,5–0,7 м/год, в то время как на участках недавних (40–50 лет) спрямлений одиночных излучин вновь сформированные изгибы русла смещаются со скоростями, почти в 5 раз превышающими средние, а на участке спрямления серии излучин (200–250 лет назад) — в 3–4 раза. Очевидно, что сравнительно высо-

кие темпы деформаций излучин на подобных участках отражают активное приспособление нового русла к изменившимся условиям руслоформирования и образование новых излучин.

Развитие свободных излучин сопровождается размывами речных берегов в их пределах и изменениями параметров излучин во времени. Для Оки и нижней Вычегды (г. Сыктывкар – устье) они определялись для излучин, находящихся на разных стадиях развития, путем сопоставления лоцманских карт за разные годы. На Оке (853 км – устье) было выделено четыре широкопойменных участка с различными скоростями размыва берегов при продольном и поперечном смещении излучин: первые изменялись от 3,0 до 4,9 м/год, вторые от 2,7 до 4,6 м/год в зависимости от степени устойчивости русла. На участках с относительно устойчивым руслом либо развиты другие типы русла (врезанные излучины, прямолинейное), либо скорости размыва незначительны (до 1 м/год), и их определение находится в пределах точности измерений.

На нижней Вычегде (ниже слияния с Сысолой) скорости размыва берегов на меандрирующих участках примерно одинаковы и составляют в среднем при поперечном смещении излучин – 12 м/год, при продольном – 10 м/год. Скорости размыва в вершинах излучин периодически активизируются до 25-30 м/год при продвижении побочной перекатов на отмели у их выпуклых берегов.

На Оке все свободные излучины были разбиты на 3 группы со следующими значениями степени развитости l_p/L : 1) от 1,15 до 1,60; 2) от 1,60 до 2,00; 3) более 2,00. По лоцманским картам 1928 и 1976 гг. были получены средние скорости изменения морфометрических параметров излучин за этот период в каждой группе отдельно. Наиболее интенсивно изменяются параметры излучин первой группы (где l_p/L не превышает критической величины 1,60). Это обусловлено тем, что по мере увеличения изгиба русла эрозионная и транспортирующая способность возрастает и, следовательно, активизируются русловые деформации на излучине. Во второй группе излучины постепенно трансформируются в петлеобразные, что сопровождается уменьшением интенсивности русловых деформаций, достигая минимума в третьей группе. Однако, если излучины достигают $l_p/L = 3,00-3,50$, на них вновь активизируются русловые деформации за счет развития на крыльях крутой петлеобразной излучины излучин второго порядка с $l_p/L < 1,60$.

Скорости изменения параметров излучин на нижней Вычегде в 2–3 раза выше чем на Оке, что объясняется меньшей устойчивостью ее русла, но общие закономерности изменений такие же. С этим же связано то, что повторная активизация русловых деформаций после достижения излучинами петлеобразной формы на нижней Вычегде происходит при величине $l_p/L = 2,00$, а не 3,00–3,50, как на Оке.

Специальные стационарные исследования размыва берегов показывают, что механизм этого явления зависит от множества факторов, включает как непосредственную эрозию берегов речным потоком, так и разнообразные склоновые процессы, протекающие на них (Нooke, 1979; Эберхардс, 1986). При высокой противозерозионной устойчивости слагающих берега грунтов важнейшим условием отступления берегового уступа является размыв дна у его основания (Ляпин, 1973). Известны примеры, когда скорости, достаточные для эффективного размыва глинистых грунтов дна русла, достигаются лишь непосредственно в вершине излучины. При этом формируются удлиненные синусоидальные (пальцеобразные) излучины, описанные Е.В.Шанцером (1951) на реках Низкого Заволжья и выделяемые американскими и канадскими исследователями в качестве особого подтипа меандрирующих русел (Shen et al., 1979; Nanson, 1980). Синусоидальные излучины широко распространены на нижнем Днестре (Беркович, Злотина и др., 1992), где большая часть поймы представляет собой заполненное глинистыми наносами дно пра-Днестровского лимана.

Синусоидальные излучины составляют третий вариант эволюции крутых излучин (в четвертую стадию их развития), характерной для меандрирования в тяжелых глинисто-суглинистых грунтах. На примере исследований подобных излучин на нижнем Днестре получено подтверждение существования специфического механизма их развития. Сопоставление вычисленных максимальных скоростей течения при прохождении руслоформирующих расходов воды Q_f на прямолинейных участках (табл. 5.1) с размывающими скоростями для глинистых грунтов (табл. 5.2) свидетельствует о том, что скорости течения в прямолинейном русле, как правило, недостаточны для размыва грунтов дна и берегов. При размывающих скоростях для глин, слагающих пойму, в зависимости от их плотности 0,33–0,43 м/с, фактические максимальные придонные скорости потока при руслоформирующих расходах колеблются в пределах 0,15–0,36 м/с. В то же вре-

Таблица 5.1. Максимальные придонные скорости течения на прямолинейных участках во время прохождения руслоформирующих расходов

	Руслоформирующие расходы, Q_{ϕ}			
	Гидропост Бендеры 221 км от устья		Гидропост Олонешты 80 км от устья	
	Нижний интервал Q_{ϕ_1}	Верхний интервал Q_{ϕ_2}	Нижний интервал Q_{ϕ_1}	Верхний интервал Q_{ϕ_2}
Расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$	375	1150	114	361
Обеспеченность расхода, %	37,1	3,2	55,6	5,3
Максимальная придонная скорость, $\text{м}/\text{с}$	0,26	0,36	0,15	0,32

Таблица 5.2. Скорости размыва глинистых грунтов поймы р.Днестра

Место отбора образцов грунта, км от устья	Придонная размывающая скорость, V_p , $\text{м}/\text{с}$
211	0,33
138	0,37
43	0,43

мя в вершинах излучин увеличение максимальных скоростей течения по отношению к средней (по живому сечению) составляет более чем 20% (Розовский, 1957), что превышает скорости начала размыва. Таким образом, скорости течения нижнего Днестра, не достаточные для размыва глинистых грунтов на прямолинейных участках, оказываются вполне эффективными для размыва русла в вершинах излучин, где скорости потока превышают неразмывающие для глинистых грунтов. При этом отступление берега происходит со скоростью 1–1,5 м/год. В результате для излучины характерно преимущественно поперечное смещение с образованием участков русла между вершинами смежных излучин, представляющих собой прямолинейные вставки с относительно стабильными берегами. С другой стороны, сосредоточение интенсивного размыва в узкой зоне у вогнутого берега в вершине излучины при относительной стабильности прямолинейных

крыльев создает условия для увеличения стрелы прогиба излучины и кривизны русла в ее вершине. Вследствие этого по мере отступления вогнутого берега и роста кривизны русла в пределах синусоидальной излучины нарушается условие безотрывного обтекания потоком берегов $r > 3 b_p$, где r – радиус кривизны излучины. Возле вогнутого берега возникает водоворотная зона, в которой происходит накопление наносов; размыв его прекращается; стрежень потока смещается к выпуклому берегу, который частично размывается, происходит консервация излучины и общая стабилизация планового положения русла. При этом степень развитости излучин – отношение $l_p/L \gg 1,6$ – значительно превышает критическую величину. Они спрямляются лишь во время катастрофических половодий в любом месте шпоры излучины, где может оказаться нарушенным почвенно-дерновый покров на поверхности поймы. Чаще на прямолинейных крыльях излучин возникают излучины второго порядка, вершины которых обращены в сторону шпоры синусоидальной излучины. Их развитие приводит к стачиванию шпоры и спрямлению русла. Такая вторичная извилистость чрезмерно удлиненных прямолинейных крыльев синусоидальных (пальцеобразных) излучин, наряду со специфическими формами их спрямления, обуславливает усложнение конфигурации меандрирующего русла нижнего Днестра и подобных ему рек.

Во всех случаях развития крутых излучин при соотношении $l_p > 1,6L$ интенсивность деформации постепенно затухает. В результате первый этап развития излучин – от зарождения до превращения в крутую сегментную с $l_p \sim 1,6L$ в 2–3 раза короче, чем второй – до спрямления петлеобразной или стабилизации синусоидальной излучины.

5.4. Деформации адаптированных излучин

Адаптированные излучины как тип русла развиваются в относительно узких долинах ($b_p < B_n < 2-3 b_p$), в которых коренные берега частично контролируют их развитие. Они встречаются также в виде отдельных форм в широкопойменном русле, возникая там, где оно подходит к коренному берегу. Образующаяся при этом вынужденная излучина представляет собой переходную одиночную форму от меандрирующего или разветвленного русла к прямолинейному, расположенному вдоль коренного берега с односторонней поймой.

Развитие вынужденных излучин широкопойменного русла происходит за счет так называемого "сжатия" (Маккавеев, 1955), когда верхние, находящиеся в пределах поймы крылья излучин смещаются вниз по долине со скоростью большей, чем нижние, заблокированные выходами устойчивых к размыву пород или высокими берегами. Крылья излучин поэтому постепенно сближаются, а кривизна русла в вершине увеличивается, что приводит к нарушению условий безотрывного обтекания вогнутого берега. Последнее вызывает смещение стрежня потока к выпуклому берегу и его постепенный размыв. Размыв выпуклого берега в вершине и стачивание шпоры за счет сближения крыльев, в конце концов, приводят к отмиранию излучины. Вынужденные излучины не спрямляются подобно свободным, так как разработке спрямляющего пойменного протока препятствуют условия подпора потока половодья, возникающие здесь под влиянием высокого незатопляемого берега. На ряде рек в условиях широкопойменных долин процесс "сжатия" вынужденных излучин передается целой цепочке расположенных выше смежных свободных излучин. Таким образом, формируются серии излучин, в которых их кривизна увеличивается вниз по течению. Радиусы кривизны излучин при этом от верхней в серии до замыкающей вынужденной изменяются согласно зависимости $r = 4,8 l^{0,4}$, где l – длина русла от начала серии до вершины данной излучины.

Слив полых вод к вершине вынужденной излучины с вышерасположенного пойменного массива и подход русла под большим углом к коренному берегу обуславливают образование подпора потока во время половодья, распространяющегося на верхнее крыло излучины и выше по течению. Вследствие этого здесь формируется одиночное разветвление русла, либо излучины осложняются разветвлениями второго порядка.

Деформации адаптированных излучин во многом зависят от строения подмываемых ими высоких берегов. В том случае, когда эти берега сложены неустойчивыми грунтами, формируются вписанные излучины, скорости смещения которых могут быть равны таковым для соседних свободных излучин (Зайцев, 1979), а иногда даже превышать их (Лысенко, 1977). Темпы размыва вогнутых высоких песчаных берегов вписанных излучин достигают 30–50 м/год на больших реках (Тарадановская излучина на Оби), а сами излучины характеризуются стабильностью своего положения по длине реки

благодаря направляющему воздействию вогнутых берегов. На перегибах русла между такими излучинами возникают мелководные перекатные участки, в пределах которых аккумулируются продукты размыва берегов. По подсчетам А.А.Зайцева (1979), на нижнем Вилюе размыв вогнутого берега высотой 25–30 м такой вписанной излучины поставляет в поток ежегодно 1,7 млн. т наносов при скорости его отступления 20–25 м/год. В нижнем течении р.Селхи (полуостров Ямал) скорости размыва высоких морских и речных террас в вершинах вписанных излучин составляют 0,4–0,6 м/год, т.е. практически не отличаются от темпов размыва на свободных излучинах (0,5–0,7 м/год). В данном случае причина близких темпов смещения свободных и адаптированных излучин состоит в интенсивном разрушении террасовых берегов, сложенных высокольдистыми многолетнемерзлыми грунтами за счет термоэрозии и криогенных склоновых процессов.

В относительно узких долинах при переходе от условий ограниченного к свободному развитию русловых деформаций адаптированные излучины представляют морфодинамический тип русла, образуя серии смежных изгибов. Их сочетание создает сундучную (трапециевидную) форму сложных двухвершинных излучин. Частным случаем излучин в относительно узких долинах являются сегментные излучины, вершины которых располагаются возле незатопляемых берегов, препятствующих дальнейшему поперечному смещению самих излучин. В этом случае происходит только продольное их смещение, которое, по данным И.В.Попова (1965), происходит на больших реках со средними скоростями от 3 до 20 м/год. Подобное явление (Попов, 1965) было названо "ограниченным меандрированием".

Однако под влиянием незатопляемого берега, которого касается излучина в вершине, чаще происходит ее преобразование, подобное сжатию вынужденной излучины широкопойменного русла (рис. 5.7). Из-за выклинивания вышележащего пойменного сегмента в вершине излучины осуществляется концентрированный слив полых пойменных вод. Вследствие этого здесь формируется переуглубленная (относительно свободной излучины) плесовая лощина. Повышенная емкость русла возле незатопляемого берега обуславливает возникновение в половодье уклона в направлении лощины и закрепление вершины излучины. При продолжающемся смещении ее верхнего крыла это может привести к искривлению русла вплоть до образова-

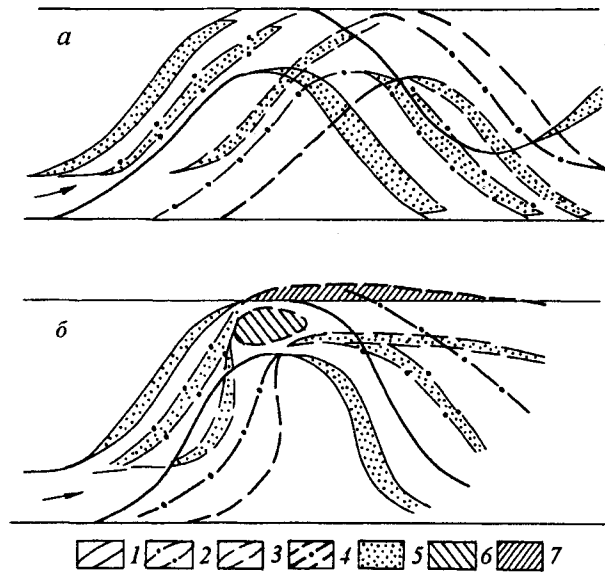


Рис. 5.7. Схема трансформации адаптированных излучин в сужениях речных долин:

а – продольное смещение сегментных излучин; б – образование сундучной излучины – сочетания вынужденной и адаптированной. 1, 2, 3 – последовательные положения русла; 4 – подмываемые берега; 5 – аккумулятивные образования в русле; 6 – переуглубление русла (яма размыва) в вершине вынужденной излучины; 7 – зона размыва коренного берега

ния крутой вынужденной излучины заваленной формы. Со временем в вершине излучины нарушается условие безотрывного обтекания берегов ($r < 3b$) с образованием водоворотной зоны у вогнутого берега и смещением динамической оси потока к выпуклому. Нижнее крыло бывшей сегментной излучины продолжает смещаться, вследствие чего возникает участок русла вдоль коренного берега между вершиной вынужденной излучины и местом отхода русла от него. Вместе с тем относительно стабильное положение вершины излучины способствует формированию выбоины высокого берега даже в том случае, если он сложен трудноразмываемыми породами. Происходит адаптация очертаний берега к форме излучины; в свою оче-

редь, форма берега оказывает направляющее воздействие на поток, фиксируя место отхода русла от него. Таким образом возникает адаптированная излучина с верхним крылом возле коренного берега, которая отличается относительной стабильностью вследствие устойчивости верхнего крыла и его направляющего воздействия на поток. Эта излучина вместе с вышерасположенной вынужденной и образовавшейся прямолинейной вставкой вдоль коренного берега составляет сложную трапецевидную (сундучную, по Н.И.Маккавееву) излучину.

5.5. Развитие врезанных излучин

Деформации врезанных излучин исследованы явно недостаточно. Чаще всего врезанное извилистое русло рассматривается как жесткий, ограничивающий русловые деформации каркас. При этом подразумевается, что деформации происходят лишь на уровне отдельных гряд в русле, побочной перекаатов и т.д. и практически не затрагивают очертания излучин. Такой подход оправдан при решении многих практических (главным образом, инженерных) задач, так как существенные изменения формы врезанных излучин развиваются зачастую лишь в геологическом масштабе времени. Действительно, развитие врезанных излучин за редким исключением не удастся проследить путем сопоставления картографических материалов разного возраста, но ход его запечатлен в строении долины. В тех случаях, когда, врезаясь на изгибе, поток одновременно с глубинной производит и боковую эрозию, формируется асимметричный профиль долины: вогнутый берег представляет собой крутой подмываемый уступ террасы или коренного борта долины; выпуклый – пологий, как правило, террасированный склон. Чаще всего, асимметрия присуща и поперечному профилю через шпору врезанной излучины – в верхнем крыле выпуклый берег круче, чем в нижнем. Асимметрия отражает смещение врезанных излучин в процессе меандрирования как в поперечном, так и в продольном по отношению к оси долины направлениях. В отличие от свободного меандрирования в данном случае процесс развивается практически без взаимодействия руслового и пойменного потоков, т.е. сосредоточен в самом врезанном русле. Спрявление врезанных излучин возможно лишь по достижению ими петлеобразной формы за счет встречного размыва берегов в шпоре

излучины у ее основания. При этом формируются останцы обтекания, описанные многими исследователями (Тагг, 1924; Мартонн, 1945; Билибин, 1956).

Важнейший признак развития врезанных излучин - закономерная асимметрия долины – был впервые отмечен американским исследователем А.Уинслоу в 1893 г. (Moore, 1926). В англоязычной литературе в настоящее время используются, главным образом, два термина: "intrenched meanders" и "ingrown meanders". Первый обозначает врезанные излучины, которые практически не смещаются в горизонтальной плоскости и характеризуются поэтому симметричным поперечным профилем долины в их пределах ("симметричные"). Второй используется для врезанных излучин, смещающихся в продольном и поперечном направлении и характеризующихся асимметрией поперечного профиля ("асимметричные"). В отечественной литературе впервые термины "симметричные" и "асимметричные" врезанные излучины введены Н.В.Хмелевой (Экспериментальная геоморфология, 1969), описавшей, главным образом, строение шпор излучин, т.е. признаки смещения их в продольном направлении.

Симметричные врезанные излучины чаще всего формируются в горных районах; на реках равнин они изредка встречаются на участках крутых перегибов продольного профиля. При прочих равных условиях закономерная асимметрия поперечного профиля долины в пределах врезанных излучин тем больше, чем меньше уклон реки (Moore, 1926; Билибин, 1956). Возникновение асимметрии может быть вызвано лишь направленными горизонтальными деформациями русла – размывом вогнутого и аккумуляцией наносов у выпуклого берегов излучин. Р.Мур (Moore, 1926) впервые высказал предположение, что причина формирования двух разновидностей врезанных излучин заключена в условиях накопления наносов, т.е., с современных позиций, в различном соотношении между транспортирующей способностью потока и количеством поступающих руслообразующих наносов. Это предположение впоследствии нашло подтверждение в экспериментальном исследовании Р.Шеферда (Shepherd, 1972). Гидродинамическая структура потока на излучине и связанные с ней особенности транспорта наносов обеспечивают предпосылки для направленных горизонтальных деформаций русла. Однако в условиях интенсивного врезания их проявлению препятствует дефицит руслообразующих наносов.

Наличие или отсутствие единой гидродинамической структуры потока на изгибе русла является критерием разделения врезанных излучин и макроизлучин. В отношении процесса меандрирования надежным показателем соответствия структуры потока и формы русла служит закономерный рельеф русла на изгибе. Длина участка, на котором может сформироваться характерная для меандрирования структура потока и связанный с ней рельеф русла, ограничена. В пределах этого участка собственно и развивается процесс меандрирования. Предельно возможная его длина зависит от ряда факторов (крупности наносов, формы поперечного сечения русла, слагающих берега пород и т.д.) и прежде всего от параметров потока и его водности. Результаты натурных исследований показывают, что у большинства излучин шаг в 3–6 раз больше ширины русла (Leopold, Wolman, 1960; Лелявский, 1961; Маккавеев, 1971). Этот показатель, по-видимому, и определяет границу между развивающимися за счет процесса меандрирования врезанными излучинами и макроизлучинами. Само же русло в пределах макроизлучин обычно следует считать относительно прямолинейным, поскольку у него соотношение $l_p/L < 1,15$, если только оно не осложнено "нормальными" врезанными излучинами.

Рельеф русла на макроизлучинах изменяется в зависимости от осложняющих их врезанных излучин "нормальных" размеров, разветвлений, прямолинейных отрезков. Развитие макроизлучин происходит в соответствии с деформациями осложняющих их русловых форм меньшего масштаба и не представляет, в большинстве случаев, единого процесса. В то же время на многих реках описаны макроизлучины, не только имеющие меандроподобные очертания, но и отличающиеся закономерной асимметрией долины в их пределах, т.е. развивающиеся как врезанные излучины "нормальных" размеров. Причиной меандроподобного развития макроизлучин могут являться деформации их "активных вершин": при изгибе русла, в целом не соответствующем современной водности реки, параметры его вершины оказываются близкими к размерам обычных излучин, которые развиваются согласно закономерностям меандрирования. Развитие "активной вершины" объясняет поперечное удлинение макроизлучин и наращивание в этом направлении лестницы террас в их шпорах. Для относительно небольших макроизлучин активное развитие может охватывать весь изгиб русла при прохождении экстремально вы-

соких расходов воды с периодом повторяемости в десятки лет (Tinkler, 1971). Такие макроизлучины обнаруживают некоторое сходство с излучинами и в отношении руслового рельефа (по осредненным значениям относительной глубины потока и асимметрии русла), вплоть до формирования русловых разветвлений или сложных перекатных участков на перегибах между соседними макроизлучинами; эти особенности руслового рельефа макроизлучин подробно описаны для среднего течения р. Яны при пересечении Куларского хребта (Матвеев и др., 1992).

Еще одной причиной меандроподобного развития макроизлучин является влияние общего изгиба русла на динамику осложняющих форм. По мнению А.Ю.Сидорчука (Матвеев и др., 1992), слабые, но однонаправленные циркуляционные течения, определяемые макроизгибом русла, влияют на местное поле скоростей смещающихся по макроизлучине русловых форм. При попеременном размыве берегов в среднем за длительный промежуток времени вогнутый берег макроизлучины будет размываться несколько быстрее, чем выпуклый. В этом отношении форма макроизлучины оказывает на размыв берегов воздействие, подобное влиянию силы Кориолиса. Соотношение темпов развития изгибов русла различного порядка и типа можно продемонстрировать на примере среднего течения р. Яны. Реконструкция положения русла показывает, что средние за четвертичный период скорости смещения макроизлучин составляли 1,5–5,0 см/год. Скорость размыва вогнутых коренных бортов макроизлучин при подходе к ним вершин смещающихся по долине врезанных и адаптированных излучин достигала 20 см/год. Наконец, скорости смещения серий излучин и узлов разветвления в пределах макроизлучин составляют 0,5–1,5 м/год, т.е. на два порядка больше скорости смещения макроизлучин.

При относительной стабилизации тектонических движений, климата и базиса эрозии развитие врезанного извилистого русла приводит к постепенной его трансформации и образованию широкопойменной долины. Механизм этого явления – стачивание шпор врезанных излучин в процессе их смещения вниз по долине – описан еще В.Дэвисом (1962) и воспроизведен в условиях эксперимента (Экспериментальная геоморфология, 1969): происходит постепенный переход от врезанных излучин к адаптированным. По мере срезания выступов незатопляемых берегов и расширения поймы адаптированные излучины превращаются в свободные.

Существует и другой путь трансформации врезанного извилистого русла, при котором плановые очертания долины полностью не меняются. Следы древних врезанных излучин остаются в виде "долинных меандров" – "valley meanders" (Dury, 1965) – изгибов широкопойменной долины, как правило, значительно превышающих по размерам современные излучины реки и не соответствующих ее водности. Связь долинных меандров с древними врезанными излучинами проявляется в закономерной асимметрии поперечного профиля современной или погребенной долины в их пределах.

Образование долинных меандров связывают со сменой врезания аккумуляцией в результате изменений климата в эпохи оледенений (Dury, 1965). Вместе с тем, широкое распространение этих форм рельефа вне районов четвертичных оледенений свидетельствует о существовании комплекса условий, приводящих к их образованию. Смена врезания рек аккумуляцией может быть следствием не только климатических изменений, но и тектонических движений, колебаний базиса эрозии. Соотношение между водностью потока и размерами врезанных излучин может нарушиться не за счет изменения водности реки, а из-за увеличения длины развивающихся излучин, формирования вторичной извилистости. Дополнительным фактором образования долинных меандров является прямая зависимость параметров излучин от крупности руслообразующих наносов, уменьшающейся при трансформации врезанного русла (Матвеев, 1988). Кроме того, нет принципиальных различий между долинными меандрами и меандроподобными макроизлучинами. На соседних участках одной и той же реки могут наблюдаться макроизлучины врезанного и широкопойменного русла (долинные меандры). Разница в условиях их формирования заключается в различном соотношении темпов горизонтальных русловых деформаций и врезания. Подобная ситуация в среднем течении р. Яны связана, в частности, с расположением макроизлучин относительно широкопойменного и врезанного русла, соответственно, выше и ниже оси Куларского поднятия (Матвеев и др., 1992). В зоне наиболее интенсивного врезания ниже оси поднятия горизонтальные русловые деформации протекают на фоне дефицита руслообразующих наносов, что находит отражение не только в фрагментарности и малой ширине поймы, но и в частых скальных выходах в русле, отсутствии надводных частей русловых гряд, развитии извилистости динамической оси потока, приводящей к образо-

ванию врезанной в коренные породы ложбины, огибающей "скальные побочни", расположенные в шахматном порядке.

5.6. Гидролого-морфологические зависимости

Меандрирование – сложный процесс, испытывающий влияние множества неоднозначных и тесно взаимосвязанных факторов. Один из традиционных методов исследования связи параметров излучин с условиями руслоформирования – установление гидролого-морфологических зависимостей. Чаще всего в качестве факторов русловых процессов в них фигурируют водность реки и уклон. Эмпирическую зависимость на основе обработки обширного натурного материала в 1940 г. получил Н.И.Маккавеев (1955) для изгибов динамической оси потока: $r = k Q_{\phi}/I$ (здесь Q_{ϕ} – руслоформирующий расход воды). В зарубежной литературе чаще всего встречаются эмпирические зависимости между водностью реки и шагом излучин. Впервые такая зависимость получена в 1938 г. К.Инглисом (Ackers, Charlton, 1970). Сходные уравнения приводятся Ч.Карлстоном (Carlston, 1965), П.Аккерсом и Ф.Чарлтоном (Ackers, Charlton, 1970). Эти исследователи основное внимание уделяли определению расходов воды, оказывающих наибольшее воздействие на размеры излучин. В качестве таковых использовались "руслонаполняющий" ("bankfull" – т.е. расход воды, заполняющий русло до бровок поймы), среднегодовой расход воды и средний расход половодья (средний многолетний для месяца максимальной водности). В качестве показателя водоносности реки используется также площадь водосборного бассейна (Dury, 1965; Nask, 1965); показатель степени в этом случае тоже близок к 0,5.

Часто встречаются эмпирические зависимости, свидетельствующие о линейной связи между параметрами излучин и шириной русла.

В таблице 5.3. приведены гидролого-морфометрические зависимости для 54 участков рек со свободными излучинами и 46 участков с врезанными. Они расположены на 57 реках России, Украины, Белоруссии, Молдавии, протекающим в различных природных условиях. Среднегодовой расход воды в реках колеблется в широких пределах: от 14,3 до 1480 м³/с. В качестве показателей водоносности рек выбраны осредненные за многолетний период среднегодовой расход воды (Q) и расход воды в половодье (Q_n – наибольший среднемесяч-

Таблица 5.3. Гидролого-морфометрические зависимости (параметры уравнений регрессии вида $y=a_1 x+a_0$ и коэффициенты корреляции r_{xy})

Тип излучин	Показатели водности реки (x)	Параметры уравнения регрессии a_1, a_0 и коэффициенты корреляции r_{xy}	Параметры излучин				
			Шаг, L км	Длина по руслу, l км	Стрела прогиба, h км	Миним. радиус кривизны, r_{min}	Средний радиус кривизны, r км
Врезанные	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	a_1	0,42	0,38	0,35	0,53	0,45
		a_0	0,21	0,37	0,12	0,044	0,13
		r_{xy}	0,66+	0,59+	0,51+	0,79+	0,73+
	$Q_n, \text{ м}^3/\text{с}$	a_1	0,49	0,46	0,43	0,56	0,49
		a_0	0,077	0,13	0,044	0,017	0,055
		r_{xy}	0,72+	0,65+	0,57+	0,82+	0,76+
	$F, \text{ км}^2$	a_1	0,35	–	–	–	–
		a_0	0,054	–	–	–	–
		r_{xy}	0,57+	–	–	–	–
Свободные песчано-галечных русел	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	a_1	0,49	0,42	0,37	0,50	0,53
		a_0	0,12	0,25	0,032	0,049	0,073
		r_{xy}	0,85+	0,73+	0,56+	0,80+	0,80+
	$Q_n, \text{ м}^3/\text{с}$	a_1	0,51	0,38	0,26	0,58	0,58
		a_0	0,054	0,19	0,11	0,016	0,028
		r_{xy}	0,86+	0,63+	0,36+	0,87+	0,83+
	$F, \text{ км}^2$	a_1	0,42	–	–	–	–
		a_0	0,021	–	–	–	–
		r_{xy}	0,81+	–	–	–	–
Свободные песчаных русел	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	a_1	0,63	0,61	0,59	0,66	0,63
		a_0	0,034	0,058	0,019	0,012	0,025
		r_{xy}	0,92+	0,94+	0,91+	0,86+	0,89+
	$Q_n, \text{ м}^3/\text{с}$	a_1	0,64	0,60	0,56	0,71	0,66
		a_0	0,013	0,027	0,010	0,0035	0,0088
		r_{xy}	0,95+	0,94+	0,87+	0,93+	0,095+
	$F, \text{ км}^2$	a_1	0,43	–	–	–	–
		a_0	0,0057	–	–	–	–
		r_{xy}	0,82+	–	–	–	–
			0,059	–	–	–	–

ный расход воды), а также площадь водосборного бассейна (F). В анализе использовался также средний уклон дна долины на участке расположения измеренных излучин. Для свободноеандрирующих русел в качественной форме учитывались различия в крупности русловых наносов ("песчано-галечные русла" – категория, в которую вошли песчано-галечные, гравийно-галечные и валунно-галечные русла; "песчаные русла" – песчаные, песчано-илистые и илистые). Для характеристики устойчивости врезанных извилистых русел также в качественной форме учитывался показатель прочности горных пород (породы скальные, полускальные, рыхлые и морена).

В качестве параметров извилистого русла использовались: шаг излучины (L), их длина по руслу (l_p), стрела прогиба (h), минимальный (r_{min}) и средний (r_{cp}) радиусы кривизны, а также относительные показатели степени развитости и кривизны (l_p/L ; r_{min}/h ; r_{cp}/h). Эти параметры измерялись по крупномасштабным топографическим и лоцманским картам для отдельных изгибов русла между точками изменения знака кривизны, а затем осреднялись для бесприточных участков (в среднем по 10–15 излучинам), выбранных вблизи гидрологических постов.

Как и в большинстве проводившихся до сих пор исследований, характеристики водоносности входят в уравнения связи с показателями степени, близкими к 0,5. Несколько более устойчивы связи, в которых в качестве показателя водности использовался средний расход воды в половодье. Это вполне закономерно, так как с половодьем связан большой объем перемещающихся руслообразующих наносов, достижение скоростей течения, достаточных для сдвига наиболее крупных их фракций, а также для размыва берегов – т.е. для развития форм русла, в том числе, излучин.

Из выбранных параметров излучин величины шага и радиусов кривизны наиболее четко характеризуют их размеры. Для параметров, в большей степени зависящих от формы излучин, то есть для их длины и, в особенности, стрелы прогиба, связь с водностью реки менее устойчива, а для безразмерных характеристик кривизны и степени развитости она вообще отсутствует. Это также вполне закономерно, так как известно, что форма излучин зависит, главным образом, от местных условий руслоформирования, прямо не связанных с водностью реки: количества и обеспеченности руслоформирующих расходов воды, характера пойменной растительности и т.д. (Маккавеев, 1955; Чалов, 1979).

В приведенном гидролого-морфологическом анализе использовались традиционные методы определения параметров свободных излучин. При этом осреднение производилось по ограниченному их числу в районе гидропостов (не более 2–3 участков на каждой реке), причем излучины могли находиться на разных стадиях развития или, наоборот, быть в одной; не учитывалась также степень развитости излучин.

Для более объективного анализа и выявления региональных различий в морфологии свободных излучин на 6 реках, протекающих в разных природных условиях (Вычегде, Оке, Десне, Днестре, Белой, Чулыме и Вилкое)*, определение параметров было проведено на всем протяжении их широкопойменных русел в пределах однородных по величине стока участков. Границы участков были установлены по графику нарастания площади бассейна и соответствуют местам впадения крупных притоков. Среднегодовые и среднемаксимальные расходы воды (Q_{cp} , Q_{max}) на каждом участке определялись по графикам связи $Q_{cp} = f(F)$ и $Q_{max} = f(F)$, где F – площадь бассейна.

Параметры излучин были определены для всех свободных излучин рассматриваемых рек (общее их число составило около 1300). Для выделенных участков каждой реки были построены диаграммы распределения всех параметров в заданных интервалах значений, по которым устанавливались модальные их величины в пределах каждого участка. Полученные характерные значения параметров использовались затем при построении гидролого-морфологических зависимостей (Завадский и др., 1997; Завадский, Чалов, 1996).

Значения l_p/L и r/h определялись как среднестатистические величины. Будучи определенными по диаграммам распределения, они могут не соответствовать излучинам с модальными значениями l_p , L и r , h , соответственно. Об этом, в частности, свидетельствуют низкие значения корреляции между l_p/L и r/h , полученные по диаграммам распределения, и параметрами l_p , L , r и h . Связано это с трансформацией формы излучин по мере их развития. Имеют значение также условия прохождения руслоформирующих расходов воды (Q_ϕ). В зависимости от особенностей гидрологического режима, ширины и характера поймы, состава руслового аллювия Q_ϕ наблюдаются в разных диапа-

* Исследование выполнено при активном участии А.С.Завадского, который является соавтором части настоящего раздела (с. 151–158).

зонах уровней и имеют неодинаковую обеспеченность. В одних случаях один из интервалов Q_ϕ (верхний) наблюдается при уровнях, соответствующих выходу на пойму (все реки, кроме Чулыма); в других – Q_ϕ проходят только в пределах бровок пойменных яров (Чулым); до выхода воды на пойму может наблюдаться один средний интервал Q_ϕ (Десна, Вилюй), два (средний и нижний) интервала (Ока, Чулым, Вычегда, Белая) или один нижний интервал Q_ϕ (Днестр). При этом средний интервал Q_ϕ соответствует уровням бровок поймы, нижний – уровням высокой межи.

В тех случаях, когда Q_ϕ проходит в пределах пойменных бровок, на исследованных реках развиваются крутые, медленно деформируемые излучины, достигающие в своем развитии петлеобразной формы. Примером таких свободных излучин, развивающихся при отсутствии Q_ϕ верхнего интервала, является Чулым в верхнем и среднем течении (имеется в виду равнинная, широкопойменная часть реки). Число излучин, достигших петлеобразной формы ($l_p/L > 2,00$ и $r/h < 1,0$), составляет 30% от общего числа свободных излучин, нередко встречаются излучины со значениями степени развитости $l_p/L > 3,00$. Спрявление таких излучин происходит за счет встречного размыва берегов в их крыльях. В нижнем течении Чулыма после слияния с р. Яей (376 км – устье) показатель l_p/L уменьшается, сокращается количество излучин петлеобразной формы (8% от общего числа излучин). Связано это с ростом соотношения ширины русла и его глубины по мере увеличения размера реки. Это приводит к ослаблению поперечной циркуляции на изгибах русла, прекращению активного поперечного смещения излучин при достижении крутой сегментной формы и уменьшению степени развитости (l_p/L) вниз по течению. Если Q_ϕ проходит при затопленной пойме (верхний интервал), то последняя обычно расчленяется протоками и рукавами, спрямляющими сегментные излучины, достигшими в своем развитии критического значения степени развитости $(l_p/L)_{кр} = 1,60$. Это характерно для Вилюя, нижнего течения Вычегды и Оки. Свободные излучины на этих реках, как правило, не приобретают петлеобразной формы и редко превышают критическое значение l_p/L . Большинство современных свободных излучин Вилюя – сегментные, со средней степенью развитости $l_p/L = 1,31$. За последние 150 лет многие излучины Вилюя спрямились, когда степень их развитости не превышала критическую $(l_p/L)_{кр}$. В нижнем течении Вычегды и Оки также по-

Таблица 5.4. Обеспеченность Q_ϕ верхнего интервала, доля крутых излучин и излучин с $l_p/L > 1,60$ на различных участках рек

Река-пост	Обеспеченность Q_ϕ верхнего интервала, %	Доля излучин с $l_p/L > 1,60$, %	Доля крутых излучин ($r/h < 1,00$), %
Десна-Разлеты	0,2	41	46
Десна-Чернигов	0,5	27	45
Ока-Касимов	0,1	44	60
Ока-Муром	1,0	5	32
Белая-Сыртланово	0,1	44	52
Белая-Стерлитамак	0,8	36	46
Вычегда-М.Кужба	0,4	26	48
Вычегда-Сыктывкар	3,2	9	23

давливающее число излучин – сегментные. Среднее значение l_p/L на нижней Вычегде составляет 1,26, на Оке – 1,34. В период с 1931 по 1982 г. на нижней Вычегде спрямилось 3 излучины, у которых l_p/L составляло 1,85; 2,03; 2,08. На нижней Оке излучины спрямились при степени развитости в интервале 1,60–2,00. Правда, на Вилюе и нижней Вычегде встречаются экстремально крутые свободные излучины, но это связано с местными особенностями, не соответствующими общим условиям свободного меандрирования на этих реках.

Сам факт наличия на реке верхнего интервала Q_ϕ не может гарантировать спрямления излучин, достигших или превысивших $(l_p/L)_{кр}$. Существенное значение имеет продолжительность этапа прохождения Q_ϕ и, соответственно, обеспеченность Q_ϕ верхнего интервала. Это подтверждается результатами исследований свободных излучин с $l_p/L > 1,60$ и $r/h < 1,0$ на реках, имеющих различную обеспеченность Q_ϕ верхнего интервала (табл. 5.4): с ростом обеспеченности Q_ϕ верхнего интервала уменьшается доля крутых излучин с $l_p/L > 1,60$ и $r/h < 1,00$, так как при малой обеспеченности Q_ϕ и, соответственно, кратковременном затоплении поймы условия для спрямления излучин, достигших критического значения степени развитости, не успевают реализоваться.

Особенности водного режима не являются единственным фактором, определяющим форму и условия спрямления излучин. На процесс свободного меандрирования оказывают влияние такие региональные факторы как устойчивость русла, высота поймы и характер растительности на ее поверхности, состав пойменного аллювия, ши-

рина днища долины. Так, значительному числу крутых излучин на верхней и средней Вычегде способствует не только низкая обеспеченность Q_{ϕ} верхнего интервала, но и залесенность поймы, снижающая скорость и размывающую способность пойменного потока. Наоборот, на нижней Вычегде пойма – луговая, что облегчает возможность спрямления излучин при ее затоплении и обуславливает заметное уменьшение количества крутых излучин.

Глинистое и суглинистое строение поймы (нижний Днестр) обуславливает высокую устойчивость русла в плане и, не препятствуя в целом русловым деформациям, способствует замедлению их темпов. Размывы русла сосредотачиваются в вершине излучины у вогнутого берега, а сами излучины приобретают синусоидальную (пальцеобразную) форму. Из-за слабой размываемости пойменного аллювия спрямление излучин при прохождении Q_{ϕ} верхнего интервала, несмотря на его высокую обеспеченность (5,3%), не происходит, и излучины достигают больших значений степени развитости: среднее значение l_p/L на нижнем Днестре – 1,93, при максимальных, превышающих 4,00 и даже 5,00. Спрявление таких излучин происходит очень редко, путем прорыва шпор во время экстремально высоких половодий.

С увеличением вниз по течению водности реки и размеров ее русла происходят соответствующие изменения параметров излучин (L , h , l_p , r , b). Однако только радиусы кривизны (r) и ширина русла в вершинах излучин (b) последовательно увеличиваются к устью; для остальных параметров характерно уменьшение значений на определенных участках. На Вычегде, Чулыме и Оке это соответствует изменению характерной формы излучин – от петлеобразной к сегментной, что при сохранении тенденции к увеличению r является причиной минимума значений других параметров. Уменьшение параметров излучин в низовьях Вилюя и Днестра имеет другие причины: на Вилюе русло на участке (122–40 км от устья) является переходным от меандрирующего к разветвленному руслу; на Днестре уменьшение параметров излучин связано с резким изменением водоносности реки: на 155 км от устья он разделяется на собственно Днестр и левый рукав – Турунчук, который отвлекает от 51 до 69% стока воды в зависимости от фазы режима (Беркович, Злотина и др., 1992). Характерно, что уменьшение длин излучин l_p на Вычегде у слияния с Сысолой было отмечено также А.Ю.Сидорчуком (1992); однако выпол-

Таблица 5.5. Коэффициенты корреляции между параметрами излучин и расходами воды исследуемых рек

Река	$r-h$	$r-L$	$r-l_p$	$r-l_p/L$	$r-Q_{cp}$	$r-Q_{max}$	$h-L$	$h-l_p$	$L-l_p$	$l_p/L-r/h$
Вычегда	82	96	95	-84	95	94	81	94	94	-74
Вилюй	82	90	91	80	70	71	94	98	93	-79
Чулым	87	91	91	-94	96	96	86	87	96	-49
Белая	95	98	95	-67	69	58	98	99	99	-22
Ока	79	95	51	-16	89	87	65	42	55	-80
Десна	97	95	99	-52	100	99	94	93	95	-61
Днестр	93	100	98	-47	76	86	94	97	97	-99

ненный им анализ изменения l_p без связи с другими параметрами (в частности, с r) и формой излучин, привел его к представлениям об уменьшении размеров излучин при увеличении водности реки и сдвиге положения русловых форм в их иерархической структуре в нижнем течении "на один ранг в сторону более мелких форм по сравнению с комплексом руслового рельефа среднего течения реки" (с. 90). Действительно, большая длина при относительно небольшом радиусе кривизны характерна для излучин сложной (петлеобразной) формы со степенью развитости больше критической ($l_p/L > 1,60$). Переход к сегментной форме излучин сопровождается заметным снижением l_p при одновременном росте r .

Для выявления связи процесса меандрирования с природными условиями были получены гидролого-морфологические зависимости между параметрами излучин и характеристиками водности рек: среднегодовым (Q_{cp}) и среднемаксимальным (Q_{max}) расходами воды. Последний, как правило, соответствует (или близок) руслоформирующему расходу среднего интервала. Между всеми параметрами были вычислены коэффициенты корреляции. В таблице 5.5 приведены их значения для наиболее тесных связей между морфометрическими параметрами и ними и характерными расходами воды (Q_{cp} и Q_{max}). Лучше всего коррелируют со всеми остальными параметрами радиус кривизны излучин. Наиболее существенной является связь радиуса кривизны излучин со среднегодовым и среднемаксимальным расходами воды.

График зависимости модального значения радиуса кривизны излучин от среднемаксимального расхода воды $r = f(Q_{max})$ (рис. 5.8) позволяет проследить влияние различных географических условий на

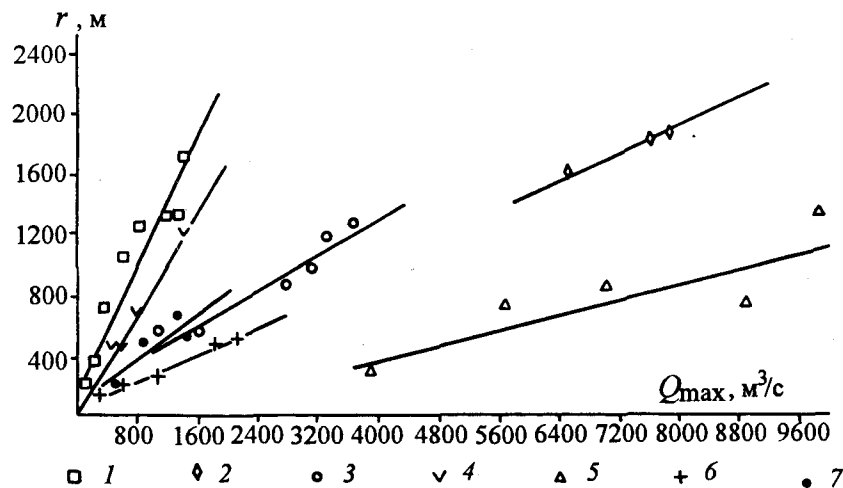


Рис. 5.8. Зависимость модального радиуса кривизны излучины (r) от средмаксимального расхода воды (Q_{max}) для участков рек: 1 – Вычегда; 2 – Виллой; 3 – Чулым; 4 – Белая; 5 – Ока; 6 – Десна; 7 – Днестр.

форму излучин. Преобладающие радиусы кривизны при одних и тех же значениях Q_{max} для каждой реки разные. Зависимость аппроксимируется линейной функцией

$$r = aQ_{max} + C;$$

параметры уравнения регрессии приведены в таблице 5.6. Коэффициент "а" в уравнении имеет региональный смысл, отражая особенности гидрологического режима рек; C – свободный член. Это подтверждается анализом связи коэффициента "а" с соотношением Q_{cp}/Q_{max} , которое характеризует внутригодовое распределение стока (коэффициент "к" в уравнении $Q_{cp} = kQ_{max} + C$, представленный в правой колонке таблицы). Корреляция между ними составляет 85%, если исключить Днестр, сток которого зарегулирован водохранилищами и не соответствует естественному значению, при котором формировались его излучины.

Зависимость модального радиуса кривизны от среднегодового расхода воды $r = f(Q_{cp})$ (рис. 5.9) не дифференцируется по рекам. Очевидно, величина Q_{cp} нивелирует региональные различия, давая обобщенную картину формирования свободных излучин.

Прямая линейная зависимость модального радиуса кривизны, определенного по диаграммам распределения, с расходами воды отлича-

Таблица 5.6. Коэффициенты уравнения регрессии зависимости $r = f(Q_{max})$ и коэффициент "к" уравнения регрессии $Q_{cp} = kQ_{max} + C$

Река	$r = aQ_{max} + C$		$Q_{cp} = kQ_{max} + C$	
	Коеф. корреляции	C	"а"	"к"
Вычегда	94	258	0,97	0,76
Виллой	71	-46	0,23	0,15
Чулым	96	161	0,27	0,21
Белая	58	20	0,84	0,25
Ока	87	-151	0,13	0,12
Десна	99	82	0,19	0,13
Днестр	86	71	0,37	-

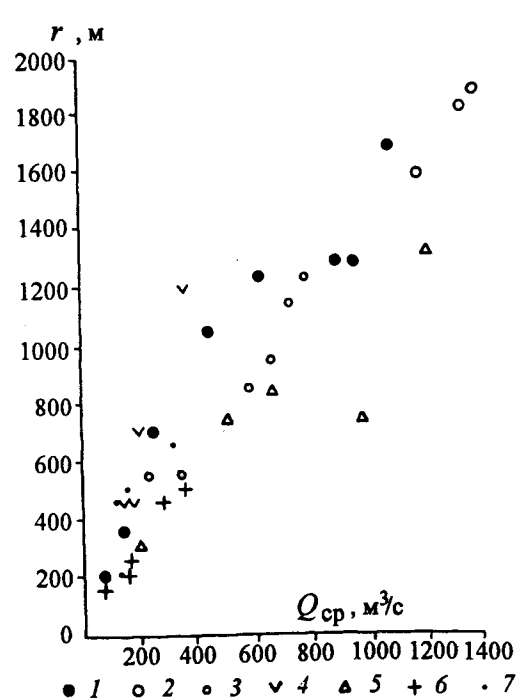


Рис. 5.9. Зависимость модального радиуса кривизны излучины (r) от среднегодового расхода воды (Q_{cp}): 1 – Вычегда; 2 – Виллой; 3 – Чулым; 4 – Белая; 5 – Ока; 6 – Десна; 7 – Днестр

ется от степенных соотношений типа $r_{cp} = kQ^n$ ($n < 1$), где r_{cp} определяется другими способами. Линейная зависимость $r = aQ + C$, видимо, более точно отражает характер связи, так как принятая методика позволяет определить характерные значения параметров свободных излучин для бесприточного участка реки, лишена субъективности,

абстрагирует исходные данные от стадии развития излучин и ставит все реки в одинаковые условия. Однако, если экстраполировать полученные зависимости в область малых значений r и Q с выводом графика на "0", то для рек с самой низкой водоносностью ($Q_{cp} < 50 \text{ м}^3/\text{с}$; $Q_{max} < 200 \text{ м}^3/\text{с}$) линейная связь трансформируется, по-видимому, в степенную. Такой результат был получен И.Г. Джухой (1984) для малых рек бассейна Сухоны.

Высокие коэффициенты корреляции говорят о достаточно прочных связях между модальными значениями морфометрических характеристик свободных излучин. Для зависимости $r = f(L)$, где L – шаг излучин, были рассчитаны параметры уравнения регрессии $r = aL + C$. Значение параметра "а" для всех рек примерно одинаково, колеблясь в пределах 15% (0,41–0,55). Исключение составляют излучины Днестра, что объясняется их синусоидальной формой. Поэтому можно записать общую зависимость радиуса кривизны от шага излучины в виде

$$r = 0,5L.$$

Зависимости, полученные для врезанных излучин в целом менее устойчивы, чем для свободных; они, как правило, прослеживаются лишь в виде тенденций. Не выявляется также влияние литологии коренных пород на параметры врезанных излучин. Причина, по-видимому, заключается в большом разнообразии условий, в которых они формируются, а также в полигенетической природе врезанных излучин и сложной истории их формирования. Однако в ряде региональных исследований роль литологии коренных пород в процессе образования врезанных излучин показана вполне убедительно, в том числе, при помощи гидролого-морфометрических зависимостей (Враун, 1983).

Отсутствует также зависимость, связывающая параметры излучин с уклоном долины. Излучины, сформировавшиеся на участках, уклон которых отличается на один-два порядка, обладают, зачастую, сходными размерами и формой. Неоднозначная роль уклона в развитии излучин, очевидно, обусловлена его тесной связью с устойчивостью русла (Экспериментальная геоморфология, 1969). Изменение уклона, в зависимости от конкретных условий, может повлечь за собой как снижение, так и увеличение устойчивости. Решающую роль при этом, по-видимому, играет крупность руслообразующих наносов и возможные ее изменения в процессе трансформации продольного профиля.

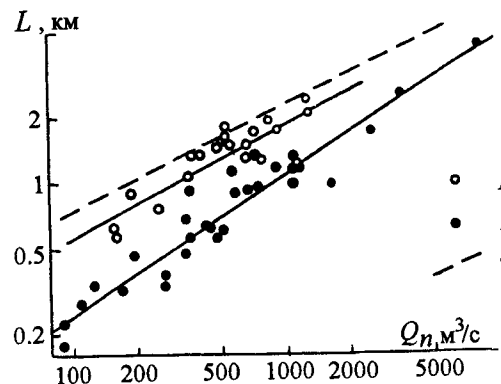


Рис. 5.10. Зависимость связи размеров (шага L) излучин от среднего расхода воды в половодье (Q_n) и крупности руслообразующих наносов:

1 – свободные излучины песчано-галечных русел; 2 – свободные излучины песчаных русел; 3 – врезанные излучины галечно-валунных русел (46 участков рек).

Влияние крупности руслообразующих наносов на развитие излучин наименее изучено. Некоторые исследователи отмечают, что при прочих равных условиях свободные излучины обладают тем большими размерами, чем крупнее наносы (Наск, 1965; Tinkler, 1971). По их предположению, объяснение этого явления состоит в том, что крупные наносы приходят в движение лишь при наиболее высоких расходах воды. Таким образом, фактическое значение руслоформирующих расходов, способных влиять на размеры и форму излучин в реках с крупным аллювием, оказывается больше, чем на реках с мелким аллювием. Соответственно различаются и размеры излучин. Полученные зависимости (рис. 5.10) дают общее представление о масштабе влияния крупности наносов на размеры излучин: при прочих равных условиях размеры (L и r) излучин "песчано-галечных" русел приблизительно вдвое больше таковых для "песчаных" русел. Косвенное подтверждение получило существование прямой зависимости размеров излучин от крупности наносов в работах С.А.Шумма (Schumm, 1967).

Прямая зависимость между размерами свободных излучин и крупностью руслообразующих наносов имеет ряд следствий. При смене динамических фаз развития речных долин – замедлении врезания и переходе к аккумуляции – меняется тип аллювия (Ламакин, 1948); соответственно уменьшается средняя крупность руслообразующих наносов. Вместе с тем ряд исследователей объясняет большие размеры врезанных излучин по сравнению со свободными возможным неоднократным увеличением водности реки относительно современной за длительное время формирования врезанных излучин; смещением по их длине извилин динамической оси потока, которые способство-

вали развертыванию дуги вогнутого коренного берега (Экспериментальная геоморфология, 1969), большим значением удельного руслоформирующего расхода воды в условиях отсутствия поймы (Маккавеев, Чалов, 1986). Полученные результаты свидетельствуют, что определенную роль играет также более высокая крупность наносов, присущая врезающимся руслам. Уменьшение размеров излучин при снижении крупности наносов на стадии аккумуляции является, очевидно, одним из возможных объяснений обычного для аккумулярующих рек превышения ширины поймы по сравнению с шириной пояса меандрирования.

5.7. Прогноз русловых деформаций и принципы регулирования меандрирующих русел

С точки зрения прикладных исследований меандрирующих русел, наиболее важными задачами являются прогноз направленности и темпов размыва речных берегов на излучинах при их смещении по днищу долины, определение вероятности и времени спрямления излучин, использование закономерностей их развития для обеспечения наименьших затрат при проектировании инженерных сооружений и мероприятий.

Прогноз деформаций речных излучин в большинстве случаев основывается на экстраполяции данных о темпах и направленности их смещения, полученных путем сопоставления разновозрастных картографических материалов, а также благодаря анализу пойменного рельефа. Известны, кроме того, расчетные методы (Сидорчук, Михинов, 1985; Замышляев, 1983; Маккавеев, Чалов, 1986). Они основываются на эмпирических зависимостях, связывающих скорости смещения излучин со скоростью потока, глубинами русла, кривизной или степенью развитости излучин, стоком наносов и некоторыми другими параметрами. В той или иной форме в них учитываются свойства слагающих берега грунтов; как правило, они отражены в коэффициентах, которые определяются по данным натурных наблюдений. В некоторые формулы входит максимальная или средняя для участка скорость размыва берегов, которая также может быть получена традиционными эмпирическими методами.

Н.Р.Грачев (1983), используя принцип удара и отражения потока на излучине, разработал метод, позволяющий рассчитать распределение плановых деформаций на излучине. Темпы смещения излучин в этой модели определяются по модифицированной формуле Н.Е.Кондратьева, что требует предварительного расчета максимальной скорости размыва по натурным данным.

В работах последних лет активно развивается математическое моделирование плановых деформаций меандрирующих русел. Известная модель В.И.Замышляева (Замышляев, 1983), в которой рассматривается движение вязкой несжимаемой жидкости по размываемому руслу, дает возможность анализировать плановые деформации участков меандрирующих рек. За рубежом достаточно широко известностью пользуются модели Р.Фергюсона (Ferguson, 1973) и некоторые другие. Использование этих и других математических моделей в практике русловых исследований затрудняется сложностью вычисления, а также тем обстоятельством, что даже наиболее совершенные из используемых в современных моделях математические аппроксимации плановых очертаний извилистых русел позволяют лишь в первом приближении охарактеризовать форму естественных русел. Модели не учитывают изменения параметров излучин в связи со сменой характеристик потока, транспорта наносов и уклона по длине реки, развития вторичной извилистости, изменчивости эрозивной устойчивости берегов и ряда других особенностей.

Заслуживает внимания модель размыва берегов на излучине, предложенная А.М.Алабяном (1994). Величина размыва y за время T определяется из условия баланса наносов у размываемого берега

$$y(h + H) = q_n \cdot T,$$

где h – глубина русла, H – высота надводного уступа берега, q_n – поперечная составляющая удельного расхода наносов, m^3/c . Отсюда скорость размыва

$$C_u = y/T = q_n/h + H.$$

Поперечная составляющая q_n расхода наносов определяется из соотношения

$$q_n/q_s = v/u,$$

где q_s – продольная составляющая расхода наносов, v и u – соответственно, поперечная и продольная компоненты скорости течения V .

Формулы для расчета расхода наносов и скорости поперечной циркуляции могут быть приведены к виду:

$$q_n = A \cdot u \cdot a \cdot k \cdot b \cdot d \cdot c,$$

$$v = B \cdot v \cdot k \cdot r \cdot i \cdot h \cdot m,$$

где r – радиус кривизны русла; d – средний диаметр руслообразующих наносов; A, B, a, b, c, k, i, m – параметры.

Прогноз спрямления речных излучин представляет особый интерес, так как этот процесс, в отличие от постепенных и закономерных деформаций излучин, происходит скачкообразно, вызывая существенную активизацию и зачастую изменение направленности перестроений русла на смежных участках. Наряду с обычными способами определения темпов размыва берегов, прогноз вероятности и времени спрямления излучин включает анализ условий спрямления, характерных для конкретного участка реки. Степень развитости и другие параметры ранее спрямленных излучин могут быть определены по форме старичных озер и понижений на пойме, рисунку пойменных грив. Традиционной задачей, решаемой с целью улучшения условий судоходства и при создании мелиоративных систем, является искусственное спрямление развитых свободных излучин и их серий. Эмпирические правила и расчетные методы выполнения этого мероприятия разработаны достаточно детально (Гришанин и др., 1986).

Ряд задач связан с выбором оптимального расположения различного рода инженерных сооружений и других объектов по берегам меандрирующих рек (опор мостовых переходов и ЛЭП, дорог, зданий и пр.). Наиболее опасными с точки зрения возможного размыва берегов, как правило, являются вогнутые берега излучин в их вершинах и нижних крыльях. Обязательным элементом русловых исследований в этой ситуации должно быть определение границ фронта размыва, темпов и направленности отступления линии берега, необходимости и выбора мест расположения берегоукрепительных сооружений. В некоторых случаях (портовые сооружения, участки зимнего отстоя судов, водозаборы) задачи прогноза и защиты от размыва берегов на излучинах должны решаться в комплексе с обеспечением наименьшей заносимости объектов речными наносами. Сочетание условий безопасности и малой заносимости особенно важно при отсутствии возможности расположения подобных сооружений в затонских частях пойменных сегментов или крупных ста-

бильных побочней: в этом случае условиям наименьшей заносимости соответствуют потенциально наиболее опасные вогнутые берега излучин. Наряду с перечисленными, необходимой частью русловых исследований в таких ситуациях является анализ смещения по длине излучины грядовых форм различного масштаба.

Широкий круг вопросов эффективного использования и выправления меандрирующих русел связан с практикой улучшения условий судоходства ("Проектирование судовых ходов...", 1964; Чалов, 1979; Гришанин и др., 1986; Дегтярев, 1987). Наряду с закреплением формы меандрирующего русла методами сплошного выправления, в отечественной практике в работах Н.С.Лелявского, Н.Н.Жуковского, Н.И.Маккавеева и др. разработан метод выборочного выправления: комбинации дноуглубительных работ, строительства запруд, полузапруд и струенаправляющих дамб; в итоге достигается улучшение условий судоходства на протяженных участках путем создания извилистой трассы.

Коренное улучшение условий судоходства на отдельных излучинах, помимо спрямления чрезмерно развитых из них, включает несколько наиболее известных приемов: укрепление интенсивно размываемых вогнутых берегов излучин для сохранения благоприятной формы русла или увеличения радиуса кривизны трассы судового хода; отторжение отмели от выпуклого берега, также выполняемое для увеличения радиуса поворота русла; обеспечение устойчивости излучин путем повышения отметок низких побочней; перекрытие слабо развитых спрямляющих протоков; выравнивание линии ведущего берега путем срезания мысов и заложения выбоин.

Глава 6

Разветвленные русла

6.1. Структурные уровни, генезис и типизация разветвлений

Разветвленные русла рек характеризуются наиболее сложной морфологией среди других типов (как по форме русла, так и по русловому рельефу), наиболее сложным режимом деформации и представляют собой, как правило, наибольшие затруднения для судоходства, обоснования выбора мест подводных, мостовых и других переходов, водозаборов, акваторий портов и т.д. На судоходных реках разветвленные русла часто на всем их протяжении требуют для обеспечения гарантированных глубин выполнения дноуглубительных и выправительных работ в больших объемах, причем эффективность этих работ зависит от того, насколько достоверным оказался прогноз русловых переформирований. Точность последнего, в свою очередь, определяется правильностью отнесения участка русла или отдельного узла разветвления к тому или иному морфодинамическому типу, описывающему как морфологический облик русла, так и режим переформирований рукавов в сезонном и многолетнем плане, установления стадии и причин, обуславливающих их развитие. То же относится и к другим видам строительства на берегах и в руслах разветвленных на рукава рек, на которых ошибки в прогнозах приводят к аварийной ситуации на трубопроводах, разрушению береговых инженерных объектов, обмелению водозаборов в рукавах, непредвиденным деформациям после возведения мостовых переходов.

Однако в большинстве "русловых" классификаций разветвленные русла, как правило, не типизируются, им дается наиболее общее определение, из которого схема их формирования не вытекает либо представляет частный случай: "русловая многорукавность" (Попов, 1965), "разбросанное русло" (Россинский, Кузьмин, 1947), "блужда-

ющее русло" (Андреев, Ярославцев, 1958), "раздвоенное и островное русло" (Ржаницын, 1985) и т.д.

Н.И.Маккавеев (1955) подразделил водотоки, составляющие разветвленное русло, на три типа согласно их соответствию различным структурным уровням руслового рельефа: протоки – их длина близка к длине изгиба меженного русла (побочня переката), разделяются они осередками или элементарными островами, образовавшимися при зарастании осередков; рукава – их длина соизмерима с длиной излучины русла, они разделяются островами, затопляемыми только в высокое половодье; ответвления – отделяются от основного русла обширными пойменными массивами и представляют собой практически самостоятельные реки, которые могут, наряду с питанием из главного русла, иметь собственный водосбор. На уровне грядовых форм движения наносов разветвленность выражается в форме осередков (рис. 6.1 а) и проявляется только в межень. Разветвления на уровне формы русла (таксономический ранг излучины) при разделении потока островом или группой островов образуют русловую многорукавность (рис. 6.1 б). На уровне элемента речной долины – поймы – разветвленность проявляется в форме пойменной многорукавности (рис. 6.1 в). Различные уровни разветвленности – осередковая, русловая и пойменная могут быть "вложены" друг в друга, то есть проявляться одновременно, или же существовать в сочетании с другими морфодинамическими типами русла – извилистым и прямолинейным, составляя формы большего или меньшего порядка; русловая и пойменная многорукавность помимо осередков может характеризоваться также побочной, ленточно-грядовой и другими формами движения наносов.

Понятие "русловая многорукавность" часто используется для обозначения и островных, и осередковых разветвлений в противовес пойменной многорукавности (Гришанин, 1972; Чернышов, 1973), что является не вполне корректным, так как здесь объединяются и форма русла (островная разветвленность), и форма движения наносов (осередки). Вместе с тем часть осередков со временем при их зарастании превращается в острова, образуя первичные элементарные русловые разветвления, по размерам соответствующие осередковым. Главным отличительным признаком в этом случае служит наличие растительности, которая способствует сохранению двух стречней потока при затоплении острова в половодье и изменяет роль самой

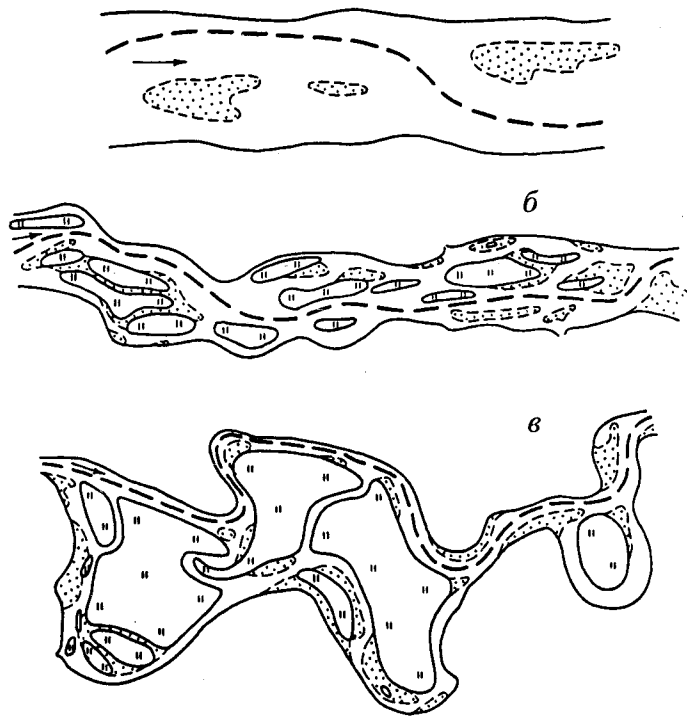


Рис. 6.1. Структурные уровни разветвленности на р. Оби:
 а – осередки, Солдатовские перекаты; б – русловая многорукавность, Акутиха; в – пойменная многорукавность, Сургут

формы в русловом процессе: осередок или сам перемещается, будучи частью крупной гряды в русле, либо на нем происходит постоянный обмен слагающего его аллювиального материала вследствие движения по нему наносов, в том числе в виде гряд меньших размеров; на острове при его затоплении происходит только аккумуляция взвешенных наносов как следствие большей шероховатости (растительность) и снижения скоростей течения. А.Майолл (Miall, 1977) предложил выделить четыре морфологических уровня, характеризующих переход от осередкового русла к руслу с островами: 1) осередки в высокую воду представляют собой зону транспорта влекомых наносов, в низкую воду обсыхают, растительности практически нет; 2) рукава активны в половодье и паводки, в низкую воду действующих рукавов мало; над островами в половодье проходит довольно мощный поток, растительный покров разреженный; 3) на островах умеренный рас-

тительный покров, маломощный поток и аккумуляция взвешенных наносов в паводки; 4) острова с густой растительностью, затопляются лишь в экстремально высокие половодья.

Разветвленные русла в отечественной литературе впервые были типизированы Н.И.Маккавеевым (Проектирование судовых ходов ..., 1964), выделившим одиночные острова, образовавшиеся при зарастании осередков, односторонние разветвления ("массивы поймы, отрезанные притеррасной рекой"), сопряженные разветвления ("восьмерки"), сложные разветвления и ряд других, имеющих частные проявления. В последующем наиболее крупные исследования разветвленных русел были выполнены Ф.М.Чернышовым (1973) и Р.С.Чаловым (1979); появилось много региональных работ, в которых содержится описание и анализ разветвленных русел и их преформирований на конкретных, как правило, больших реках. Благодаря им существенно расширились представления об этом типе русла, позволяющие на основе структурного подхода в рамках морфодинамической классификации русел рек (на уровне формы русла) предложить развернутую типизацию разветвленных русел (табл. 6.1). В основу ее положены условия руслоформирования, степень сложности и конфигурация разветвлений с учетом их генезиса, соотношения отдельных узлов разветвлений между собой и режим их многолетних и сезонных деформаций. Учет условий развития русла (подразделение на врезанные и широкопойменные) представляется ключевым моментом при анализе генезиса разветвлений и особенностей взаимодействия потока и русла на разветвленном участке. На врезанных реках возможно формирование скульптурных, аккумулятивных и скульптурно-аккумулятивных разветвлений. Скульптурные разветвления характерны для рек, русла которых формируются в скальных и трудноразмываемых породах и в основе своей имеют выходы последних, часто лишенные аллювиального покрова. Аккумулятивные разветвления приурочены к местам снижения транспортирующей способности потока при расширении речной долины или местном уменьшении уклона. В скульптурно-аккумулятивных разветвлениях в основаниях островов лежат выходы скальных пород, сыгравших роль "ядер аккумуляции" наносов. Направленность русловых деформаций на разветвленных участках врезанных рек сводится, как правило, к приспособлению потока к руслу при доминировании геолого-геоморфологических факторов руслоформирования.

Таблица 6.1. Морфодинамическая классификация русел рек, разветвленных на рукава

Морфодинамические типы разветвлений	Характеристика разветвленности						Геоморфологические типы			
	По числу основных рукавов (степень много рукавности)			По количеству островов, образующих узлы разветвления			Широкопойменные и адаптированные	Врезанные		
	Один основной рукав	Двурукавное	Трех- и более рукавные	Простые (один остров)	Сложные (архипелаги)					
Одностороннее	+	-	-	+	+	-	+		+	-
Чередующееся одностороннее	+	-	-	+	+	+	+		+	+
Одиночное	-	+	+	+	+	+	+		+	+
Сопряженное	-	+	+	+	+	+	+		+	+
Параллельно-рукавное	-	+	+	+	+	+	+		+	+
Разветвленно-извилистое	+	-	-	-	-	+	+		+	-
Пойменно-русловое	-	+	-	-	+	-	+		+	-

Для широкопойменных рек ведущим является активный фактор – речной поток, его мощность, структура, насыщенность наносами, которые в сочетании с геолого-геоморфологическими условиями долины и русла определяют специфику процесса взаимодействия потока и ложа, приводящего к формированию русла того или иного морфодинамического типа.

Наряду с тремя основными типами русел широкопойменных рек (извилистое, разветвленное и относительно прямолинейное) выделяются переходные между ними формы – разветвленно-извилистое русло и русло с односторонними разветвлениями. Разветвленно-извилистое русло характеризуется развитием островов, составляющих сегмент поймы, образующий выпуклый берег излучины. Образование островов в этом случае определяется, как правило, спецификой движения потока на изгибе русла в процессе меандрирования. Односторонние разветвления, как и относительно прямолинейные неразветвленные русла, обычно развиваются при наличии односторонней поймы и ведущего коренного берега. Маловодные протоки вдоль пойменного берега часто имеют тенденцию к отмиранию.

Сложность в изучении (и типизации) разветвленных русел, помимо большого их разнообразия, заключается в том, что даже при одинаковой морфологии и общих закономерностях переформирования режим их деформаций имеет специфические особенности в зависимости от широкопойменного и врезанного типа русла, на реках с песчаным и галечно-валунным составом наносов, на участках с разной устойчивостью, при наличии или отсутствии коренных берегов и т.д. С другой стороны, важно определить, какие разветвления русел представляют собой морфодинамический тип, поскольку острова на реке могут возникать при спрямлении излучин (прорванные излучины), развитии пойменной много рукавности, образовании структурных выступов в русле и т.д.

Непосредственной причиной формирования разветвленного русла является возникновение в нем осередка или отторжение от берегов побочной перекатов, которые в последующем покрываются растительностью и превращаются в острова. Образованию рукавов способствует прохождение руслоформирующих расходов при уровнях, затопляющих пойму, слабая устойчивость русла, хорошо выраженная внутригодовая неравномерность стока воды, повышенная изменчивость годового стока, большая насыщенность потока наносами.

Острова образуются в областях аккумуляции, а также там, где в широком распластанном русле в потоке возникает несколько динамических осей, между которыми накапливается аллювий. Каждый из этих факторов может быть главным в конкретных условиях, но общим для них является массовый переход транспортируемых потоком наносов из одной формы движения в другую, т.е. из взвешенного состояния во влекомое с образованием грядовых форм руслового рельефа. Вследствие этого на реках с песчаным составом руслообразующих наносов разветвленные русла приурочены к расширениям долин, местам подпора от расположенных ниже сужений и возникающих в узлах слияния рек.

На широкопойменных песчаных реках разветвленные русла занимают значительные по длине участки, соответствующие расширениям дна долины или зонам распространения подпоров, представляя собой системы взаимосвязанных в своем развитии узлов, тогда как на врезанных, особенно беспойменных, реках они встречаются редко, будучи образованными отдельными, далеко отстоящими друг от друга одиночными островами или, значительно реже, группой островов, вытянутой цепочкой вдоль реки (обычно такие участки сравнительно невелики по длине). Во врезанном русле, сформировавшемся в скальных породах, некоторые острова иногда не связаны с местными его расширениями, являясь цокольными, и имея в своем основании скальный выступ (скульптурно-аккумулятивные разветвления). Последний, разделяя поток на две ветви, обуславливает накопление наносов посередине русла и образование аккумулятивной части острова.

Возникающие в русле элементарные острова имеют каплевидную или веретенообразную форму (рис. 6.2 а, б) в зависимости от структуры потока в узле разветвления и соотношения стока наносов с его транспортирующей способностью (Маккавеев, Чалов, 1986): оголовки острова размывается благодаря возникновению зоны ускорения течения или здесь происходит аккумуляция наносов из-за подпорных явлений. Дальнейшая эволюция узла разветвления, происходящая из-за объединения отдельных элементарных островов, роста кос в оголовке и в ухвостье, образование возле острова в рукавах побочной зависит от вида гидравлических сопротивлений, которые возникают возле острова. Согласно исследованиям В.Р.Бейкера (Baker, 1977) и Р.Д.Комара (Komar, 1983), каплевидная форма острова обеспечивает минимум сопротивлений при $L_o/B_o = 3-4$, где L_o - его длина, B_o -

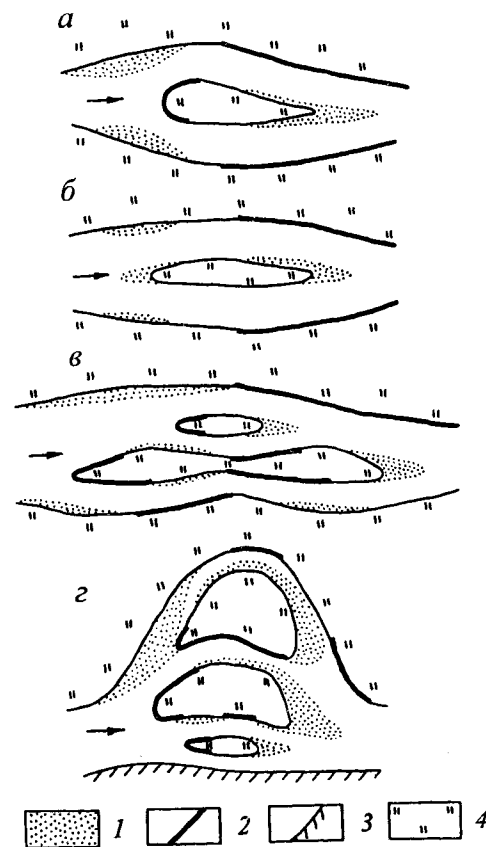


Рис. 6.2. Формы русловых разветвлений:

а - при $L_o/B_o \approx 3-4$, каплевидная; б - при $L_o/B_o > 3-4$, веретенообразная; в - $L_o/B_o \gg 3-4$, удлиненная, с образованием в рукавах разветвлений или излучин второго порядка; г - $L_o/B_o < 3-4$, веерная. 1 - зоны аккумуляции наносов, 2 - зоны размыва берегов, 3 - коренные берега, 4 - пойма

ширина, рост острова (островного массива) при сохранении каплевидной формы ограничивается достижением таких размеров, при которых соблюдаются зависимости радиуса кривизны r и шага излучин L рукавов от расхода воды Q в них - $r_{рук} = f(Q_{рук})$, $L_{рук} = f(Q_{рук})$ или ширины b их русел $r_{рук} = f(b_{рук})$, $L_{рук} = f(b_{рук})$, а также оптимальное соотношение длины рукавов l и шага их излучин (последний соответствует шагу узла разветвлений) $l_{рук} = 1,6 L$. При нарушении этих соотношений происходит отмирание одного из рукавов, и процесс образования разветвлений начинается снова. Если соотношение $L_o/B_o = 3-4$, то остров либо удлиняется ($L_o/B_o > 3-4$, преобладает сопротивление трения), либо увеличивается в ширину ($L_o/B_o < 3-4$, преобладает местное сопротивление, связанное с формой острова). В последнем случае происходит развитие излучины одного из рукавов до тех пор,

пока не утрата гидравлическая выгода извилистой формы рукава ($l_{рук} = 1,6 L$, где $l_{рук}$ – длина русла по излучине рукава, L – ее шаг) и не произойдет развитие прямого рукава, в котором со временем начнется формирование нового острова (рис. 6.2 г); если изогнутый рукав полностью не отмирает и продолжает функционировать, то может возникнуть многорукавное (трех-четырёх) разветвление, в котором рукава сходятся и расходятся в виде веера (веерообразное разветвление). В первом случае (рис. 6.2 в) острова приобретают сложную форму, а в рукавах, из-за их относительной прямолинейности, формируются разветвления второго порядка, либо они начинают меандрировать. Крайней формой такой эволюции островов являются пойменно-русловые разветвления, приуроченные к тем местам, где русло полого переваливает от одного борта долины к другому, пересекая под острым углом пойму, а также ниже крупных выступов и мысов, отклоняющих русло от коренного берега. В таких разветвлениях оба рукава отделяются друг от друга крупным островом (островным массивом, иногда расчлененным поперечными по отношению к основным рукавам протоками) сложной формы (не каплевидной или веретенообразной, как у островов, обычно составляющих русловую многорукавность), напоминающим пойменные массивы в условиях развитой пойменной многорукавности. От последней эти узлы разветвления отличаются равнозначностью водности обоих рукавов. В то же время для них характерно развитие вторичных форм русла, иногда морфодинамически разных в каждом из рукавов. На галечно-валунных реках (на Киренге – узлы разветвления в устье реки Мини, Щучий, Круговой и др.) один из рукавов – развивающийся (или активизирующийся), в котором происходит наиболее интенсивное движение наносов, отличается вторичной разветвленностью небольшими по размерам островами каплевидной формы; второй рукав – пассивный (или отмирающий) обычно меандрирует. На песчаных реках пойменно-русловые разветвления характеризуются либо меандрированием обоих рукавов (Обь в районе Барнаула, Вороновское разветвление ниже Новосибирска), либо вторичной разветвленностью (Амур – Махинов и др., 1984) вне зависимости от тенденции их развития в многолетнем плане.

Все многообразие разветвленных русел можно свести к нескольким разновидностям, определяющим в совокупности морфодинамический тип разветвленного русла (табл. 6.1).

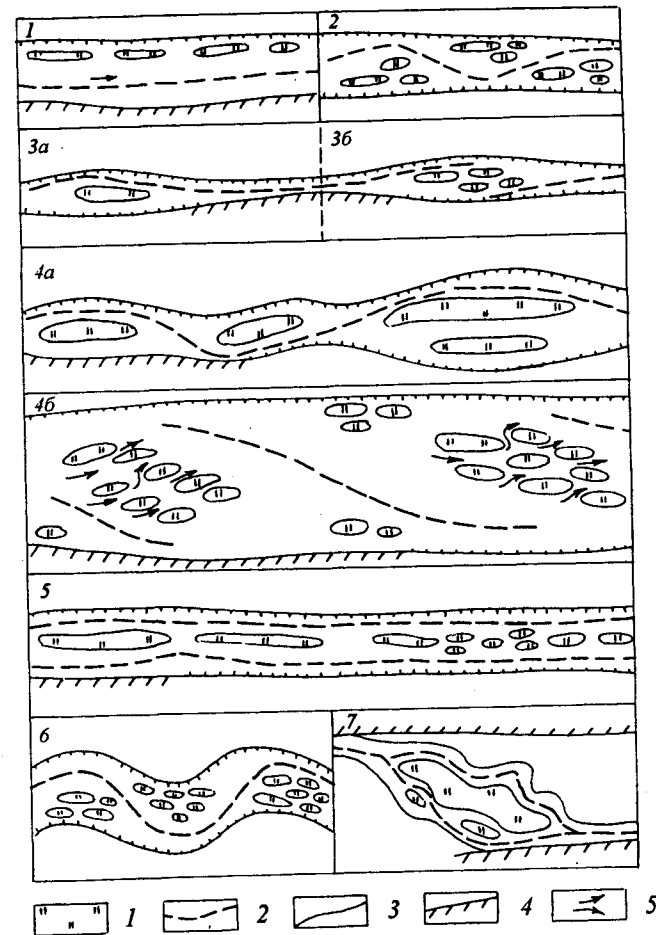


Рис. 6.3. Морфодинамические типы разветвленного русла:

1 – односторонние, 2 – чередующиеся односторонние, 3 – простые (а) и сложные (б) одиночные разветвления, 4 – простые, в т.ч. многорукавные (а) и сложные (б) сопряженные разветвления, 5 – параллельно-рукавные, 6 – разветвленно-извилистые, 7 – пойменно-русловые

Условные обозначения: 1 – острова, 2 – положение главного течения реки, 3 – пойменные берега, 4 – коренные берега, 5 – поперечные перемещения водных масс

1. Взаиморасположение островов, образующих узлы разветвления:
а) *односторонние* (рис. 6.3–1), в которых имеется один рукав – главный, сосредотачивающий постоянно большую часть расхода воды;

острова или группы островов вытянуты вдоль одного из берегов, отделяясь от него маловодными второстепенными рукавами; при этом деформация русла главного рукава осуществляется по схеме относительно прямолинейного, неразветвленного русла; также сходны условия их формирования: главный рукав обычно располагается вдоль коренного берега, тогда как острова формируются возле пойменно-го; б) *чередующиеся односторонние* (рис. 6.3–2), характеризующиеся расположением островов в шахматном порядке при сохранении общей прямолинейности очертаний русла в пойменных бровках; главный рукав образует излучины между островами, в вершинах которых он подходит к береговой пойме; в отличие от разветленно-извилистого русла шахматное (последовательно то у одного, то у другого берега) расположение узлов разветвления не находит отражения в форме русла в бровках ведущих берегов, которые сохраняют прямолинейные очертания; в) *одиночные* (рис. 6.3–3), образованные отдельными островами или группами островов; такие разветвления не связаны в своем развитии друг с другом; условием этого является соотношение длины неразветвленного участка русла между островами и его шириной, превышающее 2–3; г) *сопряженные* (рис. 6.3–4), составленные вытянутой вдоль реки цепочкой островов или групп островов, возле которых основные рукава, проходящие у противоположных берегов, образуют "восьмерки" (соответствующее название получила схема их регулирования – правило "восьмерки"); д) *параллельно-рукавные* (рис. 6.3–5), которые отличаются развитием вытянутых вдоль реки и образующих сплошную цепочку островов, групп островов или островных массивов, отделяющихся от берегов реки параллельно расположенными рукавами, между которыми распределяется основной сток воды; в тех случаях, когда цепочка островов прерывается, акватория посередине реки между ухвостьем и приверхом соседних узлов представляет заполненное наносами мелководье; этот вид разветвлений встречается в широких распластанных руслах, в которых поток разделяется на две ветви, а между водными массами, соответствующими каждой ветви, формируется граница раздела; е) *разветленно-извилистые* (рис. 6.3–6), морфология и деформации которых определяются расположением островов у вогнутых берегов излучин русла, составляя шпоры последних; в отличии от чередующихся односторонних разветвлений береговая линия русла изогнутая, привершинные части излучин имеют вогнутые очертания, а в

самом потоке формируется четко выраженная гидравлическая структура, присущая извилистому руслу; их переформирования связаны с развитием и спрямлением излучин, причем последнее происходит вдоль одного из рукавов, пересекающих шпору излучины; ж) *пойменно-русловые* (рис. 6.3–7), отличающиеся от одиночных большими размерами – длина рукавов во много раз превышает нормальные размеры форм русла, соответствующие данной реке (шаг разветвлений и излучин) – автономностью развития рукавов и формированием у них своих типов русла. Особое положение по морфологии, режиму деформаций и условиям формирования занимают разветвления в узлах слияния рек и особенно устьевые разветвления, образующиеся при впадении рек в моря и озера и различающиеся в морфодинамическом отношении в дельтах выполнения заливов и дельтах выдвигения на открытое взморье (Михайлов, 1971). Все типы разветвлений могут сопровождаться пойменной многоруканностью, возникающей лишь при определенных условиях (например, при прохождении руслоформирующих расходов воды при затопленной пойме) и свойственной также некоторым видам меандрирующих рек. Пойменные рукава (ответвления) не играют существенной роли в русловом режиме главного русла и развиваются автономно по отношению к нему (Ахтуба в системе рукавов Волго-Ахтубинской поймы, полои Северной Двины и Вычегды, левобережные рукава нижней Оби и т.д.). По существу пойменную многоруканность следует рассматривать вместе с излучинами пояса меандрирования широкопойменных рек и врезанными макроизлучинами как более высокий ранг (уровень) форм проявления русловых процессов (Chalov, Alabyan, 1995).

2. Степень разветвленности русла в каждом узле разветвления. В односторонних разветвлениях и в разветленно-извилистом русле всегда имеется один главный рукав, остальные являются второстепенными, маловодными. Значение имеют лишь размеры островов, образующих чередующиеся односторонние разветвления или шпоры излучин, так как это определяет количество второстепенных рукавов и через них влияет на переформирование главного русла. Остальные типы разветвлений могут быть двурукавными (сток перераспределяется между двумя главными рукавами, огибающими остров или группу островов посередине реки) либо многоруканными, где в каждом узле разветвления имеется не менее трех рукавов примерно одинаковой водоносности. Например, в Хайтыалахском узле разветв-

ления р. Лены левый рукав – Хайтыалаахская протока – забирает в разные фазы режима от 30 до 40% общего расхода, центральный – Прямая протока – от 30 до 24% и правый – протока Ат-Ары – от 28 до 45% (первое число соответствует половодью, второе – межени). Наиболее распространены двурукавные разветвления; четырех- и более рукавные встречаются редко. Многорукавность характерна обычно для веерных разветвлений.

3. Количество островов, образующих узлы разветвления. Основные рукава в узлах разветвления могут разделяться одним большим островом или системой из островов разных размеров, составляющих архипелага посередине реки. По поперечным протокам среди этих островов осуществляется перемещение водных масс между основными рукавами, приводящее иногда к изменению относительной их водоносности (а, следовательно, гидролого-морфологических характеристик и роли в русловых переформированиях) от начала узла к его концу. В первом случае узлы разветвления являются простыми, во втором – сложными. Для многорукавных разновидностей сложные узлы разветвления не характерны, так как центральный рукав, не имея ведущих берегов и испытывая влияние двусторонних оттоков или притоков воды, расчленяется островами, образующими единый островной массив с остальными группами островов.

4. Наличие вторичной разветвленности рукавов. Главные рукава реки могут, в свою очередь, разделяться островами, образующими разветвления второго (или третьего) порядка. Они формируются в тех случаях, когда произошло избыточное удлинение основного узла разветвления ($L_0/b_0 > 3-4$), а также в начале рукава, где из-за разделения потока снижается его транспортирующая способность, или в устье рукава из-за подпорных явлений со стороны второго главного рукава, изгиба русла, если оно подходит к коренному берегу и т.д. Образованию вторичной разветвленности способствует наличие двух-трех интервалов руслоформирующих расходов и малая устойчивость русла (Чалов, 1983). Вторичная разветвленность может иметь вид одиночных узлов разветвления или образовывать сопряженные системы, формировать односторонние разветвления рукавов или разветленно-извилистое русло главных рукавов. При этом размеры узлов разветвления второго порядка определяются водоносностью последних, их эволюция зависит от отношения L_0/b_0 , и в них могут образовываться разветвления третьего порядка. Если принять,

что в разветвлении второго порядка остров имеет ширину $B_{ост} < 0,4b_p$, то в разветвлении рукава, имеющем третий порядок, $B_{ост} < 0,4b_{рук}$; в прямолинейном русле остров, образующий разветвление третьего порядка, будет иметь $B_{ост} < 0,12b_p$.

Аналогичные разветвления второго (третьего) порядка возникают также во второстепенных рукавах, разделяющих острова посередине русла, проходящих вдоль берегов в односторонних разветвлениях, в разветленно-извилистом русле. В результате при определенных условиях (неустойчивое русло, аккумуляция наносов, три интервала руслоформирующих расходов и пр.) возникает очень сложное разветвленное русло, создающее впечатление хаотичности рисунка русла. В Сибири на крупнейших реках подобные разветвленные участки рек получили название "разбоев": например, Олекминский разбой, Якутский разбой на Лене. Якутский разбой красочно обрисовал писатель И.А.Гончаров в книге "Фрегат "Паллада": "На другой день ... я переправлялся через Лену, то есть через узенькие протоки, разделявшие бесчисленные острова... С одной стороны Лена – пески, кусты и луга, с другой, к Якутску – луга, кусты и пески". Регулирование таких русел возможно только на основе определения его морфодинамического типа и четкого выделения форм разных порядков. Морфология русла может осложняться пойменной многорукавностью и образованием прибрежных островов при сопряжении узлов разветвления.

Полный набор морфодинамических типов разветвленного русла встречается на широкопойменных реках ($B_n > 2-3b_p$, здесь B_n – ширина поймы, b_p – ширина русла); адаптированные русла ($b_p < B_n < 2-3b_p$) уже не могут иметь некоторые сложные и многорукавные разновидности разветвлений; на врезанных реках ($B_n > b_p$) встречаются только простые разветвления.

Односторонние и параллельно-рукавные разветвления характеризуются направленными горизонтальными деформациями. В односторонних разветвлениях (с параллельным расположением основного и второстепенных рукавов) они приводят к смещению русла параллельно самому себе, как правило, в сторону коренного берега (рис. 6.4 А). Причины таких смещений те же, что у прямолинейных неразветвленных русел. Переформирования разветленно-извилистых русел (рис. 6.4 Б) связаны с развитием излучин, на фоне которых происходит образование разветвлений, т.е. являются периодическими. Нали-

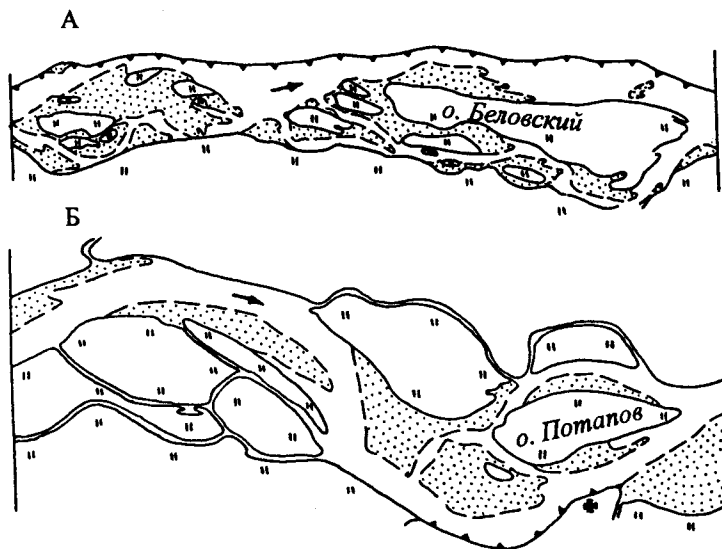


Рис. 6.4. Переходные типы разветвленного русла:
 А – односторонние разветвления, Обь ниже устья Чарыша; Б – разветвленно-извилистое, р. Выгегда у Сольвычгорска.

чие рукавов, расчленяющих шпору, составленные островами, создаст благоприятные условия для спрямления излучин при достижении ими соотношения $l_p = 1,6L$. В чередующихся односторонних разветвлениях происходит медленное смещение узлов разветвления вниз по течению (подобно сегментным излучинам), либо со временем может произойти трансформация этого типа разветвленного русла в разветленно-извилистое или параллельно-рукавное, как это наблюдается на верхней Оби. Для параллельно-рукавного русла также свойственно общее смещение русла в сторону одного из берегов, на фоне которого происходит отмирание одного рукава и развитие новой системы островов посередине того рукава, в котором сконцентрировался сток реки. Так на верхней Оби ниже слияния Бии и Катунь (рис. 6.5) правый рукав проходил в начале XX века вдоль уступов правобережной террасы; сейчас он является второстепенным, отмирающим, маловодным и мелким. Два главных рукава Оби проходят левее, располагаясь в пойменных берегах и разделяясь друг от друга системой островов, сформировавшихся в 30–40-ые годы.

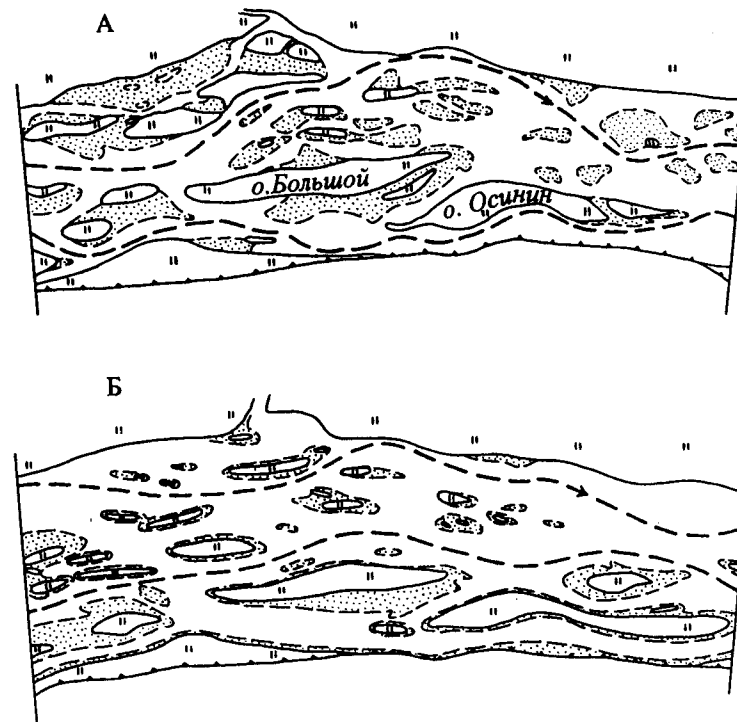


Рис. 6.5. Переформирования параллельно-рукавного разветвления верхней Оби (Усть-Ануйский участок): А – начало XX в.; Б – конец XX в.

Остальным типам разветвленного русла также свойственны периодические деформации, обуславливающие попеременную активизацию то одного, то другого главного рукава, сопровождающиеся изменением их водоносности и гидролого-морфологических характеристик во времени, вплоть до отмирания одного из них с последующим образованием нового узла разветвления, в котором этот процесс будет повторяться. Для простых одиночных узлов разветвления наиболее характерно циклическое развитие рукавов в результате попеременного заклинивания их истоков перемещающимися побочными, сформировавшимися на вышележащем неразветвленном отрезке (рис. 6.6) или в результате развития излучины одного из рукавов. В последнем случае по мере перераспределения стока в более короткий рукав в нем возникает новое разветвление (рис. 6.7). В про-

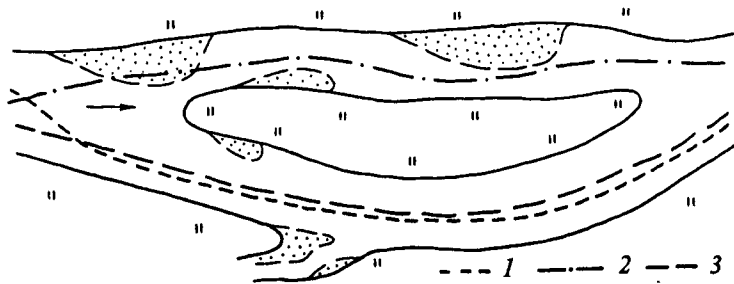


Рис. 6.6. Положение оси главного течения при циклическом развитии рукавов простого одиночного разветвления – р.Обь, о.Борошный. 1 – 1951 г.; 2 – 1964 г.; 3 – 1975 г.)

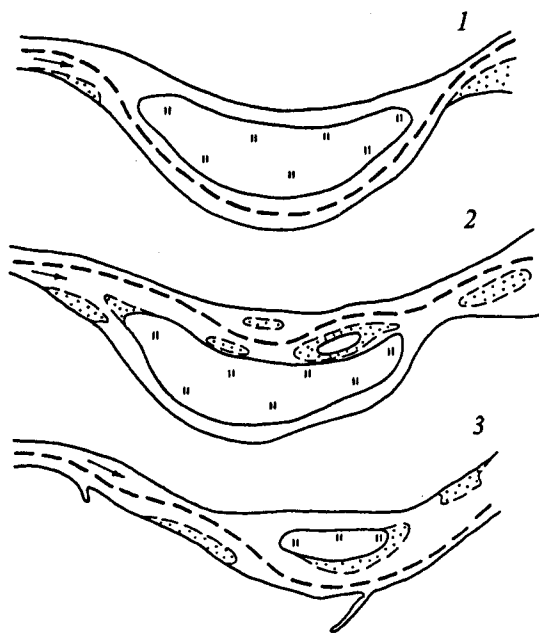


Рис. 6.7. Возникновение нового разветвления простого одиночного разветвления на месте старого (р.Обь, Елобогатское разветвление). 1 – конец XIX в.; 2 – 1933 г.; 3 – 1978 г.

стых сопряженных разветвлениях основное течение реки последовательно располагается в рукавах у противоположных берегов реки (рис. 6.7), огибая цепочки островов; если оно концентрируется в правом рукаве верхнего звена, то в нижнем звене доминирует левый ру-

кав, и наоборот. То же относится к разветвленно-извилистым руслам и чередующимся односторонним разветвлениям. Различие между ними заключается в том, что у первых со временем происходит перераспределение стока по правилу "восьмерки", и ранее пассивные или отмирающие рукава активизируются, начинают развиваться, тогда как бывшие активные, наоборот, мелеют, т.е. осуществляется периодическое переформирование русла; у вторых положение главного течения реки закреплено в одном рукаве, последовательно располагающемся у противоположных берегов реки. В сложных сопряженных и сложных одиночных разветвлениях благодаря поперечному перемещению водных масс по второстепенным рукавам между рукавами посередине русла равноценное развитие получают оба главных рукава, но со смещением по отношению к каждому из них в верхнюю или нижнюю часть узла. Это же обстоятельство обуславливает динамическую устойчивость всего узла в целом (рис. 6.8), но в сложных сопряженных разветвлениях создает впечатление нарушения "правила восьмерки" (рис. 6.9).



Рис. 6.8. Простое сопряженное разветвление (р.Обь, Почтовско – Белоярский узел). Положение главного течения реки: 1 – в 30–40-ые годы; 2 – 80-ые годы

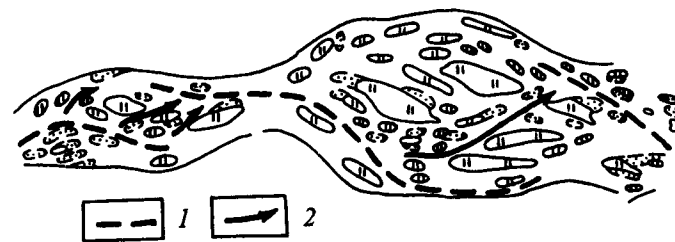


Рис. 6.9. Сложное сопряженное разветвление (р. Лена, ниже устья Вилюя): 1 – положение главного течения реки; 2 – основное направление поперечного перемещения водных масс

В сопряженных разветвлениях каждому узлу соответствует местное расширение русла, тогда как слияние рукавов в узлах сопряжения сопровождается сужением его с образованием группы прибрежных островов либо выступа ведущего (пойменного или коренного) берега. Сами узлы сопряжения могут быть удлиненными, нормальными и сдвинутыми (Чалов, 1979). Эти различия в морфологии русла при слиянии рукавов определяют особенности деформаций русла и режима расположенных здесь перекатов: благодаря отвлечению части расхода в боковые протоки среди прибрежных островов, сосредоточенному перемещению потока от одного берега к другому или его растеканию по широкой акватории и т.д.

Развитие и переформирование форм русла второго порядка усложняет деформации разветвлений любого типа; особенно сложными по морфологии и режиму переформирований являются мелкоостровные сложные параллельно-рукавные русла, сопровождающиеся сопряженными разветвлениями второго порядка, развитием прибрежных островов в местах сопряжения основных рукавов и пойменной многорукавностью.

Во врезанном русле набор разновидностей разветвлений ограничен. При этом галечно-валунные осередки и острова часто имеют коренное ядро, образованию которого благоприятствует крайне малая подвижность русловых форм. Вследствие этого сформировавшийся осередок предохраняет ложе реки от размыва, в то время как вдоль осей рукавов русло продолжает углубляться. Увеличение относительной высоты осередка и его последующее зарастание приводит к образованию островного скульптурно-аккумулятивного разветвления.

В песчаном русле при дефиците наносов в результате деформации поля скоростей при натекании потока на остров происходит размыв его оголовка и наращивание ухвостья. В галечно-валунном русле поперечные компоненты придонных скоростей оказываются слишком малыми, чтобы повлиять на движение потока наносов. Падение скоростей течения перед препятствием (осередком) приводит к остановке влекомых наносов и наращиванию оголовка острова, где обычно располагается широкая отмель. Регрессивный рост островов, являющийся в песчаных руслах признаком направленной аккумуляции (Маккавеев, Чалов, 1970), в данном случае происходит на фоне врезания реки.

Форма и размеры скульптурных и скульптурно-аккумулятивных разветвлений определяются, в первую очередь, формой и размерами

коренных скальных выступов, обуславливающих разделение потока.

В условиях интенсивного длительного врезания рек такие острова выходят из-под уровня затопления и со временем превращаются в высокие (до нескольких десятков метров над рекой) массивы (рис. 6.10). Иногда такие массивы имеют размеры, соизмеримые с макроизлучинами русел. Подобные макроразветвления широко распространены на р. Ангаре, где они имеют на поверхности маломощный аллювиальный покров. Таково же разветвление русла р. Днепра о-вом Хортицей. Среди аккумулятивных разветвлений врезанного русла чаще всего встречаются одиночные и простые сопряженные разветв-

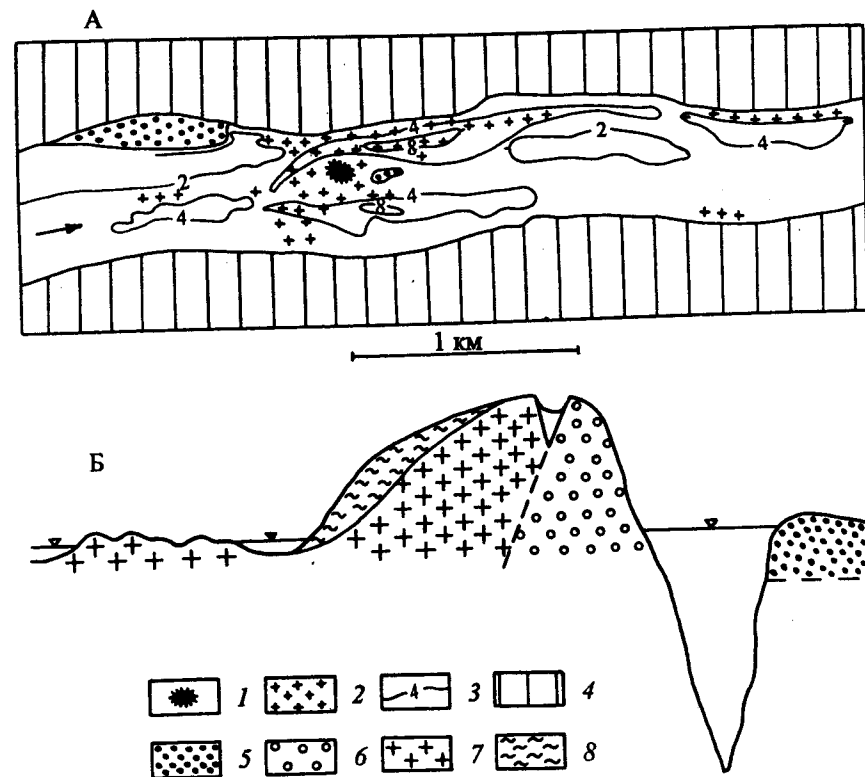


Рис. 6.10. Схема скульптурного разветвления русла (р. Витим, о-в Каменный):

А – план русла; Б – продольный профиль через остров. 1 – скальный остров; 2 – скальное ложе реки, лишенное аллювия; 3 – изобаты; 4 – коренные берега; 5 – галечно-валунные отмели; 6 – жильный кварц; 7 – пегматиты; 8 – гнейсы

ления, образующиеся в местах расширения долины и русла (они обычно бывают приурочены к пересечению реками зон разломов, повышенной трещиноватости горных пород, впадению притоков). На средней Лене (в районе Ленских столбов) на участке более 100 км развито параллельно-рукавное русло, в котором правый галечно-валунный рукав с рядом скальных "перекатов" и левый песчаный отделяются друг от друга цепочкой крупных островов удлиненной формы, между которыми находятся стабильные, но маловодные протоки, соединяющие эти рукава. Сложные трех-четырёхрукавные разветвления формируются при резкой смене геологических условий, в результате чего русло расширяется. На Витиме таковым является Венчалный узел разветвления, в районе которого происходит граница гранитно-гнейсовых формаций протерозойского фундамента и осадочного чехла Приленского краевого прогиба, представленного известняками.

6.2. Распределение расходов воды и наносов по рукавам

Расходы воды распределяются по рукавам и протокам русла в зависимости от конфигурации узла разветвления и морфометрических характеристик рукавов. Доля общего расхода, поступающего в рукав (относительная водоносность рукава) представляет собой его важнейшую характеристику. Изменение относительной водоносности рукава во времени является показателем направленности развития рукава, которое выражается в изменении морфометрических характеристик русла, происходящем с некоторым запаздыванием. Кроме того, о тенденции развития рукава может дать представление изменение его относительной водности в зависимости от фазы гидрологического режима. Активизирующиеся рукава, как правило, увеличивают относительную водоносность в межень, отмирающие – в половодье (рис. 6.11).

Измерения расходов воды по рукавам на крупной реке сложны и трудоемки. Однако задача о распределении расходов воды по потокам разветвленного русла с достаточной точностью решается аналитически. Суть расчетных методов сводится к решению системы уравнений движения и неразрывности, записанных для каждого водотока или их последовательности. Первоначально для этого приме-

нялся графо-аналитический метод (Войнович, 1932), позднее итерационный аналитический метод (Мордухай-Болтовский, 1952), получивший широкое распространение и развитие с внедрением в практику расчетов на ЭВМ (Гришанин, 1967; Иванов, 1968; Михайлов, 1971; Чернышов 1973; Васильев, Марченко, 1982; Алабян, Сидорчук, 1987).

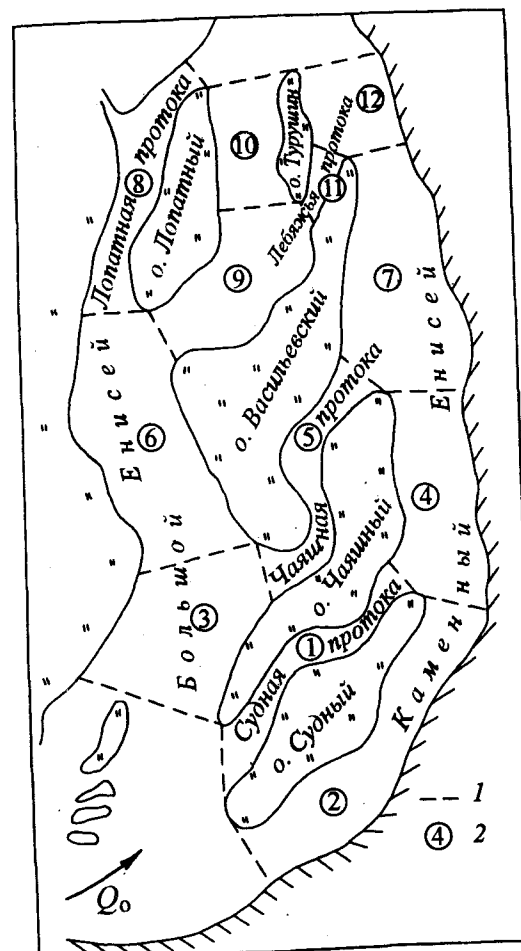


Рис. 6.11. Схема расчетного узла разветвления в восточной части дельты р. Енисей

1 – границы, 2 – номера расчетных участков

Применение аналитического метода заключается в следующем. Для узла разветвления записывается система уравнений двух типов: уравнения баланса расходов воды в узлах разветвлений и слияний рукавов:

$$\sum Q_{\text{вход}} - \sum Q_{\text{выход}} = 0, \quad 6.1$$

и уравнения замкнутости водной поверхности вокруг острова:

$$\sum \Delta z_{\text{прав.}} - \sum \Delta z_{\text{лев.}} = 0, \quad 6.2$$

причем $\Delta z = I \cdot l = f(Q) \cdot l$, где функция $f(Q)$ представляет собой правую часть уравнения движения. Число уравнений вида (6.1) и (6.2) соответствует искомому числу значений расходов воды в рукавах.

Система уравнений типа (6.1) и (6.2) для расчета распределения расходов воды по рукавам одного из узлов разветвления в низовьях Енисея имеет вид :

$$Q_0 - Q_1 - Q_2 - Q_3 = 0, \quad 6.3$$

$$Q_1 + Q_2 - Q_4 = 0, \quad 6.4$$

$$Q_3 - Q_5 - Q_6 = 0, \quad 6.5$$

$$Q_4 + Q_5 - Q_7 = 0, \quad 6.6$$

$$Q_6 - Q_8 - Q_9 = 0, \quad 6.7$$

$$Q_9 - Q_{10} - Q_{11} = 0, \quad 6.8$$

$$Q_7 + Q_{11} - Q_{12} = 0, \quad 6.9$$

$$\Delta z_1 - \Delta z_2 = 0, \quad 6.10$$

$$\Delta z_1 + \Delta z_4 - \Delta z_3 - \Delta z_5 = 0, \quad 6.11$$

$$\Delta z_6 + \Delta z_9 + \Delta z_{11} - \Delta z_5 - \Delta z_7 = 0, \quad 6.12$$

$$\Delta z_{10} - \Delta z_{11} - \Delta z_{12} = 0, \quad 6.13$$

$$\Delta z_8 - \Delta z_9 - \Delta z_{10} = 0, \quad 6.14$$

где Q_0 – расход воды в вершине узла разветвления, а остальные индексы при Q и Δz соответствуют номерам расчетных участков на рис. 6.11.

Данная система уравнений может быть решена одним из методов численного решения систем нелинейных алгебраических уравнений (Сухарев, Васильев, 1976). Распределение расходов наносов по рукавам является значительно более сложной задачей, ввиду отсутствия однозначных зависимостей между концентрацией наносов и гидравлическими параметрами потока даже на морфологически простых участках реки. В этом отношении динамика русловых потоков находится в настоящее время на этапе сбора и предварительного анализа натуральных данных. Так, для изучения распределения расходов руслообразующих наносов по рукавам русловых разветвлений средней Оби был проведен комплекс специальных измерений расходов воды и наносов в трех узлах разветвления – Дубровинском, Усть-Томском

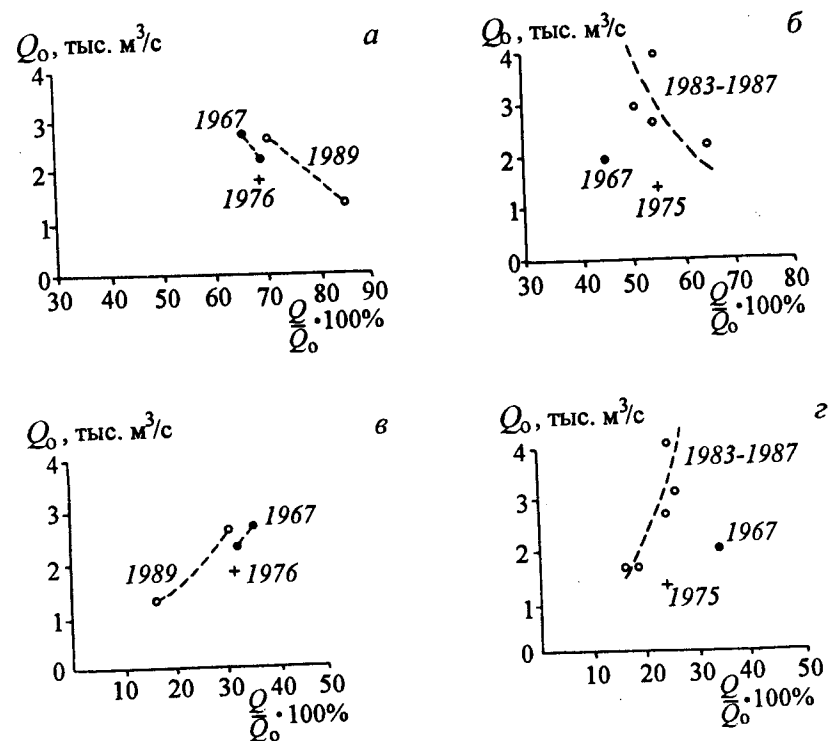


Рис. 6.12. Изменение относительной водности активизирующихся (а, б) и отмирающих рукавов (в, г) средней Оби в зависимости от суммарного расхода воды;

а – левый рукав Дубровинского разветвления; б – Брагинская протока; в – Умревинская протока; г – Битневская протока.

и Умревинском (рис. 6.12) при суммарных значениях расхода воды, близких к руслоформирующим. Для них характерен примерный баланс стока руслообразующих наносов в потоке, если рассматривать "вход" в разветвление и "выход" из него (табл. 6.2). В то же время внутри разветвлений суммарный по рукавам расход руслообразующих наносов меньше, чем на неразветвленных участках. В верхней части Дубровинского разветвления происходит уменьшение расхода наносов почти вдвое, что согласуется с наличием выше оголовка о. Ежевичного обширного песчаного массива (рис. 6.13а). Аналогичная ситуация наблюдается в Усть-Томском узле, где выше разделения на протоки

Брагинскую, Битеневскую и Чацкую сформировался массив зарастающих песков (рис. 6.13б).

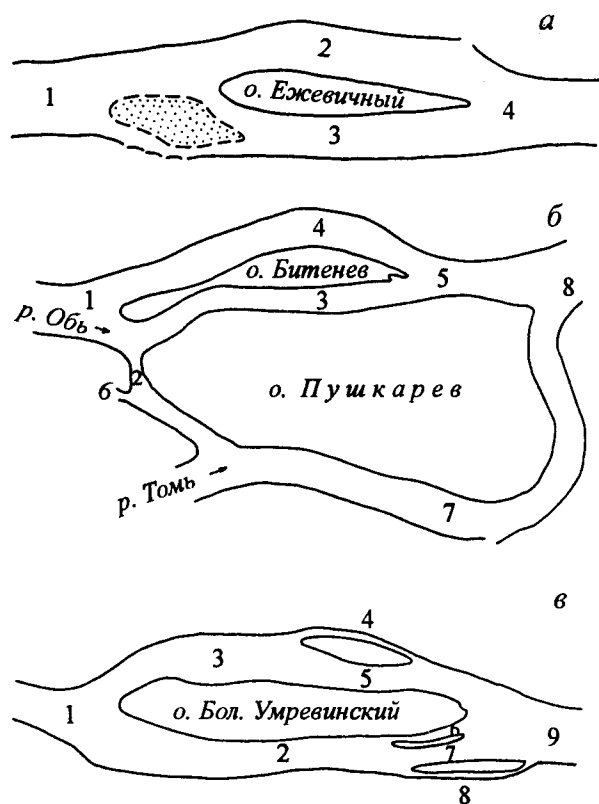


Рис. 6.13. Схема Дубровинского (а), Усть-Томского (б) и Умревинского (в) узлов разветвления (к расчету распределения расходов воды и наносов по рукавам; 1, 2, 3... – номера рукавов в табл. 6.2.)

Распределение расходов наносов по рукавам определяется в основном распределением расходов воды и определяемыми им гидравлично-морфометрическими характеристиками русел рукавов. Однако, кроме того, важное значение имеет конфигурация узла разветвления: ввиду несоответствия направления поверхностных и придонных струй в узле разветвления часто складывается ситуация, когда в один из рукавов поступает осветленная вода, а другой, напротив, становится наносоотсасывающим. Динамика стока наносов по длине рукава и соотношение взвешенной и влекомой форм их транспорта зависят от отношения фактической насыщенности потока наносами к его транспортирующей способности, что в конечном итоге определяет направленность развития рукава. В стабильных рукавах соотношение

Таблица 6.2. Распределение расходов воды и наносов по рукавам на разветвленных участках средней Оби

Узел разветвления	№ рукава (рис. 6.13)	Расход воды, Q , м ³ /с	Расход наносов	
			взвешенных R , кг/с	влекомых G , кг/с
Дубровинский (рис. 6.13 а)	1	3 040	33	66
	2	1 480	21	14
	3	1 560	12	10
	4	3 040	62	42
Усть-Томский (рис. 6.13 б)	1	2 680	77	23
	2	625	2	9
	3	635	6	12
	4	1 420	40	18
	5	2 060	56	30
	6	880	2	0
	7	1 500	7	8
	8	3 560	63	38
Умревинский (рис. 6.13 в)	1	2 610	88	н. д.
	2	700	26	н. д.
	3	1 820	91	н. д.
	4	242	5	2
	5	1 580	47	28
	6	338	9	40
	7	365	3	10
	8	87	2	0
	9	50	50	н. д.

взвешенных и влекомых наносов близко к 1,5:1, в активизирующихся рукавах и на участках с преобладанием размыва русла соотношение меняется в пользу взвешенных наносов, в отмирающих рукавах и на участках с аккумуляцией – в сторону влекомых наносов (рис. 6.14).

Характерным примером активизирующегося рукава является Брагинская протока в Усть-Томском разветвлении, ее относительная водность за последние 12 лет увеличилась на 11% (рис. 6.11 б). Для нее характерно увеличение концентрации наносов от верхней части к нижней и двукратное преобладание взвешенных наносов. Типичным отмирающим рукавом является правый рукав Умревинского разветвления: его относительная водность за 20 лет уменьшилась на 16% (рис. 6.11 в). Здесь наблюдается значительное уменьшение расхода

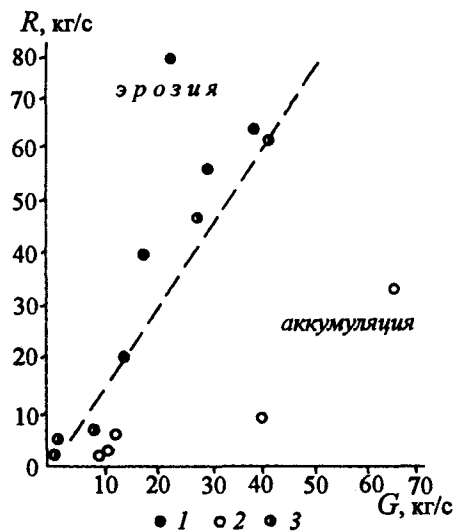


Рис. 6.14. Соотношение расходов взвешенных R и влекомых G руслообразующих и наносов в рукавах средней Оби при общем расходе воды, близком к руслоформирующему:

1 – активизирующиеся рукава и участки русла с преобладанием эрозии; 2 – отмирающие рукава и участки русла с преобладанием аккумуляции; 3 – относительно стабильные рукава и участки русла

взвешенных наносов вниз по течению и преобладание в нижней части влекомой формы транспорта, в результате чего там сформировалось вторичное дельтообразное разветвление.

6.3. Гидролого-морфометрические зависимости

Применительно к условиям разветвленного русла понятие "гидролого-морфометрические зависимости" обозначает выражения, связывающие морфометрические характеристики рукавов с гидрологическими параметрами потока в них. Методологическую основу построения таких зависимостей представляет принцип ограниченности естественных комплексов, сформулированный М.А.Великановым: "В естественных русловых потоках в результате длительного взаимодействия потока и русла проявляются особого рода зависимости между уклоном, расходом, формой русла, размерами твердых частиц; оказывает здесь влияние также и форма гидрографа, связанная с климатическими и топографическими характеристиками водосбора. Эти особого рода зависимости морфологического характера совместно с общими и бесспорными, всюду всегда действующими гидрав-

лическими зависимостями образуют как бы совокупность "уравнений", определяющих ограниченное число возможных в природе сочетаний указанных элементов" (1955, с. 242–243).

Наиболее полно методика построения гидролого-морфометрических зависимостей для рукавов разветвленного русла разработана применительно к дельтам В.Н.Михайловым (1971). При этом было принято, что все основные гидравлические и морфометрические характеристики рукавов, сформировавшихся в собственных аллювиальных отложениях, определяются значениями руслоформирующего расхода воды Q_ϕ , соответствующей ему концентрации руслообразующих наносов r , а также их крупностью d . Кроме того, принималось, что в стабильном рукаве скорость течения такова, что транспортирующая способность потока соответствует его фактической нагрузке наносами, а форма русла описывается формулой устойчивого поперечного профиля. В результате для стабильных рукавов были получены зависимости:

$$b_0 = A_B Q_\phi^{\alpha_B} d^{\beta_B} \rho^{\gamma_B} g^{\delta_B}, \quad (6.15 \text{ а})$$

$$h_0 = A_h Q_\phi^{\alpha_h} d^{\beta_h} \rho^{\gamma_h} g^{\delta_h}, \quad (6.15 \text{ б})$$

$$v_0 = A_v Q_\phi^{\alpha_v} d^{\beta_v} \rho^{\gamma_v} g^{\delta_v}, \quad (6.15 \text{ в})$$

$$I_0 = A_I Q_\phi^{\alpha_I} d^{\beta_I} \rho^{\gamma_I} g^{\delta_I}, \quad (6.15 \text{ г})$$

где g – ускорение свободного падения, индекс "0" указывает на "стабильные" значения b , h , v и I , показатели степени α , β , γ , δ зависят от принятых параметров формы русла и гидравлического сопротивления, а коэффициенты A – также и от параметров формулы размывающей скорости (или транспортирующей способности потока). Исходя из допущения, что для каждой конкретной дельты значения ρ , d и g меняются незначительно, система (6.15) может быть представлена в упрощенном виде:

$$b_0 = k_B Q_\phi^{\alpha_B}, \quad (6.16 \text{ а})$$

$$h_0 = k_h Q_\phi^{\alpha_h}, \quad (6.16 \text{ б})$$

$$v_0 = k_v Q_\phi^{\alpha_v}, \quad (6.16 \text{ в})$$

$$I_0 = k_I Q_\phi^{\alpha_I}, \quad (6.16 \text{ г})$$

причем из равенства $Q = bhv$ следует, что

$$k_B \cdot k_h \cdot k_v = 1, \quad (6.17)$$

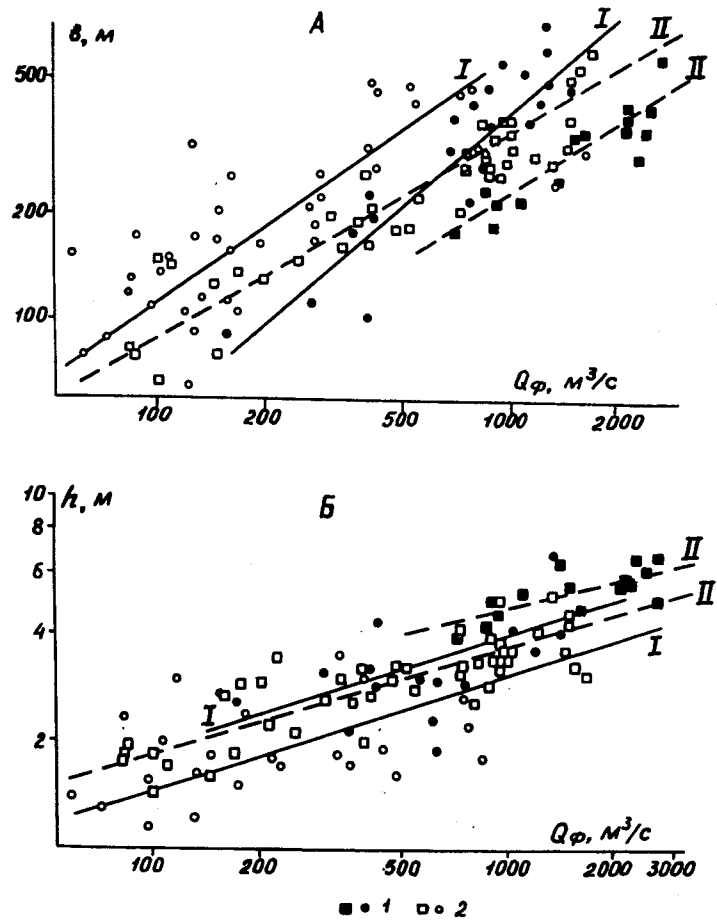


Рис. 6.15. Зависимость ширины (А) и средней глубины русла (Б) от руслоформирующего расхода воды для рукавов верхней (I) и средней (II) Оби: 1 – развивающиеся; 2 – отмирающие рукава

$$\alpha_B + \alpha_h + \alpha_v = 1, \quad 6.18$$

Такое упрощение особенно целесообразно при использовании гидролого-морфометрических зависимостей В.Н.Михайлова для анализа разветвленного русла за пределами устьевых областей.

На основании предположения, что наличие активных (размывающихся) и отмирающих (заносящихся) водотоков равновероятно, гидролого-морфометрические зависимости вида (6.16) могут быть опре-

делены как средние линии поля точек в системе координат "расход – характеристика", увязанных между собой условиями (6.17) и (6.18) (рис. 6.15).

При отсутствии в русле направленных деформаций его характеристики будут совпадать с "устойчивыми" ("стабильными", "режимными") значениями: $b=b_0$, $h=h_0$ и т.д. Для рукавов, находящихся в стадии активизации характерны соотношения: $b < b_0$, $h > h_0$, $v > v_0$, $I > I_0$, а для отмирающих водотоков – $b > b_0$, $h < h_0$, $v < v_0$, $I < I_0$. Анализ построений В.Н.Михайлова и принятых при этом допущений показывает, что они вполне справедливы и для разветвленных участков равнинных рек вне дельт. Единственным отличием является необходимость рассматривать в качестве еще одного независимого фактора уклон дна долины I_0 , который бы входил в зависимости (6.15) в виде множителя gI_0 , отражая действие продольной компоненты силы тяжести, как это предлагал М.А.Великанов (1955). Однако, ввиду того, что I_0 является величиной безразмерной, его присутствие в исходных зависимостях не вносит принципиальных изменений в формирование безразмерных комплексов и другие выкладки, связанные с применением π-теоремы. С другой стороны, вариации значения I_0 по длине участка с однородным морфодинамическим типом русла (только для таких участков построение гидролого-морфометрических зависимостей имеет смысл) на несколько порядков меньше вариаций величины Q_ϕ в рукавах и протоках разветвленного русла.

Значения ρ и d в рукавах также изменяются в значительно более узких пределах, чем Q_ϕ , к тому же они обнаруживают зависимость от гидравлических характеристик. Таким образом, руслоформирующий расход воды в рукаве для конкретного участка разветвленного русла представляется главным фактором, определяющим гидролого-морфометрические характеристики, хотя в отдельных случаях существенное влияние могут оказать локальные особенности геологического строения или работы по регулированию русла.

Изменение значений руслоформирующего расхода воды в рукаве в ходе естественного развития узла разветвления происходит из-за перераспределения стока воды в узле. Причинами этого, как правило, являются русловые переформирования на смежных или вышележащих участках: продвижение побочня на исток одного из рукавов, перераспределение стока в верхнем звене сопряженного разветвления, а также развитие излучин самого рукава и т.п.

Уменьшение относительной водности рукава предопределяет начало его отмирания. В самом начале этого процесса морфометрия рукава остается прежней, а скорость течения снижается ($v < v_0$), приводя к уменьшению транспортирующей способности потока, аккумуляции наносов и уменьшению глубины ($h < h_0$). Уменьшение глубины, снижающее пропускную способность рукава, способствует дальнейшему уменьшению расхода воды в рукаве. Ширина русла рукава является наиболее консервативной морфометрической характеристикой ($b < b_0$); ее уменьшение начинается уже после сильного обмеления рукава и формирования в нем обширных побочней и осередков, зарастание и причленение к берегу которых завершает процесс формирования морфометрических характеристик рукава, отвечающих его новому состоянию.

Одновременно с отмиранием одного из рукавов узла разветвления происходит процесс активизации "конкурирующего" рукава, принявшего дополнительный объем стока воды. Увеличение скорости течения в нем ($v > v_0$) приводит к интенсификации размыва русла, причем быстрее происходит размыв дна, что определяет опережение роста глубины потока ($h > h_0$) по сравнению с ростом его ширины (речь идет не об абсолютном росте, а об относительном

$$\frac{b + \Delta b}{h + \Delta h} \geq \frac{b}{h}$$

В ходе естественного развития узлов разветвления равномерное и полное прохождение рукавом стадий отмирания и активизации происходит далеко не всегда. Из-за сложности процессов переформирования разветвленных участков стадии активизации и отмирания могут периодически сменять друг друга до установления динамического равновесия на новом уровне. При этом, чем менее устойчиво русло и быстрее процессы его деформации, тем меньше рукавов достигают стабильного состояния, и тем больше разброс точек на графиках гидролого-морфометрических зависимостей.

6.4. Развитие разветвлений в узлах слияния рек

При слиянии рек возникают специфические особенности русловых процессов. Взаимодействие потоков сливающихся рек отличает участки, где оно проявляется, от бесприточных и от мест впадения од-

ной реки в другую, меньшей в большую, где приток влияния на главную реку не оказывает, или это влияние охватывает только ее часть, а развитие самого притока перед впадением в главную реку полностью контролируется последней. Подобные условия возникают, если доля стока воды на притоке составляет менее 10% от стока главной реки (Никитина, 1989). При слиянии равновеликих рек выделение главной реки и притока часто условно и подчинено, главным образом, исторической традиции. В подобных случаях то одна, то другая река в течение года попеременно играет роль притока, и на них в разные фазы гидрологического режима развиваются последовательно кривые подпора и спада уровней водной поверхности, аккумуляция наносов и размыв дна. В устьях сливающихся рек часто формируются своеобразные разветвления, имеющие вид дельты реки.

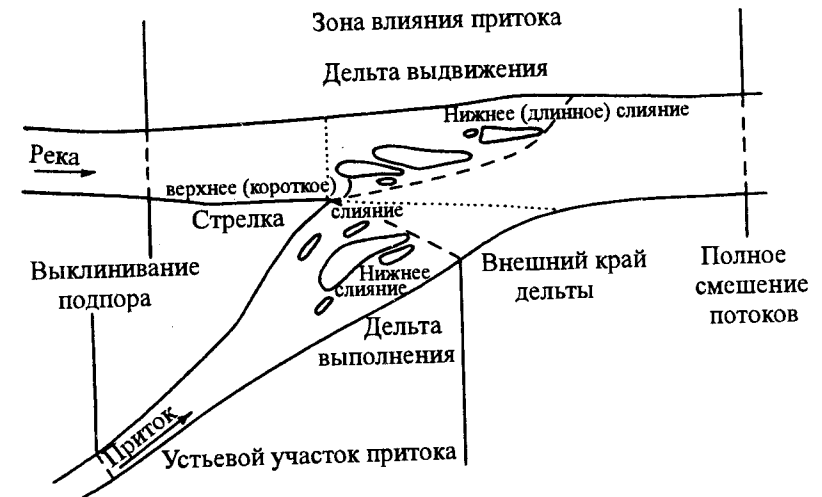


Рис. 6.16. Схема районирования и основные элементы узла слияния рек (по Н.А.Никитиной и Р.С.Чалову, 1988)

На рис 6.16 представлена схема районирования узла слияния рек, который включает в себя устьевой участок притока и зону влияния притока на главную реку (Никитина, Чалов, 1988). Устьевой участок притока располагается перед его соединением с главной рекой. Морфологический облик и развитие этого участка регулируется

взаимодействием притока и главной реки, отличается своеобразным характером эрозионно-аккумулятивных процессов, приводящих к формированию дельты. Зона влияния притока на главной реке охватывает участок выше и ниже по течению от места слияния с притоком. Ее гидравлический режим, морфология и развитие определяются взаимодействием с притоком. При определенных условиях в зоне влияния притока также может сформироваться дельта.

Дельта притока (главной реки в зоне влияния притока) – часть устьевое участка (зоны влияния притока на главной реке), где в результате процессов взаимодействия сливающихся рек сформировался аккумулятивный конус выноса, надводная часть которого представляет собой острова и отмели, разделяющие поток на рукава, а также часть примыкающей к нему поймы с расчленяющими ее ответвлениями (пойменными протоками); основные рукава дельты и пойменные протоки самостоятельно впадают в главную реку (или соединяются с притоком). Дельты в узлах слияния рек могут быть дву- и многорукавными, а по месту расположения – "дельтами выполнения" и "дельтами выдвижения". Степень разветвленности дельт зависит от величины стока наносов реки; при малом стоке наносов дельта может не формироваться, и узел слияния будет бездельтовым. Вторая характеристика определяется положением дельты по отношению к стрелке (устьевому створу). Если внешний ее край не выходит за пределы стрелки, то такая дельта является дельтой выполнения. В дельтах выдвижения острова, образующие дельту, располагаются ниже устьевого створа (стрелки), где потоки обеих рек уже вступают в непосредственный контакт; изменения ширины русла на устьевом участке притока (в зоне влияния притока на главной реке) при этом не происходит.

Верхней границей узла слияния на реке и притоке служит граница выклинивания подпора 10-процентной обеспеченности, где в морфологии русла и режиме его деформаций начинает сказываться аккумуляция наносов в период половодья. Длина зоны спада в бесподпорный период намного короче. Особенностью сливающихся рек является последовательное развитие подпора на обеих реках. Поэтому зона распространения подпора принимается за верхнюю границу узла слияния рек. В зависимости от размеров сливающихся рек она располагается на расстоянии до 100 км от устьевого створа в узле слияния. Длина кривой подпора l_n может быть определена по фор-

мулам, применяемым при соответствующих расчетах в устьевых областях рек (Михайлов, 1971):

$$l_n = 2,0 \frac{\Delta H}{I}, \quad 6.19$$

$$l_n = a \frac{h_0 + \Delta H}{I}, \quad 6.20$$

из которых (6.20) дает более точные результаты. Здесь ΔH – превышение уровня над бесподпорным в устьевом створе, I и h_0 – соответственно, уклон и глубина при отсутствии подпора; a – коэффициент, зависящий от соотношения $\Delta H/h_0$: при его значении $5 - a = 0,96$; $0,5 - a = 0,60$; $0,1 - a = 0,41$.

Нижнюю границу узла слияния следует проводить там, где происходит полное смешение потоков воды и наносов: выравнивается поле скоростей; исчезает неоднородность распределения в поперечном сечении реки взвешенных и влекомых наносов, в том числе по гранулометрическому и минералого-петрографическому составу, связанная с выносом твердого материала из притока. Обычно она располагается на расстоянии не более 10–15 км от устьевого створа притока на больших реках, но в отдельных случаях – при очень большой разнице в стоке наносов рек и малой устойчивости русла – достигает 40–60 км (Обь ниже слияния Бии и Катуня).

Сочетание геолого-геоморфологических и гидрологических факторов русловых процессов обуславливают разнообразие морфодинамических типов узлов слияния рек (табл. 6.3).

Бездельтовый тип узлов слияния характерен для рек со сравнительно малым стоком наносов. Морфологический облик сливающихся рек остается в узле слияния без изменения по сравнению со смежными участками за его пределами. Конфигурация узла слияния определяется типом русел рек и соотношением элементов их форм. Подобные узлы слияния формируются как у врезанных, так и у широкопойменных рек, причем наиболее распространены они у рек, неразветвленных на рукава. Если перед слиянием река имеет разветвленное русло, то особенности взаимодействия сливающихся потоков влияют на развитие того или иного рукава: в преимущественно подпорном устье основной расход воды реки сосредотачивается в рукаве, наиболее удаленном от стрелки; в бесподпорном устье – наоборот, в рукаве, прилегающем к стрелке. При этом под влиянием подпора может изменять-

Таблица 6.3. Морфодинамическая классификация узлов слияния рек (по Н.А.Никитиной, 1989)

Тип	Подтип
I Бездельтовый	1. Простой (неразветвленные русла)
	2. Сложный а) разветвленные русла б) разветвленное русло – неразветвленное русло
	3. С островом в зоне выклинивания подпора
II Дельтовый	1. Дельта на одной реке а) дельта выполнения в пределах русла б) дельта выполнения и пойменные ответвления в) дельта выдвижения
	2. Дельты на обеих реках
III Слияние пойменными рукавами	
IV Слияние с рукавом одной из рек	1. Простое
	2. Дельта в рукаве (в русле притока)

ся режим переформирований разветвленного русла (например, нарушается "правило восьмерки" в развитии сопряженных систем).

При большем стоке наносов в неразветвленном русле главной реки (или притока) формируются острова в зоне выклинивания подпора. Эта разновидность бездельтового узла слияния является переходной к дельтовому типу. Отсутствие дельты компенсируется образованием устьевых перекатов и кос, развивающихся как продолжение стрелки и отклоняющих стрежень потока к противоположному берегу. Подобные образования можно рассматривать как зачаточную форму дельты в узле слияния.

Дельтовый тип узлов слияния рек возникает при достаточно большом стоке наносов. В зависимости от его соотношения на обеих реках и условий переменного подпора в устье одной из них либо в обеих формируются разветвления, имеющие вид дельты. Для большинства узлов слияния характерно наличие дельты выполнения на

одной реке. Угол между основными направлениями течения на сливающихся реках достигает иногда 90° , к устьевому створу русло расширяется в виде раструба, заполненного островами, образующими дельтовое разветвление. В дельте выделяется два основных рукава, образующих короткое (верхнее) и длинное (нижнее) слияние, считая по течению реки. Поскольку приток находится во время половодья (при прохождении руслоформирующего расхода) в подпоре, его поток, огибая создаваемое главной рекой "водное препятствие", устремляется в рукав, удаленный от стрелки, где сосредотачивается основная доля стока реки. В этом случае формируется "длинное слияние", при котором образуется более острый угол встречи сливающихся потоков и обеспечивается плавное их соединение в нижнем, по отношению к стрелке, положении. Рукав, образующий "короткое слияние", маловоден и его функционирование поддерживается работой потока в бесподпорный период.

Если ниже стрелки русло объединенной реки существенно расширяется, то река с большим стоком наносов формирует дельту выдвижения. При этом взаимный переменный подпор в течение года при большом стоке наносов служит причиной того, что дельты формируются в устьях обеих сливающихся рек. Наиболее распространено их сочетание: дельта выполнения – дельта выдвижения. Дельты выдвижения на обеих реках не возникают. Типичный пример сочетания дельт выдвижения и выполнения дает узел слияния Бии и Катунь. Обе реки имеют приблизительно равную водоносность и испытывают переменный подпор в течение года; ширина русла Оби ниже устьевых створов почти вдвое превышает ширину каждой из сливающихся рек. Большой сток наносов Катунь обусловил формирование в ее устье дельты выдвижения, вытянутой вниз от бийско-катунской стрелки почти на 6 км (при ширине Оби 1–1,5 км). В устьевом расширении Бии (в 1,5 раза по отношению к руслу выше по течению) сформировалась короткая (не более 2 км) дельта выполнения.

На бесподпорной реке динамическая ось потока прижимается к стрелке, рукав возле которой углубляется, становится многоводным, формируя "короткое слияние". Если в многолетнем плане во время половодья или паводков одна река находится преимущественно в подпоре, а другая является бесподпорной, то на первой происходит направленное развитие "длинного слияния", на второй – "короткого". При переменном подпоре в разные фазы половодья и паводков

развитие рукавов на сливающихся реках определяется, соответственно, условиями возникновения кривой подпора или спада при прохождении руслоформирующих расходов воды.

Если в многолетнем плане (например, при чередовании многоводных и маловодных лет) наблюдается смена подпорных и бесподпорных условий, происходит периодическое развитие "длинного" и "короткого" слияний. В узле слияния Лены и Алдана в дельтовом разветвлении Лены в маловодные циклы, когда она преимущественно находится в подпоре от притока, развивается ее левый рукав Турий Взвоз, проходящий вдоль берега, противоположного устью Алдана. В многоводные годы, когда Лена подпирает Алдан, Турий Взвоз мелеет, но углубляется и становится основным правый рукав – Арбынская протока, по которой осуществляется короткое (вдоль лено-алданской стрелки) слияние. В устье Алдана смена подпорных условий бесподпорными не проявляется из-за малого стока наносов, но так как Лена в узле слияния образует дельту выдвигания, то в алданской дельте выполнения постоянно многоводным и глубоким является правый рукав, образующий "длинное слияние".

Если дельта формируется на одной из сливающихся рек, регулярно испытывающей подпор, в ее пределах образуется "длинное слияние", а рукав, проходящий вдоль стрелки, относительно маловоден. При прохождении на подпирающей реке пика половодья (паводка) в нем может возникать противотечение, усиливающее эффект подпора. На спаде уровней направление течения восстанавливается. Подобные явления наблюдаются в узлах слияния: Оби и Томи, где в Чацкой протоке дельтового разветвления Оби во время половодья, когда она находится в подпоре, течение направлено из притока в главную реку; Амура и Усури, где часть потока последней в летний паводковый период устремляется вверх по правому рукаву Амура между амуро-уссурийской стрелкой и островом Амурским.

Своеобразные черты приобретают дельты выполнения в широкопойменной долине с развитой пойменной многорукавностью. Выделяется собственно русло реки, от которого отделяются пойменные рукава (ответвления), самостоятельно соединяющиеся с главной рекой. При этом русло реки и его пойменные рукава образуют свои дельты выполнения. Подобный комплекс дельт образует Обь при слиянии с Иртышом, который ежегодно весной оказывает подпорное воздействие на Обь, распространяющееся на сотни километров вверх

по течению. С развитием половодья на Оби создается подпор на Иртыше, в устье которого формируется аналогичная, хотя и меньшая по размерам, дельта.

Иногда слияние рек с развитой пойменной многорукавностью происходит последовательно пойменными рукавами, причем соединение притока с главным руслом реки отсутствует, так как он образует слияние с одним из пойменных рукавов. Рукава главной реки и притока располагаются нередко почти параллельно: пойменные рукава, соединяясь с основным руслом главной реки, образуют простые бездельтовые узлы слияния.

Узлы слияния с рукавом главной реки могут образовывать притоки, которые будучи малы по сравнению с главной рекой, оказываются сопоставимыми по водоносности с ее рукавом. Впадение такого притока может служить причиной образования дельт как в сливаемом с ним рукаве, так и в устье самого притока. Слияние притока с одним из рукавов главной реки в случае подпора последнего может быть причиной развития других рукавов, находящихся в бесподпорных условиях.

В дельтовых узлах слияния рек русловые деформации проявляются в периодическом или направленном развитии одних и отмирании других рукавов. Для оценки тенденции переформирования рукавов можно применять систему упрощенных гидролого-морфометрических зависимостей (6.16), предложенных В.Н.Михайловым (1971).

6.5. Расчет и прогноз деформаций разветвленного русла

В настоящее время разработан ряд математических моделей, описывающих отдельные аспекты взаимодействия русла и потока как на реках с неразветвленным, так и с разветвленным руслом. В их основе, как правило, лежит совместное решение дифференциальных уравнений движения, неразрывности и деформации в одномерном или двумерном виде. Для получения решения такой системы уравнений необходимо (помимо введения зависимостей для гидравлического сопротивления и расхода наносов) задание начальных и граничных условий. Начальные условия задаются, исходя из профилей дна и свободной поверхности потока – соответственно $z_0 = z_0(x, 0)$ и

$z = z(x, 0)$, граничные условия обычно определяются "входным гидрографом" $Q = Q(0, t)$ и зависимость $z = z(Q)$ для нижней границы расчетной области.

Применительно к разветвленному руслу могут быть использованы как двумерные, так и одномерные модели в зависимости от специфики поставленной задачи и разновидности разветвленного участка. Условием применимости одномерных моделей являются пренебрежимо малые значения поперечного перекоса водной поверхности в узлах разветвления и слияния рукавов по сравнению с падением отметки водной поверхности по длине рукава. Это условие практически всегда справедливо для участков с пойменной многорукавностью, а также для тех русловых разветвлений, где длины рукавов в несколько раз превышают их ширину.

Данные модели, как правило, представляют собой развитие методов расчета распределения расходов воды по рукавам. Ввиду того, что процессы, связанные с движением потока, с одной стороны, и с деформацией русла – с другой, существенно разномасштабны по времени, возникает возможность раздельного моделирования этих процессов с последующим обменом информацией между ними. Наиболее детальной и корректной в данном направлении представляется разработка А.С.Овчаровой (1981). Однако в ее модели наряду с некоторыми легко устранимыми недостатками (неучет взвешенных наносов), как и в других моделях этого класса, есть ряд моментов, ограничивающих возможности их практического применения: во-первых, рассчитывается только изменение глубины, в то время как ширина принимается постоянной (во времени); во-вторых, значение коэффициентов шероховатости принимаются постоянными и не зависящими от наполнения русла; в-третьих, высокая чувствительность к начальным и граничным условиям, особенно к входному гидрографу, ограничивает возможность использования модели для долгосрочных прогнозов русловых деформаций.

Последнее обстоятельство характерно и для двумерных моделей русловых деформаций (Шеренков, 1978; Беликов, 1984; Милитеев и др., 1989), которые в то же время бывают незаменимы для вариантных расчетов и оперативных прогнозов на участках незначительной (несколько ширин) протяженности, в частности, в руслах с осередковой многорукавностью и русловой многорукавностью при обилии элементарных островов и коротких водотоков (разбросанные разветв-

ления). В то же время подобные модели деформаций разветвленного русла оказываются мало пригодными для долгосрочных прогнозов направленности развития русел рукавов в пределах узлов разветвлений.

Иной подход использован в модели, основанной на положениях, следующих из анализа обширного фактического материала и соответствующий принципам географического подхода к исследованию русловых процессов (Алабян, Сидорчук, 1987): 1) для каждого морфологически однотипного участка реки с аллювиальным руслом морфометрические характеристики рукавов определяются руслоформирующим расходом воды (Великанов, 1955; Михайлов, 1971); 2) руслоформирующим считается такой расход воды, при котором в многолетнем плане проходит максимальный сток руслообразующих наносов, вследствие чего его влияние на русло оказывается максимальным (Маккавеев, 1955; Чалов, 1979); 3) гидравлическое сопротивление и расход руслообразующих наносов должны рассчитываться по эмпирическим или полуэмпирическим зависимостям регионального характера, дающим на современном уровне знаний наилучшие результаты (Гришанин, 1992).

Исходными материалами являются карты русла в изобатах, по которым определяются осредненные значения ширины и глубины рукавов при различных уровнях воды и составляется описание конфигурации узла разветвления; кривая распределения (гистограмма) суммарных расходов воды в вершине узла разветвления и кривая $Q=f(H)$ по ближайшему гидрологическому посту.

Общая схема расчета следующая (рис. 6.17, индексы "р" при номерах блоков означают, что эти блоки – "региональные"):

1) для различных расходов воды в вершине узла разветвления Q_0 рассчитывается распределение расходов воды Q_i и руслообразующих наносов R_i по рукавам (i – номер рукава);

2) для каждого рукава строится эпюра руслоформирующих расходов $(Rp)_i$, и по максимуму произведения Rp определяется значение руслоформирующего расхода Q_{ϕ} в каждом рукаве;

3) по гидролого-морфометрическим зависимостям определяются "устойчивые" значения морфометрических характеристик каждого рукава;

4) для измененных морфометрических характеристик рукавов (принятых равными устойчивым) рассчитывается новое распределение расходов воды и наносов по рукавам.

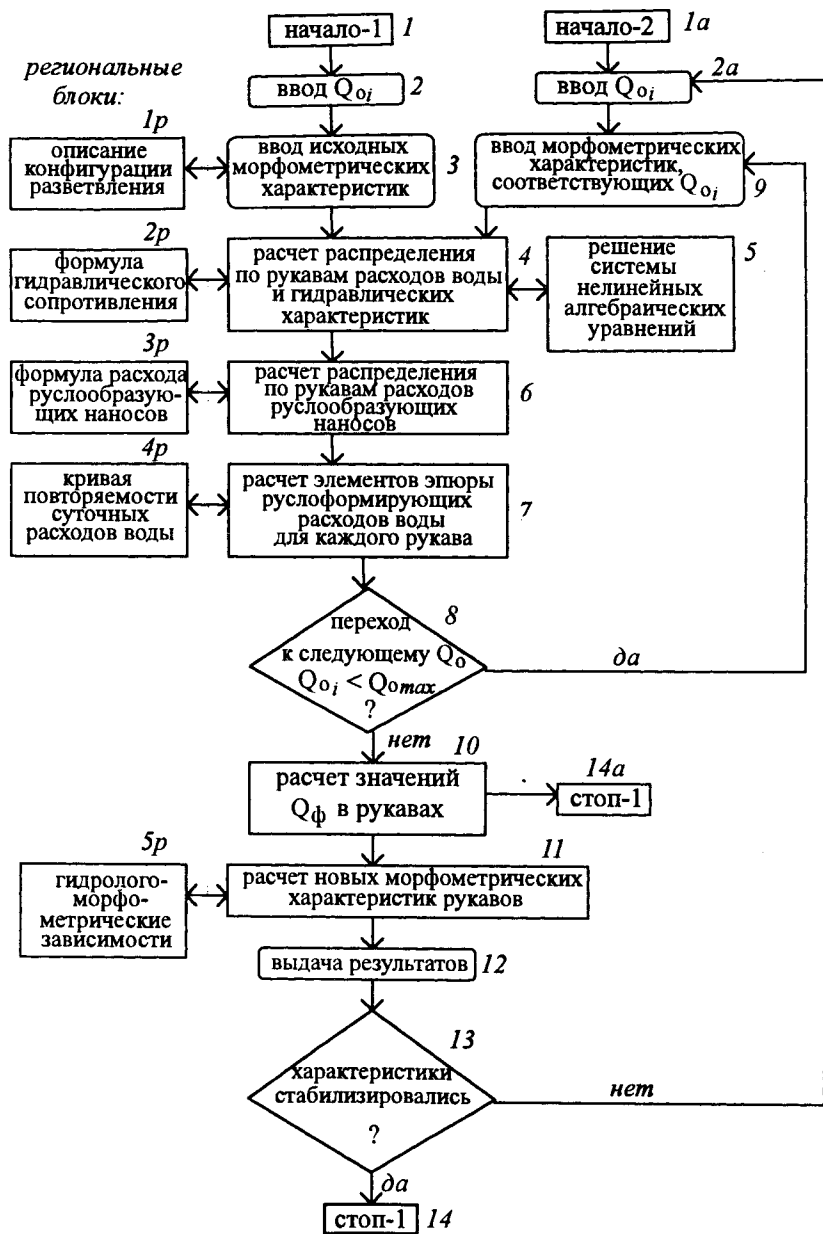


Рис. 6.17. Блок-схема расчета деформаций узла разветвления

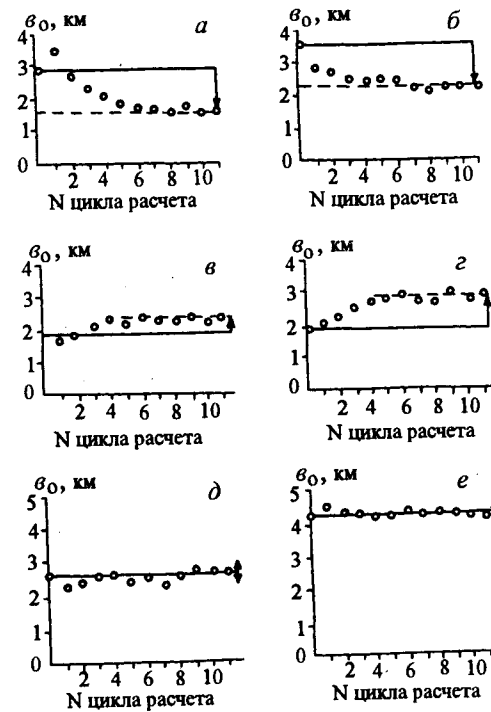


Рис. 6.18. Стабилизация "устойчивых" значений ширины русла при проведении 11 циклов расчета:

а – N 2, Каменный Енисей, исток; б – N 9, Большой Енисей, Турушинский перекат; в – N 1, Судная протока; г – N 5, Чаяшная протока; д – N 8, Лопатная протока; е – N 12, Каменный Енисей, нижняя часть (Рис. 6.11)

Операции 2–4 циклически повторяются до тех пор, пока значения морфометрических характеристик не стабилизируются, то есть морфометрия всех водотоков системы не окажется в состоянии динамического равновесия. Операции 1–3 при выполнении первого цикла могут быть выделены в отдельный предварительный этап расчета. При этом работают лишь блоки 1–10, 14а, 1р–4р. По результатам расчета формируется блок 5р. В этом случае на следующем этапе происходит циклическое выполнение всех блоков, за исключением блоков 1–3, 14а.

Различные варианты стабилизации "устойчивых" значений b_0 в ходе расчета приведены на рис. 6.18. Данная методика позволяет дать прогноз развития рукавов и в случае изменения естественного водного режима реки. Для этого необходимо на втором этапе расчета видоизменить блок 4р, заменив фактическую кривую распределения суточных расходов воды на расчетную кривую распределения для условий зарегулированного стока.

Условиями применимости модели являются:

- 1) выполнение всех условий, касающихся применения одномерной модели, главное из которых - достаточно длинные расчетные рукава;
- 2) отставание темпов перестройки конфигурации узла разветвления от изменений морфометрических характеристик рукавов; это условие, как правило, выполняется для рек со стабильными одиночными или сопряженными разветвлениями, а также при пойменной многорукавности.

Эти условия "отбрасывают" такие разновидности разветвленных русел, как осередковую разветвленность и разбросанные русловые разветвления, для которых необходимы двумерные модели. Если расчет производится для измененного водного режима, то, кроме того, необходимо установить, не приведет ли перераспределение стока к смене морфодинамического типа русла; в частности, не произойдет ли переход от разветвленности к меандрированию.

6.6. Основные приемы регулирования разветвленных русел

Разветвления русла, как правило, вызывают наибольшие затруднения при решении задач регулирования, связанных с прокладкой коммуникаций, возведением инженерных объектов на берегах, водозаборов и водовыпусков, транспортным освоением рек. При строительстве мостовых переходов, прокладке трубопроводов, дюкеров, кабелей через реки обычно выбираются створы, расположенные между отдельными узлами разветвления. В случае одиночных разветвлений таковыми являются прямолинейные, неразветвленные участки между островами, где задача упрощается и сводится практически к прогнозу переформирования соответствующего типа русла.

Более сложно решаются вопросы выбора створов на участках сопряженных разветвлений русла. Наиболее приемлемо их расположение в местах сопряжения рукавов, где русло сужено и относительно устойчиво. Особенно благоприятная ситуация складывается в том случае, если выступы берегов (или один из них), сужающих русло между смежными звеньями сопряженных разветвлений, являются коренными (террасовыми) или представлены береговой поймой. Если здесь располагаются острова второго порядка, то всегда надо иметь в виду возможность активизации протоков между ними, в т.ч.

включение их в систему сопряженных рукавов. Последнее может иметь место при искусственном (вследствие создания выше по течению водохранилища) регулировании стока.

При односторонних разветвлениях выбор створа перехода складывается из комбинации условий, определяемых наличием второстепенных рукавов вдоль одного из берегов и смещением побочной перекатов в главном рукаве. В разветвленно-извилистом русле задача решается также, как на излучинах с учетом вероятности их спрямления по протокам между островами, составляющими шпору излучины.

Разветвленные русла других типов (сложноразветвленные) являются неблагоприятными для любых переходов через реки. Поэтому створы переходов следует располагать там, где разветвления прерываются участками реки с другими типами русла, либо, в случае острой необходимости, их прокладка связана с разработкой прогнозов деформации каждого рукава и учетом возможных переформирований русла в целом.

Расположение водозаборов, водовыпусков, причалов и других объектов, связанных с водными акваториями, на реках, разветвленных на рукава, почти всегда представляет собой трудно решаемую задачу. При этом общим неблагоприятным фоном является вероятность "ухода реки" от объекта, вследствие чего он оказывается со временем в отмирающем рукаве, либо, наоборот над ним постоянно висит угроза разрушения из-за размыва берега. Если это процесс периодический, то в принципе можно с помощью комплекса регуляционных мероприятий закрепить главное течение реки в том рукаве, в котором находится сооружение. В случае направленных деформаций это приводит к тому, что в конечном итоге приходится идти на создание подходного канала к объекту, выполняя регулярные работы по его углублению и борьбе с заносимостью, либо на строительство дорогостоящих берегоукрепительных сооружений. На реках с одиночными и сопряженными разветвлениями наиболее приемлемыми для сооружения объектов являются прямолинейные неразветвленные участки между островами или места сопряжения рукавов.

Наиболее комплексно решаются задачи регулирования разветвленных русел на судоходных реках, на которых обоснование трассы судового хода в той или иной системе рукавов приобретает первостепенное значение на протяжении морфологически однородных участков большой длины.

Перестройки одиночных разветвлений определяются рядом факторов, каждый из которых может играть первостепенную роль и учет которых позволяет без значительных капитальных работ либо закреплять судовую ход в одном из рукавов, либо своевременно переносить его. Наиболее распространенной причиной развития и отмирания рукавов является попеременное надвижение на их истоки перемещающихся побочной перекатов. Для сохранения удовлетворительного состояния глубин по существующей трассе наиболее правильным мероприятием считается заблаговременное (профилактическое) их отторжение. В противном случае приходится идти на резкое увеличение объемов эксплуатационных работ, либо периодически осваивать несудоходный рукав. На Телеговских перекатах Северной Двины, например, это приводило к периодическому увеличению объемов путевых работ в несколько раз до тех пор, пока судовая ход не был закреплен в левом рукаве посредством подрезки развивающегося перед его истоками побочня и перекрытия несудоходного (правого) рукава выправительными сооружениями. Подобным образом были улучшены также судоходные условия на Шулегско-Тундрийских перекатах р. Вычегды, Борошном перекате р. Оби и ряде других затруднительных участках.

В большинстве случаев возле островов наблюдается изгиб потока. При условиях, когда гидравлическая выгодность извилистой формы русла рукава утрачивается ($l_p > 1,6L$, где l_p – длина русла по излучине рукава, L – шаг узла разветвления) и происходит перераспределение расходов воды в сторону более прямого рукава, судовая ход переносится в спрямляющий рукав, что обычно сопровождается общим улучшением условий судоходства. Показательным в этом отношении является участок Оби в районе Елобогатских перекатов. Здесь судовая ход располагался в правом рукаве, искривившемся к 30-ым годам настолько, что стал вдвое длиннее левого, в который переместился фарватер. Со временем развитие излучины этого рукава также привело к его удлинению; соотношение l_p/L к концу 60-ых годов достигло 1,4, а объем землечерпания только в 1970–1972 гг. составил 600 тыс. м³ (столько же грунта было удалено за предыдущие 10 лет). В связи с этим вдоль активизирующегося прямого рукава была разработана капитальная прорезь, что привело к ликвидации затруднительного для судоходства участка.

Стабилизирующее влияние на судовую ход в одиночных разветвлениях русла оказывают ведущие берега. Выправление русла путем разработки рукавов, проходящих вдоль последних, если они не образуют выступающих в реку мысов, как правило, приводит к резкому улучшению условий судоходства. Примером удачного применения этого метода служит р. Вычегда, на отдельных участках которой в результате выправления среднегодовые объемы землечерпания были снижены в 2–3,5 раза (Вильперт, 1970): на Тимасовских перекатах они сократились с 680 тыс. м³ до 330 тыс. м³.

В сопряженных разветвлениях судовую ход располагается последовательно в рукавах, проходящих то у одного, то у другого берега. Перераспределение расхода воды в верхнем звене системы и изменение положения судового хода происходит под влиянием деформаций русла, аналогичных рассмотренным для одиночных разветвлений, но ниже по течению оно вызывает его перемещение в рукава у противоположных берегов возле каждого острова. Подобные перестройки получили название "правила восьмерки", которое нужно учитывать при выборе трассы судового хода. Используя этот метод, на р. Оби между г. Новосибирском и устьем р. Томи не только значительно улучшены условия судоходства, но и обеспечено повышение гарантированных глубин до 250–270 см (при бытовых 120–150 см) на фоне общего снижения объемов дноуглубительных работ. Разработка ранее несудоходных сопряженных рукавов – левого на участке Ниж. Мочищенского-Базиковского перекатов, левого в районе Орско-Борского и правого на Гусиных перекатах (Орско-Борский-Гусиный-Белоглинский участок сопряженных разветвлений), правого в пределах Кругликовского участка позволило ликвидировать крутые повороты фарватера и оставить "вне транзита" ряд постоянно лимитирующих судоходство перекатов. Только на Кругликовском участке общее улучшение судоходных условий сопровождалось снижением объемов эксплуатационного землечерпания в 2,5 раза.

В ряде случаев следует учитывать другие факторы, влияющие на развитие сопряженных разветвлений и выбор оптимального приема их регулирования. Так, наличие ведущего высокого берега способствует тому, что рукав, который проходит вдоль него, остается достаточно глубоким и многоводным даже в те периоды, когда активизируется второй рукав. В этом случае возможно закрепление трассы в рукавах, расположенных у высокого берега с нарушением правила

"восьмерки". При наличии выступов ведущих берегов судовой ход также получает фиксированное положение, располагаясь в верхнем звене в рукаве вдоль высокого берега, в следующем – в пойменном рукаве, затем снова у высокого берега и т.д., как это имеет место на р. Оби ниже г. Новосибирска, где, начиная с 30-ых годов, фарватер проходит сперва в правом рукаве у высокого берега, затем в левом пойменном и снова в правом рукаве у высокого берега.

Однако иногда близость коренного берега сопровождается расширением на небольшой глубине трудноразмываемых пород, подстилающих русло рукава. В этих случаях или не происходит его углубления при развитии в соответствии с "правилом восьмерки", что препятствует расположению в нем трассы судОВОГО хода, либо вдоль него разрабатывается прорезь – "канал" в прочных грунтах, что обычно приводит к общей стабилизации трассы и прекращению ее перемещения из рукава в рукав.

Соблюдение "правила восьмерки" при проектировании трассы судОВОГО хода позволяет значительно уменьшить вероятность образования побочной, заклинивающей рукава, и обеспечивает пологий перевал от одного берега к другому в местах сопряжения узлов разветвления. При выборе трассы необходимо рассматривать участки реки вплоть до тех мест, где цепочки островов обрываются и русло становится неразветвленным. На р. Оби протяженность таких участков колеблется от 10 до 34 км (считая по судОВОМУ ходу), а число звеньев, в пределах которых фарватер располагается последовательно у противоположных берегов, составляет от 2 до 4. В таких условиях затруднительные для судоходства перекаты не образуют сплошных лимитирующих судоходство участков, встречаясь изолированно друг от друга в узлах разделения или слияния рукавов, а иногда и в центральной части последних. В случае, если трасса судОВОГО хода не соответствует "правилу восьмерки", в местах его нарушения возникают сложные перекатные участки, требующие систематического землечерпания. Таковым был до проведения капитальных выправительных работ Кругликовский узел на р. Оби, рассмотренный выше.

Следует учитывать, что в длинных слабоизогнутых рукавах (разделенных островами, у которых $L_0/B_0 \gg 3-4$), обычно возникают разветвления второго порядка. Формирующиеся при этом перекаты с центральным побочным требуют обычно землечерпания, представляя

ставляя собой наиболее тяжелые для обеспечения гарантированных глубин участки во всей системе сопряженных рукавов. Например, на Оби (Новосибирск – устье р. Томи) на 19 таких перекатах объем землечерпания составил в отдельные годы 32% от общего объема работ на плесе, тогда как на 16 перекатах в узлах разделения русла на рукава или при их соединении – 24%.

На реках со сложносопряженными разветвлениями судовой ход также обычно проходит то у одного, то у другого берега, в т.ч. в трех и более рукавных узлах. Рукава между островами посередине русла обычно мелководны, и при расположении в них фарватера составляют лимитирующий судоходство участок.

Небольшое различие в водности основных рукавов в каждом узле, постепенное ее увеличение в одном из них и уменьшение в другом вниз по течению приводит к равноценному их развитию, вследствие чего каждый из них может использоваться для расположения трассы судОВОГО хода. Предпочтение в этом случае следует отдавать тем рукавам, в которых наименее вероятно образование перекатов. Последнее зависит от несимметричного расположения поймы, наличия ведущих коренных берегов, неодинаковой руслоформирующей деятельности потока в разные фазы режима. Вследствие этого при выборе в качестве судоходного одного из двух основных рукавов в сложноразветвленном узле предпочтение следует отдавать тому из них, который проходит вдоль коренного незатопляемого берега. Этим достигается расположение трассы судОВОГО хода вне зоны преимущественной аккумуляции наносов и обеспечение устойчивого ведущего берега на значительном по протяженности участке. В результате, несмотря на сопряженный характер переформирований русла в узлах разветвлений, трасса фарватера прокладывается по системе рукавов, проходящих вдоль одного из берегов.

К подобному нарушению "восьмерки" приходится прибегать также при отсутствии коренных берегов. Трассу фарватера при этом целесообразно прокладывать по рукаву, в истоках которого доля стока при формирующих расходах воды больше, а в устье меньше, чем в другом рукаве. Это связано с тем, что несудоходный рукав в верхней своей части выполняет наносоотсасывающую роль на фоне общего снижения транспортирующей способности потока при его разделении по рукавам; располагающиеся в нем перекаты более мелководны, чем возникающие в нижней части судоходного рукава под влия-

нием оттока воды в протоки посередине реки и во второй "конкурирующий" рукав.

В параллельно-рукавных разветвлениях судовой ход может быть проложен по обоим рукавам. Однако чаще этому препятствуют местные условия или направленность развития русловых процессов в каждом из рукавов. Так, на Оби ниже слияния Бии и Катунь более перспективным является правый рукав, в котором сосредотачивается поток Бии, отличающийся на порядок величины меньшим стоком наносов, чем поток Катунь, проходящий по левому рукаву. На Лене в районе Ленских столбов трасса судовой ход проложена по правому рукаву, имеющему галечно-валунный состав руслообразующих наносов и большие глубины (несмотря на наличие ряда скальных "перекатов"); левый рукав – песчаный, с многочисленными перекатами, на которых требовалось бы выполнение регулярных землечерпательных работ. На нижней Лене (ниже устья Вилюя) преимущественному развитию правого рукава способствует его расположение вблизи или вдоль коренного (террасового берега), тогда как левый расположен вдоль широкой поймы.

Нередко на участках рек с параллельно-рукавными разветвлениями трасса судовой ход проложена то в одном, то в другом рукаве. Обычно это связано с необходимостью обеспечения подхода судов к населенным пунктам, последовательно располагающимся на противоположных берегах, или является исторически сложившейся, и ее расположение отвечает иным, чем сейчас, потребностям судоходства. В этом случае судовой ход на перевалах от берега к берегу пересекает устойчивую зону аккумуляции наносов посередине реки, и здесь располагаются наиболее затруднительные перекаты, на которых выполняются землечерпательные работы в больших объемах и с малой эффективностью; фарватер неустойчив, часто (вплоть до нескольких раз в навигацию) меняет свое положение, в том числе среди островов, разделяющих основные рукава. Таково, например, состояние судовой ход на Оби между слиянием Бии и Катунь и пос. Быстрый Исток, на некоторых участках средней и нижней Лены. Попытки выборочного решения проблемы на Оби путем удлинения левобережных отрезков трассы, предпринятые в 60–70-ые годы к успеху не привели из-за большого стока наносов в левом рукаве. В 80-ые годы был разработан ряд прорезей в бывшем ранее несудоходном правом рукаве, и перенос в него судовой ход привел к ликвидации

ряда затруднительных перекатов (Фоминский узел, Талецкие-Картуковские перекаты у о-ва Гусиного, район пос. Акутихи). Однако оставление судовой ход на двух отрезках в левом рукаве сохраняет его перевалы с пересечением зон аккумуляции посередине реки и необходимость выполнения здесь регулярных землечерпательных работ.

В пойменно-русловых разветвлениях трасса судовой ход должна прокладываться по рукаву, имеющему тенденцию к развитию. В то же время на крупнейших реках (Амур) возможно транспортное использование обоих рукавов вне зависимости от нее из-за высокой водности рукавов и больших естественных глубин, удовлетворяющих современным требованиям судоходства.

В дельтовых разветвлениях узлов слияния рек предпочтение следует отдавать рукавам, образующим длинное или короткое слияние в зависимости от преимущественно подпорных или бесподпорных условий их развития. При переменном подпоре в разные по водности периоды следует попеременно располагать трассу судовой ход то в одном, то в другом рукаве "дельты". Например, на Лене в узле слияния с Алданом в годы, когда Лена подпирает Алдан, трасса судовой ход располагается в правом рукаве, проходящем вдоль лено-алданской стрелки. В годы, когда Лена находится в подпоре от Алдана, на ней развивается левый рукав – протока Турий Взвоз; по старому направлению судовой ход мелеет, на перекатах выполняются землечерпательные работы во все возрастающих объемах; в протоке же Турий Взвоз, несмотря на то, что русло ее слабоустойчиво, при переносе в нее судовой ход в отдельные годы дноуглубление вообще не проводится.

Глава 7

Галечно-валунные русла

7.1. Общие особенности формирования и типизация галечно-валунных русел

Крупные реки, долины которых врезаются в плоскогорья, располагаются в пределах низко- или среднегорного рельефа или пересекают моренные возвышенности на равнинах, имеют уклоны, лишь немногим превышающие характерные для типичных равнинных рек (0,20–0,40 ‰ против 0,10–0,20 ‰), но отличаются от них галечно-валунным или валунно-глыбовым составом руслообразующих наносов. Последний определяется источниками поступления наносов в русло и в наибольшей степени зависит от характера рельефа и геологического строения бассейна. Значительная обнаженность скальных и крупнообломочных пород в сочетании с большой крутизной и высотой склонов создают условия для формирования галечных и галечно-валунных русел, в которых песчаные и более мелкие фракции наносов перемещаются транзитом (во взвешенном состоянии) и участвуют в руслоформировании только в качестве заполнителя в толще крупнообломочного аллювия.

Такие русла отличаются стабильностью плановых очертаний, постоянным или мало изменяющимся во времени положением отмелей и кос, что создает впечатление недеформируемости самих русел. Действительно, если определять условия перемещения потоком валунов по формулам В.Н.Гончарова, Г.И.Шамова и др., то оказывается, что они должны быть неподвижными. В межень речная вода осветляется (мутность равна или близка к 0), часто до глубины 2 м, и хорошо видно дно, выстилаемое валунами. Галечно-валунные отмели покрыты, как правило, хорошо сортированной отмосткой. Вдоль берегов вытянуты обсыхающие в межень бичевники – полого наклонные площадки шириной до нескольких десятков метров между

уступом коренного берега и урезом воды в реке; валуны и крупная галька на бичевниках также, подобно отмелям, образуют отмостку либо хорошо пригнаны друг к другу, и их поверхность напоминает мощные булыжником мостовые. По значениям показателей устойчивости (число Лохтина, коэффициент стабильности Н.И.Маккавеева) галечно-валунные русла равнинных рек относятся к абсолютно-устойчивым.

Однако очень хорошая окатанность валунов, которая является следствием перемещения (волочения) обломков потоком, и их петрографический состав, является свидетельством того, что они перемещаются на большие расстояния. Так, на верхнем Алдане (при слиянии с Учуром), где по берегам повсеместно распространены известняки, среди валунов и крупной гальки преобладают граниты и гранито-гнейсы, развитые в 100 и более километрах выше по течению. Скопления валунов образуют крупные гряды, подобные песчаным. При транспортном освоении рек дноуглубительные прорезы заносятся галечно-валунным материалом. При разветвлении галечно-валунных русел на рукава наблюдается развитие или отмирание (углубление или обмеление) последних; происходят размывы берегов; отмечено смещение побочной и осередков иногда до 20–30 метров в год. Таким образом, галечно-валунные русла переформируются, но с иными темпами, чем песчаные, и с определенной спецификой, сближающей их по внешним признакам с горными реками.

Геолого-геоморфологические условия территории России благоприятствуют широкому распространению подобных русел, причем не только на горных реках, но и на реках с равнинным характером течения и уклонами. По условиям формирования и транспортировки руслообразующих наносов выделяется две разновидности галечно-валунных русел, которым можно условно дать региональные названия: 1) восточноевропейская, для которой галечно-валунный материал преимущественно поступает из подстилающих русло и слагающих берега рек морен и флювиогляциальных отложений; 2) восточносибирская, где источником наносов служит крупнообломочный материал, поступающий со склонов (курумы, осыпи, обвалы) и из притоков, часто являющихся типичными горными реками.

В Европейской части России участки с галечным и галечно-валунным составом аллювия встречаются лишь местами, преимущественно при пересечении реками моренных возвышенностей, а также

на Среднерусской возвышенности, в Предуралье, но к востоку от Енисея это – преобладающий тип донных наносов (Русловой режим ..., 1994). Здесь галечно-валунные русла характерны для таких крупных рек, как Енисей (до впадения Нижней Тунгуски), верхняя и средняя Лена (до Ленских столбов в 200–250 км выше Якутска), Алдан, Олекма, Чара, Витим, Киренга, Яна (на Куларском участке), Индигирка (до устья Бодярихи), Колыма (до Среднеколымска), средний и верхний Амур и др.

Галечно-валунные русла европейских рек, как правило, врезанные, строго локализованы участками пересечения моренных гряд. Исходный для их формирования материал плохо сортирован (это валунные суглинки или рыхлообломочная смесь из песка, гравия, гальки и валунов) и имеет сравнительно небольшую среднюю крупность. Например, на Немане при пересечении Гродненской возвышенности средний диаметр гальки и валунов составляет 16 см, тогда как средняя крупность всей совокупности наносов – 5 мм.

На сибирских реках наносы, переносимые в период прохождения руслоформирующего расхода воды, резко разделяются по крупности на донные (галька и валуны) и взвешенные (песок, илы), занимающие в составе руслового аллювия небольшой вес. Мелкопесчаные и илистые частицы в любую фазу гидрологического режима переносятся потоком, представляя собой транзитный материал. Их скопления встречаются только в затонских частях перекаатов и подвальях прибрежных кос; они также составляют заполнитель галечно-валунных скоплений, образующих гряды в русле. Малая величина стока взвешенных наносов объясняется слабым развитием рыхлых пород (мелкозема) на горных склонах вследствие преобладания физического выветривания и развития интенсивных гравитационных процессов, способствующих быстрому сносу в реки обломочного материала.

В силу геолого-геоморфологических условий их развития, значительная часть галечно-валунных русел относится к врезанному типу, и ограниченные условия развития русловых деформаций наряду с крупнообломочным составом донных наносов определяют многие специфические черты руслоформирования. Однако встречаются и широкопойменные галечно-валунные русла. В горных областях они обычно формируются во внутри- и межгорных котловинах и обычно являются разветвленными (Киренга, верхняя Ангара). Напротив, Витим, Чара, Олекма, верхняя Лена, верхний Алдан имеют в основном

беспойменные неразветвленные русла, образующие врезанные излучины (и макроизлучины), либо прямолинейные. Отдельные разветвления встречаются в местных расширениях долины, образующихся при смене литологических комплексов, пересечении зон разломов или повышенной трещиноватости горных пород.

Впервые состав донных наносов как классификационный признак русла был введен Н.И.Маккавеевым (Проектирование судовых ходов ..., 1964). Характер русловых деформаций положен в основу морфодинамической классификации речных русел, которая позволяет решать обратную задачу – по морфологическому облику русла, то есть по информации, достаточно доступной, определять общий характер русловых деформаций. Однако, в широко распространенной редакции этой классификации (“Работа водных потоков”, 1987) характер донных грунтов как признак отсутствует. Тем не менее при проведении конкретных исследований применение морфодинамической классификации осуществлялось с учетом специфики развития русел разных типов в зависимости от состава руслообразующих. В принятом варианте морфодинамической классификации выделен специальный блок – типы русел по составу руслообразующих наносов.

7.2. Рельеф русла

Скальный рельеф дна.

Особенностью врезающихся рек, отличающихся дефицитом донных галечно-валунных наносов, является наличие участков дна, не покрытых аллювиальным материалом. При врезании в скальные породы участки, где обнажается коренное ложе потока, занимают на многих реках значительную часть площади русла.

Закономерности распространения и рельеф скальных участков русла изучались на нижнем Витиме путем анализа продольных и поперечных (выполненных через 100–150 м) эхолотных профилей дна. На участке 300–172 км площадь скальных участков составляет 10,7 км² (17,3% от общей площади русла), на участке 171–96 км – 2,2 км² (5,3%). Ниже по течению площади выхода скальных пород в целом незначительны, а в русле широко развит грядовой микрорельеф, затрудняющий идентификацию скальных выходов по материалам эхолотирования. На рис. 7.1Б показано изменение осредненных по кило-

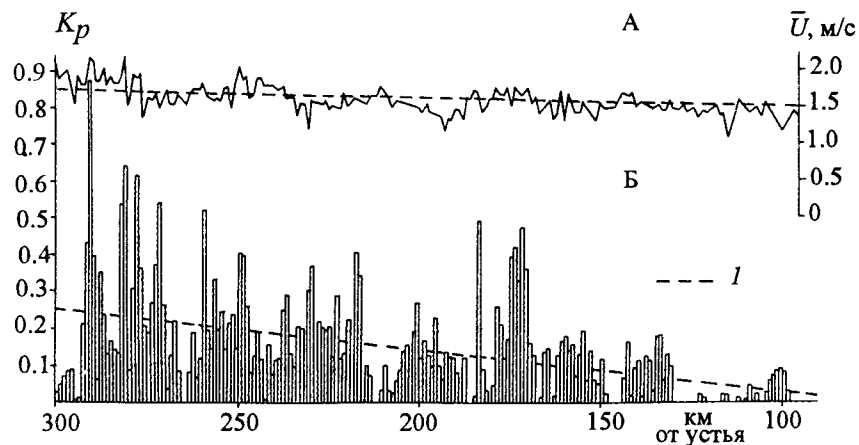


Рис. 7.1. Изменение средних скоростей течения \bar{U} (А) и коэффициента скальности русла K_p (Б) по длине р. Витима: 1 – линия тренда

метровым отрезкам значений доли площади скальных участков от общей площади русла (коэффициента скальности русла – K_p). На фоне общего убывания скальности отмечается ритмичность различного масштаба, шаг наиболее крупных ритмов составляет порядка 20 км. Ритмичность имеет, по-видимому, случайный характер, хотя отдельные ритмы скальности коррелируются с изменением по длине русла средних скоростей течения при руслоформирующем расходе воды среднего интервала ($7125 \text{ м}^3/\text{с}$, г. Бодайбо) \bar{U}_p (рис. 7.1А). Убывание скальности вниз по течению (линейный тренд описывается зависимостью $K_p^T = 0,00111L - 0,084$, где L – расстояние от устья, км) свидетельствует об уменьшении дефицита руслообразующих наносов. Значительные объемы галечных наносов выносит р. Мама, и ниже ее впадения (171 км от устья) скальность русла Витима нигде не превышает 0,185 (в принятом километровом масштабе осреднения). Направленное убывание скальности русла связано и с общим снижением скоростей течения (линейный тренд: $\bar{U}_p^T = 0,00125L + 1,388$) и объясняется, по-видимому, постепенным изменением формы транспорта все более мелких фракций наносов. Физически это можно представить следующим образом. При уменьшении средних скоростей течения увеличиваются среднее время покоя каждой отдельно взятой частицы

наносов и вероятность ее захоронения в толще наносов, прибывающих сверху. Это приводит к увеличению общей массы наносов, находящихся на отрезке русла фиксированной длины, в основном за счет тех фракций, которые ранее были в транзите, т.е. относительно большую часть времени находились в состоянии движения. Увеличение массы сравнительно мелких, подвижных наносов в составе руслообразующего аллювия способствует образованию грядовых форм.

На локальном уровне рассмотрения связь скальности русла со скоростями течения затушевывается рядом дополнительных факторов. На рис. 7.2А представлена связь K_R и U_p , осредненных по километровым отрезкам неразветвленных участков русла. При невысокой общей корреляции ($r = 0,49$) прослеживается тенденция увеличения скальности с ростом скоростей течения, особенно хорошо заметная по верхней огибающей поля точек.

На неразветвленных участках нижнего Витима с близкой к параболической формой сечения русла площади распространения скальных пород локализованы преимущественно в пределах бортовых частей русла и относительно редко отмечаются в зоне тальвега – посередине реки, где сосредоточен основной поток наносов. В пределах одиночных разветвлений обычна обратная картина: скальное, лишенное аллювия дно обнажается в центральной части обоих или одного из рукавов. Если отмеченная для простых сечений закономерность связана с дополнительной неустойчивостью частиц аллювия на наклонной поверхности, должна существовать связь между показателем скальности русла и средним углом наклона его бортов, т.е. относительной глубиной русла. На рис. 7.2Б данные по неразветвленным участкам представлены в координатах $\Delta K_p \sim 2H_{max} / B$ (здесь ΔK_p – отклонение коэффициента скальности в пределах километрового участка русла от его трендового значения; H_{max} и B – соответственно максимальная глубина и ширина русла при межженных уровнях). Прослеживается тенденция возрастания ΔK_p с ростом относительной глубины русла, особенно отчетливо заметная по нижней огибающей поля точек.

Определенное влияние на степень скальности русла оказывает локальная геоморфологическая обстановка и тип русла. По этому признаку имеющиеся данные разделены на три группы (табл. 7.1): 1) неразветвленные участки с одним или обоими коренными берегами; 2) неразветвленные участки, оба берега которых представлены аллювиальными образованиями (пойма, низкие террасы); 3) разветвленные участки.

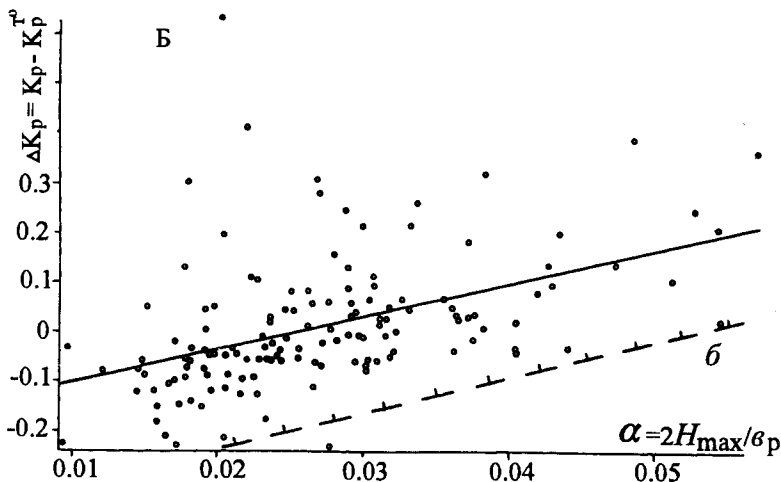
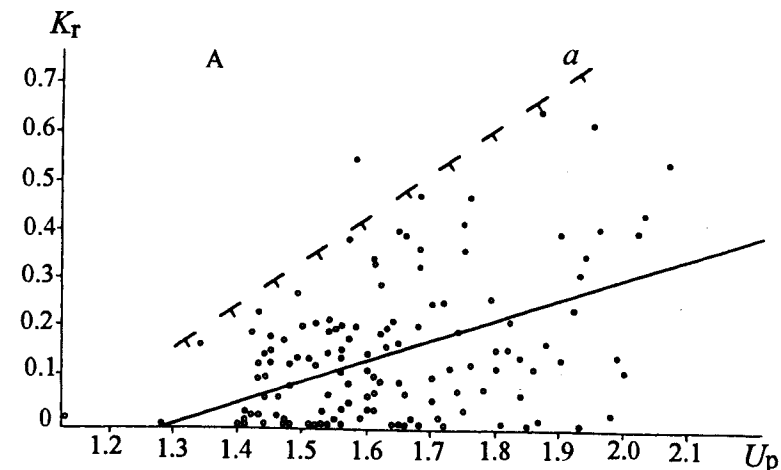


Рис. 7.2. Зависимость характеристик скальности русла р. Витима от средних скоростей течения при руслоформирующем расходе воды Q_{ϕ} (А) и относительной углубленности русла (Б); а, б – огибающие поля точек

Первая группа отличается в среднем наиболее высокими значениями скальности. На втором месте идут разветвленные участки, что иллюстрирует связь разветвлений нижнего Витима с локальными геологическими условиями. Наиболее низкой скальностью русла отличаются неразветвленные участки с аллювиальными берегами. Одна-

Таблица 7.1. Характеристики скальности русла нижнего Витима в разной геоморфологической обстановке и типах русла (s – среднее-квадратическое отклонение)

Тип русла и геоморфологическая обстановка	Число точек	$K_p \pm \sigma$	$\Delta K_p \pm \sigma$	$(\Delta K_p / K_p^T) \pm \sigma$
Неразветвленное русло с одним или двумя коренными (скальными) берегами	122	$0,16 \pm 0,15$	$0,02 \pm 0,14$	$0,12 \pm 0,94$
Неразветвленное русло с аллювиальными берегами	46	$0,09 \pm 0,10$	$-0,04 \pm 0,09$	$-0,38 \pm 0,76$
Разветвленное русло	37	$0,12 \pm 0,12$	$-0,01 \pm 0,10$	$-0,04 \pm 0,84$

ко следует отметить, что во всех трех случаях разброс данных очень велик и с формально-статистической точки зрения указанные различия незначимы даже в пределах среднеквадратических отклонений.

В геологическом масштабе времени общий дефицит наносов приводит к направленному углублению русел, в результате чего значительная их часть относится к врезанному типу, формируясь в условиях ограниченного развития русловых деформаций. В динамике врезанных русел существенную роль играет конфигурации коренных берегов, оказывающая струнаправляющее воздействие на поток. Слой руслообразующих наносов, если он имеется, маломощен, что вместе со скальными участками определяет значительную роль рельефа поверхности коренных пород в морфологии дна русла.

Рельеф скальных участков дна отличается резкими изменениями высот как в продольном, так и в поперечном направлениях. Продольные профили русла фиксируют наличие разномасштабных скальных гряд длиной до нескольких десятков метров и высотой до 2–3 м. В продольном разрезе скальные гряды имеют обычно симметричную форму и отличаются от аллювиальных гряд большей крутизной и резкостью очертаний. Поперечные профили русла демонстрируют аналогичную картину, что позволяет предполагать у большинства скальных гряд изометричную, холмовидную или пикообразную плановую форму, обусловленную сеткой трещиноватости коренных пород. В то же время наблюдения на отмелях участках русла показывают, что более мелкие скальные гряды (с шагом дециметры – первые метры), оставшиеся вне пределов разрешающей способности материалов эхолотирования, часто близки по форме к ал-

лювиальным грядам с крутым низовым и пологим верховым скатами и значительным отношением ширины гряды к длине. Расселины скального дна, представляющие собой расширенные действием водного потока и субаквального выветривания трещины, не проявляются в рельефе дна столь же отчетливо, как положительные формы, поскольку заполнены аллювием.

Грядовой рельеф.

В руслах равнинных рек возможно существование грядовых форм в широком спектре линейных размеров. Критерием разделения гряд на различные классы служит обычно характер физической связи параметров гряд с гидравлическими характеристиками потока (Знаменская, 1976). Так, в докритической по числу Фруда Fr области выделяются ("Nomenclature...", 1966; Ashida, 1973; Маккавеев, Чалов, 1986): 1) рифели (микроформы руслового рельефа) – наиболее мелкие гряды длиной порядка глубины потока; параметры рифелей определяются значением Fr ; 2) дюны (мезоформы) – гряды среднего размера длиной порядка ширины русла; параметры дюн определяются глубиной потока; 3) бары (макроформы) – гряды длиной в несколько ширин русла (побочни, осередки), параметры которых определяются шириной русла.

Рифели не могут образовываться, когда высота выступов шероховатости больше толщины вязкого подслоя на поверхности частиц грунта (Ashida, 1973). Считается, что образование рифелей редко происходит при крупности наносов $d_{50} > 0,6$ мм (Simons, Richardson, 1967; Nomenclature..., 1966; Ashida, 1973; Yalin, 1972; Знаменская, 1976 и др.), т.е. в галечно-валунном русле данный класс гряд не формируется.

Формирование гряд среднего класса – дюн – в крупнообломочных грунтах наблюдалось преимущественно в лабораторных экспериментах; исследования их в естественных условиях единичны. Долгое время считалось, что транспорт крупнообломочных наносов происходит, как правило, в форме пологих грядовых образований, соизмеримых с шириной русла (т.е. уровня мезо- и макроформ), с простой иерархической структурой – в среднем два порядка гряд. В настоящее время получены данные о достаточно сложной структурной организации рельефа галечно-валунных русел (Алексеевский, Мельник, 1991). Это подтвердилось в ходе специальных исследований на нижнем Витиме, где проанализировано более 100 км продольных профилей русла. Проведенные исследования показали также, что

формирование грядового рельефа дна в значительной степени определяется дефицитом подвижных фракций руслообразующих наносов.

Формирование гряд требует высоких величин стока наносов и происходит в периоды массового движения руслообразующего аллювия (Kellerhals, 1967). В целом, по-видимому, не существует верхнего предела крупности частиц наносов, при котором в принципе не может происходить формирование гряд, необходимо лишь достижение соответствующих гидродинамических условий (скоростей течения). Так, в литературе описаны гигантские крупновалунные гряды, формирование которых связывают с прорывом подпрудных ледниковых озер (Thiel, 1932; Baker, 1990; Рудой, 1995). Однако, как показано выше, в галечно-валунных руслах равнинных рек массовое влечение донных наносов если и происходит, то в короткие временные интервалы на пике половодья и паводков. В остальное время русло представляет собой лоток с жестким недеформируемым дном, по которому происходит эпизодическое смещение отдельных частиц аллювия, причем с увеличением крупности наносов вероятность проявления хотя бы в короткие промежутки времени их массового движения (формирования потока наносов) уменьшается. В таких условиях можно говорить о дефиците наносов с точки зрения формирования грядового рельефа, т.е. о дефиците подвижных в данных гидродинамических условиях фракций руслообразующих наносов, хотя общая масса аллювия в русле может быть и достаточно велика.

Лабораторными экспериментами (Котков, 1989; Дебольский, Котков, 1977) установлено, что определяющим фактором формирования гряд в условиях дефицита сыпучего материала является его средневесовое количество на единице площади неразмываемого дна P . При значениях P меньше некоторого критического P_0 формируются лишь пятна скоплений частиц аллювия ("песчаные пятна" – в опытах использовался песок). Если количество сыпучего материала превышает P_0 , высота пятен достигает критической величины, при которой характер их обтекания переходит от безотрывного к вихревому, и песчаные пятна преобразуются в дефицитные гряды, которые можно рассматривать как переходную стадию от движения отдельных частиц по неразмываемому дну к формированию "полных" донных форм. Длина и высота дефицитных гряд меньше по сравнению с их "полными" аналогами, но расстояние между гребнями гряд одинаково во всех случаях вследствие единого вихревого механизма их образования.

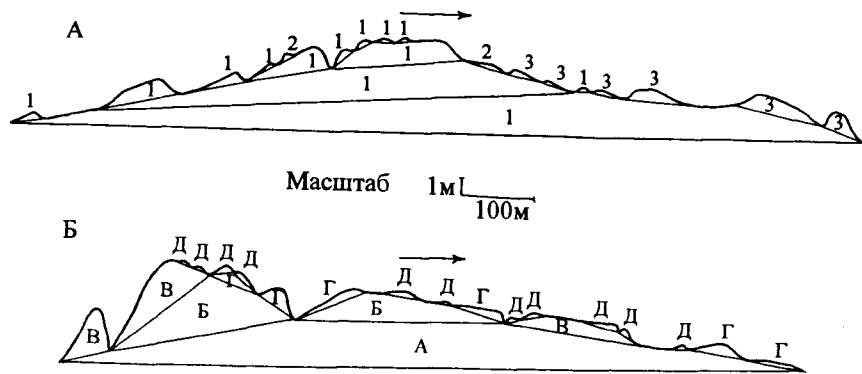


Рис. 7.3. Грядовый рельеф нижнего Витима (15–171 км от устья)
 А – гряды различной формы: 1 – прямого профиля; 2 – симметричные; 3 – ограничение профиля; Б – иерархия гряд; А, Б... – порядки гряд

На участке от г.Бодайбо до впадения р.Мамы (300–171 км от устья) в русле Витима преобладают наносы крупногалечной и мелковалунной фракций, грядовый рельеф развит слабо. В основном встречаются случайные одиночные гряды длиной до 100 м. Поля сплошного распространения грядовых форм редки и тяготеют ко второстепенным протокам, где происходит локальное уменьшение крупности руслообразующих наносов. Преобладают гряды с неразвитым профилем, а также начальные, неразвитые формы в виде низкоамплитудных волн поверхности аллювиального дна. Все это свидетельствует о высокой степени дефицита руслообразующих наносов того диапазона крупности, который является оптимальным для формирования гряд в данных гидродинамических условиях. Направленное уменьшение средних скоростей потока и степени скальности русла вниз по течению Витима свидетельствует об увеличении количества аллювия в русле, которое происходит в основном за счет достаточно подвижных фракций мелкой и средней гальки. Результатом этого является постепенное обогащение и усложнение структуры грядового рельефа, формирование ниже устья р.Мамы иерархии аллювиальных гряд.

По форме продольного профиля выделяется три разновидности гряд (рис. 7.3А): 1) гряды нормального “прямого” профиля с пологим верховым и крутым низовым скатами; 2) пологие волны поверх-

ности дна и более крутые формы с симметричным профилем; 3) гряды “обратного” профиля с крутым верховым и пологим низовым скатами. Преобладают гряды первого типа (58,0% из числа 664 измеренных форм); гряды второго и третьего типов составляют соответственно 30,6% и 11,4%. Анализ взаиморасположения гряд разной формы показывает, что гряды с обратным профилем встречаются преимущественно в подвальях и на низовых скатах более крупных гряд (рис. 7.3а), что может говорить о связи их образования с вихревыми структурами обратно-циркуляционного характера. С другой стороны, гребни крупных гряд обычно перекошены, и возникающие в их подвальях вальцовые течения направлены под углом к общему направлению движения потока. Поэтому фиксируемая форма гряд в продольном разрезе отчасти является следствием их ориентировки по отношению к линии профиля, т.е. является искаженной. Это замечание можно отнести и к симметричным грядам, но они широко встречаются и на участках плоского дна, являясь, по-видимому, промежуточными формами роста и разрушения гряд нормальной асимметричной формы. Наиболее крутые симметричные гряды могут являться формами полного профиля, образовавшимися во время экстремальных паводков. Действительно, в песчаных руслах зафиксировано изменение формы гряд в разные фазы гидрологического режима: в высокую воду гряды всех структурных уровней симметричны, с выпуклым верховым и низовым откосами, что является признаком их активного движения; со спадом уровней они постепенно становятся асимметричными, треугольными (Сидорчук, 1988). В галечно-валунном русле на спаде уровней транспорт руслообразующих наносов резко затормаживается, и донные формы оказываются “законсервированными” в том виде, в котором они существовали в период массового движения аллювия.

Длины измеренных в русле Витима гряд l_r составляют от 2,0 до 1750 м, высоты h_r – от 0,08 до 5,3 м. Кривые распределения длин и высот гряд имеют плавную, без существенных изменений знаков кривизны форму, не позволяющую провести выделение структурных уровней, в то время как на конкретных профилях русла выделяется до 5 порядков гряд, которым в порядке убывания размеров присвоены (по Н.И.Алексеевскому) условные индексы А, Б, В, Г и Д (рис. 7.3Б). Это подтверждает представление о существовании скорее континуума размеров донных форм, чем дискретных интервалов пара-

метров, соответствующих разным структурным уровням (Levey et al., 1980; Сидорчук, 1992). Случаи наличия полной иерархической структуры единичны. Наиболее часто встречается двух- и трехпорядковая иерархия, представленная грядами В, Г и Д, а также единичные гряды разных порядков. Большинство гряд относится, очевидно, к классу дюн, за исключением наиболее крупных гряд порядка А, представляющих собой подводные части побочной и осередков. Связь параметров гряд с глубиной потока при руслоформирующих расходах воды отсутствует: очевидно, более сильное влияние на размеры галечных дюн оказывает дефицит подвижных фракций руслообразующих наносов и локальные вариации их крупности. Средняя крупность аллювия отмостки на рассматриваемом участке Витима составляет 40–60 мм. Крупность наносов ограничивает минимально возможные размеры гряд: по разным авторам, соотношение l_{min}/d_{50} составляет 300–1500 (Ashida, 1973), 27–630 (Richards, 1980), 400–1000 (Сидорчук, 1988). Наиболее мелкие гряды в русле Витима имеют длину 2–10 м, т.е. $l_{min}/d_{50} = 40–200$, что укладывается в пределы Ричардса. В определенных гидродинамических условиях возникают своеобразные формы и более мелких размеров. Нами наблюдалось формирование галечных антидюн при поперечном переливе вод через приверх одного из осередков на Венчальном перекате на подъеме паводка в сентябре 1989 г. При высоких градиентах дна и средней глубине потока 15–20 см на свободной поверхности фиксировались стоячие волны, совпадавшие по фазе с волнами поверхности дна. Гряды имели симметричный профиль с вогнутыми скатами и острым гребнем, среднюю длину 120 см (около $30 d_{50}$), среднюю высоту 10,7 см ($3–4 d_{50}$). Близкие примеры известны и из литературы. Так, в канале слива пойменных вод на одном из участков р.С.Саскачеван (Канада) описана серия антидюн длиной 2–3 м и высотой 20–30 см при $d_{50} = 20$ мм (Shaw, Kellerhals, 1977). Эти же авторы наблюдали формирование галечных антидюн в лабораторных лотках.

Формирование гряд ранга баров (побочни, осередки) определяет чередование перекатов и плесовых ложин, проявляющихся в виде крупных волн в продольном профиле по линии наибольших глубин русла. Во врезанном русле в условиях дефицита наносов гряды перекатов могут иметь лишь частично аккумулятивное строение, представляя собой выступы скального ложа, прикрытые слоем аллювия небольшой мощности. Такие перекаты встречаются также и в песча-

ных широкопойменных руслах, например, на средней Оби (Беркович, Чалов, 1968). Неровности коренного ложа в большой степени predeterminedены геологическими причинами, однако ведущая роль в формировании руслового рельефа принадлежит водному потоку, и по своему облику и положению в русле подобные структурно-аккумулятивные перекаты близки к аллювиальным. Во врезанном галечно-валунном русле нижней Яны на 150-километровом отрезке пересечения Куларского хребта (средняя крупность аллювия отмостки 20–50 мм) перекаты, на гребнях которых в ряде случаев выходят коренные флишевые породы, располагаются в местах снижения транспортирующей способности потока половодья. В разветвленном русле они приурочены к приверхам и ухвостьям островов, местам отвлечения части расхода воды во второстепенные протоки и рукава, в относительно прямолинейном русле – к перевалам динамической оси потока от одного берега к другому, где перестраивается система циркуляции, к зонам подпора потока половодья перед сужениями и резкими изгибами русла. В неразветвленном русле перекаты располагаются, кроме того, на перегибах между смежными излучинами и макроизлучинами. Преобладают простые (с одним гребнем) перекаты, причем у большинства из них гребни и подвалы сглажены. Ряд перекатов образован крупными пологими грядами, пересекающими русло под углом 15–20° к его оси. Линия наибольших глубин переваливает на них от одного берега к другому. Гряды имеют асимметричный – с выраженным подвалом (перекаты Куйгинский, Северный и др.), либо практически симметричный (Удачный, Осенний) профиль. Особенности морфологии перекатов этого типа тесно связаны с общим характером изменения русла. Наиболее простое строение, без выраженных надводных частей, они имеют на участках узкого врезанного русла ниже оси Куларского поднятия, где отчетливо проявляется дефицит руслообразующих наносов (перекаты 266 км, 255 км; рис. 7.4 А). Уменьшение дефицита наносов в связи с изменением параметров русла выше оси поднятия и перед выходом реки на Приморскую равнину способствует усложнению строения перекатов – появлению надводных частей единой гряды, как правило, представленных массивными косами, наличию значительных нерабочих емкостей русла – выбоин верхней плесовой ложины, обширных и глубоких затонских частей (рис. 7.4 Б).

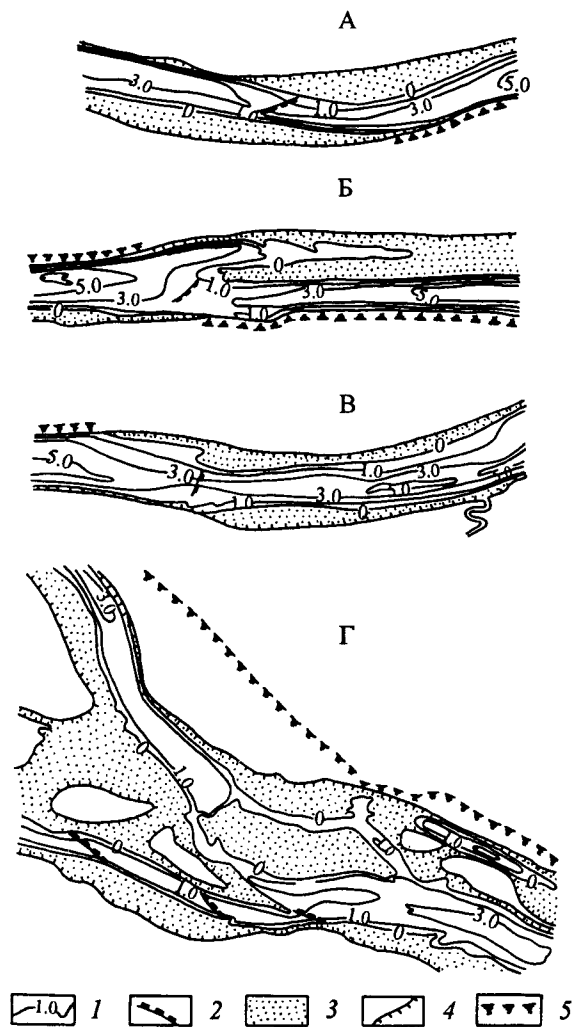


Рис. 7.4. Морфологические типы перекатов нижней Яны:

А – диагональная гряда с неразвитыми надводными формами (перекат 255 км); Б – диагональная гряда с развитыми надводными формами (перекат Северный); В – поперечная гряда (перекат 247 км); Г – перекат с несколькими гребнями и развитыми надводными формами (перекат Нижняя Подкова). 1 – изобаты; 2 – гребни перекатов; 3 – прирусловые отмели; 4 – уступы поймы и низинах надпойменных террас; 5 – скальные обрывы

Иной морфологический ряд представляют перекаты, формирующиеся в результате стеснения линии наибольших глубин побочными, косами или осередками, которые с известной долей приближения можно рассматривать как единую гряду, пересекающую русло перпендикулярно его оси. Перекаты с простейшей морфологией встречаются на Куларском участке Яны ниже оси поднятия. Здесь отчетливо выраженная линия наибольших глубин стеснена массивными низкими побочными (247 км), прижата к берегу подводными отмеля-

ми (Верх. Черчинский) или островами (Скрытый) (рис. 7.4 В). Усложнение морфологии перекатов также связано с увеличением ширины и уменьшением уклонов русла выше оси поднятия и проявляется в разрастании надводных частей, увеличении (до двух-трех) количества гребней (рис. 7.4 Г). Конфигурация ряда перекатов дополнительно усложняется при наличии мысов и выбоин ведущего берега, а также при близком залегании коренных пород в русле. Так, верхняя часть переката Пороги расположена в вершине крутой излучины, где в нарушение нормального для процесса меандрирования руслового рельефа линия наибольших глубин прижата к выпуклому берегу выходами скал.

Влияние структурно-геологических условий на формирование перекатов проявляется самым различным образом. Тесная связь расположения перекатов с разломами кристаллического фундамента характерна для верхнего Алдана (Русловой режим..., 1994), где выступы жильных пород, армирующих зоны дробления, образуют ступени продольного профиля и отдельные перекаты. На реках бассейна Подкаменной Тунгуски формирование перекатов отмечается в местах тектонических подвижек по активным поперечным разломам, влияющим на развитие руслового рельефа и косвенным образом: малые эрозионные формы, освоившие зоны повышенной трещиноватости, поставляют в реки грубообломочный материал, скопления которого образуют гряды перекатов (Бородин, 1978). Близкий характер имеет структурный контроль перекатов на р. Колорадо в пределах Большого Каньона (Dolan et al., 1978). Малые притоки, заложенные по поперечным зонам дробления, выносят в русло Колорадо большое количество крупного аллювия, который формирует перекаты непосредственно ниже по течению.

Несмотря на существенное значение локальных геолого-геоморфологических факторов, на большинстве рек как в свободных, так и в ограниченных условиях развития русловых деформаций наблюдается в целом достаточно регулярное чередование плесовых ложин и перекатов с достаточно устойчивым шагом, связанным с шириной русла (Harvey, 1975). Е. Келлер и В. Мельхорн (Keller, Melhorn, 1978) на большом региональном материале (данные по 251 перекату на 11 реках запада США) показали, что 70% изменчивости расстояния между гребнями перекатов объясняется изменчивостью ширины русла, причем данные по скальным и аллювиальным руслам

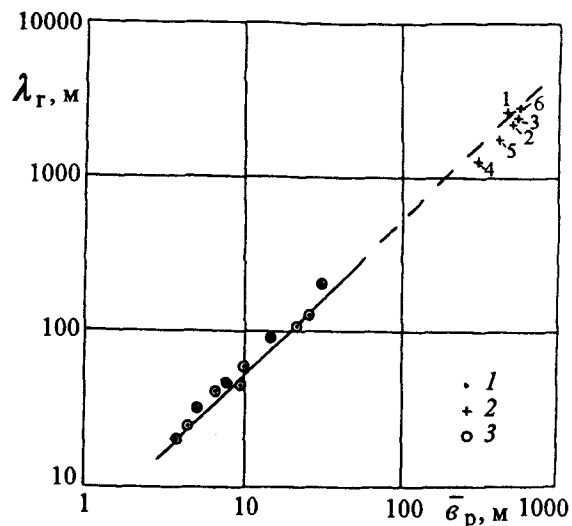


Рис. 7.5. Связь расстояния между гребнями перекатов λ_t с шириной русла в бровках поймы B_p :

1 - широкойпойменные русла; 2 - русла, врезанные в скальные породы; 3 - данные Keller, Melhort (1978). Цифрами на графике подписаны: 1 - р. Витим, 300-171 км; 2 - р. Витим, 171-96 км; 3 - р. Витим, 96-15 км; 4 - р. Алдан, 1613-1547 км; 5 - р. Алдан, 1547-1400 км; 6 - р. Алдан, 1400-1325 км

не различаются с достоверностью 95%, согласно критерию Колмогорова-Смирнова. Расстояние между гребнями перекатов λ_t линейно связано со средней шириной русла в бровках поймы B_p : $\lambda_t = 5,42 B_p^{1,01}$. Эта связь хорошо описывает также длину баров (Ashida, 1973), что закономерно ввиду непосредственной генетической связи гребней перекатов с макроформами грядового рельефа русла. Универсальность этой зависимости подтверждается данными по шести участкам русел нижнего Витима и верхнего Алдана, которые ложатся достаточно близко к экстраполированной линии Келлера-Мельхорна (рис. 7.5).

7.3. Транспорт руслообразующих наносов и русловые деформации

Равнинные реки с галечно-валунным составом аллювия характеризуются относительно малыми уклонами и скоростями течения, которые на протяжении большей части сезонного гидрологического цикла не превышают скоростей начала движения наносов, выстилающих дно. При воздействии потока на дно галечно-валунного русла, помимо крупности аллювия, значительный вклад в сопротивляемость размыву вносят такие факторы, как взаимодействие отдельных

частиц друг с другом (в частности, их заклинивание, увеличивающее общую устойчивость дна), армирование дна слоем частиц повышенной крупности (аллювиальная отмостка). В то же время, для наносов, залегающих под отмосткой, характерна резко выраженная неоднородность (от валунов до песка). Нередко длительное состояние покоя приводит к дополнительному возрастанию прочности грунта за счет уплотнения и коагуляции илисто-глинистыми частицами. Имеет значение уплотняющая роль ледохода, особенно для прибрежных отмелей и осередков, обсыхающих в межень: льдины, подобно дорожным каткам, утрамбовывают их поверхность, создавая "булыжные мостовые" (Лодина, Чалов, 1994). Тем не менее, движение аллювия фиксируется по образованию грядовых форм и в целом облику руслового рельефа, качественно не отличающемуся от рельефа русел с активным транспортом донных (песчаных) наносов. Скорости течения, достаточные для перемещения галечно-валунного аллювия, достигаются на равнинных реках лишь при прохождении максимальных расходов воды, когда разрушается созданная ранее отмостка и в движение приводится захороненная полифракционная масса аллювия. На спаде волны паводка или половодья после остановки наиболее крупных частиц снова формируется отмостка, и дно остается неподвижным до следующего крупного паводка (Маккавеев, Чалов, 1986). При медленном спаде волны паводка после остановки наиболее крупных частиц происходит формирование хорошо выраженной отмостки. При резком падении скоростей течения, а также в силу местных гидродинамических условий сортированность аллювия отмостки может быть очень низкой.

В большинстве случаев в начале многоводного сезона расходы галечно-валунных наносов ниже, чем при тех же скоростях течения в последующие фазы гидрологического режима вследствие постепенного разрыхления грунта, вымывания коагулирующего тонкого материала и повышения транспортирующей способности взвешенного потока по отношению к крупнообломочному материалу (Маккавеев и др., 1970; Россинский, Дебольский, 1980; Reid et al., 1985). Нередко ввиду повышенной крупности руслообразующего аллювия средние скорости потока вообще не достигают размывающих величин, необходимых для начала массового движения донных наносов, и в течение ряда лет сдвиг отдельных валунов и разрушения отмостки не происходит. Насыщение потока мелкоземом увеличива-

ет его транспортирующую способность как за счет кинетической энергии взвешенных частиц, так и за счет увеличения плотности и, следовательно, взвешивающей способности потока (Россинский, Дебольский, 1980). В ходе лабораторных экспериментов (Jackson, Boschta, 1984) выяснилось, что при добавлении в поток песчаных фракций наносов ранее стабильные галечные гряды начинают размываться. Из этого следует, что механизм срыва отмостки на подъеме паводка первоначально включает, по-видимому, ее локальное нарушение в наиболее слабых местах, которое может приводить к цепной реакции ее массового разрушения ниже по течению ввиду поступления в поток мелкообломочных частиц из аллювиальной толщи, залегающей под отмосткой.

Взаимное зацепление и заклинивание частиц галечно-валунного аллювия существенно увеличивает сопротивляемость грунта размыву. Лабораторным путем установлено, что неразмывающие скорости течения выше при группировке частиц в пятна-скопления, чем в случае движения по гладкому дну (Котков, 1989). В условиях характерного для галечно-валунных русел равнинных рек селективного движения частиц наносов формируются галечные кластеры (Dal Cin, 1968) – вытянутые в форме струи накопления относительно мелкого донного материала перед напорной гранью и в зоне скоростной тени позади более крупных, малоподвижных обломков. В руслах ряда водотоков Великобритании и Италии в среднем лишь менее 30% частиц аллювия располагаются на дне вне зависимости друг от друга, остальные образуют кластерные микроформы (Brauchaw, 1985). Кластеры вытянуты в целом параллельно течению, однако чем выше препятствие (ядро аккумуляции), тем больше дисперсия отклонений от направления течения, что связано с локальными деформациями поля придонных скоростей (Teisseyre, 1977). По данным натурных экспериментов (Brauchaw, 1985), критические скорости начала движения частиц (при $d = 28$ мм) из кластерных микроформ обычно превышают таковые для отдельно лежащих обломков на 2–10 см/с. Таким образом, кластеры играют определенную стабилизирующую роль при образовании отмостки, хотя детальные наблюдения (Billi, 1988) обнаруживают как аккумуляцию, так и вынос отдельных частиц при паводках, а также смещение самих кластерных микроформ за счет аблювиального эффекта.

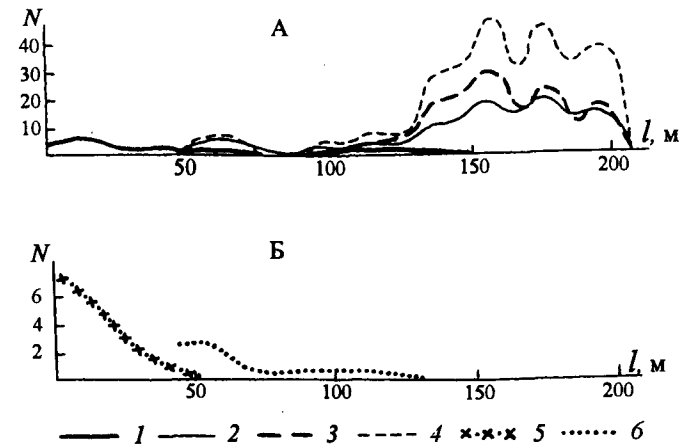


Рис. 7.6. Кривые разноса галечно-валунного материала на побочных р. Алдана за период 1986–1987 гг. (N – количество частиц в 10-метровом интервале, l – удаление от источника выноса). А – перекат Курум; Б – перекат Васькина протока

А: 1 – 10–20 см; 2 – 5–10 см; 3 – 2–5 см; 4 – менее 10 см. Б: 5 – 10–20 см; 6 – < 10 см

Механизм транспорта галечно-валунных наносов изучался на ряде перекатов верхнего Алдана (перекаты Курум, Васькина Протока, Соболевский, Силигрикин, Солёный) методом маркирования аллювиальной отмостки на надводных в межень побочных и осередках. В годовом цикле (сентябрь 1986 – сентябрь 1987 г.) было обнаружено повсеместное активное перемещение средней и крупной гальки на расстояние до 150–200 м (рис. 7.6). Идентичность кривых разноса средней и крупной гальки на большинстве перекатов свидетельствует об одновременном вовлечении в движение всего материала галечной размерности. Очевидно, это происходит при скоростях течения, превышающих неразмывающие для крупной гальки, в противном случае прослеживалась бы зависимость дальности смещения от крупности частиц.

Донные неразмывающие скорости для несвязных грунтов с диаметром частиц 100 мм, рассчитанные по формуле Ц.Е.Мирцхулавы (1988), составляют для требуемого диапазона глубин (5–10 м) 1,7 м/с и достигаются при средней скорости 3,6–4,0 м/с. Максимальные

средние скорости течения на данном участке Алдана не превышают 3,0 м/с и в конкретном сезоне достигали 2,9 м/с. Повсеместный вынос средней и крупной гальки можно объяснить явлениями локального приращения скоростей течения при короткопериодных флуктуациях скорости на подъеме и пике паводков, достигающих 30–40% от средней скорости. Частицы валунной фракции перенесены на гораздо меньшие расстояния – до 30 м, и лишь в отдельных случаях – до 200 м, причем на разных участках русла доля пришедшего в движение валунного материала колебалась в широком диапазоне (от 4 до 99%). Лишь на одной учетной полосе (правобережный побочень переката Васькина Протока) практически весь валунный материал был смещен, хотя и на небольшое расстояние (в среднем до 20 м). Дальность переноса и конфигурация вееров разноса на остальных перекатах позволяет говорить об отсутствии массового смещения и лишь о стохастическом передвижении отдельных валунов под действием импульсных турбулентных вариаций придонной скорости.

На восточноевропейских реках неразмывающие скорости для гальки и валунов существенно выше средних скоростей потока при руслоформирующих расходах и на пике половодья. На Немане, например, при пересечении Гродненской моренной возвышенности они не превышают 1,2 м/с, тогда как сдвиг гальки размером 2 см может происходить при скорости 1,34 м/с, 10 см – 2,33 м/с, мелких и средних валунов, соответственно, 2,88 и 3,70 м/с. В то же время скорости потока при руслоформирующих расходах и на пике половодья Немана в 1,5–2 раза превышают критические скорости для местных песчано-гравийных наносов и для песчаных, поступающих сюда с вышележащего участка реки (Верхненеманская низменность), где они являются руслообразующими. Поэтому здесь галечно-валунные наносы не перемещаются, представляя собой остаточные отложения (или перлювий – термин В.В.Ламакина), сохраняющиеся на дне реки после вымывания из коренного грунта песчано-гравийных фракций и формирующие отмостку (Дарбутас и др., 1993).

Интенсивность транспорта аллювия неодинакова в разных частях русла. Натурные эксперименты П.Батлера (Butler, 1977) показали, что за один паводок максимальное расстояние переноса галек вдоль подмываемого берегового откоса немного ниже, чем в средней части русла, и более чем в два раза выше по сравнению с поверхностью побочня у противоположного берега. Автор объясняет это локаль-

ными особенностями скоростного поля и турбулентной структуры потока (над гладкой поверхностью побочня течение более спокойное). Расчеты подвижности галечно-валунных наносов, выполненные для ряда перекатов нижней Яны, показывают, что на относительно прямолинейных участках неразветвленных русел, где динамическая ось потока существенно не изменяет своего положения со сменой фаз гидрологического режима, наиболее интенсивное перемещение галечно-валунных наносов происходит по линии наибольших глубин, где скорости течения наиболее высоки. Основой расчетов послужила грунтовая съемка русла, выполненная точечным способом по створам, отстоящим на 150–200 м (20–40 точек на каждом перекате). Поле скоростей потока рассчитывалось методом плоских сечений М.А.Великанова (1958). В качестве безразмерного показателя подвижности наносов принято отношение осредненной по вертикали бытовой скорости течения к неразмывающей скорости для данного (средневзвешенного) диаметра частиц аллювия (по формуле Г.И.Шамова, 1954). Осредненные значения для четырех перекатов представлены в табл. 7.2. В большинстве случаев по линии наибольших глубин скорости течения близки к неразмывающим и иногда превышают их уже при отметках 1–2 м над проектным (меженным) уровнем, а на поверхности прибрежных побочней и кос составляют не более 0,7–0,9 размывающих во все фазы водного режима (рис. 7.7). Таким образом, массовое перемещение наносов происходит лишь вдоль линии наибольших глубин, а на надводных в межень частях перекатов при их затоплении наносы могут испытывать лишь спорадические подвижки под действием положительных пульсаций скоростей течения. На перекатах с небольшой шириной русла, отсутствием надводных форм и V-образным профилем (255 км) или ясно выраженной ложбиной (247 км) во все фазы водного режима вдоль линии наибольших глубин поддерживаются высокие скорости течения, что препятствует формированию аллювиальной отмостки и благоприятствует постоянному движению наносов в узкой полосе вдоль динамической оси потока.

Дискретность перемещения галечно-валунных наносов, чередование кратковременных периодов их транспортировки с длительными периодами покоя, резкость перехода от состояния движения к остановке определяет также особенности и морфологии русла, и дифференциации самих наносов по крупности, и специфику русловых пере-

Уровень, м от ПУ

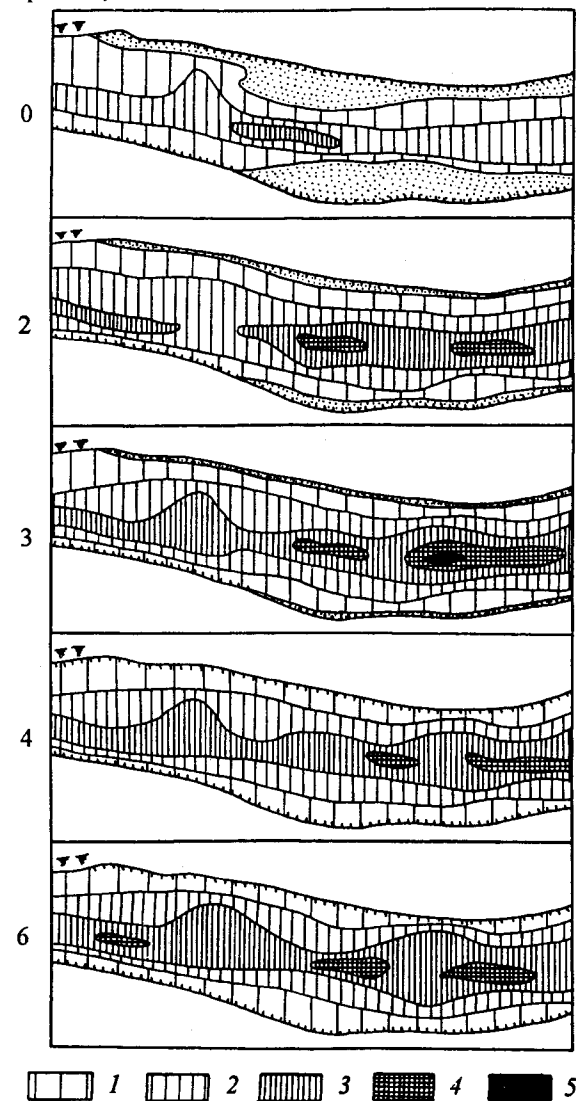


Рис. 7.7. Характеристика подвижности донных наносов при различных уровнях воды (р. Яна, пережат 247 км) V_{ϕ}/V_n (V_{ϕ} – фактическая скорость, V_n – неразмывающая скорость): 1 – 0–0,7; 2 – 0,7–0,9; 3 – 0,9–1,1; 4 – 1–1,3; 5 – 1,3–1,5

формирований. Как правило, наиболее крупные наносы движутся во врезанном русле и в сужениях долины, где велик удельный расход воды и, следовательно, поток обладает наибольшей влекущей силой.

Таблица 7.2. Осредненные значения безразмерного показателя подвижности донных наносов на перекатах Куларского участка р. Яны

Уровень воды над проектным, м	Пережат			
	Пороги	255 км	247 км	Куларский
0	0,88	0,94	0,73	–
1	0,89	1,00	0,75	–
2	0,92	1,11	0,78	0,73
3	0,92	1,13	0,81	0,76
4	0,88	1,12	0,82	0,80
5	0,83	1,08	0,81	0,79
6	0,82	–	0,83	0,79

На неразветвленных участках врезанного русла при подъеме уровней воды и пропорциональном росте скоростей течения осуществляется транзит материала. В этих условиях даже незначительное расширение русла вызывает уменьшение скорости потока и соответствующее снижение интенсивности перемещения галечно-валунного материала, его частичную остановку и образование аккумулятивных осередков и островов. В сравнительно широкой долине с развитой поймой наибольшая концентрация стока также наблюдается в сужениях долины. Относительный рост удельного руслоформирующего расхода в сужениях обуславливает увеличение крупности и транспорта руслообразующих наносов. Резкая остановка наносов после прохождения волны паводка сопровождается образованием осередков, вследствие чего в сужениях широкопойменной долины галечно-валунное русло характеризуется особенно сильной разветвленностью (Кирина, верхняя Ангара). При этом, поскольку движение самых крупных наносов происходит только в годы с наиболее высокими паводками, а более мелкий материал транспортируется ежегодно, перестроения таких разветвлений очень замедлены, их рельеф длительное время остается неизменным, а сами русла, несмотря на многорукавность, отличаются высокой устойчивостью.

В расширениях широкопойменной долины транспорт руслообразующего материала существенно меньше, чем в сужениях. Поэтому русло здесь обычно неразветвленное (или его разветвленность значительно меньше), и лишь там, где оно переваливает от одного борта

долины к другому, поперек поймы возникают пойменно-русловые разветвления.

В разветвленном на рукава галечно-валунном русле наиболее интенсивное движение наносов осуществляется в развивающихся рукавах. В результате они отличаются вторичной разветвленностью осередками и небольшими по размеру островами, в то время как отмирающие обычно меандрируют. Такое различие в морфодинамике (разветвление или меандрирование) развивающихся и отмирающих рукавов объясняется (подобно различиям руслоформирования в сужениях и расширениях) разницей в объеме транспортируемого потока при руслоформирующих расходах материала и резкой его остановкой на спаде паводка.

Малые величины стока галечно-валунных влекомых наносов обуславливают чрезвычайную стабильность побочней, осередков и гряд меньших размеров (прибрежных кос), движение которых зачастую не фиксируется инструментальными методами и не выявляется при сравнении планов русла за 30–40-летний период из-за разрешающей способности планов, выполненных обычно в масштабе 1:10000. Так, в русле верхнего Алдана, нижнего Витима; здесь о смещении гряд может свидетельствовать отсутствие заполнителя в полосе не более 1–2 м от их гребней, рыхлость материала и его подвижность на низовом склоне (подвалье). Относительно более динамичны русла Яны на всем протяжении Куларского участка, верхней и средней Лены, среднего Алдана. Здесь руслообразующие наносы, имеющие преимущественно среднегалечный состав, более подвижны (это фиксируется по регулярному занесению дноуглубительных прорезей), и темпы смещения русловых мезоформ достигают первых метров в год. На некоторых перекатах нижней Яны, образованных пересекающимися руслом под острым углом грядами (Куйгинский, Ниж. Ледяной), отмечаются циклические переформирования следующего характера: от верхнего побочня отчленяется подводный осередок, смещающийся по гребню переката в сторону нижнего побочня. Цикл длится несколько лет, в течение которых условия судоходства на перекате наименее благоприятны. Однако перекаты в целом и их крупные морфологические элементы за 20-летний период наблюдений не изменили своего расположения. Стабильность положения перекатов и крупных грядовых образований является общей чертой врезанных галечно-валунных русел. Помимо относительно небольшой подвиж-

ности аллювия, это связано с геологическим контролем руслового рельефа: перекаты, побочни и осередки в своей основе часто содержат выступы коренных пород, формируются в литологически обусловленных местных расширениях русла либо связаны с очень консервативной в ограниченных условиях развития русловых деформаций плановой конфигурацией русла (в случае нижней Яны – на перегибах между соседними врезанными макроизлучинами, в зонах местного подпора от коренных берегов на изгибах русла).

Большой динамичностью отличаются широкопойменные сложно-разветвленные галечно-валунные русла, о чем свидетельствует уже само наличие многочисленных аллювиальных форм и что подтверждается натурными измерениями скоростей их перемещения. Так, на Кириге при числе Лохтина и коэффициенте Маккавеева в несколько десятков единиц смещение побочней и осередков в расширениях русла происходит со скоростями до 20–30 м/год, что вплотную приближается к темпам переформирования песчаных русел.

При песчаном составе руслообразующих наносов перекаты испытывают сезонные деформации (наращивание гребней в паводки и половодье и их размыв в межень), достигающие десятков сантиметров и даже метров. Подобные процессы происходят и в галечно-валунных руслах, но нерегулярно и в гораздо меньших масштабах. Так, измерения Е.Келлера (Keller, 1971) на р. Драй Крик (Калифорния, США) показали, что при определенном расходе воды средняя придонная скорость в плесах становится больше, чем на перекатах, что приводит к перемещению даже наиболее крупных наносов из плесовых ложин на гребни перекатов; в межень наблюдается обратная картина. Сопоставление крупномасштабных планов русла Куларского участка р.Яны за 5–20 лет показало, что изменение отметок дна на гребнях перекатов было связано преимущественно с проведением дноуглубительных работ и последующим занесением прорезей, протекавшим с различной интенсивностью в годы с разной водностью (Матвеев, Панин, 1989; Власов и др., 1991). Факт необходимости регулярного дноуглубления на перекатах Енисея ниже Красноярска, верхней Лены (Водные пути ..., 1995), русло которой по существу превращено в канал стока воды и наносов, Алдана для обеспечения требуемых условиями судоходства глубин, говорит о достаточно активном перемещении галечно-валунных наносов. На ряде перекатов нижней Яны отмечены естественные деформации циклического характера с

периодичностью в несколько лет, причем периоды обмеления приходятся, как правило, на многоводные годы. Однако величина естественных деформаций невелика, зачастую одного порядка с точностью определения глубины при промерных работах (10 см).

Очевидно, что для сопоставления галечно-валунных русел необходима особая шкала устойчивости. Она может быть построена с учетом формы поперечного сечения русла на основании эмпирической закономерности: с увеличением расплывчатости (относительной ширины) русла, т.е. с удалением от гидравлически наиболее выгодной параболической формы, растет подвижность русловых образований и падает его устойчивость. Форма живого сечения в явном виде входит в морфометрический показатель С.Г.Шатаевой $A = \lg \Delta h / \lg \Delta b$, характеризующий приращение глубины потока при изменении ширины. Для верхнего Алдана с высокой степенью корреляции были получены связи показателей устойчивости Н.И.Маккавеева K_c , В.М.Лотина L и A для разных морфодинамических типов русла. Построенная на основе этих связей и натурных наблюдений за динамикой русла шкала устойчивости (табл. 7.3) может в первом приближении применяться и для других рек с галечно-валунным составом аллювия. При этом характеристики устойчивости в известной мере условны, так как в общей системе русел галечно-валунные являются абсолютно устойчивыми.

Таблица 7.3. Классификация галечно-валунных русел по степени их условной устойчивости

Характеристика условной устойчивости	Показатели устойчивости			
	A	K _c		
		Излучины	Прямолинейные участки	Разветвления
Неустойчивые	< 1,4	< 610	-	< 310
Слабоустойчивые	1,4–1,7	610–780	< 110	310–330
Относительно устойчивые	1,7–2,0	780–950	110–230	330–350
Устойчивые	> 2,0	> 950	> 230	> 350

Поскольку морфодинамический тип русла определяет его ширину, в том числе в пределах галечно-валунных перекатов, значения коэффициента устойчивости Н.И.Маккавеева $K_c = d / I b_p$, включающие

этот параметр, дифференцируются при одной и той же характеристике устойчивости для излучин, разветвлений и прямолинейного русла, уменьшаясь в этой последовательности.

7.4. Особенности динамики потока

Высокая устойчивость галечно-валунных русел и особенности транспорта руслообразующего аллювия вносят определенную специфику в гидравлические характеристики потока. В руслах с мелкозернистыми грунтами большой вклад в гидравлическое сопротивление вносит грядовая шероховатость, а так как параметры донных гряд изменяются вслед за глубинами и скоростями течения, поток сам регулирует шероховатость дна в разные фазы водного режима. Как показал К.В.Гришанин (1990), благодаря этому ослабляется связь гидравлического уклона со скоростью, и уменьшение скорости течения, сопровождающее увеличение глубин на перекатах после дноуглубления или размыва их гребней в межень в достаточно широких пределах не вызывает уменьшения уклонов, т.е. понижения свободной поверхности потока.

В галечно-валунных руслах донный грядовой рельеф чрезвычайно беден и слабо трансформируется (или не трансформируется) в сезонном цикле, отражая этап массовой остановки движущихся частиц наносов в начале спада половодья или крупных паводков. При сравнительно небольшом объеме донного материала зона активно перемещающихся наносов в период прохождения руслоформирующих расходов воды не захватывает всей ширины русла, располагаясь вдоль линии наибольших скоростей потока. Так как прекращение транспорта наносов происходит на спаде половодья резко, наиболее мелководные части гряд-перекатов, их гребни, характеризуются наибольшей крупностью аллювия, соответствующей положению стрежня потока во время половодья, тогда как седловины перекатов оказываются в периферийных зонах русла. В межень динамическая ось потока, огибая мелководную часть гряды, избирает часто направление, перпендикулярное оси русла. Гидравлические сопротивления в таком русле жестко определяются формой поперечного сечения потока и зернистой шероховатостью дна и слабо зависят от скорости течения. В таких условиях гидравлический уклон пропорционален

квадрату скорости течения, и даже незначительное уменьшение последней вызывает заметный спад кривой свободной поверхности потока.

Яркой иллюстрацией этого служит верхняя Лена, где к настоящему времени в результате начавшихся в 1950-х гг интенсивных дноуглубительных работ и фактической ликвидации большинства перекатов проектные уровни воды снизились по гидрол. посту Усть-Кут на 1,9 м. Начиная с 1972 г., после достижения гарантированной глубины и ширины судового хода соответственно 200 см и 65 м посадка уровней стала обгонять осуществляемое понижение проектного дна (Водные пути ..., 1995).

Кроме того, гребни перекатов после спада уровней размываются очень медленно либо, при образовании отмостки, не размываются вообще. Поэтому в межень перекаты выполняют роль подпорных плотин для вышележащих плесовых лощин, а их гребни создают гидравлическое подобие водослива с широким порогом, скорости течения на котором часто возрастают до величин, лимитирующих судоходство (Зайцев, 1989). Рост скоростей течения сопровождается дополнительным (относительно плесовых лощин) падением уровней и глубин на перекатах. Значительные изменения (вплоть до обратных) уклонов свободной поверхности потока в разные фазы водного режима иллюстрируются на примере Венчального узла разветвления нижнего Витима (рис. 7.8). Аналогичные явления возникают на скальных выступах коренного ложа реки.

7.5. Регулирование русла

Разработка дноуглубительных прорезей на гребнях перекатов может встретиться с неблагоприятными последствиями двоякого рода. Механическое удаление отмостки при скоростях течения, недостаточных для ее естественного разрушения, может стимулировать активный размыв и массовое перемещение ранее недоступной для потока аллювиальной толщи, состоящей в значительной мере из более мелких фракций наносов. Продукты размыва, перемещаясь по течению, попадают в зону подпора нижележащих перекатов и вызывают их обмеление. С другой стороны, увеличение глубин на корыте переката вызывает посадку уровней, величина которой может ликвидиро-

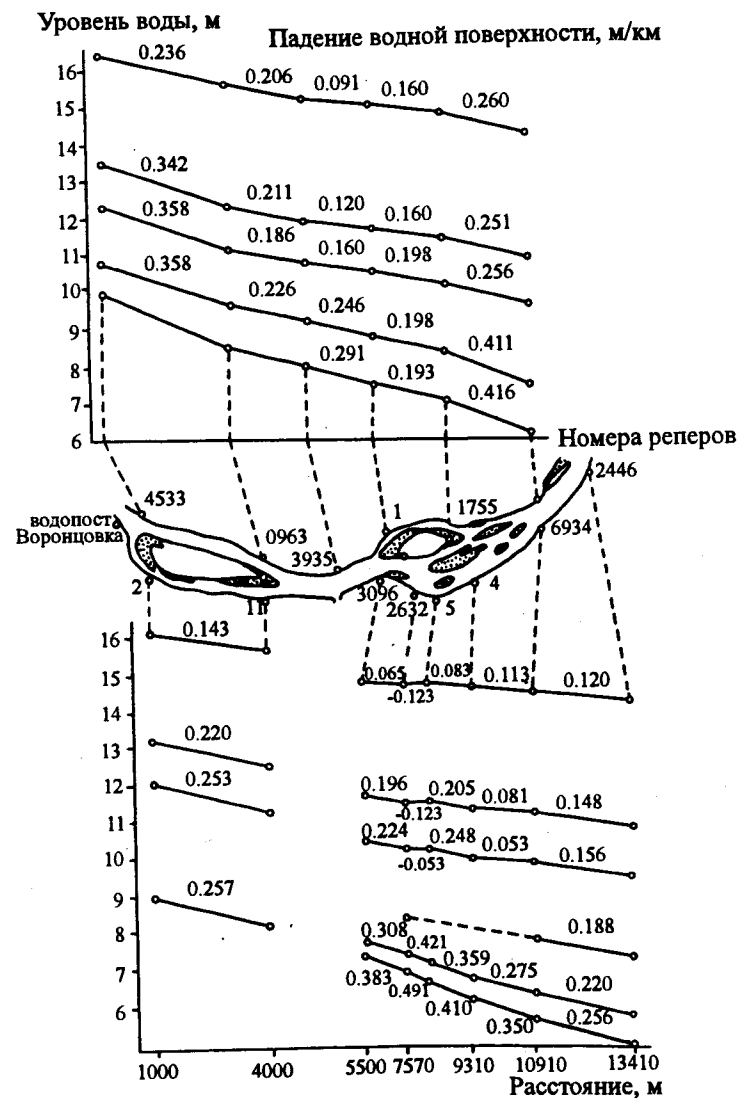


Рис. 7.8. Продольные профили водной поверхности при различных уровнях воды на Шляпинском – Венчальном перекатах Витима (по измерениям А.А.Зайцева, О.М.Кирика и А.В.Панина)

вать и даже превысить эффект дноуглубления. Так, на некоторых перекатах верхней Оки (русло реки здесь галечное) посадка уровней при дноуглублении достигала нескольких десятков сантиметров и была примерно равна толщине снимаемого слоя. Кривая спада при высоких уклонах быстро затухает вверх по течению, но на близко расположенных перекатах (первые километры) падение глубин может быть существенным. Подобные примеры характерны для верхней и средней Лены, Енисея, верхнего и среднего Амура. Среди прочих неблагоприятных последствий, также связанных с посадкой уровней воды при углублении галечно-валунных русел, – обмеление причалов портов, головных сооружений бесплотинных водозаборов и т.д.

Посадки уровней являются, пожалуй, одной из наиболее значительных проблем при регулировании галечно-валунных русел, именно по причине их относительной недеформируемости, в отличие от менее устойчивых песчаных русел, где наибольшие сложности создают собственно русловые деформации.

Дноуглубление при крупнообломочном составе грунтов требует применения мощных многочерпаковых земснарядов. Даже при наличии соответствующей техники не удается избежать частых поломок и повышенного износа грунтозаборных устройств. Дополнительный усложняющий фактор – выходы в руслах коренных, обычно скальных пород. В ряде случаев поток непосредственно контактирует с коренным ложем реки на столь значительной части русла, что оно фактически представляет собой своеобразный скальный лоток. Таково, например, русло нижнего Витима на участке г.Бодайбо – устье р.Мамы. Локальные выступы коренного ложа, предопределенные тектоническими и геологическими причинами и характерные для большинства галечно-валунных рек Восточной Сибири, сопровождаются местным увеличением уклона, высокими скоростями течения и, как следствие, повышенной транспортирующей способностью потока, обуславливающей возникновение местного дефицита наносов и образование скальных “перекатов” (в кавычки взято из-за условности применения этого понятия, принятого обычно на лосманских картах и в воднопутевой производственной практике для обозначения вообще затруднительных для судоходства участков с уменьшением глубины русла).

Дефицит донных наносов благоприятен с точки зрения заносимости дноуглубительных прорезей, однако вызывает и ряд проблем.

Выходы трудноразмываемых скальных пород определяют расположение порожистых участков, где происходит заметное увеличение уклонов и скоростей течения, что затрудняет или даже прерывает судоходство в межень. Часто начало порожистого участка на крупной реке является границей судоходства (например, на Вилюе, Олекме, Витиме, Нижней Тунгуске и др.). Одиночные выступы скальных пород иногда имеют облик шивер и скальных “перекатов”, особенно неблагоприятных для судоходства в маловодные годы, когда эффект “водослива с широким порогом” на них приводит к дополнительно понижению уровней и снижению глубины ниже прогнозируемой обычными методами (Зайцев, 1989).

Скальные выступы, деформируя поле скоростей потока, часто играют роль ядра зоны локальной аккумуляции галечно-валунного материала. Многие перекаты и острова, с поверхности сложенные аллювиальным материалом, обнаруживают на небольшой глубине ядро коренных пород (некоторые перекаты Енисея в нижнем бьефе Красноярского гидроузла, острова на Витиме, Лене, Ангаре). Такие скульптурно-аккумулятивные формы имеют стабильное положение, не смещаясь подобно аккумулятивным грядам по течению реки, но выходы скальных пород лимитируют здесь возможности дноуглубления (Зайцев, Савцова, 1994). В крайних случаях приходится применять дорогостоящие и экологически небезопасные технологии – взрывное разрыхление скальной породы с последующей скалоуборкой (например, Олекминский и Хатын-Тумульский перекатные участки на средней Лене).

Одной из наиболее специфических особенностей галечно-валунных и скальных русел, создающих аварийную обстановку на судовых ходах, является наличие в них камней-одинцов. Поставщиком их являются контактирующие с руслом реки цоколи высоких террас, коренные борта долины и скалы по берегам рек. Особенно часто скопления в русле наиболее крупных обломков (до нескольких метров в поперечнике) встречается на реках, склоны долин которых покрыты курумами. В частности это характерно для гор Восточной Сибири. Камни-одинцы широко распространены на таких крупных реках, как Витим, средняя Лена, верхний Алдан. Чаще всего появление в русле крупных обломков, превышающих по размерам фоновую крупность наносов, является следствием мощного ледохода. Плывущий лед толщиной 1,5–2 м обладает огромной транспортирующей

способностью по отношению к вмерзающим в него и попавшим на его поверхность во время ледостава обломкам. В местах заторов камни-единцы образуют россыпи почти по всей площади русла, они могут возникать в любой части русла, в том числе в пределах плесовых ложин, вследствие чего практически все галечно-валунное или скальное русло является опасным для движения судов после ледохода и особенно при наступлении межени. Дальнейшее перемещение камней-единцов может вновь происходить под влиянием ледохода; кроме того, возможно проявление аблювиального эффекта (Лодина, Чалов, 1994), воздействие гидростатического напора в период прохождения фронта волны паводка или возникновение области двухфазного течения при срыве отстойки и насыщении потока взвешенным материалом из залегающей под ней толщи. Не исключается и одновременное воздействие этих факторов. Однако механизм явления пока не познан, как и не поддается прогнозу возможное место возникновения камней-единцов. Это обуславливает малую эффективность мероприятий по очистке русел рек от камней-единцов, существенно ограничивающих габариты судового хода особенно при попадании их на корыта перекатов. В одних случаях очистка русла от камней-единцов дает положительный результат (например, на р.Киренге), в других – результаты работ по расчистке русла от камней-единцов малозаметны (верхний Алдан). В первом случае русло широкопойменное, в основном разветвленное на рукава, камни-единцы образуются редко и только в местах заторов, которые достаточно хорошо известны; во втором – русло врезанное, со сложными условиями ежегодного возникновения камней-единцов.

Опыт путевых работ на верхней Лене и других реках показывает, что дноуглубительные работы в галечно-валунных руслах обязательно должны сопровождаться строительством выправительных сооружений, направленным на компенсацию посадок уровней и уменьшение необходимых объемов дноуглубления (Водные пути ..., 1995). По существу, выправление русла должно стать главным принципом создания современных судовых ходов на галечно-валунных и скальных реках.

Извлекаемый из прорезей грунт необходимо складировать в нерабочих емкостях русла и использовать для возведения русловыправительных сооружений, концентрирующих поток по трассе фарватера. Наиболее эффективны сооружения меженного регулирования, воз-

водимые с целью стеснения потока при низких уровнях. Полузапруды и дамбы весеннего регулирования оказываются очень дорогостоящими, быстро разрушаясь в половодье и паводки, и в целом не только недостаточно эффективны, но могут приводить и к противоположному эффекту, так как в периоды прохождения руслоформирующих расходов сосредотачивают весь сток наносов в узкой полосе. Остановка движения наносов на спаде уровней, особенно при большом их стоке, может повлечь за собой обмеление судоходной трассы и приводит к необходимости увеличения объемов дноуглубительных работ. В наиболее тяжелых грунтовых условиях выправительные сооружения могут оказаться единственным экономически эффективным способом увеличения гарантированных габаритов судового хода.

Однако к возведению выправительных сооружений следует подходить с большими предосторожностями, учитывая устойчивость русла на конкретном участке. Избыточное стеснение потока может привести к увеличению скоростей течения до величин, лимитирующих судоходство, а также вызвать ускоренный размыв дна на корыте переката и неконтролируемую посадку проектного уровня. Примером могут служить деформации группы Ладейских перекатов Енисея у г.Красноярска. Они сформировались в рукаве, ширина которого составляла не более половины ширины меженного русла в Красноярском узле разветвления. Кроме того, русло этого рукава было дополнительно стеснено продольными дамбами, ограничившими растекание потока по прирусловым отмелям, так что ширина русла на перекатах составила всего 200–350 м при средней ширине русла Енисея около 600 м. Учитывая, что даже при проектном уровне расход воды превышает 2000 м³/с, можно видеть, что стеснение русла вызвало значительное увеличение скорости течения по сравнению с бытовой и потерю руслом устойчивости (средняя крупность донных наносов – около 40 мм, уклон – 0,30–0,35 м/км, коэффициенты L и K_c в бытовом состоянии соответственно равны 130 и 40). В результате произошла существенная эрозия дна на перекатном участке, понижение отметок дна составило за 1967–1991 гг. от 0,7 до 1,7 м, а понижение меженных горизонтов воды – более 20 см на верхней границе перекатного участка.

Большая крупность галечно-валунных наносов (крупные валуны имеют в диаметре около 1м) должна учитываться при определении гидравлически допустимых глубин судового хода, понижая расчет-

ную величину не менее, чем на 20–40 см из-за неизбежных выступов шероховатости (отдельных валунов).

При трассировании прорезей, в случае необходимости проводить дноуглубительные работы без одновременного возведения выправительных сооружений (например, если последние вызывают рост скоростей течения, затрудняющих судоходство), следует использовать по возможности периферийные зоны русла, где не происходит массового движения наносов в половодья и паводки, в том числе седловины перекатов с крутым изгибом динамической оси потока. При этом прорезь должна не только углубить судовой ход, но и обеспечить сглаживание его поворотов. Подобный подход следует использовать, главным образом, на перекатах, сформировавшихся в местных расширениях врезанного русла, где их гребни представлены осередками.

На одиночных перекатах при разработке прорезей можно пренебрегать посадкой уровней и объемом размытого грунта при разрушении отмостки, так как они не скажутся на выше- и нижележащих перекатах. Если же перекаты располагаются сериями, то при планировании дноуглубительных работ необходимо учитывать их неблагоприятные последствия – уменьшение глубины за счет посадки уровней на вышележащем перекате и обмеление из-за размыва прорези нижележащего.

В широкопойменном разветвленном русле важен оптимальный выбор судоходного рукава. Таковым при галечно-валунном составе наносов является рукав с относительно меньшей водностью, который обычно характеризуется большей глубиной, так как основной поток наносов устремляется в многоводный рукав.

Глава 8

Географические закономерности русловой морфодинамики (на примере Северной Евразии)

8.1. Русловые процессы и физико-географическая среда

Формы русла и руслового рельефа представляют собой результат взаимодействия потока с грунтами, слагающими ложе реки, эрозии, транспорта и аккумуляции наносов, т.е. производную русловых процессов. С другой стороны, русловые процессы обуславливают постоянные изменения созданных ими форм. При однородности типов русла реки отличаются по своему русловому режиму, т.е. совокупности характерных изменений русел, свойственных каждой географо-гидрологической зоне (или району) и определяемых многолетними и внутригодовыми особенностями стока воды и наносов в зависимости от природных условий территорий, по которым они протекают.

Отражая воздействие речного стока на земную поверхность, русловые процессы имеют двойственную природу. С одной стороны, они развиваются по законам гидромеханики, причем потоки, их определяющие, являются взвесенесущими или перемещающими у дна наносы, которые по своему генезису суть производные взаимодействия потока с грунтами ложа реки, составляя неотъемлемую часть самого взаимодействия. Гидромеханическая природа русловых процессов обуславливает образование вполне определенных форм русла и руслового рельефа, характеризующихся устойчивостью при стационарном режиме русловых процессов (закон ограниченности морфологических комплексов М.А.Великанова – Н.И.Маккавеева). С другой стороны, русловые процессы – одно из многочисленных природных явлений, возникающих и развивающихся в конкретной есте-

ственно-исторической обстановке. Формы проявления русловых процессов, их пространственные и временные (сезонные, многолетние и вековые) изменения зависят от водоносности рек и их водного режима, объема и режима стока наносов, а через них – от климата, рельефа, геологического строения и почвенно-растительного покрова.

Все природные факторы русловых процессов можно объединить в три группы. К активным относятся сток рек, его величина, изменчивость и фазовое состояние, определяющее сам процесс руслоформирования. Пассивные факторы – внешние по отношению к потоку – определяют условия его движения и воздействия на русло, состояние, насыщенность наносами и т.д. В этом отношении само русло и русловой рельеф выступают как факторы русловых процессов, поскольку при взаимодействии с ними в потоке создается такая внутренняя структура, которая постоянно способствует их возобновлению.

Сток наносов, определяя вместе с движением потока сущность русловых процессов, является активным фактором. По Н.И.Маккавееву (1955, с. 137), "... процесс руслообразования можно определить как процесс "отображения" поверхностью твердой среды (т.е. грунтами, слагающими ложе) особенностей движения воды и перемещаемых ею наносов". При недостаточном количестве наносов происходит непосредственное воздействие потока на коренное ложе реки, образование дефицитных форм руслового рельефа. С транспортом наносов связано возникновение грядового руслового рельефа и развитие различных форм самого русла. Движущиеся частицы, кроме того, воздействуют на ложе реки, корродируя его, способствуя отрыву других частиц и, попадая в толщу потока, изменяют его транспортирующую способность по отношению к донным наносам (Маккавеев и др., 1970; Россинский, Дебольский, 1980).

С другой стороны, формирование стока наносов – результат воздействия потока на дно и берега реки и поступления их с территории водосбора. Это определяет пассивный характер стока наносов как фактора русловых процессов.

Активные факторы подчиняются законам географической зональности (Кузин, Бабкин, 1979; Сток наносов ..., 1977), что создает предпосылки для ее проявления в руслоформирующей деятельности рек. Каждая географо-гидрологическая зона (или район) характеризуется определенным русловым режимом, тип которого зависит от многолетних и внутrigодовых особенностей стока воды и наносов.

По этому признаку можно выделить типы (подтипы, виды) русловых режимов, соответствующие зональным, региональным и местным проявлениям русловых процессов. Иными словами, русловые процессы подчиняются законам географической зональности, так как не могут развиваться вне определенной географической среды (Маккавеев, 1955) либо характеризуются региональными или местными особенностями. Первая обусловлена зональностью активных факторов русловых процессов – стоком воды и наносов, последняя – преобладающей ролью в функционировании системы "поток-русло" пассивных геолого-геоморфологических и прочих факторов (геологического строения и рельефа бассейна, морфологии долины реки или их частей).

Зональные, региональные или местные особенности руслового режима рек сказываются через специфику механизма взаимодействия потока с грунтами, слагающими их русла, в конкретных природных условиях. Это связано, во-первых, с неодинаковым внутrigодовым распределением стока, что приводит к различиям в изменениях во времени гидравлических характеристик потока, и, во-вторых, с неодинаковыми в разных районах условиями поступления в реки наносов с площади водосбора. В результате внешне одинаковые формы русла и руслового рельефа отличаются по своей внутренней структуре, иерархии и сочетанию между собой на реках, протекающих в разных географо-гидрологических зонах или геоморфологических районах. Н.И.Маккавеев (1955) в связи с этим подчеркивал, что "потоки с одинаковыми гидравлическими характеристиками могут в различных природных условиях создавать различные русловые формы, и, в свою очередь, внешне одинаковые русловые образования могут возникать под влиянием совершенно различных гидравлических процессов" (с. 15).

Пассивные факторы, не являясь ведущими, но будучи зональными (почвенно-растительный покров, климатические) и влияя на русло опосредованно, усиливают зависимость русловых процессов от положения рек в географических зонах и зональность их руслового режима. Вместе с тем, хотя сток наносов зависит от географических условий, эрозионных и денудационных процессов на водосборе, формы русла и руслового рельефа отражают структуру потока; поэтому последние, имея гидромеханическую природу, представляют собой интразональные образования. Однако в конкретных природных

условиях, при определенном сочетании факторов русловых процессов возникают закономерные сочетания форм русла и руслового рельефа, благодаря которым в регионе или зоне получают преимущественное распространение те или иные морфодинамические типы русла.

Малые реки (а также средние с широтным направлением течения или расположенные в одной природной зоне) полностью зональны в отношении руслового режима. Вместе с тем, чем меньше река, тем в большей мере ее руслоформирующая деятельность определяется местными геоморфологическими и ландшафтными условиями. Большие транзитные реки в гумидных областях (Обь, Енисей, Лена) интегрируют в своем русловом режиме влияние зон, которые они пересекают, и переносят из одной зоны в другую черты, присущие предыдущей зоне. В аридных областях (Сырдарья, Амударья, Или), напротив, происходит полное приспособление руслового режима реки к особенностям данной зоны. Вместе с тем нижняя Волга и нижний Днепр, пересекая степи полностью сохраняют тот русловый режим, который сформировался в других природных зонах.

На реках Русской равнины, где главным источником питания является снеготаяние, основная руслоформирующая деятельность сосредотачивается в весенний период. Однако разные условия формирования стока наносов (в южной части при быстром таянии снега доля весеннего стока наносов превышает 90 %; на севере при больших снегозапасах, но относительно замедленном снеготаянии – от 50 до 90 %) создают зональные различия южных и северных рек в продолжительности и эффективности активного воздействия потока на русло. Это различие усиливается возрастанием роли летнего и осеннего, а иногда и зимнего периодов в русловых переформированиях: на южных реках за счет дождей, в центральных районах – благодаря большой продолжительности межени, на севере – вследствие ледовых явлений.

В Сибири и на Дальнем Востоке максимум стока наносов и наибольшие интенсивные русловые деформации приурочены к летнему периоду. Это связано с увеличением роли дождей в формировании стока воды, вплоть до преимущественно дождевого питания рек на юге Дальнего Востока. Большое значение имеет также распространение многолетнемерзлых пород, определяющих поступление наносов в реки с водосборов в основном в летний период, когда происходит наибольшее их протавивание.

В аридных условиях равнин Средней Азии и Казахстана сток воды и наносов (кроме транзитных рек) приурочен к кратковременному весеннему половодью, летом многие реки пересыхают. Для них характерны глубокие плесы, которые не заполняются наносами в межень, когда течение рек перерывается и размыв перекатов не происходит; во время половодья в них аккумулируются илы, которые уплотняясь, превращаются в трудноразмываемые осадки.

К зональным относятся также особенности развития речных русел, которые связаны с их промерзанием (реки Крайнего Севера, Восточной Сибири и северо-востока, маловодных бассейнов Казахстана), образованием наледей, погребением русел малых рек солифлюкционными отложениями и т.д. Зональные черты руслового режима рек во многом определяются пространственными изменениями характеристик руслоформирующих расходов воды (Чалов, 1979).

Геолого-геоморфологическое строение бассейнов определяет региональную изменчивость русловых процессов, которая выражается в свободных и ограниченных условиях развития русловых деформаций. Для первых характерно наиболее полное развитие форм русла и руслового рельефа, разнообразие видов деформаций, большие их скорости. В этих условиях (по М.А.Великанову) "поток управляет руслом", создавая те или иные его формы, распространение и режим переформирований которых полностью определяется географическими закономерностями стока воды и наносов. При ограниченном развитии русловых деформаций, наоборот, "форма русла управляет потоком". Будучи пассивным фактором русловых процессов, она в этом случае оказывает на развитие русла ведущее влияние. Однако лишь в скальных породах русло полностью приспособляется к геологической структуре, и его формы не связаны со структурой потока, который лишь моделирует первичную форму русла, придавая ей плавные "речные" очертания.

В районах восходящего развития рельефа геолого-геоморфологические факторы определяют распространение различных типов русел горных и полугорных рек, отличающихся формой транспорта наносов, их крупностью, кинематикой потока, величинами продольных уклонов, а также характером и режимом деформаций. Со всеми этими факторами связана высотная зональность русловых процессов в горах, проявляющаяся как в направлении от высокогорий к низкогорьям и предгорьям, а также в сторону днищ долин больших рек.

Наряду с зональными и региональными изменениями форм проявления русловых процессов, последние испытывают влияние местных факторов. Четковидность в строении дна долины или выдержанность ее ширины на участках значительной протяженности, выходы трудноразмываемых пород и связанные с ними порожистые участки и шиверы, изгибы долины, обусловленные морфоструктурным планом территории, ветер, создающий ветровое волнение, нагонные явления в низовьях рек, денивеляции уровней и перенос песка с развеваемых отмелей в наветренную часть русла, оползни и обвалы на коренных берегах оказывают локальное воздействие на русло больших рек, не изменяя общей его морфологии и характера деформаций. Чем меньше река, тем существеннее проявление местных факторов, которые могут полностью контролировать русловые процессы на малых реках. Ряд особенностей морфологии и динамики их русел связывается с образованием лесных заломов, карчеходом, трудноразмываемыми породами, распространение которых соизмеримо с размерами потока.

8.2. Районирование Северной Евразии по русловому режиму рек

В.В. Докучаев в своем "Учении о зонах природы" писал "... та же зональность, тот же всемогущий закон природы весьма резко выражен и в морях, и в океанах, и в реках". Следствием этого закона являются закономерные сочетания и общность изменений во времени форм проявления русловых процессов, позволяющие выделять соответствующие типам русловых режимов зоны. Региональные различия внутри зон, связанные с широтными и меридиональными изменениями руслового режима, определяемыми условиями прохождения руслоформирующих расходов воды, появлением новых характерных фаз водного режима, в которые проходят русловые деформации, влиянием многолетнемерзлых грунтов, промерзанием или пересыханием рек и т.д. дают основания для выделения регионов (или областей), которым соответствуют подтипы русловых режимов. К этому же виду региональных различий приводит распространение равнинных, полугорных или горных рек (по типам русловых процессов).

Местные различия, главным образом связанные с геолого-геоморфологическими факторами, обуславливающими развитие таких форм проявления русловых процессов и специфических особенностей руслового режима, которые находятся вне связи с зональными характеристиками, являются азональными. Наличие последних позволяет выделять районы – таксономические единицы, отличающиеся определенной однородностью как зональных, так и азональных черт руслового режима.

Таким образом, использование понятия "русловой режим рек" позволяет осуществлять районирование суши по типам (подтипам, видам) русловых режимов протекающих по ней рек, выделяя зоны, области и районы. При этом, с точки зрения русловых процессов, зона – территория, по которой протекают реки, характеризуется однозначностью показателей, варьирующих в пределах определенного интервала, и общностью руслового режима рек. Области характеризуются региональными различиями, связанными с широтными и меридиональными изменениями руслового режима, определенными условиями прохождения руслоформирующих расходов воды, появлением новых характерных фаз водного режима, в которые происходят русловые деформации, промерзанием или пересыханием рек в большей или меньшей степени, на большее или меньшее время, изменением геолого-геоморфологических условий. Район – таксономическая единица, имеющая определенную однородность как в зональном, так и азональном проявлении руслового режима.

На территории Северной Евразии (в границах бывш. СССР) выделяются (рис. 8.1) в полной мере три зоны: северная (А), охватывающая большую часть Европейской территории (ЕТ), всю Сибирь и северо-восток, южная сухостепная (Г) – юг ЕТ и Северный Казахстан и Субтропическая (Д) – Кавказ и Среднюю Азию. На реках северной зоны руслоформирующие расходы воды приурочены к весеннему половодью, когда русловые деформации осуществляются на уровне форм русла и основных форм руслового рельефа. При этом велика роль высокой межени из-за ее относительной многоводности, продолжительности или наличия летне-осенних паводков; в это время на реках с песчаным руслом происходят переформирования перекатов. Для широкопойменных русел характерны малая устойчивость и в целом большая интенсивность русловых деформаций.

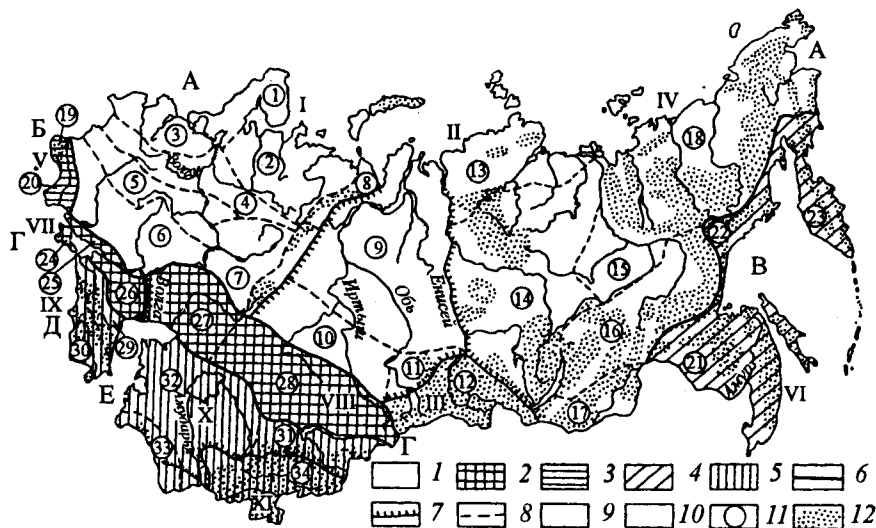


Рис. 8.1. Районирование территории Северной Евразии по типам русловых режимов рек. Зоны:

1 – северная; 2 – южная сухостепная; 5 – субтропическая. Регионы: 3 – Карпатский, 4 – Дальневосточный. Границы: 6 – зон, 7 – областей, 8 – районов. Индексы: 9 – зон и регионов, 10 – областей, 11 – районов, 12 – горные территории

В Южной зоне руслоформирующие расходы приурочены к кратковременному периоду половодья; в межень малые реки пересыхают, зимой – промерзают, что приводит к консервации русла и резкой дифференциации его на плесы и перекаты. Деформации русла практически затухают в эту фазу режима даже на больших реках (Урал). Для зоны характерно заиливание и деградация малых рек.

Субтропическая зона отличается значительной долей горных рек. Равнинные реки характеризуются большим стоком наносов, абсолютным преобладанием слабоустойчивых и неустойчивых русел с очень высокой интенсивностью горизонтальных деформаций. Руслоформирующие расходы приурочены к весенне-летнему половодью.

Кроме этих трех зон, имеется два региона с зональными признаками – Карпатский (Б) и Дальневосточный (В), которые в заданных границах не имеют сплошного распространения либо представляют собой территориальные образования, характеризующиеся специфичными природно-климатическими особенностями, гидрологическим и

русловым режимами. В Карпатском регионе руслоформирующие расходы воды наблюдаются до выхода воды на пойму; в русловых переформированиях влияние не ярко выраженного половодья уступает влиянию паводков. Горизонтальные деформации выражены слабо, паводочный режим определяет специфику образования грядовых форм движения наносов и переформирований перекатов.

Для Дальневосточного региона характерен многоводный летний паводочный период и частые наводнения, приводящие к резким переформированиям русел. Последние растягиваются на весь длительный многоводный период, приобретая катастрофический характер. Роль межени незначительна, в горно-предгорных регионах и на малых реках велика роль наледных явлений.

Северная зона разделяется на четыре области – Восточно-Европейскую, Западно-Сибирскую, Алтайско-Саянскую и Восточно-Сибирскую. В Восточно-Европейской области этапы активных переформирований, приуроченные к половодью и высокой межени, четко дифференцированы; в Западно-Сибирской роль межени существенно ослабевает, возрастает влияние вечной мерзлоты и ледовых заторов. В Восточно-Сибирской большую роль играют летне-осенние паводки, к которым приурочен основной сток наносов; во время половодья из-за его прохождения при неоттаявших грунтах преобладают размывы, сосредоточенные в узкой пристрежневой полосе русла.

Алтайско-Саянская область в основном представлена горными реками. К равнинным относятся только Енисей, Абакан и ряд других рек в пределах Минусинской котловины, низовья Бии и Катунь. Все реки имеют галечно-валунное русло, в широкопойменных условиях (в котловинах и при выходе рек на равнины) – сложно разветвленное, со сложным режимом деформаций, осуществляющихся во время весенне-летнего половодья и дождевых паводков. Руслоформирующие расходы проходят в пойменных бровках. В межень деформации русел полностью затухают.

В Южной сухостепной зоне выделяются Черноморско-Каспийская и Северо-Казахстанская области, различия между которыми связаны с возрастанием с запада на восток влияния на динамику русла промерзания рек в зимний период и их пересыхания летом, усилением в этом же направлении роли кратковременного весеннего половодья.

Субтропическая зона подразделяется на Кавказскую, Пустынно-полупустынную область с равнинными бесприточными реками, на

которых преобладает аккумуляция наносов (Амударья, Сырдарья, Или, Чу), и Памиро-Тяньшаньскую с горными и полугорными реками. Темпы вертикальных (аккумуляция) и горизонтальных русловых деформаций на реках пустынно-полупустынных областей нередко достигают катастрофических значений (соответственно сантиметры и сотни метров в год), что выделяет их среди всех рек Северной Евразии и сближает с реками юго-восточной Азии (Янцзы, Хуанхэ, Меконг). Переформирования русел происходят в течение длительного периода прохождения руслоформирующих расходов, охватывающего все лето и часть осени и связанного с весенним половодьем. Равнинные реки Кавказа отличаются от них меньшими темпами деформаций, приуроченных к короткому весеннему половодью и летним паводкам.

В 11 областях на территории Северной Евразии выделяются по зональным и азональным особенностям руслового режима 34 района. При этом к азональным относятся русла горных рек и рек, протекающих на равнинах в условиях ограниченного развития русловых деформаций. Например, в северной зоне районами с зональными чертами руслового режима являются Двинско-Печерский, Полесский, Степной, Предуральский, Нижнеобский, Обь-Иртышский, Лено-Вилуйский, Таймырский и Северо-Восточный; с азональными – Кольско-Карельский, Уральский, Саяно-Кузнецкий, Байкало-Охотский, Среднесибирский, Витимо-Алданский.

Южная сухостепная зона включает в себя четыре района (по два в каждой области): Приазовский, Кума-Маньчский, Прикаспийский и Восточно-Казахстанский, выделенные по изменениям зональных черт руслового режима рек по мере увеличения континентальности климата. Кавказская область субтропической зоны делится на Северокавказский и Закавказский районы, пустынно-полупустынные Арало-Каспийский и Прибалхашский; все эти регионы характеризуются изменениями зональных проявлений русловых процессов.

Зональные, региональные и азональные черты руслового режима свойственны рекам, полностью протекающим в пределах данной природной зоны или крупного региона. Большие и особенно крупнейшие реки, будучи транзитными, по своему русловому режиму являются полизональными. Полизональность определяется, с одной стороны, трансграничным переносом черт режима, свойственных другим зонам, а, с другой – их трансформацией под влиянием при-

родных условий данной зоны (или региона). Однако степень трансформации руслового режима рек, берущих начало за пределами зоны (региона), не одинакова. В полной мере она проявляется на Оби, Енисее, Лене, Амуре и Иртыше, у которых наблюдается частичная трансформация черт руслового режима, привнесенных из других зон регионов, под влиянием природных условий данной зоны или региона. Для нижнего Днепра, нижнего Дона, нижней Волги (в естественных условиях от слияния с Камой), Урала характерно несоответствие их руслового режима рекам зон, которые они пересекают. Напротив, на Амударье, Сырдарье, Или и Чу, берущих начало в горах, происходит полное изменение их руслового режима применительно к природным условиям равнинной пустынно-полупустынной области.

8.3. Географическое распространение морфодинамических типов русел равнинных рек

Закономерности распространения типов русел определяются изменчивостью и сложным сочетанием разнообразных факторов руслоформирования, главным образом, прохождением руслоформирующих расходов воды (Q_{ϕ}) и геолого-геоморфологическими условиями развития русловых деформаций. В зависимости от количества Q_{ϕ} , а также соотношения уровней воды в реке при их прохождении и высоты поймы, на территории Северной Евразии (в пределах бывшего СССР) выделяются пять субширотных зон и один субмеридиональный пояс вдоль Уральских гор (Русловой режим ..., 1994). Зона А, охватывающая северную половину территории (среднее и нижнее течение рек, стекающих с главного водораздела Европейской части на север и гор юга Сибири; бассейны рек северо-востока Сибири), характеризуется прохождением верхнего Q_{ϕ} во время половодья при полном и глубоком затоплении пойм. В зоне Б, протягивающейся вдоль главного водораздела Европейской части и охватывающей области формирования стока главных сибирских рек (южную часть Сибири), Q_{ϕ} сосредоточены в пойменных берегах; в результате роль высоких половодий в формировании русел здесь менее значительна. Южная половина Европейской части России, Украина, Казахстан и юг Дальнего Востока входят в зону В, где реки имеют Q_{ϕ} верхнего интервала (при разливах воды на пойме) благодаря мощным поло-

водьям и многоводному паводочному периоду. Южнее следуют зоны Г (Западное Закавказье и Средняя Азия) и Д (Восточное Закавказье; реки, стекающие с Копетдага), в которых отсутствует или имеется верхний Q_{ϕ} . В Уральском поясе Е Q_{ϕ} на реках проходят до выхода воды на пойму.

Геолого-геоморфологические факторы определяют уклон речных долин и, тем самым, кинематические характеристики потока, формы транспортировки и крупность руслообразующих наносов, т.е. особенности распространения равнинных, полугорных и горных рек. Области их развития приурочены к определенным типам рельефа – равнинам, предгорьям и горам. Исключения представляют внутригорные котловины и высокогорные плато, а также долины больших рек в горных районах, где формируются русла рек равнинных типов. Наоборот, в равнинных условиях на малых реках, расчленяющих склоны возвышенностей, и на реках, пересекающих массивы скальных пород, встречаются участки русел полугорного и даже горных типов.

Важнейшей геолого-геоморфологической характеристикой, прямо или косвенно отражающей комплекс факторов (интенсивность неотектонических движений, геологическую структуру и состав пород, историю развития рельефа и др.), является свободное или ограниченное развитие русловых деформаций и, соответственно, распространение широкопойменных или врезанных русел. Распределение морфодинамических типов русел в областях с различными условиями развития русловых деформаций (табл. 8.1) определено по карте "Русловые процессы на реках СССР" (1990) для всех рек, длина которых превышает 500 км. Измерения проводились по оси дна долин; с учетом среднего коэффициента извилистости рек 1,6 (Попов, 1965), общая длина русел рек составила свыше 300 тыс. км.

В целом в Северной Евразии доля горных, полугорных и равнинных русел составляет, соответственно, 3,9; 21,6; 74,5 %. Районы распространения этих типов русел от ее общей площади занимают 25, 26 и 49 % (включая бессточные области Средней Азии и Прикаспия). Очевидное несоответствие доли измеренных площадей и длины рек связано, в первую очередь, с тем, что многочисленные малые и средние полугорные и, особенно, горные реки длиной менее 500 км не учитывались в расчетах.

Среди равнинных рек в областях свободного развития русловых деформаций резко преобладают широкопойменные (около 92 %) и

только около 4 % рек имеют врезанные русла. Последние приурочены, главным образом, к локальным выходам трудноразмываемых пород при пересечении положительных морфоструктур (например, пересечения р. Вяткой Вятского увала) или связаны с их интенсивным воздыманием (пересечение Северной Сосьвой Люлимоворского поднятия, Иртышом у Омска – Прииртышского и т.д.).

В областях ограниченного развития русловых деформаций 9,7 % длины русел крупных (более 500 км) рек являются горными, 39,6 % – полугорными и более 50 % – равнинными. Среди последних преобладают врезанные русла – 75 %. Широкопойменные участки рек (25 %), как правило, приурочены к внутригорным впадинам и котловинам, заполненным рыхлыми отложениями; к зонам повышенной трещиноватости и разломов; они отличаются малыми уклонами и широким развитием грядовых форм руслового рельефа.

В областях чередования условий развития русловых деформаций в пластичных и скальных породах доля широкопойменных и врезанных русел приблизительно одинакова. В то же время, в областях распространения скальных пород имеются горные реки, которых нет в областях, сложенных пластичными породами; для них характерна большая доля полугорных рек (17,0 против 0,2 %), что объясняется приуроченностью этих областей к регионам значительной активности неотектонических движений (Среднесибирское плоскогорье, Зауралье и др.). В областях с широким распространением унаследованных речных долин (северо-восток Сибири и др.) большие уклоны, свойственные преимущественно горным регионам, обуславливают полугорный характер крупных рек, а широкие ящикообразные долины способствуют формированию широких пойм. Поэтому здесь преобладают полугорные широкопойменные реки с разветвленными руслами (около 70 % от длины всех рек). Врезанные равнинные реки (около 4 % от общей длины рек в этих областях) формируются, главным образом, при пересечении крупных массивов устойчивых по отношению к денудации пород (гранитные батолиты в верхнем течении Колымы) и воздымающихся блоков земной коры. Широкопойменные равнинные русла (18,7 %) характерны для внутригорных и межгорных котловин, а также для отдельных относительно опущенных блоков. Притоки и верховья крупных равнинных и полугорных рек, как правило, отличаются большими уклонами и располагаются в

Таблица 8.1. Распределение морфодинамических типов русел рек (длиной более 500 км) на территории Северной Евразии в областях с различными условиями развития русловых деформаций, %

Типы русел	Для территории страны	Области с различными условиями развития русловых деформаций						
		свободных условий	ограниченных условий	чередование условий свободного и ограниченного развития				
1	2	3	4	5	6	7		
Горные	3,9	-	9,7	-	0,8	8,1		
Полугорные	21,6	4,2	39,6	0,2	17,0	69,4		
Равнинные	74,5	95,8	50,7	99,8	82,2	22,5		
Врезанные	22,6 100,0	3,9 100,0	37,9 100,0	48,8 100,0	36,7 100,0	3,8 100,0		
прямолинейные	6,8 30,1	0,7 17,9	12,1 31,9	16,4 33,6	8,1 22,1	0,6 15,8		
излучины	13,2 58,4	2,8 71,8	20,3 53,6	29,7 60,9	26,4 71,9	1,3 34,2		
разветвления	2,6 11,5	0,4 10,3	5,5 14,5	2,7 5,5	2,2 6,0	1,9 50,0		
Широкопойменные	51,9 100,0	91,9 100,0	12,8 100,0	51,0 100,0	45,5 100,0	18,7 100,0		
прямолинейные	7,4 14,3	13,6 14,8	2,1 16,4	6,3 12,4	5,9 13,0	0,3 1,6		

Таблица 8.1 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7
вынужденные и адаптированные излучины	3,6 6,9	3,5 3,8	2,2 17,2	7,5 14,7	9,7 21,3	-
прорванные излучины	9,0 17,3	15,6 17,0	3,2 25,0	3,9 7,6	4,7 10,3	10,5 56,2
сегментные и петлеобразные излучины	27,6 53,2	52,4 57,0	3,6 28,1	27,9 54,7	24,3 53,4	3,7 19,8
простые сопряженные разветвления	2,3 4,4	3,9 4,2	0,6 4,7	2,3 4,5	0,3 0,7	3,0 16,0
сложные разновидности разветвлений	2,0 3,9	2,9 3,2	1,1 8,6	3,1 6,1	0,6 1,3	1,2 6,4
Длина рек в пределах областей (% от общей длины рек СССР)	100,0	40,8	33,8	11,0	6,7	7,7

Примечание. В числителе - % от общей длины русел в пределах областей, в знаменателе - от общей длины врезанных или широкопойменных русел.

областях распространения трудноразмываемых скальных пород; многие из них имеют горные типы русел (свыше 8 %).

В характере распределения морфодинамических типов русел равнинных рек по различным группам областей (за исключением областей с широким развитием унаследованных долин) нет резких контрастов (табл. 8.1, данные в знаменателе). Во всех областях как во врезанных, так и в широкопойменных руслах преобладают излучины, причем среди свободных это – сегментные и петлеобразные излучины. Доля прямолинейных неразветвленных и слабоветвленных (с одиночными и односторонними разветвлениями) русел рек больше, чем типичных разветвленных. Подобное распределение типов русел отражает общую для территории Северной Евразии картину. Так, среди широкопойменных рек более 77 % принадлежит извилистым руслам, более 14 % – неразветвленным относительно прямолинейным и руслам с одиночными и односторонними разветвлениями, более 8 % – разветвленным руслам (простые и сложные сопряженные разветвления, разбросанные русла). У врезанных рек соотношения несколько иные: в связи с литологическими ограничениями горизонтальных деформаций и отчетливым влиянием линеаментных систем доля прямолинейных русел возрастает более чем вдвое (30 %), тогда как доля извилистого русла снижается до 58 %. Доля разветвленных русел имеет близкие значения (около 12 %). Последний показатель в целом несколько занижен, так как "переходные" типы русел (разветленно-извилистые, одиночные и односторонние разветвления) отнесены, соответственно, к извилистым или относительно прямолинейным. Кроме того, не учитывалась степень сложности русла, т.е. иерархия вложенных друг в друга русловых форм (например, вторичная разветвленность меандрирующих русел), и тип русла определялся по формам русла первого порядка.

Тем не менее, в распределении типов русел равнинных рек по группам областей с различными геолого-геоморфологическими условиями развития русловых деформаций отмечаются определенные различия. В областях свободного развития русловых деформаций мало по сравнению с другими областями русел с вынужденными и адаптированными излучинами, что вполне объяснимо, учитывая преобладание здесь широкопойменных русел. В областях ограниченного развития русловых деформаций относительно повышенная доля разветвленных русел, как врезанных (свыше 14 % от всей их

длины), так и встречающихся здесь широкопойменных (более 13 %), связана с большой изменчивостью уклонов, особенно при выходе рек в предгорья, а также образованием островов в местных расширениях русел и аккумуляцией наносов возле выступов коренного ложа на дне реки. Дополнительными факторами, способствующими разветвлению русел в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке, являются многолетняя мерзлота и наледные явления. Поэтому доля разветвленных русел относительно повышена в преобладающих здесь широких унаследованных долинах. Благодаря тем же факторам доля прорванных излучин превышает в этих областях почти в 3 раза долю петлеобразных и сегментных, в то время как для всей территории характерно обратное соотношение.

Наибольший процент участков русел с преобладанием адаптированных и вынужденных излучин отмечается в областях перехода от условий ограниченного к условиям свободного развития русловых деформаций (участки Днестра, Вилюя, Мезени, Нижней Тунгуски и др.).

Характер распространения типов русел по группам областей, выделенных по геолого-геоморфологическим условиям, свидетельствует об относительности влияния этого фактора на формирование речных русел. Состав пород, в которых развивается русло, неотектоническая активность территории и другие факторы, прямо или косвенно отраженные в районировании, определяют направленность и величину вертикальных и интенсивность горизонтальных русловых деформаций, а через них – существование русел горных, полугорных и равнинных (врезанных и широкопойменных) рек. Вместе с тем, эти факторы не оказывают решающего влияния на формирование конкретных типов русла – извилистого или разветвленного, тип излучин или разветвлений и т.д., т.е. на те формы проявления русловых процессов, которые определяются структурой потока и характером движения руслообразующих наносов.

Весьма существенным фактором является водоносность рек. При прочих равных условиях с ее увеличением повышается вероятность формирования разветвленных типов русел. При чередовании условий развития русловых деформаций наиболее крупные реки протекают в широкопойменных долинах (Северная Двина, Печера), тогда как меньшие по водности оказываются неспособными к их разработке и формируют врезанные русла (Онега, Даугава). Малые реки этих регионов зачастую лишь скользят по поверхности трудноразмываемых

Таблица 8.2. Распространение широкопойменных русел в зонах, выделенных по условиям прохождения Q_{ϕ} , %

Регионы	Европейская часть						Урал	Западная Сибирь			Средняя Азия и Казахстан			Восточная Сибирь			Дальний Восток		
	А		Б		В			Г		Д		Е		А		Б		В	
	16,8	22,6	19,0	21,3	2,5	19,0		9,9	11,7	20,7	14,7	30,7	4,2	6,0	7,8	7,2	30,7	4,2	6,0
Типы широкопойменных русел, %	Прямолинейные																		
	3,9	2,7	10,0	12,8	10,6	5,8	14,8	6,9	29,2	35,6	3,0	34,3	43,5	59,5	51,5	3,0	34,3	43,5	59,5
	Петлеобразные и сегментные излучины																		
	46,8	73,8	69,5	46,8	73,3	75,2	73,8	72,6	44,9	6,6	51,0	43,4	42,7	15,7	17,3	51,0	43,4	42,7	15,7
В процентах от региона	Разветвленные																		
	32,5	0,9	1,5	19,1	13,6	-	1,5	8,8	5,2	43,1	15,3	18,1	7,8	17,0	24,0	26,0	22,5	65,9	5,4

¹ В зонах А, В, Д руслоформирующий расход верхнего интервала проходит при затопленной пойме, в зонах Б, Г, Е - все Q_{ϕ} проходит до выхода воды на пойму.

² В скобках приведены данные для районов преимущественно свободного развития русловых деформаций - Северо-Сибирской низменности и Центральноножукотской равнины.

Таблица 8.3. Распространение участков рек Северной Евразии с пойменной многорукавностью (в процентах от общей длины).

Области, выделенные по условиям развития русловых деформаций	Зоны, выделенные по условиям прохождения руслоформирующих расходов		
	А, В и Д	Б, Г и Е	
Свободного развития	50,2	4,8	
Ограниченного развития	1,8	5,9	
Чередований условий свободного и ограниченного развития:			
	в пластичных породах	3,0	0,7
	в скальных породах	2,8	1,1
при широком распространении унаследованных долин	23,2	6,5	

ных ("экранирующих") пород, образуя широкопойменные долины в покровных отложениях (малые реки моренных равнин Европейской части и траппового плато Среднесибирского плоскогорья). При большой залесенности пойм малых рек затруднено спрямление излучин пойменными протоками, и здесь преобладают крутые петлеобразные излучины (Тюнг, Марха, Васюган, Конда), тогда как на более полноводных реках в тех же районах формируются прорванные излучины или разветвленно-извилистое русло (Виллой, Иртыш и др.).

Некоторые особенности морфологии речных русел и их деформаций связаны с условиями прохождения руслоформирующих расходов воды. Этот фактор не оказывает влияния на соотношение равнинных и горных рек и характер распространения разновидностей врезанных русел, проявляясь в областях свободного развития русловых деформаций в условиях спрямления речных излучин (табл. 8.2) и формирования пойменной многорукавности (табл. 8.3). Прохождение Q_{ϕ} верхнего интервала выше пойменных бровок способствует спрямлению крутых сегментных излучин до достижения ими петлеобразной формы. Оптимальные условия для развития спрямляющей протоки возникают при достижении излучиной степени развитости $l_p/L = 1,6$; при этом прежнее русло реки может долгое время сохраняться в виде пойменной протоки. Действительно, в субширотных зонах А и В (в пределах Европейской территории), где для рек характерно прохождение Q_{ϕ} верхнего интервала при затопленной пой-

ме, доля русел с прорванными излучинами среди всех свободномандрирующих русел составляет соответственно 8 и 13 %; в зоне Б, где Q_{ϕ} проходят в бровках поймы, их доля составляет менее 4%. Для Западной Сибири аналогичный показатель в зоне А составляет 17 %, в зоне Б уменьшается до 10 %. В пределах Северо-Сибирской и Центральноякутской низменностей (зона А) он вновь возрастает до 20 %.

Еще более существенна роль условий прохождения Q_{ϕ} в распространении рек с пойменной многорукавностью. Ею обладают около 20 % рек, протекающих, в основном, в областях свободного развития русловых деформаций и чередования условий свободного и ограниченного развития при распространении унаследованных долин. 81 % от общего количества рек с пойменной многорукавностью относится к зонам А, В и Д, где имеется на реках верхний интервал Q_{ϕ} , соответствующий полному затоплению пойм в половодье.

Вне областей преимущественно свободного развития деформаций роль этого фактора затушевывается на фоне разнообразных форм проявления геолого-геоморфологических условий. Вместе с тем не прослеживается связь между морфологией русел рек, видом их деформаций и различиями в прохождении руслоформирующих расходов в пределах пойменных бровок. Последнее связано с тем, что анализируемая картина отражает лишь один структурный уровень – формы самого русла. Более полно выявить влияние руслоформирующих расходов на распределение разновидностей речных русел можно лишь при учете всей иерархии русловых форм и форм руслового рельефа.

8.4. Региональные аспекты регулирования русел

Учет природных условий (факторов руслового процесса) при разработке прогнозов русловых деформаций и проектов регулирования русел, наряду с характеристикой гидрологического режима рек и геолого-геоморфологического строения долины как наиболее общих условий формирования русла, должен включать в себя выявление связей русловых деформаций и форм русла с руслоформирующими расходами, устойчивостью русла, строением и режимом поймы, морфологией долины, формой и строением коренных берегов и ложа реки, а также оценку величины стока и состава руслообразующих

наносов. В частности, комплекс геолого-геоморфологических факторов определяет класс речного русла – горное, полугорное или равнинное, врезанный или широкопойменный тип русла, состав руслообразующих наносов, с которым связана их подвижность и условия формирования отмостки (песчаный, песчано-галечный и галечно-валунный). Выделение горных, полугорных и равнинных рек дает возможность не только разграничить различные условия развития горизонтальных деформаций, но и учесть форму транспорта крупнообломочного материала водными потоками, отличающимися по кинетичности и уклону.

Среди гидрологических факторов важнейшее значение имеют величина стока, характеристики внутригодовой и многолетней неравномерности стока, интенсивность подъема и спада уровней. Они непосредственно влияют на транспорт руслообразующего аллювия, размеры русловых форм, характер их деформаций в сезонном и многолетнем разрезе, т.е. в конечном счете определяют русловый режим рек.

Врезанный или широкопойменный тип русла определяет, по существу, ведущую роль потока или русла в русловых процессах. Это обуславливает применение активных или пассивных методов регулирования; под последними в данном случае понимаются такие, которые ориентированы на использование работы самого потока.

Количество, обеспеченность и условия прохождения руслоформирующих расходов обуславливает для каждого района, выделенного по этому признаку, свой комплекс мероприятий по регулированию русел в естественном состоянии, а при определении возможного изменения руслового режима в результате создания водохранилищ, водозаборов в больших размерах и т.д. – в этих новых условиях.

Галечно-валунный или песчаный состав руслообразующих наносов определяет разный подход к регулированию врезанных и широкопойменных русел. Галечно-валунные реки отличаются целым рядом принципиально иных закономерностей руслового режима, благодаря которым механическое перенесение на них методов регулирования, разработанных применительно к песчаным рекам, часто сопровождается тяжелыми последствиями для рек как природных и хозяйственных объектов. Примером является русло верхней Лены, где дноуглубление на трассе судового хода сопровождается соответственным снижением уровня воды; между тем, несмотря на превращение русла в канал с гидравлически предельными габаритами, оно

продолжает заноситься галечно-валунными наносами и требовать проведения дальнейших дноуглубительных работ. При внешней стабильности форм русла и руслового рельефа в естественных условиях, галечно-валунные русла оказываются очень уязвимыми при малейшем вмешательстве в их русловой режим.

Степень детальности и полнота учета комплекса факторов русловых процессов зависит от поставленных задач и масштаба (по отношению к данной реке или речному бассейну) проектируемых работ. При разработке генеральной схемы улучшения условий судоходства или сплошном выправлении русла для этих целей, регулировании стока водохранилищами ГЭС, обосновании схем комплексного использования водных и связанных с ними земельных ресурсов требуется широкий анализ условий руслоформирования и прогноз русловых деформаций для рек от истоков до устья или участков значительной протяженности. При этом должны быть учтены и оценены все факторы русловых процессов и установлена доля участия каждого из них в русловом режиме реки. По отношению к таким видам использования рек важен комплексный учет всех факторов, возникающих при хозяйственной деятельности. Применительно к ним можно говорить о региональных или зональных системах регулирования русел.

При проектировании берегозащитных мероприятий, возведении различных сооружений на берегах рек и местных водозаборов, при планировании мероприятий по коренному улучшению условий судоходства (выборочное выправление) прогнозирование русловых деформаций может ограничиваться отдельными крупными формами русла (излучинами, узлами разветвления, перекатами) или их сериями (взаимосвязанными смежными излучинами, перекатными участками, системами сопряженных разветвлений – "восьмерками"). Только отдельными формами руслового рельефа (перекатами, грядами) или элементами форм русла (крыло или вершина излучины, та или иная часть узла разветвления) прогноз может ограничиваться, если планируется эксплуатационная прорезь по трассе судового хода, капитальная дноуглубительная работа на отдельном перекате (частичное выправление), или влияние сооружения ограничивается только данным поперечным сечением русла. При этом в конкретных условиях на первый план выдвигается та или иная сторона русловых деформаций, хотя прогнозирование переформирования русловых форм любого порядка должно проводиться на общем фоне развития всего

русла и применительно к конкретной природной обстановке, т.е. на фоне общей оценки руслового режима реки.

Такое сужение степени полноты учета природных и хозяйственных факторов русловых процессов связано с зависимостью степени влияния на русло физико-географических факторов от масштаба русловых деформаций и от размеров русловых образований – форм русла и форм руслового рельефа.

Список литературы

1. Алабян А.М. Компьютерная модель размыва берегов извилистого русла // Динамика и термика рек, водохранилищ, внутренних и окраинных морей. Том 1. М.: 1994. С. 187.
2. Алабян А.М. Типы русел равнинных рек и факторы их формирования // Геоморфология. 1992. № 4. С. 37–42.
3. Алабян А.М., Алексеевский Н.И., Беркович К.М. Транспорт наносов в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС // Труды ЗапСибНИГМИ. 1992. Вып. 98. С. 79–89.
4. Алабян А.М., Сидорчук А.Ю. Метод расчета переформирований русел разветвленных на рукава рек при изменении гидрологического режима // Метеорология и гидрология. 1987. № 10. С. 82–88.
5. Алексеевский Н.И., Борсук О.А., Лодина Р.В. Изменение механического состава и форм перемещения влекомых наносов в различных звеньях русловой сети // Труды Всесоюз. гидрол. съезда. Том 10. Книга 2. Л.: Гидрометеиздат, 1988. С. 161–167.
6. Алексеевский Н.И., Мельник О.В. Структура и особенности развития рельефа гравийно-галечных русел // Геоморфология. 1991. № 3. С. 59–65.
7. Алтунин С.Т. Регулирование русел. М.: Сельхозиздат, 1962. 350 с.
8. Андреев О.В., Ярославцев И.А. Русловые деформации на участках рек с мостовыми переходами // Русловые процессы. М.: изд-во АН СССР, 1958. С. 352–372.
9. Антроповский В.И. Критериальные зависимости типов руслового процесса // Труды ГГИ. 1972. Вып. 190. С. 5–18.
10. Антроповский В.И. Связь типов руслового процесса с определяющими факторами // Труды ГГИ. 1970. Вып. 183. С. 70–80.
11. Беликов В.В., Волченков Г.Я. Двухслойная модель русловых переформирований в неравномерных речных потоках // Динамика и термика рек, водохранилищ и эстуариев. М.: Наука. 1984. С. 230–231.
12. Белоцкий К.Н., Рулева С.Н., Чалов Р.С. Принципы районирования крупных регионов по условиям прохождения руслоформирующих расходов

воды (на примере рек Алтая) // География и природные ресурсы. 1995. № 3. С. 165–169.

13. Белый Б.В., Беркович К.М., Борсук О.А., Зайцев А.А., Лодина Р.В., Чалов Р.С., Чернов А.В. Морфология, динамика и регулирование русла р.Киренги в связи с транспортным освоением зоны БАМ // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 7. М.: Изд-во МГУ, 1979. С. 119–135.
14. Беркович К.М. Современная трансформация продольного профиля верхней Оки // Геоморфология. 1993. №3. С. 43–49.
15. Беркович К.М., Векслер А.Б., Виноградова Н.Н., Доненберг В.М., Лысенко В.В., Маккавеев Н.И., Рулева С.Н., Чалов Р.С. Формирование русла Оби в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС // Труды ЗапСибНИИ Госкомгидромета. 1981. Вып. 52. С. 3–20.
16. Беркович К.М.: Виноградова Н.Н. Влияние крупных водохранилищ на гидрологический и русловой режим зоны переменного подпора // Водные ресурсы. 1975. № 6. С. 81–87.
17. Беркович К.М., Злотина Л.В., Иванов В.В., Никитина Л.Н., Рязанов П.Н., Турыкин Л.А., Чалов Р.С., Чернов А.В. Развитие русла нижнего и среднего Днестра в условиях антропогенной нагрузки // Экологические проблемы эрозии почв и русловых процессов. М.: Изд-во МГУ, 1992. С. 141–165.
18. Беркович К.М., Чалов Р.С. Исследование перекатов, сложенных из каменистых грунтов // Речной транспорт. 1968. № 4. С. 38–39.
19. Беркович К.М., Чалов Р.С. Русловой режим рек и принципы его регулирования при развитии водного транспорта // География и природные ресурсы. 1993. № 1. С. 10–17.
20. Билибин Ю.А. Основы геологии россыпей. М.: изд-во АН СССР, 1956. 464 с.
21. Бородин В.П. Отражение активных разломов в морфологии пересекающих их русел рек и в строении руслового аллювия (бассейн Подкаменной Тунгуски) // Геоморфология. 1978. № 2. С. 47–51.
22. Борсук О.А., Долженко Ю.А., Зайцев А.А., Кирик О.М., Лодина Р.В., Матвеев Б.В., Христофоров А.В., Чалов Р.С. Русловые процессы на верхнем Алдане и их учет при транспортном освоении рек // Эрозия почв и русловые процессы. Вып.10. М.: 1995. С. 157–188.
23. Букреев В.П. Искусственный аналог ограниченного меандрирования // Натурные и лабораторные исследования гидротехнических сооружений. М.: 1987. С. 116–120.
24. Васильев Л.В., Марченко А.С. К методике расчета расходов воды в сложных разветвлениях // Труды ЛПИ. № 383. 1982. С. 3–8.
25. Васильев П.П., Сухарев А.Г. Программа численного решения системы нелинейных уравнений методом Брауна с предварительным подбором

- начального приближения. Описание применения // Деп. в ВНИИЦ, № П 006441, 1983. 15 с.
26. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. Том 2. М.: Гостехиздат, 1955. 323 с.
 27. Великанов М.А. Русловой процесс. М.: Госфизматиздат. 1958. 395 с.
 28. Великанов М.А. Русская русловая гидротехника и ее роль в развитии учения о русловых процессах // Вопросы гидротехники свободных рек. М.: Речиздат, 1948. С. 5–16.
 29. Великанова З.М. Грядовое движение наносов на модели речной излуцины // Труды ГГИ. 1969. Вып. 169. С. 87–97.
 30. Вендров С.А., Ключева В.А. Деформации берегов и дна Цимлянского водохранилища за двадцать лет // Геоморфология. 1972. № 4. С. 26–32
 31. Вильперт А. Из опыта коренного улучшения судоходных условий и увеличения габаритов пути // Речной транспорт. 1970. № 3. С. 35–37.
 32. Виноградов В.А. Натурные исследования морфологии и гидравлики излучин свободного меандрирования // Труды ГГИ. 1970. Вып. 183. С. 119–137.
 33. Власов Б.Н., Козинер Л.А., Матвеев Б.В., Панин А.В. Условия формирования и методы выправления перекатов в нижнем течении р. Яны // Материалы научной конференции по проблеме водных ресурсов Дальневосточного экономического района и Забайкалья. СПб.: Гидрометеоздат, 1991. С. 588–592.
 34. Власов Б.Н., Чалов Р.С. Районирование Европейской территории по условиям прохождения руслоформирующих расходов на реках // Вестник МГУ. Сер. География. 1991. № 6. С. 32–42.
 35. Водные пути бассейна Лены. М.: МИКИС, 1995. 600 с.
 36. Войнович П.А. К вопросу о распределении расхода по разветвлениям открытого русла // Известия НИИ Гидротехники. 1932. Том 5. С. 73–106.
 37. Гордииков А.В., Россомахин М.В. Поперечные уклоны водной поверхности затопленной поймы (на примере р. Иртыша) // Труды ГГИ. 1961. Вып. 88. С. 109–124.
 38. Грачев Н.Р. Метод расчета плановых деформаций речной излуцины // Труды ГГИ. 1983. Вып. 288. С. 72–86.
 39. Гринберг З.И. О морфометрических характеристиках рек // Метеорология и гидрология. 1950. № 4. С. 43–45.
 40. Гришанин К.В. Основы динамики русловых потоков. М.: Транспорт, 1990. 320 с.
 41. Гришанин К.В. Гидравлическое сопротивление естественных русел. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 184 с.
 42. Гришанин К.В. Гидравлический расчет элементов водного режима в дельтах рек арктической зоны // Труды ААНИИ. 1967. Вып. 278. С. 5–21.
 43. Гришанин К.В. Теория руслового процесса. М.: Транспорт, 1972. 215 с.
 44. Гришанин К.В., Дегтярев В.В., Селезнев В.М. Водные пути. М.: Транспорт, 1986. 400 с.
 45. Гришанин К.В., Замышляев В.И. Возникновение меандрирования рек как проблема гидродинамической неустойчивости // Труды ГГИ. 1985. Вып. 301. С. 5–12.
 46. Дарбутас А.А., Лодина Р.В., Чалов Р.С. Современный русловой аллювий Немана // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 1993. № 5. С. 90–99.
 47. Дебольский В.К., Котков В.М. Особенности динамики дефицитных форм в поступательных потоках // Метеорология и гидрология. 1977. № 10. С. 67–71.
 48. Дегтярев В.В. Улучшение условий судоходства на реках Сибири. М.: Транспорт, 1987. 176 с.
 49. Джуха И.Г. Морфология и динамика русел малых рек таежной зоны. Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М.: Изд-во МГУ 1984. 24 с.
 50. Добровольская Н.Г., Лодина Р.В., Чалов Р.С. О роли механического и биохимического выветривания в формировании состава руслового аллювия // Геоморфология. 1991. № 1. С. 59–64.
 51. Дэвис В.М. Геоморфологические очерки. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1962. 455 с.
 52. Журавлев Ю.В. Причины разрушения и способы защиты берегов р. Волги в районе Ульяновско // Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях. М.: Изд-во МГУ, 1987. С. 309–310.
 53. Завадский А.С., Никитина Л.Н., Чалов Р.С. Особенности свободных излучин на реках в различных природных условиях // География и природные ресурсы. 1997. № 1. С. 85–92.
 54. 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.
 55. Зайцев А.А. Режим уровней и уклонов на валунно-галечных перекатах и скальных выступах в руслах крупных рек // Метеорология и гидрология. 1989. № 12. С. 103–106.
 56. Зайцев А.А. Формирование свободных излучин на равнинных реках. Автореф. диссерт. на соиск. уч. степени канд. геогр. наук. М.: 1979. 24 с.
 57. Зайцев А.А., Савцова Т.М. Скульптурный и аккумулятивный рельеф врезанных русел рек Восточной Сибири и особенности его формирования // Геоморфология. 1994. № 4. С. 58–64.
 58. Замышляев В.И. О плановой устойчивости прямого русла // Труды ГГИ. 1982. Вып. 278. С. 48–55.

59. Замышляев В.Н. Математическая модель плановых переформирований речного русла // Труды ГГИ. 1983. Вып. 288. С. 53–72.
60. Знаменская Н.С. Донные наносы и русловые процессы // Л.: Гидрометеоздат. 1976. 131 с.
61. Зорина Е.Ф., Косов Б.Ф., Прохорова С.Д. Опыт оценки объемов овражных выносов в бассейне р. Дон // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 1980. № 3. С. 39–45.
62. Иванов В.В. Метод гидравлического расчета элементов водного режима в дельтах рек // Труды ААНИИ. 1968. Вып. 283. С. 30–63.
63. Иванов В.В. Условия формирования, гидролого-морфометрические зависимости и деформации относительно прямолинейных неразветвленных русел. Автореф. диссерт. на соиск. уч. степени канд. геогр. наук. М.: 1989. 23 с.
64. Карасев И.Ф. Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 287 с.
65. Караушев А.В. Речная гидравлика. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 190 с.
66. Кондратьев Н.Е. Русловые деформации в меандрирующих руслах // Труды ГГИ. 1954. Вып. 44 (98). С.
67. Кондратьев Н.Е., Ляпин А.Н., Попов И.В., Пиньковский С.И., Федоров Н.Н. Якунин И.И. Русловой процесс. Л.: Гидрометеоздат, 1959. 372 с.
68. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Снищенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 272 с.
69. Копалиани З.Д., Цхададзе В.С. Типы речных русел Западной Грузии // Труды ГГИ. 1972. Вып. 195. С. 20–32.
70. Кортаев В.Н., Лодина Р.В., Милошевич В.А., Сидорчук А.Ю., Чалов Р.С. Формирование дельты р. Яны и прогноз развития ее устьевых баров // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 6. М.: изд-во МГУ, 1978. С. 123–159.
71. Котков В.М. Особенности транспорта наносов при дефиците сыпучего материала // Гидрофизические процессы в реках, водохранилищах и окраинных морях. М.: Наука, 1989. С. 28–50.
72. Кузин П.С., Бабкин В.И. Географические закономерности гидрологического режима рек. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 200 с.
73. Куколевский Г.А. Гидравлико-вероятностные характеристики русловых процессов // Труды V Всесоюз. гидрол. съезда. Том 10. Кн. 1. Л.: Гидрометеоздат, 1988. С. 98–103.
74. Курдюмов Л.Д. Закономерности эрозионно-аккумулятивного процесса. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 128 с.
75. Ламакин В.В. Динамические фазы речных долин и аллювиальных отложений // Землеведение. Том 2 (42). М.: 1948. С. 154–187.
76. Лелявский С. Введение в речную гидравлику. Л.: Гидрометеоздат, 1961. 230 с.
77. Лодина Р.В., Рашутин Д.В., Сидорчук А.Ю., Чалов Р.С. Изменения морфологии русла и руслообразующих наносов от истока до устья (на примере Терека) // Геоморфология. 1987. № 1. С. 86–93.
78. Лодина Р.В., Чалов Р.С. Бульжные мостовые на больших реках // Природа. 1994. № 7. С. 57–63.
79. Лысенко В.В. О естественном спрямлении излучин верхней Оби (на примере Тарадановской излучины) // Труды ЗапСибНИИ Госкомгидромета. 1977. Вып. 35. С. 119–126.
80. Ляпин А.Н. Об устойчивости речных берегов // Труды ГГИ. 1973. Вып. 209. С. 117–131.
81. Маккавеев Н.И. Общие закономерности эрозионно-русловых процессов // Труды IV Всесоюз. гидрол. съезда. Т. 10. Л.: Гидрометеоздат, 1976. С. 8–12.
82. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: изд-во АН СССР, 1955. 343 с.
83. Маккавеев Н.И. Русловый режим рек и трассирование прорезей. М.: Речиздат. 1949. 202 с.
84. Маккавеев Н.И. Сток и русловые процессы. М.: 1971. 116 с.
85. Маккавеев Н.И., Литвин Л.Ф., Хмелева Н.В. Использование транспортирующей способности потока в практических целях // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 1970. № 2. С. 82–89.
86. Маккавеев Н.И., Сахарова Е.И., Чалов Р.С. Современные эоловые процессы в долине верхней Оби // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 1966. № 2. С. 49–55.
87. Маккавеев Н.И., Чалов Р.С. Некоторые особенности дна долин больших рек, связанные с периодическими изменениями нормы стока // Вопросы географии. Сб. 79. М.: Мысль, 1970. С. 156–167.
88. Маккавеев Н.И., Чалов Р.С. Русловые процессы. М.: изд-во МГУ, 1986. 264 с.
89. Мартонн Э. Основы физической географии. Т. 2. М.: Учпедгиз, 1945. 253 с.
90. Матарзин Ю.М., Мацкевич И.К., Сорокина Н.Б. О формировании рельефа дна камских водохранилищ // Гидрология и метеорология. Вып.3 Пермь: 1968. С. 92–111.
91. Матвеев Б.В. Влияние геолого-геоморфологических факторов на образование и морфологию речных излучин // Геоморфология. 1985. №3. С. 51–58.
92. Матвеев Б.В. Процесс меандрирования и развитие речных долин // Геоморфология. 1988. №1. С. 63–69.
93. Матвеев Б.В., Панин А.В. Русловые деформации в нижнем течении р. Яны // Динамика и термика рек, водохранилищ и окраинных морей. Т. 1. М. 1989. С. 110–111.

94. Матвеев Б.В., Панин А.В., Сидорчук А.Ю. Развитие antecedentной долины р. Яны на участке пересечения Куларского хребта // География и природные ресурсы. 1992. №1. С. 102–107.
95. Махинов А.Н., Чалов Р.С., Чернов А.В. Направленная аккумуляция наносов и морфология русла нижнего Амура // Геоморфология. 1994. №3. С. 70–78.
96. Милитеев А.Н., Петров П.Г., Беликов В.В. Пакет прикладных программ для расчета течений жидкости в открытых потоках (КАСКАД) // Динамика и термика рек, водохранилищ и окраинных морей. Том 2. М.: 1989. С. 83–85.
97. Мирцхулатова Ц.Е. Основы физики и механики эрозии русел. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 304 с.
98. Михайлов В.Н. Динамика потока и русла в непривливаемых устьях рек. М.: Гидрометеоздат. 1971. 260 с.
99. Михинов А.Е. Неустойчивость донных волн в деформируемом русле // Метеорология и гидрология. 1983. № 11. С. 84–91.
100. Мордухай-Болтовский А.И. Приближенный расчет распределения расходов по рукавам русла методом повторения // Метеорология и гидрология. 1952. № 6. С. 39–41.
101. Морфоструктурный анализ речной сети СССР. М.: Наука, 1979. 304 с.
102. Никитина Н.А. Руслые процессы в узлах слияния рек. Автореф. дисс. ... канд. географ. наук. М.: 1989. 20 с.
103. Никитина Н.А., Чалов Р.С. Узлы слияния рек и их морфологические типы // Геоморфология. 1988. № 4. С.64–70.
104. Никонов А.А. Определение скорости врезания реки // Геоморфология. 1973. № 1. С. 24–35.
105. Ободовский А.Г. Руслформирующие расходы воды рек равнинной части Украины. Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1987. 25 с.
106. Овчарова А.С. Численный метод расчета деформаций дна в системах открытых русел и каналов // Динамика сплошной среды. Вып. 52. Новосибирск. 1981. С. 78–87.
107. Панин А.В. Морфология и динамика врезанных галечно-валунных русел. Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ. 1991. 24 с.
108. Петров И.Б. Руслые переформирования и развитие береговых склонов Нижнего Иртыша // Сибирский географический сборник. Вып. 9. 1974. С. 35–89.
109. Петровский В.В., Сахарова Е.И. О переформированиях Красноборского переката (Сев. Двина) // Руслые исследования для улучшения судоходных условий. М.: Речной транспорт, 1958. С. 19–23.
110. Поляков Б.В. Гидрология бассейна р. Дон. Ростов н/Д. 1930. 328 с.
111. Попов И.В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство. Л.: Гидрометеоздат. 1965. 328 с.
112. Проектирование судовых ходов на свободных реках // Труды ЦНИИЭВТ. 1964. Вып. 36. 203 с.
113. Прокачева В.Г., Снищенко Д.В., Усачев В.Ф. Дистанционные методы гидрологического изучения зоны БАМ. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 224 с.
114. Работа водных потоков. М.: изд-во МГУ, 1987. 196 с.
115. Рашутин Д.В., Чалов Р.С. Типология, морфометрия и деформация русла на бесприточном участке среднего Терека // Вестн. МГУ. Сер. 5. География 1995. № 5. С. 72–79.
116. Ржаницын Н.А. Руслформирующие процессы рек. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 263 с.
117. Родевич В.М. К вопросу о классификации рек // Изв. ГТИ. 1932. № 35. С. 44–47.
118. Розовский И.Л. Движение воды на повороте открытого русла. Киев: изд-во АН УССР, 1957. 188 с.
119. Ромашин В.В. Типы руслвого процесса в связи с определяющими факторами // Труды ГТИ. 1968. Вып. 155. С. 56–63.
120. Россинский К.И., Дебольский В.К. Речные наносы. М.: Наука. 1980. 216 с.
121. Россинский К.И., Кузьмин И.А. Некоторые вопросы прикладной теории формирования речных русел // Проблемы регулирования речного стока. М.-Л.: изд-во АН СССР, 1947. С. 88–129.
122. Руднев А.С. О наводнениях на реках Якутии // Вопросы географии Якутии. Вып. 6. Л.: Гидрометеоздат, 1973. С. 48–57.
123. Рудой А.Н. Геоморфологический эффект и гидравлика позднеплейстоценовых йокульлаупов ледниково-подпрудных озер Алтая // Геоморфология. 1995. № 4. С. 61–76.
124. Руслвой режим рек Северной Евразии. М.: 1994. 336 с.
125. Руслые процессы на реках Алтайского края. Масштаб 1:1000000. М.: Комитет геодезии и картографии СССР. 1991.
126. Руслые процессы на реках СССР. Масштаб 1:4000000. Для высшей школы. ГУГК СССР. 1990.
127. Сахарюк Н.П. Определение руслформирующих расходов для рек южной части Приморья // Труды ДВНИИГМИ. 1980. Вып. 84. С. 94–96.
128. Сидорчук А.Ю. Морфология речного русла и определяющие ее факторы // Системный подход в геоморфологии. М.: 1988. С. 20–26.
129. Сидорчук А.Ю. Структура рельефа речного русла. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 126 с.
130. Сидорчук А.Ю., Михинов А.Е. Морфология и динамика руслвого рельефа // Итоги науки и техники. Серия "Гидрология суши". Том 5. 1985. М.: 161 с.

131. Снисченко Б.Ф. Связь типов русел с формами речных долин // Геоморфология. 1979. № 1. С. 18–26.
132. Сток наносов, его изучение и географическое распределение. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 240 с.
133. Талмаза В.Ф., Крошкин А.Н. Гидроморфометические характеристики горных рек. Фрунзе: Кыргызстан, 1968. 204 с.
134. Третьяков Е.В. Инженерно-геологическая оценка размыва берегов р. Оби в степном Алтае // Бюлл. НТИ. М.: 1964. № 2 (52). С. 23–26.
135. Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: изд-во МГУ, 1979. 232 с.
136. Чалов Р.С. Некоторые особенности руслового процесса горных рек // Метеорология и гидрология. 1968. №4. С. 70–74.
137. Чалов Р.С. Принципы типизации, морфология и деформации русел равнинных рек // Эрозионные и карстовые процессы на территории центра Русской равнины. М.: 1987. С. 3–27.
138. Чалов Р.С. Типы русловых процессов и принципы морфодинамической классификации речных русел // Геоморфология. 1996. № 1. С. 25–36.
139. Чалов Р.С. Факторы русловых процессов и иерархия русловых форм // Геоморфология. 1983. № 2. С. 16–26.
140. Чалов Р.С., Белый Б.В. Региональные особенности руслоформирующих расходов воды на реках Средней Азии // Известия АН СССР. Сер. География. 1984. № 12. С. 107–116.
141. Чернов А.В. Геоморфология речных пойм. М.: изд-во МГУ, 1983. 198 с.
142. Чернышов Ф.М. Повышение эффективности путевых работ на рукавных участках судоходных рек. Новосибирск: 1973. 324 с.
143. Шамов Г.И. Речные наносы. Л.: Гидрометеиздат, 1954. 347 с.
144. Шанцер Е.В. Аллювий равнинных рек умеренного пояса и его значение для познания закономерностей строения и формирования аллювиальных свит // Труды Геол. ин-та АН СССР. Сер. геология. 1951. Вып. 135. № 55. 275 с.
145. Шарашкина Н.С. Роль грядообразного движения наносов в формировании речных русел // Гидравлика сооружений и динамика речных русел. М.: изд-во АН СССР, 1959. С. 212–223.
146. Шеренков И.А. Прикладные плановые задачи гидравлики свободных потоков. М.: Энергия, 1978. 240 с.
147. Шукин И.С. Общая геоморфология. 1960. Том 1. М.: изд-во МГУ, 616 с.
148. Эберхардс Г.Я. Основные типы и сезонные переформирования берегов малых и средних свободномандрирующих рек средней Прибалтики // Геоморфология. 1986. № 3. С. 85–90.
149. Экспериментальная геоморфология. Вып. 2. М.: изд-во МГУ. 1969. 255 с.
150. Ярных Н.А. Деформации русла и берегов на крутой излучине // Труды ГГИ. 1978. Вып. 252. С. 56–62.
151. Ackers P., Charlton F.G. Meander geometry arising from varying flows // J. Hydrology. 1970. V. 11. № 3. P. 230–252.
152. Andrew E.D. Effective and bankfull discharge of streams in the Yampa River basin, Colorado and Wyoming // J. Hydrol. 1980. V. 46. № 3–4. P. 311–330.
153. Ashida K. The bed configuration and roughness of alluvial streams // Chapter 1. Bed configurations in alluvial streams. Trans. ASCE. 1973. V. 5. P. 107–113.
154. Baker V.R. Paleohydrology and sedimentology of Lake Missoula flooding in eastern Washington // Geol. Soc. Am. Spec. Pap. 1990. Vol. 144. 79 p.
155. Baker V.R. Stream-channel response to floods with examples from central Texas // Geol. Soc. Amer. Bull. 1977. № 8. P. 1057–1071.
156. Begin Z.B. The relationship between flow-shear stress and stream patterns // J. Hydrol. 1981. № 3–4. P. 307–319.
157. Bettes R., White W.R. Meandering and braiding of alluvial channels // Proc. Inst. Civ. Eng. 1983. V. 75. Sept. part 2. P. 525–538.
158. Billi P. A note on cluster bedform behavior in a gravel-bed river // Catena, 1988. V. 15. № 5. P. 473–481.
159. Blackburn W.H., Knight R.W., Schuster J.L. Saltcedar influence on sedimentation in the Brazos River // J. Soil and Water Conserv. 1982. V. 37. № 3. P. 298–301.
160. Braun D.D. Lithologic control of bedrock meander dimensions in the Appalachian Valley and Ridge province // Earth Surf. Process. and Landforms. 1983. № 3. P. 223–237.
161. Brayshaw A.C. Bed microtopography and entrainment thresholds in gravel-bed rivers // Bull. Geol. Soc. Am. 1985. V. 96. № 2. P. 218–223.
162. Brotherton D.L. On the origin and characteristics of river channel // J. Hydrol. 1979. V. 44. № 3–4. P. 211–230.
163. Butler P.R. Movement of cobbles in a gravel-bed stream during a flood season // Geol. Soc. Am. Bull. 1977. V. 88. № 8. P. 1072–1074.
164. Callander R. Instability and river channels // J. Fluid. Mech. 1969. V. 36. № 3. P. 465–480.
165. Carlston C.W. The relation of free meander geometry to stream discharge and its geometric implications // J. Amer. Science. 1965. V. 263. № 10. P. 864–885.
166. Carson M.A. The meandering-braided river threshold: a reappraisal // J. Hydrol. 1984. V. 73. P. 315–334.
167. Chalov R.S., Alabyan A.M. Channel Processes and River Ecosystems // Proceedings of the International Symposium. Vol. 1. St. Petersburg, Russia. 16–20 may 1995. P. 34–42.

168. Chang H. Minimum stream power and channel patterns // *J. Hydrol.* 1979. V. 41. № 3–4. P. 303–327.
169. Chang H. River technology and threshold // *J. of Hydraul. Eng.*, 1985, № 3, P. 503–519.
170. Chitale S.V. River channel patterns // *J. Hydraul. Div. ASCE.* 1970. V.96. HY-1. P. 201–222.
171. Cole W.S. The Interpretation of entrenched meanders // *J. Geol.* 1930. V. 38. № 5. P. 423–436.
172. Dal Cin R. "Pebble clusters": their origin and utilization in the study of paleocurrents // *Sediment. Geol.* 1968. V. 2. № 4. P. 233–241.
173. Davies T.R., Sutherland A.J. Resistance to flow past deformable boundaries // *Earth Surf. Processes.* 1980. V. 5. P.175–179.
174. Dolan R.E., Howard A., Trimble D. Structural control of the rapids and pools of the Colorado River in the Grand Canyon // *Science.* 1978. V. 202. № 4365. P. 629–631.
175. Dury G.H. Theoretical implication of underfit stream // *US Geol. Surv. Prof. Pap.* 1965. 452-C. 43 p.
176. Engelund F., Skovgaard O. On the origin of meandering and braiding in alluvial streams // *J. Fluid. Mech.* 1973. V. 57. № 2. P. 289–302.
177. Fergusson R.J. Regular meander path models // *Water Resour. Res.* 1973. № 4. P. 1079–1086.
178. Ferguson R.J. The threshold between meandering and braiding // *Channels and Channel Contr. Struct.* 1984. № 6. P. 15–29.
179. Fredsoe I. Meandering and braiding of rivers // *J. Fluid. Mech.* 1978. V.84. № 4 P. 609–624.
180. Graf W.L. Fluvial adjustment to the spread of tamarisk in the Colorado Plateau region // *Bull. Geol. Soc. Amer.* 1978. V. 89. № 10. P. 1491–1504.
181. Gregory K.J., Walling D.E. Drainage basin form and process: a geomorphological approach. London. 1973. 456 p.
182. Hack J.T. Postglacial drainage evolution and stream geometry in Ontomgon area, Michigan // *Geol. Surv. Prof. Pap.* 1965. 504-B. 40 p.
183. Hadley R.F., Eschner T.R. Effects of water development on the hydrology and morphology of the Platte River channel, south-central Nebraska // *IAHS Publ.* 1982. № 137. P. 3–10.
184. Harvey A.M. Some aspects of the relation between channel characteristics and riffle spacing in meandering channels // *Wn. J. Sci.* 1975. V. 275. P. 470–478.
185. Henderson F.M. Open-channel flow. Macmillan. New-York. 1966. 552 p.
186. Hickin E. J. The development of meanders in naturel river cannels // *Amer. J. Science.* 1978. V. 274. № 4. P. 414–442.
187. Hooke R.L. Distribution of sediment transport and clear stress in a meander bend // *J. Geology.* 1975. V. 83. № 5. P. 543–565.
188. Hooke J.H. An analysis of processes of river bank erosion // *Hidrology.* 1979. V.42. № 1-2. P. 39–62.
189. Ikeda S. Self-formed straight channel in sandy beds // *Hydraul. Div. Pro. Amer. Soc. Civ. Eng.* 1981. № 4. P. 389–406.
190. Jackson W.L., Boschta R.L. Influence of increased sand delivery on the morphology of sand and gravel channels // *Water Res. Bull.* 1984. V. 20. № 4. P. 527–533.
191. Karcs I. Development of a meandering thalweg in a staght erodible laboratory channel // *J. Geology.* 1971. V. 79. № 2. P. 234–240.
192. Keller E.A. Development of stream channels:a five-staght model// *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1972. V. 83. № 5. P. 1531–1536.
193. Keller E.A. Areal soning of bed-load material: the hypothesis of velocity reversal // *Geol. Soc. Ani. Bull.* 1971. V. 82. № 3. P. 753–756.
194. Keller E.A., Melhorn, W.N. Rhythmic spacing and origin of pools and riffles // *Geol. Soc. Wn. Bull.* 1978. V. 89. № 5. P. 723–730.
195. Kellerhals R. Stable channels with gravel-paved bed. *J. Waterways and Harbours Div.* 1967. V. 93. № W W1. P. 63–84.
196. Kellerhals R., Churh M., Bray D.J. Classification and analysis of river processes // *J. Hydraul. Div. proc. Amer. Soc. Civ. Eng.* 1976. № 7. P. 813–829.
197. Komar P.D. Shapes of streamlintd island on the Earth and Marth: Experiments and analysesof the minimum-drag form // *Geology.* 1983. № 11. P. 651–654.
198. Lacey G. Uniform flow in alluvial rivers and channels – *Proc. Inst. Civ. Eng.* 1935. V. 237. P. 421–451.
199. Lane E.A. A study of the shape of channels formed by natural streams flowing in erodible material // *U.S. Army Eng. Corps. Div. Missouri River, M.R.D. Sediment Ser.* 1957. Rep. N V.F. 981. № 9. 106 p.
200. Leopold L.B., Langbein W.B. River meanders // *Scientific Amer.* 1966. V. 214, № 6. P. 60–70.
201. Leopold L.B., Wolman M.G. River-channel patterns: braided, meandering and straight // *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper.* 1957. № 282-B. P. 1–85.
202. Leopold L.B., Wolman M.C. Rivers meanders // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1960. V. 71. № 6. P. 769–794.
203. Levey R.A., Kerfve B., Getzen R.T. Comparison of bed form variance spectra within a meander belt during flood and average discharge // *J. Sed. Petrol.* 1980. V. 50. № 1. P. 149–155.
204. Levin J. Initiation of bedforms and meanders in coarse greind sediment.. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1976. V. 87. № 2. P 281–285.
205. Levin J., Bradly S.B., Macklin M.G. Historical valley alluviation in mid-Wales // *J. Geol.* 1983. V. 18. № 4. P. 331–350.

206. Matthes G.H. Basic aspekt of stream meanders // Amer. Geoph. Union. Frans. 1941. P. 632–636.
207. Miall A.D. A review of the braided-river depositional environment // Earth Sci. Rev. 1977. V.13. P. 1–62.
208. Moore R.C. Origin of inclosed meanders on stream of Colorado Plateau // J. Geology. 1926. V. 34. № 1. P. 29–57.
209. Nadler C.T., Shumm S.A. Metamorphosis of South Platte and Arkansas River, Eastern Colorado // Phys. Geogr. 1981. V. 2. № 2. P. 95–115.
210. Nanson G.C. Regional trend to meander migration // J. Geol. 1980. 88. №1. P. 100–108.
211. Neff E.L. Discharge frequency compared to long-term sediment yields // Proc. Symposium on River Morphology. IAHS. 1967. Pub. 75. P. 236–242.
212. Nolan K.M., Lisle T.E., Kelsey H.M. Bankfull discharge and sediment transport in northwestern California // Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim. Proc. Corvallis Symposium. IAHS. 1987. Pub. 165. P. 439–448.
213. Nomenclature for bed forms in alluvial channels. Report by task force on bed forms in alluvial channels // J. Hydr. Div. ASCE. 1966. V. 92. HY3. P. 51–64.
214. Ostercamp W.R. Gradient, discharge and particle-size relations of alluvial channels in Kansas, with observations on braiding // Amer. J. Sci. 1978. V. 278. № 9. P. 1253–1268.
215. Ozaki S., Hayashi T. On the formation of alternating bars and braids and the dominant meander length // Proc. Jap. SCE. 1983. V. 333. P. 109–118.
216. Page K.L., Heerdegen R.G. Channel change on the lower Manawatu river // Geographer. 1985. № 1. P. 35–38.
217. Parker G. On the cause and characteristic scales of meandering and braiding in rivers // J. Fluid Mech. 1976. V. 76. P. 457–480.
218. Reid I., Frostick L., Layman J. The influence and nature of bedload transport during flood flows in coarse-grained alluvial channels // Earth Surf. Proc. Landf. 1985. V. 10.
219. Richards K.S. The formation of ripples and dunes on an erodible bed // J. Fluid Mech. 1980. V. 99. № 3. P. 597–618.
220. Rust B.R. Sedimentation in arid-zone anastomosing fluvial system: Cooper creek, Central Australia // J. Petrol. 1981. 51. № 3. P. 745–755.
221. Schumm S.A. Meander wavelength of alluvial rivers // Science. 1967. V. 157. № 3796. P. 1549–1552.
222. Schumm S.A. Sinuosity of alluvial rivers on the Great Plains // Geol. Soc. Amer. Bull. 1963. V. 74. P. 1089–1100.
223. Schumm S.A. The fluvial system. 1977. 338 p.
224. Schumm S.A., Khan H.R. Experimental study of channel patterns // Geol. Soc. Am. Bull. 1972. V. 83. P. 1755–1770.

225. Senour S.A. New project for stabilizing and lower Mississippi river // Proc. Amer. Soc. Civ. Eng. 1946. № 2. P. 431–476.
226. Shaw J., Kellerhals R. Paleohydraulic interpretation of antidune bedforms with applications to antidunes in gravel // J. Sed. Petrol. 1977. V. 47. № 1. P. 257–266.
227. Shen H.W., Komura S. Meandering tendencies in straight alluvial channels // Hidraul. Div. Proc. Amer. Soc. Civil. Eng. 1968. V. 94. № HL4. P. 997–1016.
228. Shen H.W., Schumm S.A., Doehring D.O. Stability of stream channel patterns // Transp. Res. Rec. 1979. № 736. P. 22–28.
229. Shepherd R.G. Incised river meanders: evolution in simulated bedrock // Science. 1972. V. 178. № 4059. P. 409–411.
230. Simons D.B., Richardson F.V. The effect of bed roughness on depth discharge relation in alluvial channels // US Geol. Surv. Prof. Paper. 422-J. 1967. 61 p.
231. Sukegawa N. Conditions for the occurrence of river meanders // J. Fakult. Eng. Univ. Tokyo. 1970. V. B30. № 4. P. 289–306.
232. Tarr W.A. Intrenched and incised meanders of some stream on the northern slope of Ozark Plateau in Missouri // J. Geology. 1924. V. 32. № 7. P. 583–600.
233. Teisseyre A.K. Pebble clusters as a directional structure in fluvial gravels: modern and ancient examples // Geol. Sudetica. 1977. V. 12. № 2. P. 79–89.
234. Thiel G.H. Giant current ripples in coarse fluvial gravels // J. Geol. 1932. V. 40. № 5. P. 452–458.
235. Tinkler K.J. Active Valley meanders in south-central Texas and their implications // Geol. Soc. Amer. Bull. 1971. V. 82. № 7. P. 1783–1800.
236. Wolman M.G., Miller J.P. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes // J. Geol. 1960. V. 68. P. 54–74.
237. Yalin M.S. Mechanics of sediment transport. Oxford. Pergamon. 1972. 290 p.
238. Yang C.T. On river meanders // J. Hydrology. 1971. V. 13. № 3. P. 231–233.
239. Your Lianyan. A study of the formation and evolution of braided channels with stable islands: the middle and lower reaches of the Yantze River // Inter. Geomorphol. Pt-1. 1987. P. 649–662.

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Типизация речных русел	7
1.1. История исследований и развитие представлений о морфодинамике речных русел	7
1.2. Принципы современных классификаций речных русел	12
1.3. Морфодинамическая классификация русел рек	20
Глава 2. Гидролого-морфологический анализ условий формирования русел разного типа	35
2.1. Анализ QI-диаграмм и морфометрических параметров	35
2.2. Математическое моделирование	43
Глава 3. Факторы формирования русел равнинных рек	48
3.1. Природные факторы	48
3.2. Руслообразующие наносы и устойчивость русла	58
3.3. Антропогенные факторы	71
Глава 4. Относительно прямолинейные неразветвленные русла	87
4.1. Критерии выделения прямолинейных русел	87
4.2. Генезис и типизация прямолинейных русел	92
4.3. Критериальные и гидролого-морфометрические зависимости	99
4.4. Деформации прямолинейных русел	106
4.5. Регулирование прямолинейных русел	111
Глава 5. Излучины (извилистые русла)	115
5.1. Генезис и типизация излучин	115
5.2. Динамика потока на излучинах	125
5.3. Транспорт наносов, рельеф дна и деформации свободных излучин	129
5.4. Деформации адаптированных излучин	139
5.5. Развитие врезанных излучин	143
5.6. Гидролого-морфологические зависимости	148
5.7. Прогноз русловых деформаций и принципы регулирования меандрирующих русел	160
Глава 6. Разветвленные русла	164
	164

6.2. Распределение расходов воды и наносов по рукавам	184
6.3. Гидролого-морфометрические зависимости	190
6.4. Развитие разветвлений в узлах слияния рек	194
6.5. Расчет и прогноз деформаций разветвленного русла	201
6.6. Основные приемы регулирования разветвленных русел	206
Глава 7. Галечно-валунные русла	214
7.1. Общие особенности формирования и типизация галечно-валунных русел	214
7.2. Рельеф русла	217
7.3. Транспорт руслообразующих наносов и русловые деформации	230
7.4. Особенности динамики потока	241
7.5. Регулирование русла	242
Глава 8. Географические закономерности русловой морфодинамики (на примере Северной Евразии)	249
8.1. Русловые процессы и физико-географическая среда	249
8.2. Районирование Северной Евразии по русловому режиму рек	254
8.3. Географическое распространение морфодинамических типов русел равнинных рек	259
8.4. Региональные аспекты регулирования русел	268
Список литературы	272

Научное издание

Р.С.Чалов, А.М.Алабян, В.В.Иванов,
Р.В.Лодина, А.В.Панин

Морфодинамика русел равнинных рек

(под редакцией профессора Р.С.Чалова)

Печатается по постановлению
межвузовского научно-координационного совета
по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ

Художник О.В.Кураленко
Редактор Л.Н.Федосеева

Подписано к печати 08.08.1998
Формат 72х108 1/16. Бумага офсет № 1, 80 г/м
Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 18,0. Уч.-изд. л. 20,0.
Тираж 500 экз.
Тип. зак. № 369С, Москва

Издательство ГЕОС
Изд. лицензия Л.Р. № 050112 от 09.03.95
109017, Москва, Пыжевский пер., 7.
Тел.: (095) 230-80-92
Факс: (095) 951-04-43