

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Географический факультет

Р.С. Чалов, А.С. Завадский, А.В. Панин

РЕЧНЫЕ ИЗЛУЧИНЫ

<http://makkaveev-lab.narod.ru>

Москва – 2004

ISBN 5-89575-1
УДК 627.152.122

Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В. Речные излучины.

Научный редактор Р.С. Чалов. М.: изд-во МГУ. 2004 г. 371 с. илл.

В книге впервые с единых методологических позиций рассмотрена вся совокупность вопросов, связанных с процессом меандрирования. Дан анализ механизма формирования и эволюции речных излучин, их гидролого-морфологические характеристики. Предложены схемы развития вынужденных, адаптированных и врезанных излучин. Впервые рассмотрены палеогеографические аспекты развития речных излучин.

Рассчитана на специалистов в области русловых процессов, гидрологов, геоморфологов, гидротехников.

*Выполнено при финансовой поддержке Российского фонда
фундаментальных исследований (проекты №№ 03-05-64302, 03-05-64021) и
гранту Президента РФ для поддержки ведущих научных школ
(проект НШ-1443.2003.5)*

*Печатается по решению Межвузовского научно-координационного совета
по проблемам эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ*

Рецензенты: доктор географических наук, профессор Н.И. Алексеевский
кандидат географических наук, доцент А.Н. Кичигин

*Посвящается 250-летию Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова*

*и
95-летию со дня рождения и 50-летию
научной работы в МГУ профессора
Маккавеева Николая Ивановича
(1908-1983)*

© Российский фонд фундаментальных
исследований
© Коллектив авторов
© Географический факультет МГУ

Moscow State Lomonosov University
Faculty of Geography

R.S. Chalov, A.S. Zavadsky, A.V. Panin

RIVER MEANDERS

Moscow – 2004

ISBN 5-89575-1

Chalov, R.S., Zavadsky, A.S., Panin, A.V. River meanders.

Scientific editor Chalov, R.S. Moscow University Press, 2004. 371 p. pictures

The book describes different aspects of river meandering: physical reasons of straight channel instability and origin of meanders, flow hydraulics and sediment transport in channel bends, relationship between channel parameters and hydrological characteristics (hydromorphological equations), development of individual meanders and long-term evolution of meandering channels in a palaeogeographical context.

The publication is intended for specialists and students in river hydrology and geomorphology, river management and engineering.

*The research was fulfilled under RF President Grant
to support the Leading Scientific Schools (HIII 1443.2003.5) and Russian Fund
of Basic Research (Projects № 03-05-64021, № 03-05-64302)*

Reviewers: Doctor of Science (Geography), professor N.I. Alexeevsky
PhD (Geography), associate professor A.N. Kichigin

*Посвящается 250-летию Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова*

*и
95-летию со дня рождения и 50-летию
научной работы в МГУ профессора
Маккавеева Николая Ивановича
(1908-1983)*

© Russian Fund of Basic Research
© Team of contributors
© Faculty of Geography, Moscow State University

ОГЛАВЛЕНИЕ

<u>Введение</u>	6
<u>Глава 1. Излучины как морфодинамический тип русла</u>	9
1.1. Излучины и их разновидности в классификациях речных русел	9
1.2. Морфологические элементы и параметры излучин	27
1.3. Критерии выделения извилистых, разветвленных и относительно прямолинейных, неразветвленных русел	30
1.4. Типизация излучин	35
<u>Глава 2. Формирование излучин</u>	44
2.1. Причины и механизм образования излучин	44
2.2. Условия формирования излучин	51
2.3. Динамика потока и движение наносов на изгибе русла	68
<u>Глава 3. Свободные излучины</u>	95
3.1. Формы и механизм смещения излучин	95
3.2. Стадии развития и условия спрямления излучин	110
3.3. Асимметрия формы излучин	129
3.4. Гидролого-морфологический анализ	138
3.5. Изменение параметров излучин по длине реки	164
3.6. Разветвленно-извилистые русла и меандрирование рукавов	168
3.7. Излучины динамической оси потока в прямолинейном русле	182
<u>Глава 4. Вынужденные и адаптированные излучины</u>	193
4.1. Излучины адаптированного русла	193
4.2. Вынужденные и вписанные излучины широкопойменного русла	198
<u>Глава 5. Врезанные излучины</u>	210
5.1. Условия формирования врезанных излучин	210
5.2. Генетические типы врезанных излучин	224
5.3. Параметры врезанных излучин и их связь с литологией горных пород и водностью рек	229
5.4. Макроизлучины и изгибы русла, не связанные с процессом меандрирования ..	232
<u>Глава 6. Рельеф русла на излучинах</u>	251
<u>Глава 7. Меандрирование русел и формирование пойм</u>	259
7.1. Образование, морфометрия и распространение пойм меандрирующих рек	259
7.2. Формирование рельефа пойм меандрирующих рек	263
<u>Глава 8. Палеогеографический анализ свободного меандрирования</u>	276
8.1. Методика палеоруслового анализа	276
8.2. Трансформация меандрирующих русел на рубеже позднеледниковья и голоцена	287
8.3. Основные тенденции развития меандрирующих русел в голоцене	297
<u>Глава 9 География меандрирующих русел</u>	312
9.1. Географические факторы меандрирования русел	312
9.2. Региональный анализ распространения меандрирующих рек (на примере Северной Евразии)	323
9.3. Характеристика меандрирования рек в бассейне реки (на примере верхней и средней Оби)	335
9.4. Оценка русловых деформаций на больших реках с меандрирующим руслом (на примере Оки и Вычегды)	342
<u>ЛИТЕРАТУРА</u>	350

ВВЕДЕНИЕ

Речные излучины (меандры) – феномен, на который обращали внимание на всех этапах освоения рек. Отсюда и народные корни самого термина – излучина, излука, лука (по В.И. Далью: «излука, излучина – крутой изгиб реки», «лука – изгиб, погиб, кривизна; ...поемный луг, огибаемый рекой»), и наличие международных терминов для их обозначения – меандры (river meander), меандрирование рек, вошедшие в обиход благодаря первому научному описанию сильно извилистой реки Меандр в Малой Азии. Извилистость русел в целом (собственно излучины рек), их рукавов на разветвленных реках или стрежня потока вокруг побочной делает это явление практически всеобщим, хотя на излучины самого русла, т.е. изгибы потока, нашедшие отражение в форме береговой линии, приходится около 70% длины всех рек (Северная Евразия). При этом одни излучины находятся среди затопляемой в периоды высокой воды поймы, постоянно меняют свою конфигурацию, в их пределах происходят размывы берегов, углубляются одни участки русла и формируются мелководные перекаты на других, со временем они спрямляются с образованием речных стариц и старичных озер (тоже народные термины, вышедшие в научный лексикон); другие излучины практически не меняют во времени свои очертания в плане, имеют высокие незатопляемые берега, которые не размываются рекой, отступая лишь вследствие провоцируемых потоком гравитационных процессов на склонах (оползней, обвалов). На одних русловые деформации проявляются повседневно, сказываясь на условиях использования рек в различных отраслях экономики и жизнедеятельности людей на их берегах; на других перестроения русла можно установить только на протяжении длительных отрезков времени, соизмеримых с геологическими периодами, они отражаются в морфологии долин и представляют интерес в основном для геоморфологических построений.

Речным излучинам и процессам меандрирования посвящена обширная литература. Вся история развития учения о русловых процессах (русловедения) связана с изучением этого феномена. При этом все исследования можно разделить на два основных направления: гидродинамическое, в котором изучались кинематика потока на изгибе русла, циркуляционные течения, распределение скоростей потока и т.д., и гидролого-морфологическое, акцентирующее внимание на формах излучин, их эволюции, смещении, стадиях развития, условиях спрямления, размывах берегов. Первое в основном опирается на данные лабораторных экспериментов (И.Л. Розовский, М.А. Великанов, А.Н. Ляпин и др.), теоретические разработки (К.В. Гришанин, Н.Е. Кондратьев, В.И. Замышляев) и реже – на результаты натурных исследований. Второе, наоборот, развивалось главным образом при изучении излучин и процесса меандрирования на конкретных реках (И.В. Попов, Н.И. Маккавеев, Р.С. Чалов, А.Ю. Сидорчук), тогда как лабораторные ис-

следования в этом направлении весьма немногочисленны (наверное, наиболее серьезными среди них являются работы Н.И. Маккавеева с сотрудниками [Экспериментальная геоморфология, 1969]). Попытка объединить эти направления в одном труде на основе единого методологического подхода была предпринята Н.И. Маккавеевым [1955] и в коллективной монографии ГГИ «Русловой процесс» [Кондратьев, Ляпин и др., 1959]. Эти работы, опубликованные уже почти полвека тому назад, опирались на результатах исследований, выполненных к тому времени. Несмотря на это они до сих пор сохраняют свое значение, а полученные в них выводы и модели являются и сейчас основополагающими.

Тем не менее в последующие десятилетия продолжающиеся исследования, особенно натурные, получившие наибольший размах в 60-80-е годы XX столетия, позволяют по-новому подойти к решению ряда вопросов, связанных с развитием излучин как следствия взаимодействия потока и русла, уточнить и детализировать некоторые представления, в частности, о стадийности процесса меандрирования, о гидролого-морфологических зависимостях извилистого русла, об асимметрии форм излучин и т.д. Был выполнен ряд специальных исследований, результаты которых разбросаны в различных журналах, сборниках статей, ведомственных изданиях и трудах научно-исследовательских институтов.

При натурном изучении излучин основное внимание уделяется свободному меандрированию. Более того, в трудах ГГИ реки с врезанными излучинами относятся к немеандрирующим и практически исключаются из объектов исследований. По существу этот тип излучин является предметом изучения не русловедения (учения о русловых процессах), а флювиальной геоморфологии. Исключение составляет лишь работы Н.И. Маккавеева и Н.В. Хмелевой, в которых впервые врезанные излучины были рассмотрены с позиций механизма русловых процессов. Впоследствии этот подход получил дальнейшее развитие, но главным образом в рамках исследований, выполненных в МГУ.

В последние два десятилетия возник и стал активно развиваться палеогидрологический подход к изучению процесса меандрирования, основанный не только на восстановлении бывших за время формирования поймы положений меандрирующего русла, но и определении их возраста и той ландшафтно-климатической обстановки, которая имела место на разных этапах развития и спрямления речных излучин. Если изучение самого процесса свободного меандрирования связано с решением многих конкретных задач, возникающих при использовании рек, то палеорусловой анализ открывает пути к разработке долгосрочных прогнозов русловых деформаций в связи с глобальными изменениями природной среды и климата, в том числе под влиянием все возрастающей хозяйственной деятельности.

Все это создало предпосылки для выполнения обобщений на современном уровне имеющихся данных о речных излучинах всех типов и разновидностей, их развитии, включая палео- и исторические аспекты про-

блемы. Попытку такого обобщения предприняли авторы книги, опираясь в основном на материалы собственных исследований излучин, в первую очередь, натурных, выполненных в ходе экспедиционных работ на многих реках бывшего СССР, а также на анализ картографических и аэрокосмических данных за многолетний период. Вместе с тем широко использованы и обобщены литературные данные, причем в ряде случаев главное внимание уделялось обзору зарубежной литературы, сравнительно слабо известной в России. Некоторые разделы книги носят компилятивный характер, поскольку рассмотренные в них вопросы авторы специально не исследовали, но без их освещения обобщение было бы неполным. Очевидно, что некоторые выводы носят дискуссионный характер, другие – постановочный и требуют дальнейшей разработки.

Авторы благодарят своих коллег по экспедиционным исследованиям, а также принимавшим участие в обсуждении на разных этапах результатов исследований, в первую очередь, докторов географических наук Н.И. Алексеевского, К.М. Берковича, А.Ю. Сидорчука, кандидатов географических наук А.М. Алабяна, А.А. Зайцева, В.В. Иванова, Б.В. Матвеева, С.Н. Рулеву, В.В. Суркова, А.В. Чернова.

В основу книги положены две кандидатские диссертации, выполненные с интервалом почти в 10 лет А.В. Паниным и А.С. Завадским под научным руководством профессора Р.С. Чалова. При этом А.С. Завадский занимался вопросами свободного меандрирования, А.В. Панин – развитием врезанных излучин.

Отдельные разделы книги написаны: Р.С. Чаловым (Введение; разделы 1.3, 3.6, 3.7, 4.1, 4.2, 7.1, 7.2), А.С. Завадским (разделы 3.3, 3.5, 9.1, 9.4), А.В. Паниным (разделы 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 8.1, 8.2, 8.3). Совместно всеми тремя авторами написаны разделы 2.1, 2.2, Р.С. Чаловым и А.С. Завадским – разделы 1.1, 1.2, 1.4, 3.1, 3.2, глава 6, 9.2, 9.3, Р.С. Чаловым и А.В. Паниным – раздел 2.3, А.С. Завадским и А.В. Паниным – раздел 3.4. Графическое оформление книги выполнено Н.В. Анисимовой, которой авторы выражают особую благодарность. Общее руководство работой над книгой и научное редактирование осуществлял Р.С. Чалов.



ГЛАВА 1



ИЗЛУЧИНЫ КАК МОРФОДИНАМИЧЕСКИЙ ТИП РУСЛА



1.1. Излучины и их разновидности в классификациях речных русел

Вопросы типизации речных русел неоднократно рассматривались как в отечественной, так и в зарубежной русловедческой литературе. При этом накопление информации о формах русел, особенностях их деформаций, расширение географии исследований, применение новых методов изучения русловых процессов приводило к изменению ранее предложенных классификаций, их дополнению, а также разработке новых классификационных схем, основывающихся иногда на различных принципах. Первые классификации речных русел появились в конце 30-х годов XX столетия. Характерно, что даже основоположники учения о русловых процессах В.М. Лохтин и Н.С. Лелявский не выделяли в явном виде русла, отличающиеся по своей морфологии, обращая главное внимание на формирование перекатов. Правда, Н.С. Лелявский [1948] отмечал неодинаковую структуру потока на излучинах и возле островов (в разветвлениях) и, следовательно, различия в режиме формирующихся здесь перекатов и методах их углубления для улучшения условий судоходства.

Большее значение морфологии русла придавалось в геоморфологической литературе, посвященной работе рек как рельефообразующему фактору. Так, А.Н. Краснов [1897], описывая излучины («змееобразные извивы» или «излучины») как наиболее характерную форму русел и механизм их развития вплоть до спрямления, указывал в то же время, что в среднем и нижнем течении реки часто разветвляются на рукава. При этом «если река, извиваясь, вместе с тем быстро углубляет свое русло, получая все более и более высокие берега, извилины теряют возможность перемещаться, они становятся постоянными, закрепленными eingeseckte Mäander (encaissé)» [с. 185]. По существу А.Н. Краснов впервые выделил два типа излучин – извилины, формирующиеся «если река течет по рыхлой породе» [с. 179] и закрепленные меандры, что соответствует свободным и врезанным излучинам в современной литературе.

Позднее И.С. Щукин [1933] рассматривал первичные излучины (меандры) – изгибы реки, связанные с рельефом земной поверхности, и вторичные, формирующиеся в результате работы самого водного потока. Впоследствии он [Щукин, 1960] уточнил, что «излучины реки на пойменной равнине принято называть блуждающими меандрами» [с. 248], а «непосредственно окаймленные крутыми и высокими бортами долины, называются ... врезанными меандрами» [с. 236]. Одновременно он стал выделять реки,

разделенные островами на рукава, хотя развитие долины реки связывал исключительно с меандрированием русел. По Я.С. Эдельштейну [1947], «если тальвег долины описывает большие излучины, имеющие формы дуг, нередко с сильно сближенными концами, то такие участки называются меандрами... В том случае, когда вся долина глубоко врезана в земную кору и извилиста, ее меандры называются врезанными» [с. 90].

Таким образом, в «доклассификационный» период развитие речных русел рассматривалось, главным образом, с точки зрения условий меандрирования, причем выделялись две разновидности излучин – свободные и врезанные. Вместе с тем, для больших рек были описаны многорукавные русла, однако только А.Н. Краснов [1897] выделил «четыре случая» крупных разветвлений и разветвления, связанные с небольшими островками (вслед за И.В. Мушкетовым он назвал их осередками), разделяющими реку на рукава (воложки на Волге), соединяющиеся между собой «проранами, проносами или протоками» [с. 197-198].

Одна из первых классификаций русел была основана на оценке степени их устойчивости – интегральной характеристике интенсивности перестроений. В 30-е годы М.И. Львович [1938], используя предложенный В.М. Лохтиным [1948] критерий – число Лохтина $L = d/H$ (здесь d – крупность наносов; H – километрическое падение, определяющее силу скоростного напора потока), разделил русла рек на устойчивые и неустойчивые. Впоследствии были предложены различные модификации этой классификации. М.А. Великанов [1958] выделял уже четыре типа русла по степени устойчивости: 1 – реки повышенной устойчивости; 2 – реки нормальной устойчивости; 3 – равнинные реки пониженной устойчивости; 4 – неустойчивые реки. Одновременно предпринимались попытки связать устойчивость русла с условиями развития на реках тех или иных морфодинамических типов русла. Однако субъективность подходов приводила нередко к противоречивым результатам: в частности, развитие излучин (меандрирование) разными исследователями соотносилось с различной степенью устойчивости русел.

Иные критерии оценки устойчивости русел были предложены С.Т. Алтуниным [1962], З.И. Гринберг [1950], А.В. Караушевым [1975], Н.И. Маккавеевым [1955, 1971] и другими. Ими предлагались свои классификационные схемы, в которых не только определялись граничные значения показателей для русел разного типа, выделенных по интенсивности деформаций, но и оценивалось развитие тех или иных морфодинамических типов русел, соответствующих определенным диапазонам показателей устойчивости. Так, по С.Т. Алтунину [1962], блуждающие реки (I тип по устойчивости русел) «на одних участках делятся на рукава (протоки), а на других образуют меандры», реки неустойчивые и с малой устойчивостью русел (II тип) «образуют преимущественно устойчивые в плане меандры» (с. 27); в то же время для устойчивых русел (III тип) морфологические характеристики не приводятся.

Н.И. Маккавеев видоизменил число Лохтина, предложив его модификацию в виде коэффициента стабильности $K_c = (d/B_p I) 1000$, где I – уклон реки в безразмерном выражении; B_p – средняя ширина меженного русла в метрах. Используя этот показатель и число Лохтина, Н.И. Маккавеев [1971] и Р.С. Чалов [1979] предложили разделять русла на неустойчивые, малоустойчивые, относительно устойчивые, устойчивые. Впоследствии этот перечень был дополнен сначала абсолютно устойчивыми [Чалов, 1997], а затем абсолютно неустойчивыми руслами [Чалов и др., 2000]. При этом ими были получены эмпирические связи между показателями устойчивости русла (L , K_c) и параметрами излучин (радиусом кривизны r , шагом L) и разветвлений [Экспериментальная геоморфология, 1969; Чалов, 1979].

Применение данной классификации к меандрирующему руслу показало, что теоретически свободное меандрирование может развиваться на реках с различной устойчивостью русла, за исключением абсолютно устойчивых, для которых характерны только врезанные излучины. В большинстве случаев свободное меандрирующее русло является относительно устойчивым: $L=5-10$; $K_c=15-20$ [Чалов, 1979]. Условия, когда свободные излучины развиваются в устойчивом русле, встречаются реже. Для равнинных рек примером меандрирующего устойчивого русла служит нижнее течение Днестра (от Дубоссарской ГЭС до устья). Пойма на этом участке сложена связными глинистыми отложениями, что существенно снижает интенсивность русловых деформаций и способствует развитию свободных излучин специфической формы – «пальцеобразных». Похожие меандрирующие русла, формирующиеся в глинистых отложениях, встречаются на некоторых реках Заволжья (Большой Иргиз и др.) [Шанцер, 1951]. Одной из разновидностей связных пойменных отложений являются многолетнемерзлые грунты. Они также повышают устойчивость русла и замедляют интенсивность русловых переформирований. Однако подобные примеры не вписываются в классификацию устойчивости русел Н.И. Маккавеева – Р.С. Чалова, т.к. для оценки устойчивости к размыву связных пойменных отложений не применимы ни число Лохтина, ни коэффициент стабильности Н.И. Маккавеева. Для них следует использовать иные критерии, учитывающие специфику размыва подобных отложений, как это сделано, например, для галечно-валунных русел [Чалов, 1997], применительно к которым абсолютно устойчивые русла разделены на четыре подтипа по степени устойчивости в зависимости от формы поперечного сечения русла, которая не зависит от крупности наносов.

Для неустойчивого русла меандрирование также не характерно. Излучины в нем быстро разрушаются при блуждании динамической оси потока [Экспериментальная геоморфология, 1969]. Поэтому, например, в нижнем течении Вилюя снижение коэффициента стабильности K_c с 10-15 до 4 [Водные пути..., 1995] приводит к переходу от меандрирующего русла к разветвленно-извилистому. Аналогичная смена типа русла, вплоть до разветвленного, наблюдается на Вычегде [Белый Иванов и др., 2001]. С другой

стороны, на Хуанхэ – реке с очень большим стоком наносов и абсолютно неустойчивым руслом Р.С. Чалов и др. [2000] выделили блуждающие и относительно стабильные излучины. Если последние в целом соответствуют общепринятым представлениям о морфологии и динамике излучин, то первые отличаются очень большими скоростями смещения (от 25-25 до 120-150 м/год), преимущественно пологой формой и быстрым (через 2-3 года) спрямлением.

Другим направлением в типизации речных русел является выделение равнинных, полугорных и горных рек. Оно основывается на том, что в зависимости от степени кинетичности потока возникают различные формы транспорта наносов и механизмы его взаимодействия с руслом, что сказывается в принципиальных различиях в руслоформирующей деятельности рек в горах и на равнинах. Первым обосновал необходимость выделения соответствующих трех типов русел Н.И. Маккавеев [1955]. Для горных рек характерны бурные потоки, русла порожисто-водопадные или с безгрядовой формой («гладкая фаза») движения наносов, и только при сравнительно небольших для горных рек уклонах – гряды наносов, имеющие форму антидюн (русла с развитыми аллювиальными формами [Чалов, 1979]). Первые два условия не способствуют формированию излучин. В последнем случае (русла с развитыми аллювиальными формами) наличие гряд (побочней) обуславливает извилистость русла, но активное врезание горных рек при стабилизирующем воздействии на положение потока коренных скальных берегов, приводит к развитию врезанных излучин, абсолютно преобладающих в горах. Теоретически формирование свободных излучин возможно там, где реки пересекают межгорные впадины; однако низкая (для галечно-валунного аллювия) устойчивость русла в их пределах, как правило, сопровождается разрушением зарождающихся излучин и формированием разветвлений, наиболее сложных по своей морфологии и режиму деформаций. Такие же условия формирования излучин характерны для полугорных рек, являющихся по русловым процессам переходными от горных к равнинным. При ограниченных условиях развития русловых деформаций на них образуются врезанные излучины (в низкогорном поясе гор); на предгорных равнинах, где происходит обычно резкое уменьшение уклона, расширение долин рек и смена скальных бортов сложенными легкоразмываемыми отложениями, также формируются разветвленные русла, и лишь по мере удаления от гор возможно развитие свободноеандрирующего русла. Аналогичный подход по отношению к горным рекам применили В.Ф. Талмаза и А.Н. Крошкин [1968], которые подразделили их на участки истока, верхний, средний и нижний (соответствующие порожисто-водопадным, горным с неразвитыми аллювиальными формами, горным с развитыми аллювиальными формами и полугорным, по Р.С. Чалову [1979]), а по очертаниям в плане – прямолинейные (или слабоизогнутые), извилистые и разбросанные (распадающиеся на рукава и протоки – терминология А.Н. Крошкина); по-

следние, в свою очередь, могут быть каньонами, долинными, пойменными или блуждающими (т.е. характеризующиеся неустойчивостью русла).

На равнинных реках с преобладающей грядовой формой перемещения донных наносов развиваются русла различных морфодинамических типов, среди которых преобладающим являются излучины (меандрирование). Свободные излучины, как и разветвления, наиболее распространены на широкопойменных реках в условиях свободного развития русловых деформаций; там, где реки пересекают структурные, холмисто-моренные и другие возвышенности (ограниченные условия развития русловых деформаций), преобладают врезанные русла.

Таким образом, выделение по типам русловых процессов горных, полугорных и равнинных рек сопровождается характеристикой русла по другим признакам, в т.ч. морфодинамическим, по степени устойчивости и т.д.

Наиболее широко распространены классификации речных русел по их очертаниям в плане (морфологии русел) и соответствующим им горизонтальным деформациям (переформированиям). Такие классификации по своей сути являются морфодинамическими [Чалов, 1996] или гидролого-морфодинамическими, поскольку развитие тех или иных форм русла определяется водностью потока, стоком и формой грядового движения наносов.

Первая морфодинамическая классификация речных русел принадлежит К.И. Россинскому и И.А. Кузьмину [1947, 1958], выделившим прямолинейные (соответствующий тип деформаций – периодическое расширение), извилистые (развитие излучин, меандрирование) и разбросанные (блуждание) русла. Судя по описанию, они относятся к равнинным рекам, русла которых формируются в условиях свободного развития русловых деформаций, т.е. являются широкопойменными. В этой классификации был заложен физически обоснованный подход: независимое существование трех основных типов русел, причем каждый из них характеризуется вполне определенными особенностями динамики и структуры потока, спецификой руслового рельефа и характером деформаций. В ней, как и в большинстве последующих морфодинамических классификациях, меандрирующее русло занимает равноценное с другими типами русла место. Так, О.В. Андреев и И.А. Ярославцев [1958] выделяли среди равнинных рек: немеандрирующие, «характеризующиеся побочной формой движения наносных скоплений внутри слабо изменяющейся во времени и плане русловой зоны» [с. 353]; частный случай немеандрирующих рек – с островной формой переноса наносов; меандрирующие со «значительной извилистостью русловой зоны»; блуждающие, русла которых непрерывно меняются, причем последние распространены в местах выхода рек из гор в предгорья или на равнины, где происходит резкое уменьшение уклонов. Характерно, что в этой классификации разветвленные, многорукавные русла присутствуют лишь как частный случай немеандрирующих русел.

И.В. Попов [1956; Кондратьев, Ляпин и др., 1959] типизировал русла по изменениям их плановых очертаний: 1) меандрирование или форми-

рование излучин; 2) перемещение прямолинейных участков русла параллельно самим себе на значительном протяжении; 3) перемещение русла за счет перераспределения стока по рукавам и формирования островов (русла разбросанного типа); 4) блуждающие русла с быстрым перемещением потока из одного рукава в другой при неустойчивых грунтах. При этом среди свободномеандрирующих русел им было выделено 7 разновидностей (табл. 1), отличающихся по форме смещения и трансформации самой формы в процессе развития, тогда как другие типы русла не разделяются, а разветвление в дальнейшем характеризуются только в отношении меандрирования рукавов реки. В то же время И.В. Попов выделяет реки «с извилистым руслом, но с незначительными плановыми деформациями...: 1) текущие в узких извилистых долинах с трудноразмываемыми склонами, причем извилины русла... повторяют извилины долин...; 2) реки, протекающие по территории, с которой верхний, легко размываемый материал уже вынесен...; 3) реки тундры и лесной зоны или текущие в пределах заболоченных массивов лесов, а также в областях с наличием вечной мерзлоты; 4) реки, зарегулированные озерами и водохранилищами, извилистость русла которых является следствием наличия местных препятствий, либо унаследована от прежнего состояния реки до ее зарегулирования» [Кондратьев, Ляпин и др., 1959, с.85, 88]. Первые из них соответствуют врезанным излучинам, вторые – скальным руслам, ложе которых лишено аллювия.

При известной непоследовательности классификационных признаков (наряду с врезанными и скальными руслами – болотные, вынужденные излучины, зарегулированные и т.д.) и кажущемся случайном наборе выделенных разновидностей русла, здесь налицо попытка охватить в едином перечне типов русла максимально возможное их разнообразие, в том числе на реках, где деформации относительно замедлены и проявляются только на протяжении длительных отрезков времени.

Этот подход разделял и Н.И. Маккавеев [Проектирование судовых ходов..., 1964], выделивший меандрирующие и немеандрирующие русла, а среди последних – прямолинейные и разветвленные на рукава, т.е. извилистость русла принимается им в качестве ведущего классификационного признака. Правомерность такого подхода объясняется тем, что в этом случае сохраняется однозначность критериев, т.к. прямолинейные и меандрирующие русла различаются по извилистости, а разветвление – по наличию рукавов реки [Chitale, 1981], хотя при обтекании острова, как и побочня в прямолинейном русле, также возникает извилистость динамической оси потока.

Н.И. Маккавеев [1971; Экспериментальная геоморфология, 1969], выделяя врезанные, свободные и вынужденные или адаптированные излучины (ранее [Маккавеев, 1955] первые он называл излучинами в районах преобладания глубинной эрозии, вторые – в районах преобладания боковой эрозии, причем для них не употребляя термин «свободные»), классифицировал их по форме (очертаниям) в плане (морфологии): сегментные, сину-

соидальные, сундучные, омеговидные, заваленные, прорванные (табл. 1). Такой внешне формальный подход имеет в то же время глубокий смысл, поскольку форма излучин отражает в данном случае вид и характер их смещения и переформирований. Сопоставление этой классификации с предложенной им раньше [Маккавеев, 1955] показывает, что сегментные излучины смещаются вниз по течению без изменения формы, развитие омеговидных приводит к пережиму шеек меандр и последующему их «перееданию» (термин Н.И. Маккавеева), прорванные возникают в результате прорыва излучин спрямляющим протоком и т.д. Сундучные излучины, по Н.И. Маккавееву, возникают при подходе русла к коренному берегу и последующему отходу от него (в первом случае – «косые меандры» возле сбойных коренных берегов [Маккавеев, 1955]).

Сходный прием применил Н.П. Матвеев [1970], который, рассматривая формы излучин рек Подмосковья, выделил семь их «геометрических» типов: 1) синусоидальные, 2) круговые, 3) эллиптические, 4) петлеобразные, 5) сложные, 6) асимметричные, 7) большие излучины, осложненные мелкими меандрами. Каждая форма была описана математическими уравнениями, однако условия образования самих излучин и их деформации не оценивались, что снижает значимость этой классификации.

Во второй половине XX века появились иные подходы к классификации речных русел. В них извилистость остается одним из ведущих признаков, но наряду с ней учитываются транспортирующая способность потока, устойчивость русла, форма транспорта наносов, направленность вертикальных деформаций (врезание рек или аккумуляции наносов). В отечественной литературе наиболее отчетливо это проявилось в классификации ГГИ, получившей широкое распространение, в том числе благодаря использованию ее в нормативной литературе. Первый вариант этой классификации был предложен И.В. Поповым [1965]; в дальнейшем она была развита Н.Е. Кондратьевым в 1968 г (опубликовано в 2000 г), неоднократно публиковалась, докладывалась и в окончательной, «несколько уточненной форме» входит в монографию Н.Е. Кондратьева, И.В. Попова и Б.Ф. Сنيщенко [1982]. В ней типы русла (русловых процессов, согласно взглядам авторов) располагаются в определенной последовательности (рис. 1): 1) ленточно-рядовой; 2) побочный; 3) меандрирование ограниченное; 4) меандрирование свободное; 5) меандрирование незавершенное; 6) пойменная многорукавность; 7) осередковый тип или русловая многорукавность. Эта последовательность типов русла образует закономерный ряд, соответствующий, по мнению авторов, изменению транспортирующей способности потока. С другой стороны придание извилистости русла функции ведущего классификационного признака обуславливает то, что меандрирование представлено тремя типами русла, а если учесть, что при развитии побочной динамической оси потока в межень оказывается также извилистой, – четыремя, тогда как разветвленные русла даются очень обобщенно, и лишь есть ссылка в тексте на то, что они очень многообразны; прямолинейные русла отсутст-

вуют, хотя к ним можно отнести типы русла, выделенные по формам руслового рельефа (ленточным грядам, побочням, осередкам). Такая ограниченность классификации (на это обращал внимание сам Н.Е. Кондратьев [2000], писавший о неполноте охвата в ней всего разнообразия речных русел), учет только русел равнинных рек и преимущественно тех, которые формируются в условиях свободного развития русловых деформаций (при отсутствии ограничивающих факторов руслового процесса, по терминологии авторов), приводят к тому, что при ее применении вводятся новые, внеклассификационные типы.

Например, С.И. Пиньковский [1960] выделяет при составлении схемы распространения типов русел на территорию СССР немеандрирующие русла, к которым относит врезанные как прямолинейные, так и извилистые. И.В. Попов с соавторами [Водные ресурсы..., 1977] для рек юга Восточной Сибири применяют термин «вынужденное меандрирование» – «тип руслового процесса, при котором очертания реки в плане повторяют извилины долины рек» [с. 224]. Но это – врезанные излучины – термин, давно применявшийся в литературе [Щукин, 1933; Эдельштейн, 1947; Экспериментальная геоморфология, 1969]. Такое обозначение этого типа излучин, по существу – его переименование, приводит только к терминологической путанице.

Несколько раньше К.В. Гришанин [1972], принимая названия типов русел в соответствии с классификацией ГГИ, но отказываясь от расположения типов русла в предложенном порядке, в то же время соотносит их с тремя главными типами речных русел К.И. Россинского и И.А. Кузьмина, Н.И. Маккавеева и др.: 1) прямолинейными или слабо изогнутыми однорукавными с расположенными в них в шахматном порядке побочнями; 2) извилистыми или меандрирующими; 3) разветвлениями. При этом извилистые (по ГГИ) он дополняет вынужденным изгибом русла, возникающим, если русло делает резкий поворот, подходя к коренному берегу, сложенному трудноразмываемыми породами. Подобные вынужденные излучины (изгибы) выделяли также Н.И. Маккавеев [1971; Экспериментальная геоморфология, 1969] и Н.А. Ржаницын [1960, 1985].

Многие зарубежные морфодинамические классификации опираются в основном на принципы, которые положили в основу типизации еще К.И. Россинский и И.А. Кузьмин [Leopold, Wolman, 1957; Richards, 1980; Schumm, 1977], но дополняют их новыми признаками. Так, С. Шумм [Schumm, 1977] соотносит тип русла с формой транспорта наносов. Он выделяет однорукавные и многорукавные русла; к первому типу относится русло слабоизвилистое или прямое с осередками (при большей доле влекомых наносов в общем стоке наносов), меандрирующее (смешанные наносы) и с крутыми меандрами (при малой доле влекомых наносов). В другой работе С. Шумм [Shen et al., 1979] располагает русла в последовательности увеличения его устойчивости (стабильности): 1) прямолинейные, стабильные; 2) прямые, с меандрирующим тальвегом – обычно стабильные, со смещаю-

щимися побочными; 3а) меандрирующие, стабильные, но в них могут быть отторгнуты небольшие побочни (пляжи); 3б) меандрирующие с обширными пляжами у выпуклых берегов, относительно стабильные, с отторжением пляжей, прорывом шеек излучин, смещением излучин и их ростом; 4) переходящие от меандрирования к разветвлениям, нестабильные, 5) много-рукавные русла, нестабильные.

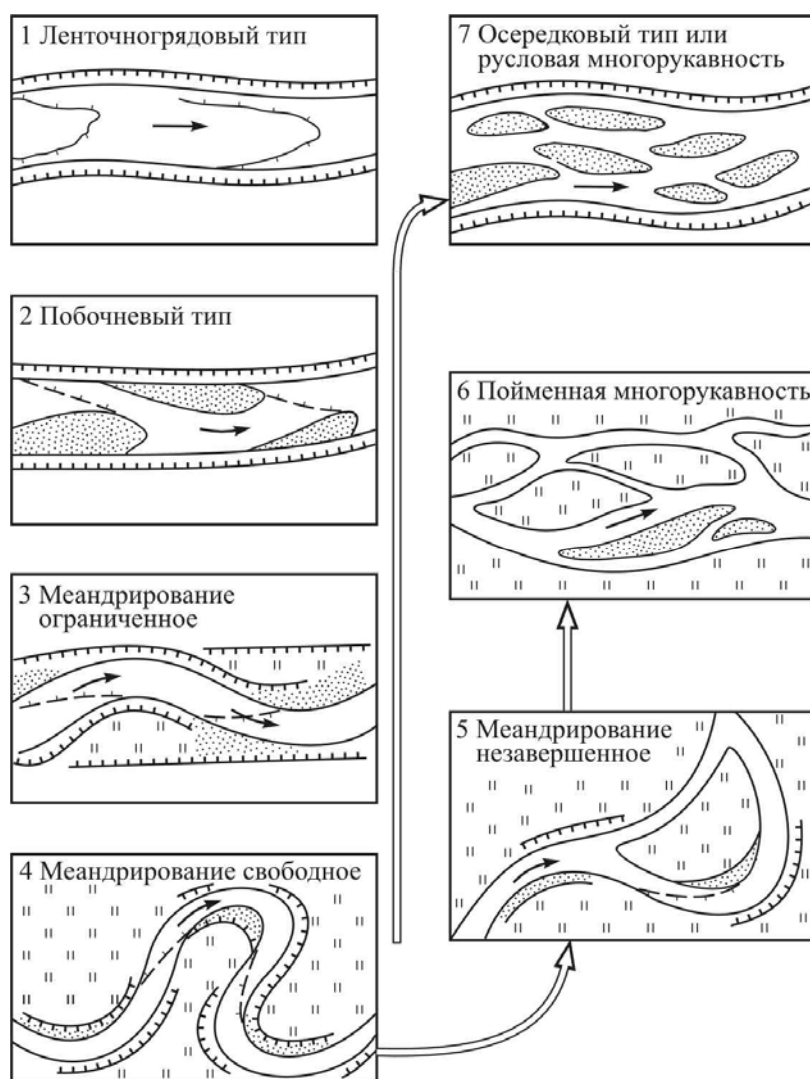


Рис. 1. Классификация русел рек ГГИ.

Р.С. Чаловым и др. [2000] дан обзор морфодинамических классификаций русел рек, разработанных в Китае. В них меандрирующее русло также выделяется в самостоятельный блок, наравне с прямолинейным и разветвленным руслом. При этом в ряде из них, учитывая специфику русловых процессов на китайских реках (с очень большим стоком наносов), отдельно выделяется блуждающее русло, неидентичное разветвленным (много рукавным, разбросанным и блуждающим) в российской литературе. В типизации русел Линь Чэнкуаня, опубликованной в начале 60-х годов, меандрирующие и разветвленные русла подразделяется на устойчивые и блуждающие излучины или разветвления: первые развиваются, если устойчивость рельефа русла больше устойчивости берегов, вторые – если устойчивость русла меньше устойчивости берегов.

Во многих китайских классификациях русел, в отличие от отечественных и европейских, учитывается широкий спектр условий их формирования. Последние в основном разработаны для свободных условий развития русловых деформаций на равнинных реках. Русла горных и полугорных рек, врезанные русла равнинных рек, формирующиеся в условиях ограниченного развития русловых деформаций, отсутствуют, занимают второстепенное положение или включаются в качестве некоторых дополнений. В 1992 г Линь Чэнкуань предложил классифицировать русла по условиям формирования (аллювиальные, полуаллювиальные и неаллювиальные, в том числе врезанные) и только затем по их морфологии (прямолинейные, извилистые, разветвленные, блуждающие) и интенсивности деформаций (например, устойчивые извилистые, свободные извилистые). Несколько раньше (в конце 80-х годов) Цянь Нин, выделяя также четыре основных типа русла, только излучины (меандры) разделил на врезанные, свободные и вынужденные, считая при этом, что все они характерны для относительно устойчивых русел. Врезанные русла (врезанные излучины и со скальными островами) включены также в классификацию Шэн Юйчан и Гун Гоюань (рис. 2), но они соотнесены только с горными реками, где разделены на нормальные и перемещающиеся; излучины равнинных рек также подразделяется на два типа – простые и меандрирующие.

Последней из предложенных отечественных классификаций русел рек является морфодинамическая, разработанная Р.С. Чаловым [1996, 1997; Чалов, Алабян и др., 1998]. Она является развитием схемы, предложенной Н.И. Маккавеевым и Р.С. Чаловым [1986], которая неоднократно уточнялась и получила известность по многим публикациям, ее использующим, как классификация МГУ. По своей структуре она многоуровневая и также основана на принципе независимости развития трех основных типов русел. В ней впервые учтены, с одной стороны, особенности взаимодействия потока и русла в свободных (широкопойменных) и ограниченных условиях развития русловых деформаций, определяемых геолого-геоморфологическим строением долин рек, а с другой – различия в механизме русловых процессов (взаимодействие потока и русла, форма транспорта наносов) на горных, полугорных и равнинных реках (рис. 3). В связи с этим русло каждого из основных морфодинамических типов (меандрирующее, извилистое; разветвленное на рукава; относительно прямолинейное, неразветвленное)

может быть широкопойменным, врезанным и адаптированным, равнинным, полугорным и горным. В свою очередь, каждое из них подразделяется на несколько разновидностей, отличающихся по форме русла и характеру русловых деформаций. Отдельными блоками в этой классификации учитывается состав руслообразующих наносов и устойчивость русла.



Рис. 2. Типизация русел рек Шэн Юйчан и Гун Гоюань.

Среди свободных излучин (рис. 4) в широкопойменном русле выделено четыре разновидности, имеющие разную форму в плане (морфологию) и направленность смещения (горизонтальные деформации). Кроме того, в этих условиях могут формироваться вынужденные излучины двух видов и адаптированные, также двух видов. Особое место занимает пойменная многорукавность, которая встречается как на меандрирующих, так и на разветвленных реках, будучи вызванная прохождением руслоформирующих расходов воды в условиях затопленной поймы [Чалов, 1979].

Для извилистых рек смысл выделения широкопойменных, врезанных и адаптированных излучин раскрывается с позиции закона взаимодействия потока и русла, сформулированного М.А. Великановым [1958]. В кратком виде он имеет следующую словесную форму: «поток управляет руслом, русло управляет потоком». Активным фактором русловых процессов является сток воды; поэтому развитие форм русел, их параметров определяется гидравлическими характеристиками водного потока. Однако в полной мере эта зависимость проявляется лишь в свободных условиях развития русловых деформаций, при отсутствии воздействия на русло коренных и вообще незатопляемых берегов.

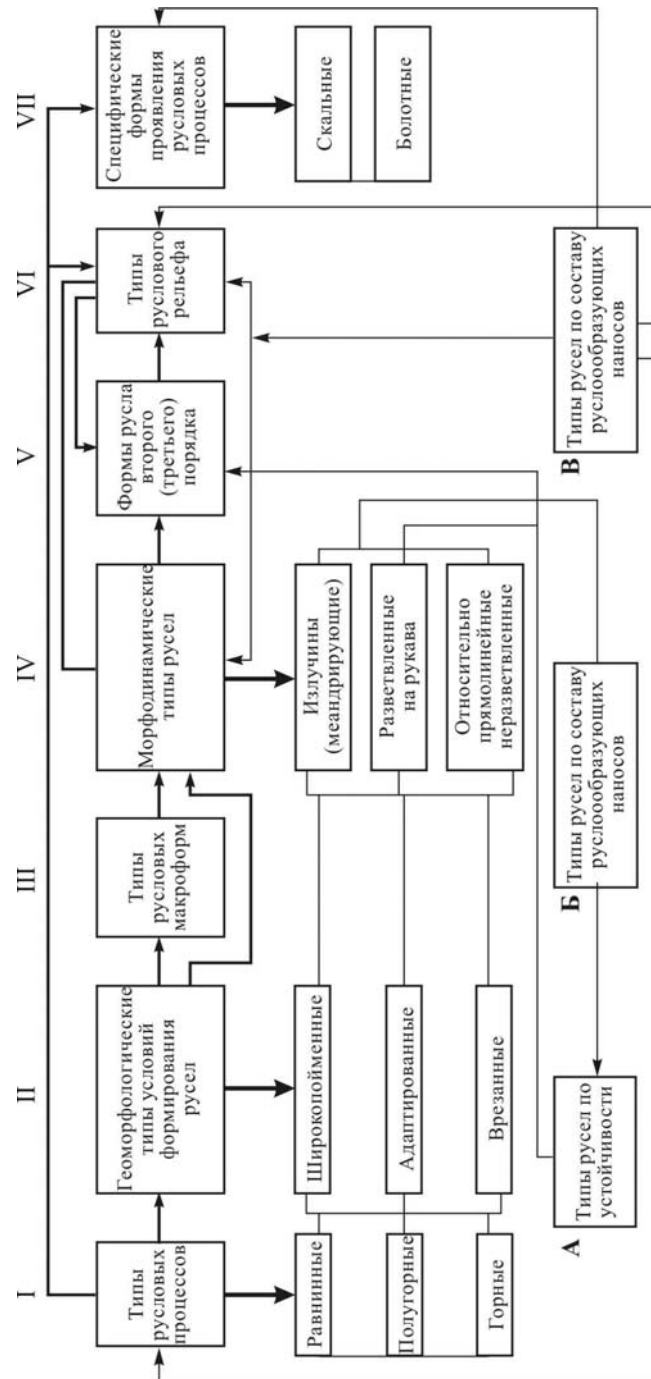


Рис. 3. Морфодинамическая классификация Р.С. Чалова.

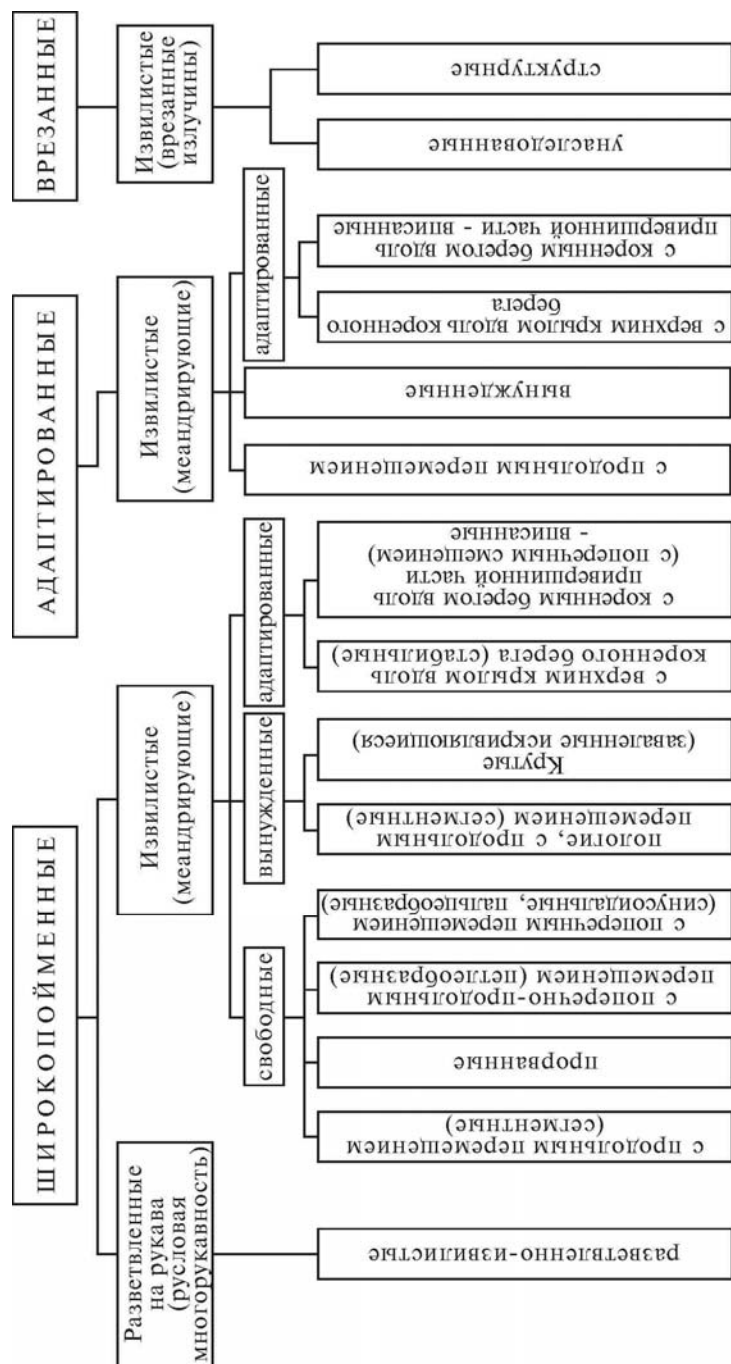


Рис. 4. Морфодинамические типы излучин в классификации Р.С. Чалова.

В данном случае такое русло управляется потоком, причем, через обратную связь, форма русла (например, излучина), сформировавшись под воздействием потока, получает динамическую устойчивость, и ее развитие обуславливается образованием в потоке гидродинамической структуры, соответствующей форме русла. В ограниченных условиях развития русловых деформаций на первый план выступает вторая составляющая взаимодействия: русло управляет потоком. При этом формы русла (формы излучин) и их эволюция полностью или частично контролируются коренными берегами, вследствие чего их непосредственная связь с характеристиками потока или нарушается, или может вообще не проявляться.

Таким образом, при различии принципов составления, полноте охвата разновидностей речных русел, обоснованности их выделения, дробности и т.д. все классификации включают в себя извилистые (меандрирующие) русла. В табл. 1 представлено сопоставление разделов (частей) ряда наиболее известных классификаций или их модификаций, касающиеся излучин (меандрирования). При этом учтены описания, данные их авторами в соответствующих публикациях. Характерно, что, если не считать свободных и врезанных излучин, описанных еще в «доклассификационный» период изучения речных русел, то разделение их (излучин, плановых деформаций, русловых процессов) на типы (виды, разновидности, формы) стало производиться лишь в начале второй половины XX века [Маккавеев, 1955; Попов, 1956]. При этом основное внимание уделяется свободному меандрированию, при котором излучины меняют свою конфигурацию на разных стадиях развития.

Поэтому наиболее детальные из предложенных схем отражают, с одной стороны, формы излучин в плане и соответствующие им виды деформаций, а с другой, стадии их развития, условия спрямления и направленность (по отношению к оси пояса меандрирования) смещения. В наиболее явном виде стадийность для свободных излучин подчеркивал К.В. Гришанин [1972], выделивший четыре последовательные формы, возникающие по мере развития самих излучин.

И.В. Попов [1965] впервые стал выделять ограниченное меандрирование, свойственное рекам с относительно узкой поймой; здесь излучины располагаются таким образом, что вершины двух соседних касаются противоположных бортов долины, вследствие чего создаются условия для их продольного смещения (сползания, по выражению И.В. Попова). При этом он исходит из положения, что завершением развития излучины является образование петли и ее спрямление за счет прорыва шейки. Если такие петли не возникают, чему препятствуют борта неширокой долины, то излучины являются ограниченными. Если же создаются условия для спрямления излучин, не достигших петлеобразной формы, то процесс их развития отнесен к незавершенному меандрированию. Н.И. Маккавеев [Экспериментальная геоморфология, 1969] такие излучины называл прорванными. Ограниченное меандрирование (в классификации ГГИ) Р.С. Чалов [1996, 1997; Чалов, Алабян и др., 1998] предложил рассматривать как одну из форм развития адаптированных излучин.

Таблица 1. Основные классификации излучин (меандрирующих русел)
и их сопоставление по морфологии, характеру деформаций и условиям формирования

Р.С. Чалов [1996, 1997; Чалов, Алабян и др., 1998] – классификация МГУ	Н.И. Маккавеев, Р.С. Чалов [1986]	И.В. Попов, А.Т. Власов и др. [Водные ресурсы рек..., 1977]	К.В. Гришанин [1972]	Н.И. Маккавеев [Экспериментальная геоморфология, 1969; 1971]	И.В. Попов [1965] – классификация ГГИ	И.В. Попов [1956; Кондратьев, Ляпин и др., 1959]	Н.И. Маккавеев [1955]
Широкопойменные Свободные: <i>с продольным перемещением</i> (сегментные); <i>с продольно-поперечным перемещением</i> (петлеобразные)	Свободные в широкой долине сегментные омеговидные, заваленные	Свободное меандрирование	Свободное меандрирование: 1-я стадия 2-я стадия	Свободные излучины сегментные омеговидные, заваленные	Свободное меандрирование	Меандрирующие реки разворот S-образных извилин русла вплоть до прорыва петель (I-1)	Реки районов преобладания боковой эрозии смещающиеся вниз по течению без изменения формы с пережимом шеек меандр; отторгнутые при порыве («перееданием») шейки меандры образование синусоидальных излучин

Продолжение таблицы 1.

с поперечным перемещением (синусоидальные, пальцеобразные)	синусоидальные			синусоидальные		сползание отдельных участков русла при сохранении коротких устойчивых участков в вершине	
прорванные	прорванные	Незавершенное меандрирование	Незавершенное меандрирование 3-я стадия	прорванные	Незавершенное меандрирование	то же, что I-1, но цикл не полный; срезание выпуклого берега	прорывы излучин спрямляющим протоком
разветленно-извилистое русло			4-я стадия	сложные		то же, что I-1, но с разветвлением русла на рукава тоже, что I-1, при явлении объединения и дробления излучин	перерезывание излучины близ вершины
							стачивание выпуклости бывшей меандры образованием серии излучин меженного фарватера
Вынужденные: пологие, с продольным перемещением (сегментные); крутые (заваленные), искривляющиеся	вынужденные		Вынужденный изгиб русла	вынужденные или адаптированные			косые меандры возле отбойных коренных берегов

Продолжение таблицы 1.

Адаптированные: с верхним крылом вдоль коренного берега (стабиль- ные); с коренным берегом вдоль приверженной части, впи- санные (с поперечным перемещением)	адаптированные						
Адаптированные Сегментные (с продольным перемеще- нием)	Свободные в узкой долине	Ограниченное меандрирование	Ограниченное меандрирование		Ограниченное меандрирование	Сползание излучин	
Вынужденные <i>Адаптированные (ста- бильные):</i> с верхним крылом вдоль коренного берега; Вписанные (с коренным берегом вдоль привершинной части)	сундучные			сундучные		То же, что I-1, но цикл неполный и сменяется высотны- ми деформациями	
Врезанные	Врезанные	Вынужденное меандрирование		Врезанные излучины		Извилистые русла с незначительными плановыми дефор- мациями	Реки районов пре- обладания глубин- ной эрозии (врез- анные меандры)

Продолжение таблицы 1.

Унаследованные Структурные	Симметричные Асимметричные			Симметричные Асимметричные		Реки, текущие в узких извилистых долинах (извилины русла повторяют извилины долины) Реки, протекающие по территориям, с которых вынесен верхний, легкоразмываемый материал Реки тундры, лесной зоны, заболоченных массивов, областей с вечной мерзлотой Реки, зарегулирование озерами и водохранилищами, извилистость которых является следствием местных препятствий или унаследована от прежнего состояния реки	
-------------------------------	-------------------------------	--	--	-------------------------------	--	--	--

Примечание: названия типов русел или их описания приведены в соответствии с литературным источником

1.2. Морфологические элементы и параметры излучин



Формируясь в разных условиях, на больших и малых реках, будучи врезанными, вынужденными (адаптированными) или свободными, находясь на разных стадиях своего развития, излучины отличаются по размерам, форме и сложности своей конфигурации в плане. При этом они могут сопрягаться с соседними излучинами иной конфигурации и в другой стадии развития или с такими же излучинами, образуя серии следующих друг за другом форм. Верхняя и нижняя излучины в серии обычно сопрягаются с участками русла, характеризующимися другими типами русла – разветвлениями или прямолинейным неразветвленным, свободные излучины – с адаптированными или вынужденными и наоборот. Излучины того или иного вида могут быть одиночными образованиями среди участков с разветвленным или прямолинейным, неразветвленным руслом, находиться среди излучин другого вида. Все это создает большое разнообразие очертаний излучин в плане и, в то же время, обуславливает необходимость выделения основных их морфологических элементов и параметров, которые позволяют характеризовать различные излучины, сопоставлять их между собой, оценивать изменения каждой излучины во времени по мере ее развития и перехода из одной стадии в другую.

Отдельно взятая излучина представляет собой изгиб русла реки, в результате чего по ее длине один берег является вогнутым, другой выпуклым. При расположении излучин в серии две смежные излучины сопрягаются друг с другом таким образом, что в месте сопряжения происходит изменение знака кривизны русла. Это может быть как плавный переход линий разной кривизны друг в друга, так и разделенный коротким отрезком русла, представляющим собой прямолинейную вставку между двумя его изгибами (рис. 5А, Б).

В литературе иногда встречается мнение, что одна излучина представляет собой два смежных изгиба русла, имеющий разных знак кривизны [Маккавеев, 1971] или две смежных излучины следует объединить общим термином «извилины» [Кондратьев, Ляпин и др., 1959]. Однако в последнем случае «извилины» соотносятся с развитием излучин петлеобразной формы (рис. 5В), когда происходит усложнение очертаний излучины из-за образования вторичных изгибов на ее крыльях. И.В. Попов такое преобразование меандрирующего русла называл «разворотом излучин», а сами формирующиеся излучины – «S-образными». Однако в дальнейшем [Кондратьев и др., 1982] он уже не употребляет этих терминов, а говорит о том, что «если рассматривать низовую половину какой либо излучины и верховую половину нижеследующей, то их деформации в плане напоминают разворот S-образной фигуры» (с.108). Н.И. Маккавеев также впоследствии отказался от распространения понятия «излучина» на два смежных изгиба русла с разными знаками кривизны [Маккавеев, Чалов, 1986]; впрочем, раньше [Маккавеев, 1955] он также называл излучиной один изгиб русла.

В пределах излучин выделяются отдельные морфологические элементы, сочетания количественных характеристик которых позволяют описать размеры излучин и их форму на разных стадиях развития (рис. 6). Каждая излучина состоит из двух крыльев – верхнего и нижнего. При последовательном расположении излучин нижнее крыло одной переходит в верхнее крыло ниже расположенной. Переход от верхнего крыла к нижнему на отдельной излучине соответствует ее вершине; в створе вершины излучины происходит изменение направления русла по отношению к оси долины. Иногда отрезок русла в районе вершины называют привершинной частью излучины. Расстояния по ширине дна долины между вершинами смежных излучин определяет ширину пояса меандрирования (B_m). Эта величина изменяется по мере поперечного смещения излучин, их спрямления и, таким образом, не характеризует ширину части дна долины, в пределах которой может происходить блуждание русла. Последняя в свободных условия развития русловых деформаций всегда больше, чем пояс меандрирования, определяемый положением смежных излучин на данный момент времени.

Для оценки размеров и формы излучин применяются показатели – параметры («измерители», по терминологии ГГИ [Попов, 1964, 1965; Кондратьев и др., 1982]): шаг L , стрела прогиба h , длина по руслу l , радиус кривизны r , ширина русла в вершине излучины B , а также безразмерные показатели – степень развитости l/L и показатель формы r/h . Они позволяют достаточно полно охарактеризовать геометрию очертаний изгиба русла в плане. Шаг излучины L представляет собой расстояние между точками перегиба соседних излучин. При этом прямая линия, проходящая через точки перегиба русла между несколькими смежными излучинами называется осью пояса меандрирования. Таким образом, шаги смежных излучин в сумме $\sum L$ составляют длину пояса меандрирования по его оси. Перпендикуляр, проведенный от оси пояса меандрирования к вершине излучины, характеризует стрелу прогиба h . Сумма величин стрел прогиба смежных излучин составляет ширину пояса меандрирования ($B_m = 2h$). Радиус, которым описывается кривая геометрической оси русла на большей части протяжения излучины (сегментной, петлеобразной) или ее привершинной части (синусоидальной), является радиусом кривизны излучины. Суммарная длина двух крыльев составляет длину излучины по руслу l . Ширина русла B в вершине излучины может измеряться как для условий межени, так и уровня высокой воды, когда затоплены прирусловые отмели. Если в привершинной части излучины у выпуклого берега находится побочень, то различие между шириной русла в межень и половодье может быть весьма существенным (двукратное и больше). Для более полной характеристики русла на излучине его ширина также определяется на крыльях, в створе перегиба, в середине и по граничным створам прямолинейных вставок.

В литературе встречается и другие названия морфологических элементов и параметров излучин, а также их буквенные обозначения [Попов, 1965; Кондратьев и др., 1982; Барышников, Попов, 1988]: пояс меандриро-

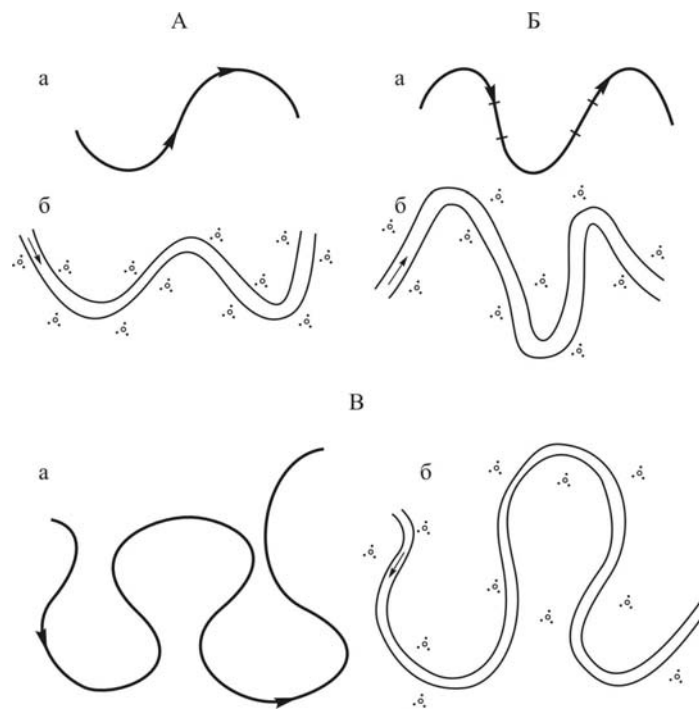


Рис. 5. Сопряжение излучин и изменение знака кривизны русла: *A* – плавное; *Б* – с прямолинейной вставкой между излучинами; *В* – при развитии излучин петлеобразной формы; *а* – линии кривизны излучин; *б* – излучины на *р.* Чузик (*A*), *р.* Нюролька (*Б*), *р.* Васюган (*В*) (все бассейн средней Оби).

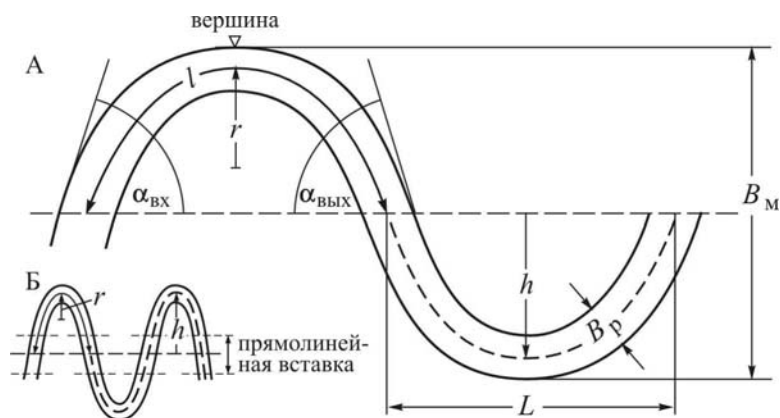


Рис. 6. Морфологические элементы и параметры сегментных излучин (*A*), синусоидальных излучин (*Б*).

вания B_m – пояс руслоформирования B_{np} ; стрела прогиба h – высота излучины y_m ; шаг излучин обозначается λ ; длина излучин – S . Нередко применяются и другие показатели – угол входа $\alpha_{вх}$, угол выхода $\alpha_{вых}$, угол разворота излучины $\alpha = \alpha_{вх} + \alpha_{вых}$, а также угол сопряжения излучин как разность углов выхода верхней излучины $\alpha_{вых_1}$ и входа нижней излучины $\alpha_{вх_2}$. В данной работе эти показатели не используются.

Пространство суши, заключенное между крыльями излучины, носит названия шпоры излучины. Если излучина свободная и имеет сегментную или близкую к ней форму, то нередко говорят о пойменном сегменте. У петлеобразных излучин самую узкую часть суши (поймы) между их крыльями называют шейкой излучины.

Если излучины по длине русла образуют серии следующих друг за другом форм, то границы отдельных излучин определяются по точкам (створам) перегиба русла в плане (смены знака кривизны) между смежными излучинами. На одиночных излучинах их границы определяются с учетом распределения максимальных глубин, положения зон размыва берегов и соотношения между собой параметров излучин (например, по данным ряда исследователей [Попов, 1965; Экспериментальная геоморфология, 1969; Антроповский, 1969] соотношение между шагом излучин L и шириной русла B_p изменяется в среднем от 5 до 7). При наличии прямолинейных вставок между соседними излучинами их границы устанавливается по этим признакам, а ось пояса меандрирования в этом случае проводится по оси русла.

1.3. Критерии выделения извилистых, разветвленных и относительно прямолинейных, неразветвленных русел



Основой для выделения той или иной формы русла служат его конфигурация в плане и наличие в русле островов. В первом случае неразветвленные русла разделяются на извилистые (образующие излучины, меандрирующие) и относительно прямолинейные, во втором – русла являются разветвленными на рукава. Однако относительно прямолинейное русло или соответствующий ему морфологически однородный участок из-за местных причин может иметь в плане форму слабо вогнутой дуги или состоять из следующих друг за другом очень пологих изгибов. С другой стороны, на излучинах русла могут находиться острова, причем на крутых излучинах они обычно формируются в привершинной части или в нижних крыльях, т.е. там, где происходит аккумуляция наносов; на пологих излучинах острова могут возникать в пределах любого морфологического элемента излучины. В таких случаях визуальное определение типа русла затруднено. Поэтому важно установить четкие критерии, характеризующие относительно прямолинейное, неразветвленное и извилистое русло, т.е. определить условия, при которых начинается меандрирование русла реки. При наличии островов в русле с извилистыми очертаниями необходимо установить, являются

ся ли они формообразующими или составляют образования второго порядка: в первом случае русло является разветвленным, а его изгибы относятся к макроизлучинам, являющимся реликтами палеорусел или соответствующим конфигурации долины реки в целом; во втором случае форма русла квалифицируется как излучина, в котором вследствие его большой ширины, малой устойчивости или других причин сформировались острова второго порядка.

Чтобы оценить, носят подобные изгибы русла случайный или закономерный характер, т.е. является русло относительно прямолинейным или извилистым (меандрирующим), В.В. Иванов [Чалов, Алабян и др., 1998] предложил использовать показатель степени развитости излучин l/L . Поскольку каждому типу русла соответствует определенная структура потока – поле скоростей, циркуляционные течения и т.д., определяющие распределение в русле зон эрозии и аккумуляции наносов, то второй характеристикой может служить асимметрия поперечного сечения русла в вершине излучины (изгиба) русла. Она выражается через коэффициент асимметрии K_{ac} , равный отношению расстояния от выпуклого берега b к расстоянию от вогнутого берега a до линии максимальных глубин (рис. 7А).

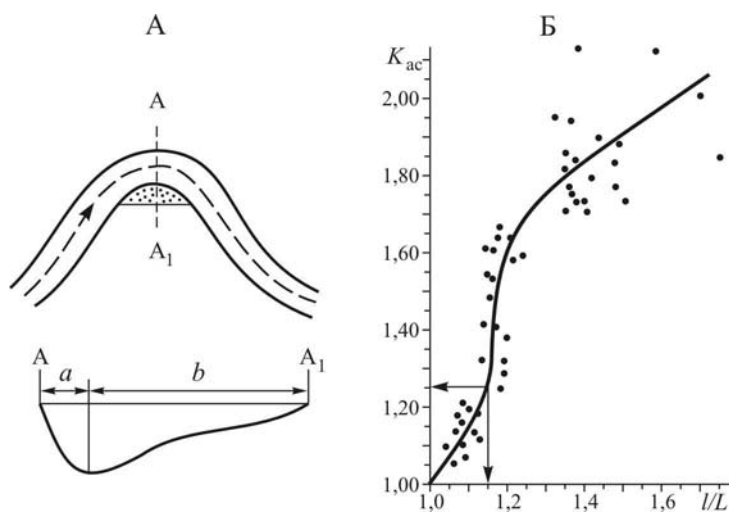


Рис. 7. Зависимость коэффициента асимметрии поперечного сечения русла K_{ac} от степени развитости излучины l/L (Б); способы определения $K_{ac} = b/a$ (А) (по В.В. Иванову [Чалов, Алабян и др., 1998]).

Действительно, с момента возникновения кинематической структуры потока, характерной для меандрирующего русла, динамическая ось потока и, следовательно, линия максимальных глубин постепенно смещаются в сторону одного из берегов, что приводит к асимметрии поперечного сече-

ния и формированию изгиба русла. В этом случае прямолинейное русло становится извилистым, а дальнейшее изменение показателя извилистости (степени развитости излучины) сопровождается увеличением коэффициента асимметрии поперечного профиля русла.

Анализ зависимости коэффициента асимметрии поперечного сечения $K_{ac}=b/a$ от степени развитости излучины русла l/L (рис. 7Б) показал, что при изгибе с соотношением $l/L > 1,10-1,15$ даже небольшое увеличение показателя извилистости сопровождается резким ростом коэффициента асимметрии. При $l/L < 1,10-1,15$ связь $K_{ac} \sim l/L$ выражена слабо. Таким образом, значение $l/L = 1,10-1,15$ можно считать пороговым для возникновения процесса меандрирования и перехода от прямолинейного русла к извилистому. Увеличение l/L с 1,15 до 1,4 приводит к росту коэффициента асимметрии с 1,25 до 1,70, после чего на графике наблюдается большой разброс точек, так как излучины такой кривизны приобретают сложную конфигурацию, происходит образование двух и более плесовых ложин, разные ее части развиваются неодинаково в зависимости от литологии берегов, взаимоотношения с пойменными потоками в половодье, положения среди смежных излучин и т.д.

Оценка значимости острова в определении типа русла (меандрирующее или разветвленное) не столь четкая. Однако, если $l/L > 1,10-1,15$, то наличие острова в пределах излучины свидетельствует о развитии разветвления как формы второго порядка на излучине. При этом распределение расходов воды по рукавам такого разветвления, а также их морфометрические характеристики (глубина, ширина) и тенденции развития за многолетний период определяются кинематической структурой потока на излучине. Рукава, находящиеся в зонах замедления течения, обычно маловодны, отличаются малой глубиной, сравнительно нешироки, нередко обсыхают в низкую межень, а острова со временем прилегают к пойме. Наоборот, рукава, располагающиеся в зонах ускорения течения, активно развиваются, глубокие, в них сосредотачивается большая часть, а в низкую межень нередко весь расход воды. После прилегания острова к пойме в них может сформироваться новый остров. В результате формирующаяся пойма по своему рельефу является сегментно-островной [Чернов, 1983; Маккавеев, Чалов, 1986]: «веера блуждания» представлены не серией глив, а группами причленившихся островов, образующих плосковершинные широкие гряды (рис. 8).

При $l/L < 1,10-1,15$ эволюция русла при формировании в нем острова (дальнейшее развитие разветвления или образования излучины с разветвлением второго порядка) зависит от возникающей возле острова кинематической структуры потока [Маккавеев, 1955]. Благодаря ей в разветвлении происходит увеличение суммарной ширины русла, т.к. остров вызывает изгиб потока в сторону одного или обоих рукавов, вследствие чего происходит размыв противоположных острову берегов. Очевидно, если образование острова не сопровождается подобным изменением структуры потока, то русло следует относить к прямолинейному типу, а соответствующее ему разветвление – к русловой форме второго порядка.

Оценка значимости узла разветвления в формировании типа русла (разветвленное или прямолинейное, неразветвленное, с разветвлением второго порядка) производится способом, аналогичным разделению относительно прямолинейных, неразветвленных и меандрирующих русел [Чалов, Алабян и др., 1998]. Возникновение циркуляционных течений возле острова и формирование изгиба динамической оси потока в одном или обоих рукавах приводит к возникновению асимметрии поперечного сечения их русел. Коэффициент асимметрии рукавов $K_{ас\,рук}$ определяется как отношение расстояния от острова, образующего выпуклый берег, и расстояния от вогнутого берега рукава до линии максимальных глубин в створе, соответствующем вершине излучины рукава.

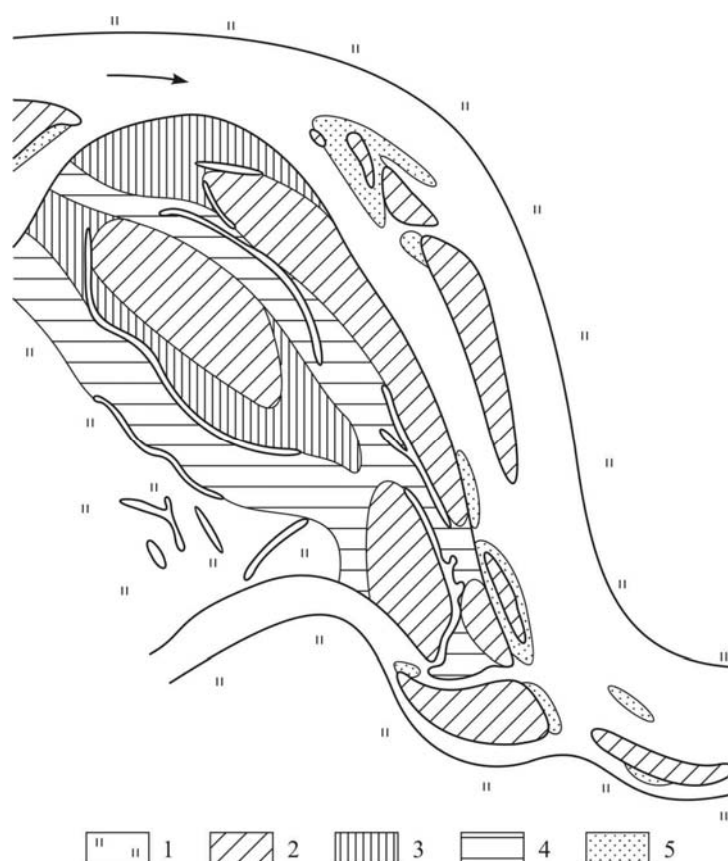


Рис. 8. Сегментно-островная пойма (р. Обь, Таганская излучина):
1 - пойма; 2 – острова, в т.ч. причленившиеся к пойме; 3 – бывшие побочни, превратившиеся в пойму; 4 – бывшие протоки – пойменные заросшие ложбины; 5 – современные побочни и осередки.

В качестве аргумента принимаются линейные характеристики островов – их длина L_o и ширина B_o в безразмерном виде – L_o/B_p , B_o/B_p , где B_p – средняя ширина русла на смежных неразветвленных участках. График изменения $K_{ас\text{рук}}$ в зависимости от значений относительных размеров островов (рис. 9) показывает, что резкое нарастание коэффициента асимметрии происходит при значениях $L_o/B_p=1,20-1,30$, что соответствует относительной ширине острова $B_o/B_p=0,35-0,40$. Рукава возле одиночного острова, имеющего ширину до 0,4 от средней ширины русла, не образуют изгиба, в котором создается соответствующая ему структура потока; в этом случае разветвление можно рассматривать как форму второго порядка в прямолинейном русле, которое по мере увеличения асимметрии поперечного сечения благодаря изгибу русла может трансформироваться в извилистое, меандрирующее, и тогда развитие разветвления будет происходить по описанной выше схеме как формы второго порядка на излучине русла.

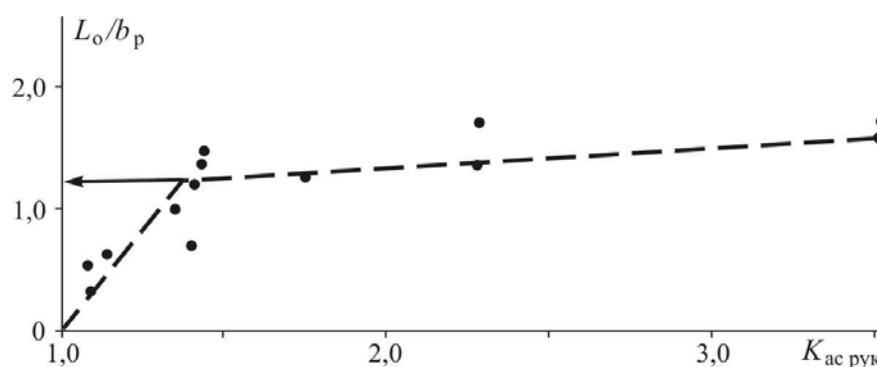


Рис. 9. Зависимость между соотношением длины островов и ширины русла L_o/B_p и коэффициентом асимметрии $K_{ас}$ поперечного сечения русел рукавов (по В.В. Иванову [Чалов, Алабян и др., 1998]).

При превышении этой величины формирующееся разветвление как форма русла получает динамическую устойчивость, ей соответствуют определенные кинематическая структура потока, расположение зон размыва русла и аккумуляции наносов. В таком случае разветвление образует тип русла, и лишь в его рукавах могут возникать излучины, которые, в свою очередь, представляют уже формы русла второго порядка. Они наиболее характерны для разветвлений, у которых $L_o/B_o > 3-4$ (здесь L_o – длина острова, B_o – его ширина), встречаясь наиболее часто у пойменно-русловых разветвлений.

1.4. Типизация излучин



Широкое распространение извилистых (меандрирующих) русел как на малых, так и на больших реках, развитие излучин на реках, протекающих в различных природных условиях, отличающихся своим водным режимом, величиной стока наносов, соотношением его составляющих (взвешенных и влекомых), крупностью руслообразующих наносов, и изменения их формы в ходе эволюции, на разных стадиях которой излучины характеризуется неодинаковыми очертаниями и соотношениями параметров, обуславливают разнообразие терминологии, которой придерживаются исследователи при типизации речных излучин. Это хорошо видно в приведенном выше анализе классификаций излучин и в сводной таблице 1: в зависимости от их плановых очертаний и условий развития выделяют (в алфавитном порядке) адаптированные, асимметричные, вписанные, врезанные, вынужденные, заваленные, круговые, крутые, макроизлучины, незавершенные, ограниченные, омеговидные, пальцевидные, петлеобразные, П-образные, пологие, прорванные, свободные, сегментные, симметричные, синусоидальные, сложные, сундучные, эллиптические излучины. Одни из них различаются по классификационным признакам, другие являются синонимами. При этом использование для обозначения вида излучин того или иного термина не исключает применения других, что позволяет обеспечить полноту характеристики извилистого русла, особенно если одно из них характеризует конфигурацию излучины в плане, а остальные – условия ее формирования, степень развитости, крутизну и т.д. Например, свободные (по условиям формирования) излучины могут быть сегментными или крутыми петлеобразными; также описываются и врезанные излучины. С другой стороны, один и тот же термин по-разному трактуется применяющими его исследователями. Так, в классификации ГГИ свободными излучинами называется те, которые в своем развитии изменяют свою форму от сегментной до петлеобразной, а спрямление их происходит за счет встречного размыва берегов на шпоре излучины. В классификации МГУ термин «свободные» характеризует развитие излучин широкопойменного русла. С другой стороны, синонимами являются термины «прорванные» и «незавершенные (в точном написании – незавершенное меандрирование) излучины». В то же время ограниченные (по классификации ГГИ) и адаптированные (по классификации МГУ) излучины можно считать синонимами только в том отношении, что в обоих подходах эти термины относятся к излучинам, формирующимся в относительно узкой долине, но в первом случае понятие «ограниченные» соотносится только с одной разновидностью излучин, тогда как во втором выделяются их четыре – вынужденные, адаптированные, касающиеся в вершине коренного берега (они соответствуют в полной мере ограниченным в классификации ГГИ) и вписанные, причем отмечается, что как единичные формы они встречается и в широкопойменном русле там, где река подходит к коренному берегу.

Таким образом, при описании излучин и выделении их видов в литературе имеет место довольно большой разноречивый и различный толкование одних и тех же терминов. Для того, чтобы обеспечить в дальнейшем изложении однозначное их понимание и одновременно упорядочить представления о разновидностях излучин, предлагается использовать классификацию, предложенную Р.С. Чаловым [1998]. Она основывается на учете трех основных признаков: условий формирования, очертаний излучин в плане и особенностей деформаций. Эта классификация (рис. 10) состоит из двух взаимосвязанных блоков.

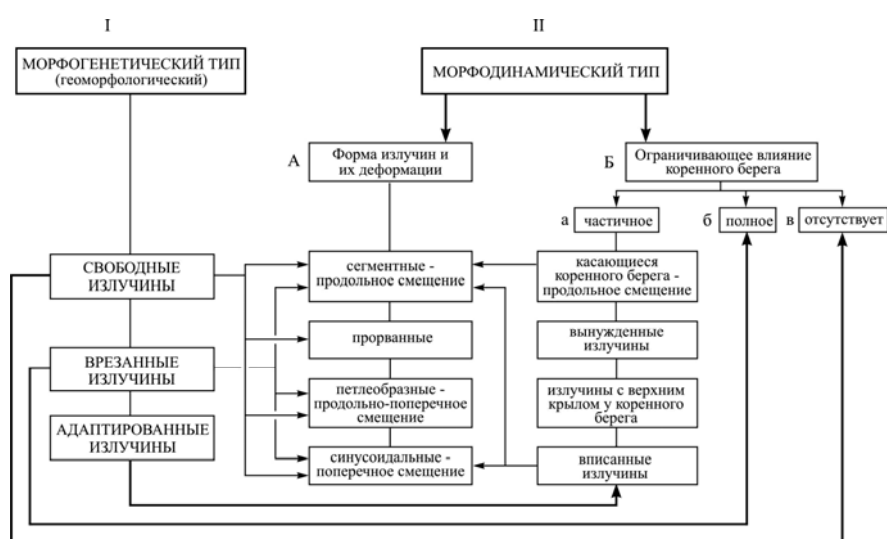


Рис. 10. Схема морфодинамической классификации излучин (по Р.С. Чалову [Чалов, Алабян и др., 1998]).

Блок I включает в себя морфогенетические виды излучин, формирование которых определяется геолого-геоморфологическими условиями развития русловых деформаций. Блок II – морфодинамический, состоит из двух подблоков, соответствующих очертаниям излучин в плане и форме смещения (деформаций) в процессе развития и спрямления (А) и влиянию на очертания и деформации излучин коренных берегов (Б). Подблок Б, следовательно, относится только к адаптированным (а) излучинам. При этом все излучины могут быть крутыми или пологими, причем петлеобразные или синусоидальные – только крутыми, если принимать, что излучина считается крутой при соотношении стрелы прогиба h и радиуса кривизны r $h > r$ и пологой – при $h < r$ [Маккавеев, 1971; Чалов, 1979]. В блоке I по геолого-геоморфологическим условиям выделяются три основных вида извилистых русла (рис. 11):



А



Б

Рис. 11. Основные типы речных излучин. *Продолжение рисунка и подписи на следующей странице.*



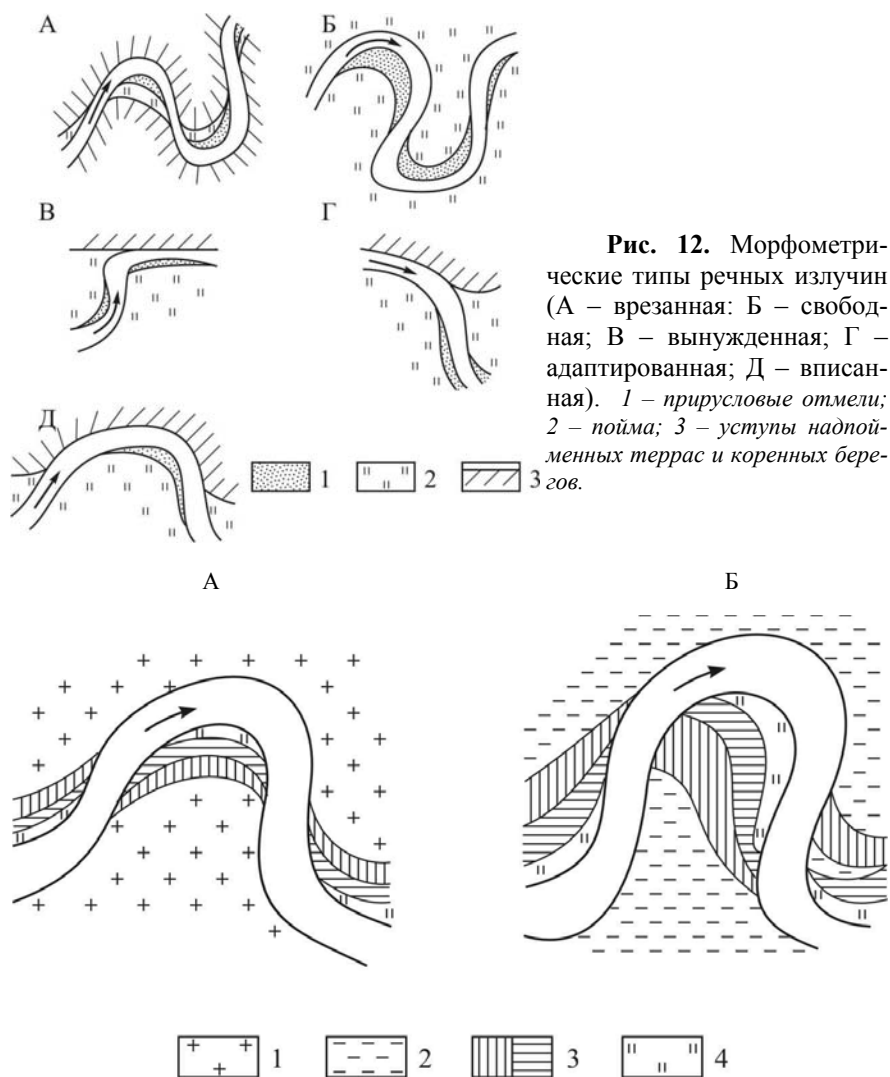
В

Продолжение рис. 11. Основные типы речных излучин: *А – врезанная (р. Лена, Ленские щели); Б – свободная (р. Юг); В – адаптированная (р. Обь, Тарадановская излучина).* Фото Р.С. Чалова.

1. *Врезанные излучины* формируются в условиях ограниченного развития горизонтальных русловых деформаций. В их пределах русло контролируется высокими незатопляемыми берегами, сложенными коренными породами и представленными уступами водораздельных поверхностей или цокольных террас (рис. 12А). Русло при этом повторяет в плане изгибы долины, пойма узкая, как правило, односторонняя, приуроченная к выпуклым берегам излучин, нередко отсутствует. Для врезанных излучин, как и для всех врезанных русел, соответствующих ограниченным условиям развития русловых деформаций, характерно соотношение $B_n < B_p$, где B_n – ширина поймы, B_p – ширина русла. Оно определяется существенным преобладанием в ходе развития излучин глубинной эрозии над боковой. Принято считать, что врезанные излучины формируются, если время, требующееся для смещения излучин вниз по течению на расстояние шага излучины, больше, чем время, необходимое для превращения высокой поймы у выпуклого берега в надпойменную террасу в процессе врезания [Панин, 1991].

Среди врезанных излучин выделяются две разновидности, связанные с различной литологией трудноразмываемых горных пород: а) в скальных породах; б) в пластичных породах. Форма и размеры первых обычно предопределяются структурно-тектоническими или геологическими услови-

ями – разломы, зоны трещиноватости горных пород и т.д. В этих условиях излучины чаще всего являются симметричными (рис. 13А), поскольку горизонтальные русловые деформации, заключающиеся в продольном смещении, благодаря скальным берегам практически не проявляются. На таких излучинах пойма отсутствует или представлена узкими фрагментами



($B_n < 0,1-0,01B_p$ в зависимости от размеров реки) бичевниковой (по А.В. Чернову, 1983) поймы. В областях распространения пластичных горных пород врезанные излучины наследуют свободные, сформировавшиеся до начала интенсивного врезания реки. В этих условиях поток одновременно с глубинной производит и боковую эрозию, вследствие чего излучина становится асимметричной (рис. 13Б): вогнутый берег представляет собой крутой подмываемый уступ высокой цокольной террасы или коренного борта долины, выпуклый – пологий, террасированный, с относительно широкой ($B_n \sim B_p$) поймой, характеризующейся ступенчатым профилем от тылового шва к руслу.

2. *Свободные излучины* свойственны условиям свободного развития русловых деформаций, формируются в долинах рек, где коренные породы не ограничивают горизонтальные смещения русла (рис. 12Б). Русла таких рек – широкопойменные, у них $B_n > 3-4 B_p$, ширина пояса меандрирования меньше, чем ширина дна долины. При свободном меандрировании наблюдается наибольшее разнообразие форм излучин. Для свободных излучин характерно существенное преобладание горизонтальной составляющей русловых деформаций над вертикальной (на несколько порядков), вследствие чего наблюдается смещение излучин как продольное (вниз по долине реки), так и поперечное, приводящее к постоянной трансформации формы излучин в процессе размывов меандрирующей рекой пойменных берегов, сложенных легкоразмываемыми породами (песками, супесями, суглинками). В отличие от врезанных излучин, формирующихся практически без взаимодействия руслового и пойменного потоков, в условиях, когда весь сток воды во все фазы водного режима, в том числе многоводные, при прохождении руслоформирующих расходов сосредоточен в самом русле, свободные излучины, располагаясь среди широкой двусторонней поймы, в своем развитии испытывают влияние оттоков воды из русла в пойму и сливов ее с поймы в русло, причем во время половодий (паводочных периодов) по пойме проходит до 80% расхода воды [Барышников, 1984]. Пойма в этом случае выступает и как регулятор стока, и как фактор, определяющий специфику развития излучин, вплоть до их спрямления через основание пойменных сегментов (образование прорванных излучин [Маккавеев, 1971] или незавершенное меандрирование [Попов, 1965]).

3. *Адаптированные излучины* (рис. 12В, Г, Д) формируются либо в широкопойменном русле при подходе или расположении реки возле коренного берега как одиночные формы русла, либо в относительно узкой долине ($B_p < B_n < 3-4B_p$), в которой река последовательно переходит от одного коренного берега к другому и имеет чередующуюся то лево-, то правобережную пойму. Если верхнее крыло располагается в пойменных берегах, а нижнее вдоль коренного берега, излучина является вынужденной (рис. 12В); если верхнее крыло располагается у коренного берега, а нижнее в пойменных берегах – адаптированной (рис. 12Г). Таким образом, ограничивающим фактором развития данных видов излучин являются коренные борта речной

долины, сложенные трудноразмываемыми породами. Это, в первую очередь, относится к поперечному смещению излучин, что приводит в процессе формирования к отличиям в их размерах и форме по сравнению со свободными излучинами. Одной из разновидностей излучин этого типа являются вписанные излучины, вся привершинная часть которых (со стороны как верхнего, так и нижнего крыльев) представлена вогнутым коренным берегом (рис. 12Д), сложенным относительно неустойчивыми к размыву породами, как правило, аллювиальными песками или супесями [Букреев, 1987; Чалов, Алабян и др., 1998]. В относительно узких долинах, где ширина поймы B_n не превышает трех ширин русла, т.е. $B_n < 3B_p$, вынужденные и адаптированные излучины следуют одна за другой, образуя морфологически однородные участки адаптированного русла. При разнородном строении бортов долины вынужденные и адаптированные излучины располагаются у коренного берега, сложенного трудноразмываемыми породами, тогда как у противоположного песчаного террасового формируются вписанные излучины (рис. 14).



Рис. 14. Вынужденная, адаптированная у правого берега (левая часть снимка) и вписанные (правая часть снимка) излучины одной из рек Скандинавии (фотография представлена З. Бабиньским, Польша).

Блок II (морфодинамический) классификации излучин (рис. 11) включает в себя подблок, в котором излучины характеризуются своими очертаниями в плане. Такой подход впервые был предложен Н.И. Маккавеевым [1971], выделившим сегментные, петлеобразные, синусоидальные,

прорванные, заваленные и сундучные излучины (рис. 15). Однако описательный принцип, положенный в основу выделения этих разновидностей излучин, является лишь внешним. На самом деле излучинам с теми или иными морфологическими очертаниями соответствует свойственные только им механизм и направленность смещения, характер трансформации формы по мере развития, рельеф русла (расположение плесов и перекатов, что было подмечено еще Л. Фаргом) и, наконец, определенные соотношения между морфометрическими параметрами [Завадский и др., 2000].

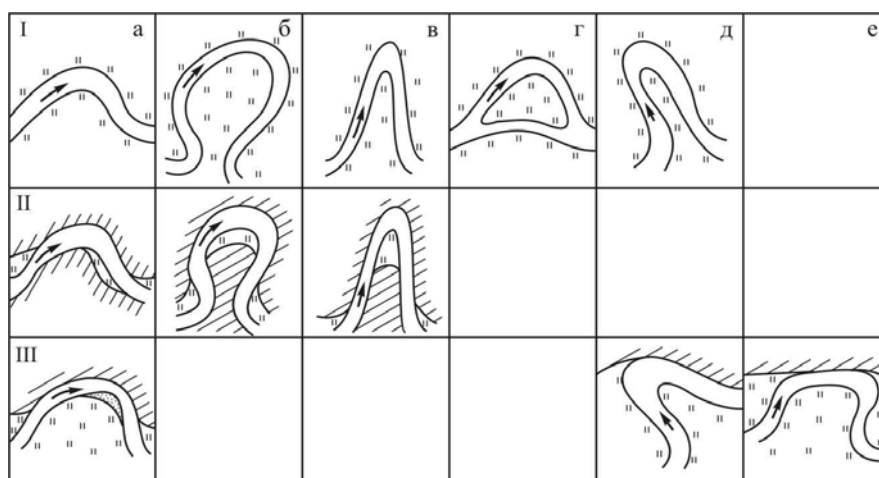


Рис. 15. Виды свободных (I), врезанных (II) и адаптированных (III) излучин: а – сегментные; б – петлеобразные; в – синусоидальные; г – прорванные; д – заваленные; е – сундучные.

1. *Сегментные излучины* (рис.15а) – наиболее типичная форма меандрирующего русла, образованная дугами круга. Для них характерно преобладающее продольное смещение.

2. *Петлеобразные (или омеговидные) излучины* (рис. 15б) характеризуются продольно-поперечным смещением. Шпоры этих излучин пережаты вдоль оси пояса меандрирования с образованием узкой шейки между верхним и нижним крыльями. Спрямление петлеобразных излучин происходит на поздних стадиях развития излучин за счет встречного размыва берегов на их крыльях. При этом формирующиеся старицы быстро отшнуровываются от реки и превращаются в пойменные старичные озера.

3. *Синусоидальные излучины* (рис. 15в) отличаются преобладанием поперечного смещения. Они вытянуты в поперечном по отношению к оси пояса меандрирования направлении и имеют протяженные прямолинейные участки (вставки) на крыльях.

4. *Прорванные излуины* (рис. 15г) являются результатом завершения эволюции излуин, имеющих чаще всего крутую сегментную форму (в классификации ГГИ процесс их образования получил название «незавершенное меандрирование»). Такие излуины спрямляются в половодье, формируя через шпору новое русло. Русловые деформации в старом русле либо постепенно прекращаются, оно отмирает с образованием серповидноизогнутой старицы, в нижней части переходящей в залив (курью), либо продолжают функционировать, образуя пойменную многорукавность.

Прорванные излуины характерны только для широкопойменных русел, являясь одной из форм проявления свободного меандрирования реки. Сегментные, синусоидальные и петлеобразные излуины свойственны также врезанному руслу. Адаптированные излуины могут быть сегментными или синусоидальными. Отличия этих излуин при свободных и ограниченных условиях развития русловых деформаций заключаются в скоростях горизонтальных деформаций. Если в первом случае они проявляются в ежегодном размыве и намыве берегов, то в ограниченных условиях деформации врезанных излуин проявляются только за исторические и даже геологические отрезки времени [Чалов, Алабян и др., 1998].

5. *Заваленные излуины* (рис. 15д) формируются при преимущественном смещении вершины излуины вниз или вверх по течению относительно стрелы прогиба и представляют собой гипертрофированные формы, образование которых связано с воздействием дополнительных, в том числе внешних по отношению к потоку, факторов. Они часто являются вынужденными, т.к. формируются под влиянием коренного берега, благодаря которому нижнее крыло относительно стабильно, а верхнее, расположенное в пойменных берегах, продолжает смещаться. В результате происходит «сжатие» излуин [Маккавеев, 1971], приобретающих заваленную вверх форму. Свободные излуины такой формы встречаются в устьевых областях рек как следствие нагонных или приливных воздействий на динамику потока [Кортаев, Лодина и др., 1978], выше узлов слияния рек на притоках, находящихся в подпоре во время прохождения руслоформирующих расходов воды.

6. *Сундучные излуины* (рис. 15е) представляют собой комбинацию вынужденной и адаптированной излуин, разделенных коротким отрезком прямолинейного русла возле коренного берега, образующим «вставку» между нижним крылом одной и верхним крылом другой излуины.

Если излуины осложняются вторичными изгибами русла, их называют сложными [Маккавеев, 1971]. Однако в этом случае речь идет об иерархии вложенных друг в друга форм русла, подобно развитию излуин рукавов разветвленного русла или образованию островов (разветвлений второго порядка) на излуинах.



ГЛАВА 2



ФОРМИРОВАНИЕ ИЗЛУЧИН



2.1. Причины и механизм образования излучин

Причины меандрирования – давно дискутируемый, но окончательно не решенный вопрос. Уже к середине XX столетия насчитывалось более 40 гипотез [Экспериментальная геоморфология, 1969], и с тех пор их количество только увеличивалось. Критический обзор этих гипотез можно найти в ряде трудов отечественных и зарубежных исследователей [Маккавеев, 1955; Leopold, Wolman, 1960; Yang, 1971; Hakanson, 1973; Знаменская, 1976; Knighton, 1977; Замышляев, 1978; Callander, 1978; Матвеев, 1985; Сидорчук, Михинов, 1985]¹.

Часть гипотез представляет лишь исторический интерес. К таковым относится, например, объяснение меандрирования действием силы Кориолиса – инерционной отклоняющей силы осевого вращения Земли [Бэр, 1860; Einstein, 1926]. Эта группа гипотез опровергается не только гидродинамическими [Werner, 1951; Yang, 1971; Rachocki, 1973], но и географическими аргументами. Действительно, значимое участие силы Кориолиса в формировании излучин должно было бы выражаться в увеличении интенсивности меандрирования рек по направлению от экватора к полюсам, но выраженных различий в меандрировании рек низких и высоких широт не наблюдается. Извилистые русла встречаются и в экваториальных широтах, где ускорение Кориолиса равно или близко к нулю. Отсутствуют статистически значимые различия в параметрах лево- и правосторонних меандров, что указывает на незначительную роль кориолисовых сил в их формировании. В бассейне р. Камы [Бутаков и др., 1997] скорости поперечных смещений излучин превышают средние (0,1-1 м/год) в 1,5-2 раза на одних реках у правосторонних излучин, на других – у левосторонних.

Среди подходов, дискутируемых до настоящего времени, можно выделить следующие.

1. *Гипотезы «первичного толчка»* – действие препятствия, нарушившего прямолинейное движение потока (выступ прочных горных пород, конус выноса оврага или притока, обвальное или оползневое тело и т.п.) [Penk, 1894; Davis, 1913; Werner, 1951]. Отклонение потока приводит к размыву противоположного берега и возбуждению циркуляционных течений, которые способствуют дальнейшему самостоятельному росту первичного

¹ Ссылки на работы, не упомянутые в списке литературы, заимствованы из обзоров.

изгиба. Такого рода излучины действительно нередко встречаются на реках. Случайные выступы берегов, отвалы грунта при землечерпании и другие препятствия, способные оказывать отклоняющее воздействие на поток, становятся причиной зарождения излучин в прямолинейных каналах [Карасев, 1975]. В то же время, данное объяснение не может считаться всеобщим и исчерпывающим, т.к. не в состоянии объяснить регулярность (многократное повторение) излучин, свойственное меандрирующим рекам. Кроме того, наиболее регулярные и развитые излучины свойственны широкопойменным руслам, формирующимся в пределах относительно однородной толщи рыхлых, преимущественно аллювиальных отложений, а влияние коренных берегов на русло минимально.

2. *Обоснование энергетической выгоды процесса меандрирования.* Наибольшее развитие получил постулат о том, что в потоке имеют место процессы саморегуляции, направленные на минимизацию потерь энергии. «Поразительная геометрическая правильность извивающейся реки не случайна. Очевидно, меандры – та форма русла, при которой река совершает минимальную работу; следовательно, это наиболее вероятная форма, которую может принять русло реки» [Leopold, Langbein, 1966, с. 60]. Ч. Янг [Yang, 1971] так же полагает, что разные потоки создают свое русло так, чтобы скорость затрат потенциальной энергии по длине была минимальной. А. Найтон [Knighton, 1977], комментируя гипотезу Леопольда – Лангбейна, отмечает, что в прямолинейных руслах потери энергии на перекатах значительно превышают таковые на плесах, в то время как на излучинах они более равномерны благодаря росту сопротивления на изгибах потока (в плесах). Поэтому формирование меандров отражает не только стремление к общей минимизации потерь энергии, но и выравнивание этих потерь по длине потока. Гипотезы, исходящие из постулата об «экономии сил природных процессов» [Маккавеев, 1955, с. 264], были популярны и в первой половине XX века. По этому поводу Н.И. Маккавеев [1955] писал, что принцип минимальной диссипации энергии приводит к двум совершенно противоположным положениям. С одной стороны, река должна искривляться для уменьшения потерь энергии и производимой ею эрозионной работы, с другой – прямое направление является наивыгоднейшим. По Н.И. Маккавееву [1955, 1971], выгода меандрирующей формы русла заключается в увеличении живой силы потока на изгибе русла вследствие роста неравномерности поля скоростей.

3. *Представление о том, что меандрирование является отражением присущей потоку неустойчивости прямолинейного движения* в самых различных внешних средах: твердой (русловые потоки, потоки талых вод на поверхности ледников), жидкой (меандрирование морских течений), воздушной (движение атмосферных фронтов) [Flohn, 1952; Leopold, Wolman, 1960; Leopold et al., 1964]. В лабораторных опытах со струйкой воды на гладкой наклонной поверхности получены меандры, по форме и относительным размерам идентичные речным [Goryski, 1973]; описаны и приведе-

ны фотографии правильных излучин водного потока на поверхности речной наледи [Кондратьев и др., 1982].

Все разнообразные примеры меандрирования объединяет наличие трения на границе движущихся сред, а также потенциальные (инерционные) эффекты. Свидетельством единой природы меандрирования может служить наличие общей для всех случаев (реки разных размеров, талые потоки на поверхности ледников, меандры Гольфстрима) связи длины волны (удвоенного шага) меандров с шириной водного потока [Leopold, Wolman, 1960]:

$$\lambda_m = 10,1 B_p . \quad (2.1)$$

Объяснение меандрирования рек как следствие неустойчивости прямолинейного движения водного потока получило широкое признание и распространение среди отечественных исследователей. Еще М.В. Потапов [1950, с. 319] отмечал, что «...при нарушении прямолинейности потока возникающий в нем внутренний механизм течений не содействует ликвидации или ослабеванию первоначального нарушения, а, наоборот, усиливает его ... Изогнутая форма в плане есть естественная устойчивая форма речных русел». Впервые научно обосновал этот подход Н.Е. Кондратьев [1954]. Дальнейшее развитие гипотеза получила в работах И.Ф. Карасева [1975], К.В. Гришанина и И.В. Замышляева [1985].

Основным принципом, заложенным в этой гипотезе, является представление об энергетической выгоде извилистой формы русла. Количественные характеристики явления были получены А.Я. Миловичем [1914] (для идеальной жидкости) и впоследствии Н.И. Маккавеевым [1955] (по экспериментальным данным). По данным А.Я. Миловича, увеличение живой силы потока (кинетической энергии) на повороте русла, в сравнении с прямолинейным участком, должно составить 100%, что объясняет динамическую устойчивость извилистой формы русла.

Механизм самого явления заключается в следующем. При отклонении потока от прямолинейного движения, порождаются силы, способствующие закреплению и дальнейшему развитию изгиба, обуславливая, таким образом, его динамическую устойчивость [Маккавеев, 1955; Проектирование судовых ходов ..., 1964; Маккавеев, Чалов, 1986; Чалов, Алабян и др., 1998]. Такими силами является местное возрастание кинетической энергии потока за счет увеличения неравномерности поля скоростей, транспортирующей и эрозионной способности потока. При этом на изгибе, вследствие действия центробежной силы, возникают циркуляционные течения, с развитием которых в вершине формирующейся излучины связана ее дальнейшая эволюция. Изучением этого явления впервые в России начал заниматься в конце XIX века Н.С. Лелявский [1948], исследовавший распределение течений на излучинах Днепра с помощью специально изобретенного им «донного флюгера». Впоследствии, М.В. Потаповым [1950] было проведено всестороннее изучение и анализ структуры потока на изгибе в натурных и ла-

бораторных условиях. Результатом послужил разработанный им метод возбуждения искусственной поперечной циркуляции, который положил начало принципиально нового подхода к регулированию русел. Особенность структуры водного потока на изгибе русла заключается в следующем: «верхний слой воды, испытывающий большие центробежные силы, будет двигаться в направлении их действия и при этом вытеснять нижний слой воды, который обладает меньшей центробежной силой. В результате, в поперечном сечении потока возникает замкнутое течение (циркуляция)» [Потапов, 1950, с. 316]. Поверхностный слой воды отклоняется от общего направления течения к вогнутому берегу, придонные слои, наоборот, отклоняются от вогнутого берега к выпуклому («донное течение») и относят к нему донные наносы. При этом происходит размыв вогнутого берега и отложение продуктов размыва у выпуклого. Вследствие этого формируется асимметричный поперечный профиль русла в привершинной части с большими глубинами (плесом) у размываемого берега и с отмелью в месте отложения наносов. М.В. Потапов также отмечал рост транспортирующей способности потока на повороте, что связано с ростом кинетической энергии потока. Увеличение неравномерности скоростного поля вызывает перекосы в поперечном сечении водной поверхности и развитие циркуляционных течений внутри потока.

Однако замкнутое винтообразное течение (циркуляционное) возникает только в русле, у которого ширина русла B_p и его глубина h_p соизмеримы между собой. На это указывал Н.И. Маккавеев [1955], показавший, что ширина винтообразного течения не превышает 15-20 h_p . Такой же результат был получен еще М.В. Потаповым [1936]. В более широком русле имеют место разделение потока на несколько динамических осей. А.И. Лосиевский [1934] на основе лабораторных опытов показал, что единое винтообразное течение охватывающее весь поток, наблюдается только в узком, но относительно глубоком русле; в широком относительно мелком русле поток распадается на несколько ветвей.

И.Ф. Карасев [1975] предложил оценивать условия движения потока в русле критерием его квазиоднородности

$$\theta = \frac{B_p}{h_p} \sqrt{\lambda}, \quad (2.2)$$

где $\lambda = (2g)/C$ – модуль гидравлических сопротивлений, C – коэффициент Шези. Его анализ показывает, что в руслах малых рек θ приобретает наименьшие значения ($<4,5$), что соответствует условиям сохранения потоком «формы компактной струи, имеющей размеры всего русла» [с. 100]. С ростом θ поток расплывается, а затем разделяется на обособленные ветви течения, что соответствует уже средним и большим рекам.

Вместе с тем, согласно исследованиям В.М. Замышляева [1982], условие существования компактной струи еще не означает прямолинейности потока: благодаря действию силы трения, направленной поперек русла, и

реакции дна, направленной по нормали к берегу, поток искривляется, образуя серию следующих друг за другом изгибов, с возникновением которых появляется центробежная сила. Им разработана математическая модель, расчет по которой приводит к получению извилистой формы потока – синусоидальной или в виде полуокружностей.

Представления о внутренне присущей русловым потокам неустойчивости прямолинейного движения послужили методическим основанием для разработки и других математических моделей неустойчивости русловых потоков. Однако в них, в отличие от идей В.М. Замышляева, допускающих абсолютную жесткость дна и берегов, дно и береговая линия потока принимаются всегда обладающими многочисленными неровностями, образующими непрерывный спектр. Эти неровности создают возмущения глубины, скоростей течения, расхода наносов и других параметров потока. С течением времени амплитуда возмущений изменяется, и те из них, которые обладают положительными наибольшими скоростями роста, проявляются в форме дна и берегов русла. Для математического моделирования этих процессов разработан так называемый метод малых возмущений [Callander, 1969].

Однако неустойчивость прямолинейного потока, приводящая к его извилистости, сама по себе не означает образования соответствующей ей извилистой формы русла. Так, Г. Паркер [Parker, 1976] справедливо полагает, что для реализации неустойчивости и возникновения меандрирования необходим дополнительный «третий эффект»: для речных потоков – транспорт наносов, для лишенных наносов потоков талых ледниковых вод – градиент температур, для океанических течений – сила Кориолиса, для мельчайших лабораторных потоков – поверхностное натяжение жидкости.

Механизм реализации неустойчивости прямолинейного движения связывается, прежде всего, со способностью потока эродировать дно и берега и осуществлять транспорт наносов. Еще в 1920-е годы Н.Н. Жуковский [1948, с. 346] следующим образом описывал процесс образования речных излучин: «Следствием вызываемой побочном боковой концентрации вод является ... размыв берега, примыкающего к боковой плесовой ложине, и возникновением на ее продолжении в большем или меньшем от нее расстоянии второго побочня. Если первый побочень имеет постоянный объем и находится ... в состоянии перемещения, то размыв плесового берега, достигнув определенной степени развития, ... остается далеко незаконченным к моменту удаления побочня из данного участка русла. Если же побочень из-за непрерывного и обильного притока наносов из вышележащей части реки непрерывно растет и перемещает свою подошву все ближе и ближе к противоположному берегу, то растет и вытесняющее его действие на притекающие сверху воды, благодаря чему размыв плесового берега удерживается непрерывно на однообразной степени интенсивности и береговая линия, вместе с плесовой ложинкой, перемещается все далее и далее вглубь материка. Таким образом, возникает местный поворот реки.

Интенсивный размыв данного берега, очевидно, обуславливает собой интенсивный же приток наносов к связанному с ним нижележащему побочню, который, в свою очередь, столь же быстро растет и вызывает аналогичный размыв противоположного берега, так же отступающего в сторону материка вместе со своей плесовой ложбиной. Таким образом, возникает второй поворот, образующий с первым двойной поворот или извилину реки. ... рост побочня ... приводит к обращению корневых частей побочня в отсыпи пойменного берега ... Так образуются и развиваются из извилины излучины и их луки».

Учитывая увеличение живой силы потока на изгибе, Н.И. Маккавеев [1955, с. 271-272] рисует следующую картину образования излучины: «... местный изгиб струй потока, вызванный, например, скоплением нескольких более крупных частиц наносов или другой причиной, способствует более интенсивной эрозии дна, чем на прилегающих участках живого сечения, где струи прямолинейны. ... Увеличение глубины, вследствие более энергичного размыва, по криволинейному пути струй вызывает перераспределение расхода воды, изгиб становится более выраженным и постепенно приводит к образованию излучины всего русла. На участках русла, которые в результате прорыва шейки меандры или искусственного спрямления получили прямолинейную форму, восстановлению извилин обычно предшествует образование беспорядочно расположенных эрозионных углублений и аккумулятивных гряд, вследствие чего в потоке создается значительное количество небольших местных изгибов струй. Постепенно некоторые из этих изгибов увеличиваются за счет уничтожения других, охватывают всю ширину потока, и в расположении гряд все яснее проявляется «шахматный» рисунок». Описанный механизм идентичен идеям, положенным позднее в основу метода малых возмущений. Кроме того, он сближает все три группы гипотез возникновения меандрирования. Рост живой силы на изгибе объясняет предрасположенность потока к криволинейному движению. С другой стороны, в потоке (природном или лабораторном) всегда имеется бесконечное количество «первичных толчков» в виде неровностей берегов и дна, турбулентных возмущений различного масштаба, отклоняющих струи потока от прямолинейного направления [Великанов, 1955; Зайцев, 1979], т.е. имеется бесконечное число возможностей реализовать вышеупомянутую предрасположенность. Другой вопрос – механизм этой реализации. В русловом потоке с деформируемым дном это происходит за счет местных процессов эрозии и аккумуляции наносов, т.е. путем закрепления изгиба струй в рельефе дна и форме береговой линии. Для потоков другого рода можно опереться на «третий эффект» Г. Паркера.

Большинством исследователей регулярные размывы берегов также тесно увязываются с формированием крупных грядовых форм. Основанием для этого может служить, например, близость линейных размеров излучин и крупных неровностей дна. Е. Келлер и В. Мельхорн [Keller, Melhorn, 1978] на большом региональном материале показали, что среднее расстояние ме-

жду гребнями перекатов как врезанных, так и широкопойменных русел имеет тесную связь со средней шириной русла в бровках поймы. Эта связь описывается зависимостью:

$$\lambda_r = 5,42 B_p^{1,01}. \quad (2.3)$$

Сравнение зависимостей (2.1) и (2.3) показывает, что шаг меандров близок к среднему расстоянию между соседними перекатами.

Предлагаются различные схемы преобразования вертикальной неустойчивости дна прямолинейного русла в изменение его плановой формы [Hakanson, 1973; Levin, 1976; Richards, 1982; Knighton, 1984]. Так, Д. Левин [Levin, 1976] наблюдал за формированием излучин в искусственно спрямленном русле р. Исвит в Уэльсе. После сильного паводка в русле возникла регулярная серия побочней, которые постепенно росли, вытесняя и искривляя русло. С другой стороны, Д. Левин отмечает, что когда извилистое русло уже сформировалось, его развитие слабо зависит от начальных форм, и наращивание побочней становится уже не причиной, а результатом эрозии вогнутых берегов. Однако это возможно только на малых реках, на которых поперечная циркуляция потока приобретает вид винтообразного течения, перемещающего наносы от вогнутого берега к выпуклому. Имеет место обратная связь: в извилистом русле перекаты возникают на перегибах между соседними излучинами как следствие изменения структуры водного потока, т.е. расположение перекатов и плесовых ложин диктуется формой русла в плане, а не наоборот. Тот же Д. Левин [Levin, 1977], а также У. Мильне [Milne, 1983] связывают причину меандрирования с циркуляционными течениями, возникающими в потоке и с образованием в изначально прямолинейном русле плес – перекатных систем. П. Аскерс [Ackers, 1964] отмечает, что меандрирование начинается, если наблюдается неустойчивость донных наносов, выражающаяся в появлении побочней. В стабилизации грядовых форм, закреплении их растительностью и образовании поймы видит причину меандрирования А.Ю. Сидорчук [1992]. Основываясь на обширном литературном и собственном материале, Р.С. Чалов [1979] показал, что «толчком» для развития излучин служат побочни перекатов, располагающиеся в русле в шахматном порядке. Они обуславливают извилистость динамической оси потока, в котором, вследствие этого, создается своеобразное скоростное поле и возникают циркуляционные течения. Благодаря им начинают интенсивно размываться берега, происходит увеличение кривизны изгиба русла. Таким образом, достаточное количество руслообразующих наносов, транспортируемых потоком в виде крупных гряд – побочней, перекатов, является необходимым условием для формирования свободномеандрирующего русла. Это подтверждается слабым распространением извилистых русел в начальных звеньях русловой сети, у которых еще не достигнуто равновесие между транспортирующей способностью потока и расходом наносов. Русла таких рек чаще имеют прямолинейные очертания и интенсивно врезаются в подстилающие породы.

К. Тинклер [Tincler, 1970] считает, что наличие гряд перекатов в прямолинейном русле может и не приводить к развитию меандрирования. Действительно, важным элементом в процессе преобразования извилин динамической оси потока в излучины русла является закрепление побочней. В природных условиях это происходит благодаря их зарастанию растительностью. В лабораторных опытах С. Шумма и Х. Хана [Schumm, Khan, 1972] меандрирующее русло было получено лишь после добавления в поток взвешенных наносов, кольматирующих поверхность побочней, что предохраняло их от последующего размыва. К таким же выводам пришел Р.С. Чалов [1997], показавший, что закрепление растительностью побочней зависит от скорости их смещения: чем она выше, тем меньше вероятность появления на побочнях густой кустарниковой растительности, повышающей шероховатость русла при их затоплении. Поэтому слабой извилистостью характеризуются реки с низкой устойчивостью русла, постоянно перерабатывающие свои берега [Маккавеев, 1955].

Во врезанных руслах, особенно галечно-валунных, формирование и развитие излучин имеет свою специфику, связанную с высокой устойчивостью русла и ограниченными условиями развития горизонтальных деформаций. Подробное исследование происхождения, морфологии и динамики врезанных излучин привело Б.В. Матвеева [1985] к выводу об их гетерогенной природе: они могут быть унаследованы от свободных излучин существовавшего прежде широкопойменного русла, могут формироваться в процессе врезания при участии геологической структуры или целиком быть обусловлены структурно-литологическими особенностями субстрата и лишь моделироваться водным потоком.

Таким образом, импульсом для начала развития излучины служит формирование первичного изгиба в направлении движения водного потока. Искривление струи потока в прямолинейном русле может происходить по различным причинам (впадение притоков, препятствия в русле, развитие турбулентных возмущений внутри потока). Однако причиной зарождения самой излучины как формы русла является специфика транспорта наносов водными потоками в виде крупных гряд – побочней и их закрепление (при обсыхании в меженьный период) растительностью. Дальнейшее развитие излучины определяется как циркуляционными течениями, так и особенностями скоростного поля потока на изгибе русла.

2.2. Условия формирования излучин



Условия формирования основных морфодинамических типов русел – прямолинейного, разветвленного, меандрирующего – изучаются методами гидроморфологического анализа и теории гидродинамической устойчивости русловых потоков. Н.Е. Кондратьев и др., [1982] тип русла рассматривают как режимное состояние системы «поток-русло», определяемый соотношением ширины и уклонов русла и дна долины, т.е. условиями транспор-

та наносов реками. Л. Леопольд и М. Уолман [Leopold, Wolman, 1957] приняли в качестве определяющих факторов уклон русла I и расход воды в бровках поймы Q_ϕ , соответствующий (по Р.С. Чалову, 1979) среднему интервалу руслоформирующих расходов воды. Данные по меандрирующим и разветвленным руслам рек США и Индии разделились в этих координатах на две области (рис. 16), разделенные линией

$$I_c = 0,0125 Q_\phi^{-0,44}, \quad (2.4)$$

где I_c назван критическим уклоном меандрирования-разветвления.

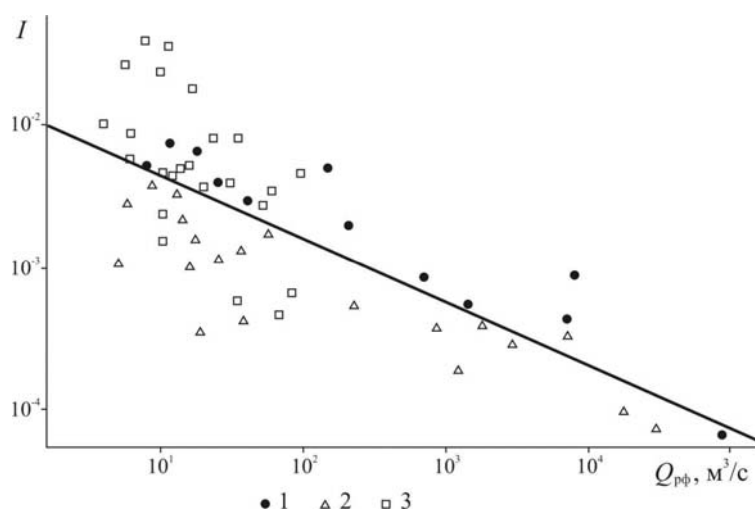


Рис. 16. Диаграмма «уклон-расход» для рек США и Индии [Leopold, Wolman, 1957]: 1 – меандрирующие русла; 2 – разветвленные русла; 3 – прямолинейные русла.

Впоследствии М. Карсон [Carson, 1984], проанализировав данные Л. Леопольда и М. Уолмена, пришел к выводу, что полученная ими зависимость разграничивает прежде всего реки с песчаным и галечным руслом. Уклон выше критического имеют галечные русла, большинство которых в исходном массиве данных разветвляется; уклон ниже критического имеют песчаные русла, большинство которых меандрирует. Д. Хендерсон [Henderson, 1961] ввел в формулу Леопольда-Уолмена крупность руслообразующих наносов:

$$I_c = 0,0196 d_{50}^{1,14} Q_\phi^{-0,44}, \quad (2.5)$$

поскольку увеличение крупности наносов сопровождается, как правило, увеличением уклонов ($d \sim I$). В. Остеркамп [Osterkamp, 1978] на данных по 76 рекам штата Канзас (США) с песчаными и песчано-галечными руслами также показал, что соотношение $I \sim Q$ может быть описано семейством урав-

нений с параметрами d_{50} . Д. Брей [Bray, 1982], проанализировав данные по галечным и галечно-валунным руслам Альберты (Канада), получил, что извилистые русла с коэффициентом извилистости более 1,25 имеют уклон менее, чем

$$I_c = 0,0367 Q_2^{-0,44}, \quad (2.6)$$

где Q_2 – расход воды при паводке двухлетней повторяемости. Выше этой линии (А) лежат точки, соответствующие слабоизвилистым и разветвленным руслам (рис. 17).

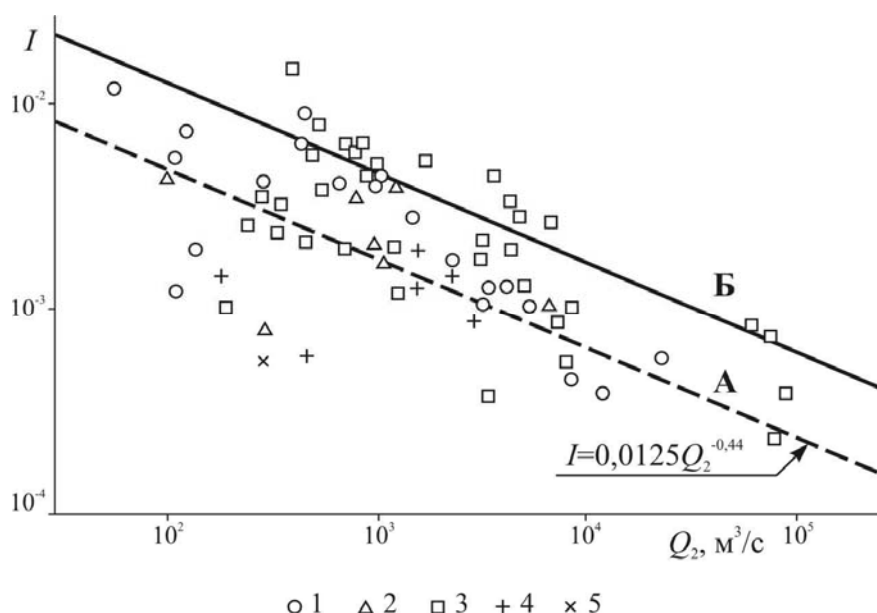


Рис. 17. Диаграмма «уклон-расход» для галечных русел рек Альберты (Канада) с различной степенью извилистости (А) [Bray, 1982]; Б – линия, полученная Л. Леополдом и М. Уолменом [1957]. Реки с коэффициентом извилистости (степенью развитости) l/L : 1 – 1,0-1,25; 2 – 1,25-1,55; 3 – 1,55-1,85; 4 – 1,85-2,15; 5 – 2,15-2,45.

На этом рисунке приведена также линия Леопольда – Уолмана Б (2.4). Из сравнения видно, что критический уклон для рек с крупнообломочным аллювием значительно выше I_c , полученного без учета крупности наносов. Характерна общая тенденция: чем больше значения l/L , тем левее и ниже на графике расположены соответствующие точки. Р. Фергюсон

[Ferguson, 1984] по данным для 89 песчаных и галечных русел получил зависимость для I_c с учетом крупности наносов:

$$I_c = 0,042 Q_\phi^{-0,49} d_{50}^{0,09} \quad (2.7a)$$

$$I_c = 0,017 Q_\phi^{-0,49} d_{90}^{0,27} \quad (2.7б)$$

В данном случае линия Леопольда – Уолмена лежит слишком высоко для песчаных и слишком низко – для галечных русел.

В России метод I - Q -диаграмм для определения условий формирования русел с различным морфодинамическим типом использовался В.В. Ро-машиним [1968], В.И. Антроповским [1970, 1972], А.М. Алабяном [1992]. Последним было проведено физическое обоснование этого метода, основанное на связи различных форм грядового движения наносов с показателями мощности потока.

Обоснование I - Q -диаграмм обычно проводится с позиций удельной энергии или мощности потока. З. Бегин [Begin, 1981] рассчитал значение донного касательного напряжения τ/τ_m (τ_m – среднее по всем данным) для 126 сильноизвилистых (извилистость $l/L > 1,5$), 54 слабоизвилистых ($l/L < 1,5$) и 82 разветвленных русел. С ростом τ/τ_m доля сильноизвилистых русел уменьшается, доля разветвленных растет; максимум встречаемости слабоизвилистых русел приходится на $\tau/\tau_m = 2,0$. Иначе говоря, с ростом касательного напряжения возрастает вероятность разветвления русла на рукава. Механизм формирования русел разных типов этот автор объясняет возрастанием скоростей размыва берегов и транспорта наносов при увеличении удельной энергии потока. Близкий подход применяет Р. Фергюсон [Ferguson, 1973, 1984]. Из выражения для удельной мощности потока $W = \rho g Q I B_p^{-1}$ и из статистически устойчивой связи $B_p \sim Q^{0,5}$ следует, что $W \sim Q^{0,5} I$. Вычисленная таким способом удельная мощность потока примерно постоянна вдоль граничной линии, полученной Л. Леопольдом и М. Уолменом (2.4.) и составляет $W_c = 50$ Вт/м². Р. Фергюсон заключает, что реки с $W > W_c$ разветвляются, реки с $W < W_c$ меандрируют. М. Карсон [Carson, 1984] для линии (2.7) получил $W_c = 30$ Вт/м², отметив, что энергетические пороговые соотношения скорее характеризуют условия начала движения наносов, чем условия формирования типов русла. Тем не менее, во всех исследованиях зафиксирован рост пороговой комбинации $I \sim Q$ (т.е. мощности потока) с увеличением крупности руслообразующих наносов. А.М. Алабян [1992] для исследований условий формирования разветвленных русел использует мощность потока на единицу его длины. По его данным между типами русла имеется широкая переходная область: в диапазоне мощности потока от 4 до 15 кВт/м (0,4 < $Q_\phi I$ < 1,5) могут существовать как разветвленные, так и меандрирующие русла. Очевидно, это связано с разнообразием условий руслоформирования – противоэрозионной устойчивостью берегов, гидрологическим режимом, крупностью и количеством руслообразующих наносов и т.д. [Алабян, 1992; Чалов и др., 1998].

Именно многофакторность русловых процессов определяет специфику I - Q -диаграммы для больших и малых, равнинных и горных, врезанных и широкопойменных рек. Это видно на рис. 18, на котором приведены I - Q -диаграммы для среднего Амура, Северной Двины, Оби, Лены с их крупнейшими притоками – Чулымом, Вилюем, Алданом, Хуанхэ, Янцзы (А) и малых рек Алтайского региона (Б). Для первых поле точек на графике зависимости $Q_{\text{ср}}=f(I)$ (рис. 18А) можно разделить на три части, соответствующих конкретному морфодинамическому типу русла. Точки, относящиеся к участкам со свободномеандрирующим руслом, располагаются в нижней части I - Q -диаграммы; в верхнем правом углу графика находятся точки, соответствующие максимальной мощности потока и принадлежащие различным видам разветвленного русла; точки средней части графика соответствуют относительно прямолинейному руслу. Линии раздела аппроксимируются уравнениями

$$I=5,2Q^{-0,45} \quad (2.8a)$$

для прямолинейного и разветвленного русла и

$$I=2,1Q^{-0,37} \quad (2.8б)$$

для прямолинейного и меандрирующего русла.

Особое положение занимают реки Китая, характеризующиеся существенно большим стоком и интенсивной направленной аккумуляцией наносов. Точки, соответствующие р. Янцзы, отвечают своеобразным асимметричным одиночным разветвлениям, в которых один из рукавов имеет вид заваленной излучины («голова утки» по дословному переводу китайского названия этого типа русла). Они находятся в правой части графика и в целом ниже остальных точек меандрирующего русла. По-видимому, формирование крутых заваленных излучин одного из рукавов является ведущим процессом, сближающим этот тип русла с меандрирующим, напоминающим по механизму образования прорванных излучин.

Точки, соответствующие руслу р. Хуанхэ, рассредоточились таким образом, что в верхнем поле оказались принадлежащие блуждающим разновидностям прямолинейного и извилистого русла, в центральном поле – стабильным излучинам, в нижнем поле – стабильному прямолинейному руслу, причем стабильность двух последних связана с закреплением форм русла дамбами обвалования. Такое расположение точек вполне логично: блуждающие типы русла формируются в условиях большой насыщенности потока наносами, а их транспорт осуществляется потоком, характеризующимся наибольшей мощностью. Поэтому соответствующие им точки занимают самое высокое положение на I - Q -диаграмме. Самое нижнее положение занимают точки, относящиеся к прямолинейному руслу, полностью ограниченному дамбами и имеющему самые малые уклоны (нижнее течение Хуанхэ). Промежуточное положение занимают пологие излучины, развитие которых также ограничено дамбами [Чалов и др., 2000].

Полученные результаты анализа I - Q -диаграммы в целом согласуются с выводами, полученными по другим рекам Северной Евразии: свободно меандрирующее русло формируется при минимальной мощности потока, а соответствующие ему точки располагаются в нижнем левом углу Q - I -диаграммы [Алабян, 1992; Антроповский, 1970]. Если рассматривать не только свободные условия развития русловых деформаций на равнинных реках, то максимальная мощность потока соответствует различным типам врезанного русла (в основном, врезанным излучинам), как это наблюдается при пересечении Амуром горного массива Малый Хинган, горным и полугорным рекам. А.В. Панин [1991] получил разграничение вдоль линии $I=0,1Q^{-0,065}$ точек, соответствующих врезанным излучинам, сформировавшимся в скальных (в верхней части диаграммы) и пластичных (в нижней части) породах. Выше этой линии содержатся также точки, соответствующие разветвлениям врезанных русел. Действительно, последние чаще встречаются в местных расширениях врезанных русел в областях распространения скальных пород, тогда как в пластичных формируются преимущественно врезанные излучины.

Для средних и малых, в т.ч. полугорных, рек Алтая [Смирнова, 2002] на I - Q -диаграмме получен своеобразный «клин» разветвленных русел, показывающий, что самые малые реки либо свободно меандрируют, либо являются относительно прямолинейными или образуют врезанные формы русла, но не разделяются на рукава (рис. 18Б); линии раздела между разветвленными и меандрирующими руслами аппроксимируются уравнениями

$$I=0,066Q^{-0,74}, \quad (2.9a)$$

между разветвленными и относительно прямолинейными врезанными руслами

$$I=0,0138Q^{-0,28}. \quad (2.9б)$$

Точки начала «клина разветвления» соответствуют граничным условиям формирования разветвлений: среднегодовой расход воды $30 \text{ м}^3/\text{с}$, уклон дна долины – $5,4^\circ/\text{оо}$; при меньших значениях водности и больших значениях уклона разветвленные русла не образуются.

Иной подход в оценке условий формирования излучин среди других морфодинамических типов связан с применением теории гидродинамической устойчивости русловых потоков. При этом развитие меандрирующего или разветвленного русла может с известной долей упрощения рассматриваться как результат плановой неустойчивости потока в изначально прямолинейном русле. Для математического исследования этого процесса в конце 1960-х годов разработан метод малых возмущений, суть которого состоит в изучении поведения волновых возмущений, накладываемых на дифференциальные уравнения плановой гидравлики [Callander, 1969].

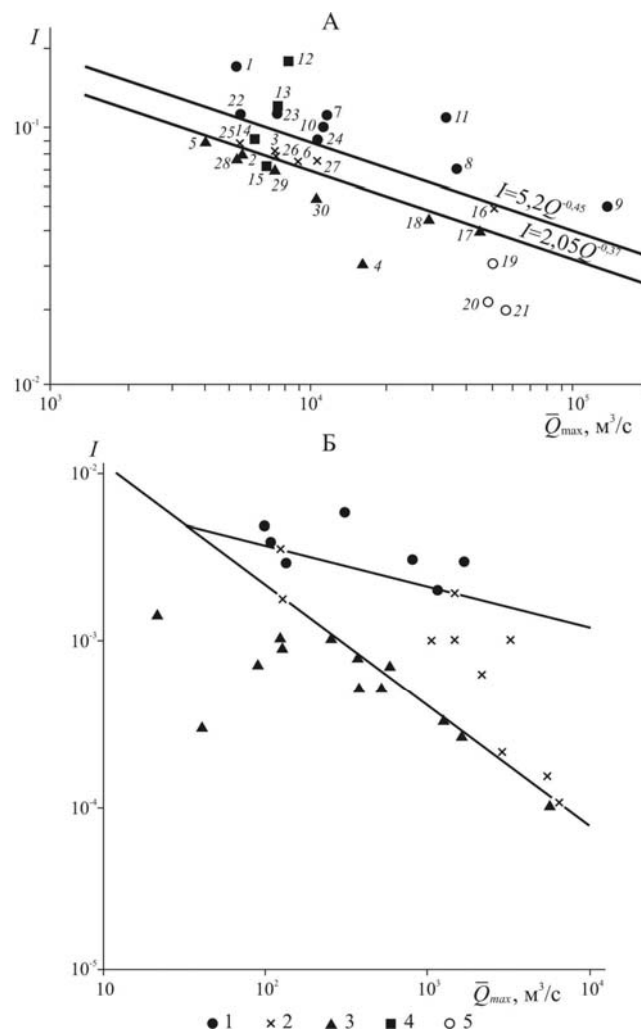


Рис. 18. Распределение морфодинамических типов русла в поле I - Q диаграммы: А – для рек среднего Амура, Северной Двины, Оби и Лены с притоками, Хуанхэ, Янцзы [Чалов и др., 2000]; Б – малых рек Алтайского региона [Смирнова, 2002]. 1 – разветвленное русло; 2 – прямолнейное неразветвленное русло; 3 – меандрирующее русло; 4 – р. Хуанхэ; 5 – одиночные асимметричные разветвления с заваленной излучиной одного из рукавов (р. Янцзы); 6 – полугорные прямолнейные врезанные русла рек Алтайского региона; Номера точек на диаграмме А: 1-4 – Обь; 5 – Чулым; 6 – Томь; 7 – Северский Донец; 8-9 – Лена; 10 – Вилюй; 11 – Алдан; 12-15 – Хуанхэ (12 – блуждающее прямолнейное; 13 – блуждающее извилистое; 14 – стабильные излучины; 15 – стабильное прямолнейное в дамбах); 16-21 – Янцзы; 22-30 – средний Амур.

После линеаризации получается система уравнений относительно возмущений, исследование которой обнаруживает существование некоторого диапазоне безразмерных длин волн λ_0/B_p , в котором амплитуда возмущений растет с течением времени. Предполагается, что возмущения с максимальной скоростью роста имеют наибольшую вероятность проявиться в деформации первоначально плоского дна и дают начало русловым формам – побочным и осередкам. Базируясь на этом подходе, Ф. Энгелунд и О. Сковгард [Engelund, Skovgaard, 1973] получили графическое выражение зависимости коэффициента усиления поперечных возмущений от их волнового числа в безразмерном виде K_2H , где $K_2=2\pi/\lambda_2$ (λ_2 – длина волны поперечных возмущений) и $K_2B_p=2\pi m$ (m – число рукавов, на которые разбивается поток в результате развития возмущений). Из анализа графиков авторы заключили, что при данных гидравлических сопротивлениях русла и глубине потока река будет меандрировать, если ширина русла B_p меньше некоторой критической B_p^* , и разветвляться при $B_p > B_p^*$. Анализ устойчивости плоской модели руслового потока привел И. Фредсоу [Fredsoe, 1978] к заключению, что река разветвляется, если $B_p/h_p > 60$, и меандрирует при $8 < B_p/h_p < 60$. При $B_p/h_p < 8$ русло остается прямолинейным, неразветвленным. Относительная ширина русла входит также в критерий меандрирования – разветвления русел, полученный из анализа двумерной модели Г. Паркером [Parker, 1976]: условие $I/Fr > h_p/B_p$ соответствует меандрированию, $I/Fr < h_p/B_p$ – разветвлению. Г. Паркер представил графическую проверку своего критерия, которая показала хорошую сходимость с натурными и экспериментальными данными (рис. 19).

Таким образом, относительная ширина (глубина) русла входит в большинство предложенных критериев для разделения меандрирующих и разветвленных русел. Вместе с тем, ширина и глубина русла тесно связаны с основными определяющими факторами руслоформирования – водоносностью реки, уклоном русла, крупностью руслообразующих наносов. Выяснение характера этой связи необходимо для более полного понимания физической сущности I - Q -диаграмм и условий формирования меандрирующего русла.

С увеличением водности реки ширина русла растет быстрее его глубины. По Н.А. Ржаницину [1960], относительная ширина русла связана с порядком водотока зависимостями: $B_p/h_p = N/0,07$ – для перекатов и $B_p/h_p = N/0,16$ – для плесов. О.М. Пахомова [2000], применяя для оценки порядка рек схему А. Шайдеггера (в модификации Н.И. Алексеевского), получила экспоненциальную зависимость $B_p/h_p = ke^{mN}$, параметры которой дифференцируются по типам излучин и отличаются от таковых для горных и врезанных прямолинейных русел (табл. 2). Характерно, что значения коэффициентов k последовательно уменьшаются, а m увеличиваются при переходе от горных рек к равнинным и от врезанных излучин к свободным.

Вместе с тем теснота этих связей (ρ) невелика у горных рек, врезанных прямолинейных русел и врезанных излучин и вполне достаточна

при свободном меандрировании. Объясняется это тем, что в первом случае ширина русла больше связана с геолого-геоморфологическим строением долины, чем с водностью реки и динамикой потока.

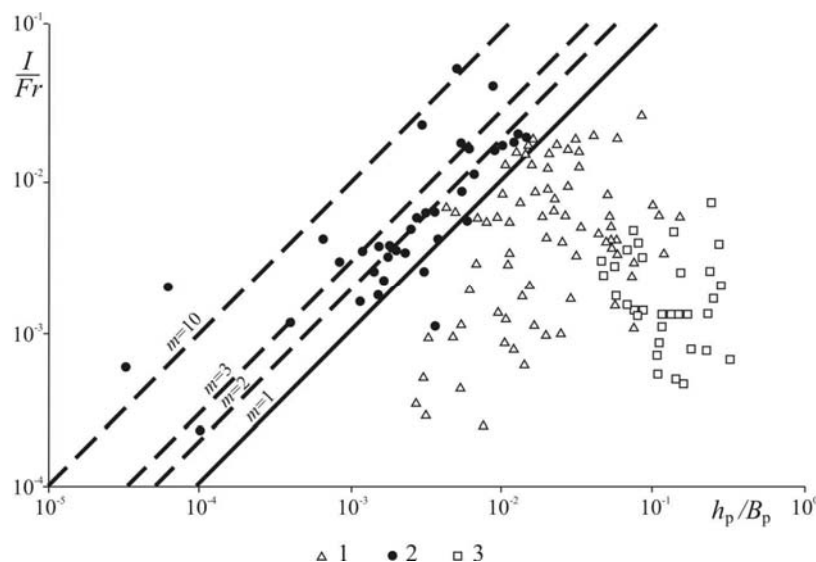


Рис. 19. Проверка критерия Г. Паркера [Parker, 1976] на натурных данных и экспериментальных данных: 1 – меандрирующие русла; 2 – разветвленные русла; 3 – прямолинейные русла.

Таблица 2. Параметры зависимости $B_p/h_p = ke^{mN}$ для меандрирующих рек бассейна р. Белой [Пахомова, 2000]

Параметры уравнения	Морфодинамический тип русла			
	Горное и врезанное прямолинейное	Врезанные излучины	Вынужденные и адаптированные излучины	Свободные излучины
k	11,6	9,46	5,39	1,08
m	0,11	0,17	0,20	0,32
ρ	0,59	0,47	0,85	0,78

Традиционно применяемые эмпирические связи ширины и глубины русла с расходом воды [Ласеу, 1935; Антроповский, 1969] $B_p \sim Q^{1/2}$ и $h_p \sim Q^{1/3}$ – позволяют в общем виде получить зависимость относительной ширины русла от водоносности реки:

$$B_p/h_p \sim Q^{1/6} \quad (2.10)$$

Для малых рек Пенсильвании Л. Брашем [Brush, 1961] получены связи $B_p \sim Q^{0,52}$ и $h_p \sim Q^{0,49}$, т.е.

$$B_p/h_p \sim Q^{0,09}. \quad (2.11)$$

Близкую зависимость для 278 участков галечных русел средних и крупных рек ($B_p/h_p > 15$) разных регионов получил Г. Паркер [Parker, 1979]:

$$B_p/h_p = Q_\phi^{0,085} \quad (2.12)$$

Имеются данные о влиянии крупности наносов на глубину русла. Р. Келлерхалс [Kellerhals, 1967] для рек Британской Колумбии с галечными руслами получил зависимость, согласно которой с ростом крупности наносов глубина русла уменьшается:

$$h_p = 0,166 Q_f^{0,4} d_{90}^{-0,12} \quad (2.13)$$

(здесь Q_f – расход воды 3-5-летней повторяемости).

К.В. Гришанин [1974] приводит график связи безразмерной глубины $h_p(gB_p)^{0,25} Q^{-0,5}$ с относительной гладкостью русла d_{50}/h_p и отмечает, что «систематическое убывание безразмерной средней глубины с ростом крупности донных частиц – закон, проявляющийся в реках с гравелисто-галечным и валунным дном» (с. 103). Причины этого он видит в затрудненности глубинной эрозии и в неразвитости донных форм, уменьшающей гидравлические сопротивления и увеличивающей скорости течения. С другой стороны, для малых рек, имеющих параболическую форму живого сечения, Р. Ли с соавторами [Li et al., 1976] теоретически получил обратную связь относительной ширины русла с углом естественного откоса частиц, выстилающих дно. Это должно выражаться в увеличении глубины с ростом крупности руслообразующих наносов, которое объясняется, по-видимому, тем, что морфометрия параболического русла определяется крутизной прибрежных скатов, занимающих большую часть сечения. Очевидно, что по той же причине имеет место эффект увеличения глубины и уменьшения ширины русла с ростом степени неоднородности галечных наносов d_{90}/d_{50} [Syunsuke et al., 1988].

В ряде исследований получены зависимости ширины от уклона для прямолинейного неразветвленного русла. По Г. Гриффиту [Griffiths, 1981], в зависимости $B_p \sim I^x$ показатель степени x колеблется в интервале от 1,17 до 1,26. В.В. Иванов [1989] провел множественный корреляционный анализ большого натурального материала по рекам бывшего СССР и получил зависимости для ширины и средней глубины прямолинейных русел с двусторонней поймой:

$$B_p = 7,23 Q_\phi^{0,648} I^{0,451}, \quad (2.14a)$$

$$h_p = 0,735 Q_\phi^{0,099} I^{0,577}, \quad (2.14б)$$

откуда

$$B_p/h_p = 9,84 Q_\phi^{0,549} I^{1,038}. \quad (2.14в)$$

Зависимости 2.14а-в свидетельствуют о значительном возрастании степени распластанности русла с увеличением уклона, которое происходит за счет роста ширины и одновременного уменьшения глубины. Поскольку увеличение крупности аллювия обычно сопровождается ростом уклона, а

последний – ростом скорости течения, этим можно объяснить снижение глубины при укрупнении руслообразующих наносов.

Ширина и глубина русла зависят также от сопротивляемости его берегов размыву, которая определяется противозрозионными свойствами слагающих их грунтов. Так, С. Шамм [Schumm, 1960] получил обратную зависимость относительной ширины прямолинейных и извилистых русел рек Канзаса от величины M – средневзвешенного содержания ила и глины в наносах по периметру русла (включая береговые откосы): $B_p/h_p = 255M^{-1,08}$, причем галечно-илистые русла по сравнению с песчано-илистыми и врезающиеся по сравнению с аккумулярующими оказываются менее распластанными (рис. 20).

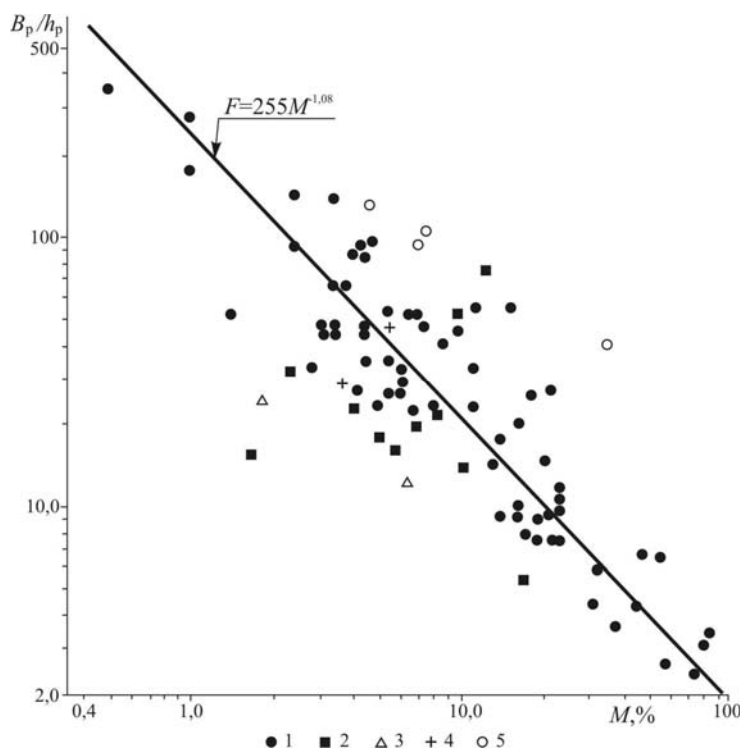


Рис. 20. Связь между относительной шириной русла B_p/h и процентом ила и глины M в поперечном сечении русел рек Канзаса, США [Schumm, 1960]: 1 – стабильные участки с песчано-илистым аллювием; 2 – стабильные участки, где $> 40\%$ площади русла занимают галечно-валунные наносы; 3 – врезающиеся участки ниже дамб; 4 – участки с выходами коренных пород; 5 – участки с тенденцией к аккумуляции. Линия регрессии приведена для 1.

Д. Брэй [Bray, 1982] для галечных русел рек Альберты (Канада) с берегами разных типов получил связь относительной ширины с расходом

воды двухлетней повторяемости: $B_p/h_p = pQ_2^{0,194}$. При среднем значении 8,95, коэффициент p заметно ниже (т.е. русло менее распластано), если берега сложены глинами и илами, чем несвязными грунтами. По данным В.В. Иванова [1989], прямолинейные русла, врезанные в скальные породы или моренные отложения, имеют в среднем меньшую ширину, чем широкопойменные.

Таким образом, ширина и степень распластанности (относительная ширина) русла, контролирующие развитие крупных русловых форм, форм русла и его морфодинамического типа, в среднем растут с увеличением водоносности реки, уклона русла, крупности руслообразующих наносов и со снижением противозерозионной устойчивости берегов. В этом же направлении уменьшается вероятность формирования меандрирующего русла и растет вероятность формирования разветвленного. С другой стороны, деление потока на рукава ведет к расширению русла, т.е. различия в ширине разветвленных и меандрирующих русел определяются различиями в характере русловых деформаций.

Сделанный обзор показывает, что за последние десятилетия попытки разработать универсальный критерий для выявления условий формирования меандрирующих русел не увенчались успехом. Найдены определенные эмпирические закономерности, но в любых гидравлических и морфометрических координатах между типами русла существует широкая переходная область. А.Ю. Сидорчук [1992] полагает, что система поток-русло имеет как минимум 8 степеней свободы, а с учетом иерархии русловых образований – значительно больше. Этому соответствует бесконечное количество состояний равновесия системы даже при неизменном соотношении гидравлических параметров (например, уклон-расход). Поэтому морфодинамический тип русла определяется тем, на каком структурном уровне организации руслового рельефа произойдет стабилизация гидравлически определенных грядовых русловых форм – их переход к закрепленным процессом поймообразования формам русла. Это определяется широким комплексом природных условий речного бассейна.

Например, ландшафтно-климатические условия определяют процессы закрепления прирусловых отмелей пионерной растительностью, скорость накопления пойменного наилка, рост пойм в высоту и т.д. Сочетание гидравлических и ландшафтно-климатических факторов, мало зависящих друг от друга, приводит к большому морфологическому и динамическому многообразию типов речных русел. В этих условиях на одно из ведущих мест выдвигаются географические методы изучения форм речных русел. Один из них связан с использованием понятия руслоформирующий расход воды Q_{ϕ} . Его величина определяется по максимумам произведения $\sigma Q^m I P$, где Q – средняя величина расхода воды в пределах интервалов, на которые разбивается весь диапазон расходов в конкретном створе, P – вероятность расходов воды каждого интервала, I – средний уклон участка русла, m – показатель степени, зависящий от состава руслообразующих наносов, σ – ко-

эффициент, изменяющийся от 0,5 до 1 в зависимости от ширины разлива воды в половодье по пойме. График связи $Q=f(\sigma Q^m IP)$ условно назван Н.И. Маккавеевым [1955] «эпюрой руслоформирующих расходов»; пики графика соответствуют их величинам. Это произведение, по существу, представляет собой результат умножения координат кривой связи расходов воды и расходов наносов $R=AQ^m I$ на координаты кривой вероятности (повторяемости) расходов воды с учетом кинематического эффекта, возникающего при затоплении поймы во время половодья и сопровождающегося снижением транспортирующей способности потока. Поэтому при наличии данных наблюдений Q_ϕ может определяться по максимумам произведения σRP , а $\sigma Q^m IP$ применяться для неизученных в отношении стока наносов рек. Показатель степени m рекомендуется применять на основе районирования территории или разделения рек на участки по его величине, полученной при построении связи $R \sim Q$ на соответствующих гидрологических постах [Ободовский и др., 1987; Чалов, 1997].

Число максимумов на эпюре руслоформирующих расходов воды может изменяться от одного до трех. В зависимости от особенностей прохождения выделяют нижний, средний и верхний интервалы руслоформирующих расходов воды, причем первые два проходят до выхода воды на пойму [Чалов, 1979], верхний – при затопленной пойме. Каждый из интервалов Q_ϕ по-своему воздействует на переформирование меандрирующего русла. Верхний интервал, проходя при затопленной пойме, обычно расчленяет последнюю на отдельные массивы ответвлениями, создающими пойменную многорукавность, создает благоприятные условия для спрямления свободных излучин и формирования «прорванных излучин» (незавершенное меандрирование, по ГГИ). Средний интервал Q_ϕ соответствует (в большинстве случаев) уровням, близким к высоте пойменных бровок. При его прохождении происходит наиболее интенсивное развитие излучин: размыты одних и наращивание отмелей у других берегов, приводящие к смещению самих излучин, трансформации их формы и изменению параметров. Нижний интервал Q_ϕ проходит на уровне прирусловых отмелей и вызывает активные деформации перекатов в пределах их седловин. Обычно этот интервал наблюдается в период устойчивой летней межени, когда важным фактором русловых деформаций является длительность воздействия потока на русло. В это время излучины осложняются вторичной извилистостью, параметры которой меньше параметров самих излучин и соответствуют изгибам динамической оси потока, огибающим побочные перекааты.

Однако использование руслоформирующих расходов воды разных интервалов позволяет, в большинстве случаев, давать лишь качественную оценку русловых переформирований. Для проведения сравнительного анализа процесса меандрирования на разных реках, выявления региональных закономерностей, построения гидролого-морфологических зависимостей обычно оперируют одним показателем водности, который может быть принят ответственным за развитие форм речного русла. Таковым в принципе

должен быть один из интервалов Q_ϕ , но возникает проблема его выбора при наличии на реке двух или трех его интервалов. Вопрос о том, какой из них в наибольшей мере соответствует максимальным переформированиям русла и, соответственно, развитию излучин, дискуссионен. Н.С. Лелявский [1948] предлагал принимать за руслоформирующий расход воды для перекатных участков расход межени (т.е. Q_ϕ нижнего интервала). Но очевидно, что образующиеся в межень изгибы русла на перекатах являются формами русла второго (или третьего) порядка. Известно, например, что за исключением малых рек, излучины в основном имеют многопесовую структуру. Поэтому этот показатель водоносности нельзя принимать за основополагающий.

Многие исследователи (например, В.С. Лапшенков [1979]) считают, что наиболее эффективным в отношении русловых деформаций является расход воды, аналогичный Q_ϕ среднего интервала. Его иногда называют «руслонаполняющим». Однако с дальнейшим повышением уровня воды при уже затопленной пойме удельный расход воды в русле продолжает увеличиваться, растет транспортирующая способность потока, а сам поток обладает большей энергией, чем при Q_ϕ среднего интервала.

Выбор в качестве ведущего в образовании излучин Q_ϕ верхнего интервала также проблематичен. Поток воды в половодье, вызывая переформирования самого русла, часть энергии затрачивает на перестройку пойменного массива и преодоление сопротивлений в его пределах [Барышников, Самусева, 1999]. Поэтому для выделения собственно «русловой» и «пойменной» составляющей необходимы дополнительные исследования на конкретных участках рек. При этом, вычисление Q_ϕ верхнего интервала в некоторых случаях дает существенные погрешности. Н.В. Шенберг [1989, 1990] показала, что его обеспеченность и величина, рассчитанная по методике Н.И. Маккавеева, обладает большой статистической неустойчивостью и зависит от выбора временного ряда, за который проводились вычисления.

Выход из этой ситуации был найден А.М. Алабяном [1992], предложившим совместный анализ эпюр руслоформирующего расхода воды и положения точек на I - Q -диаграмме для одних и тех же пунктов. Он заключается в расчленении площади эпюр Q_ϕ на секции, соответствующие тем или иным характерным типам русла, образование которых определяется мощностью потока. Этот прием осуществляется посредством проведения в поле координат $Q \sim \sigma Q^m IP$ горизонтальных линий, секущих площадь эпюры и соответствующих значений расходов воды, при которых: 1) происходит выход воды на пойму (проведение этой линии производится уже при типизации условий прохождения Q_ϕ и впервые было применено Р.С. Чаловым [1972]) – линия поймы; 2) достигается значение QI , достаточное для формирования того или иного морфодинамического типа русла (это значение снимается с I - Q -диаграммы). На рис. 21А представлена эпюра Q_ϕ для среднего течения р. Оби (г.п. Колпашево) [Чалов и др., 2000]. Линия поймы на ней проходит непосредственно выше самого большого пика эпюры, являющегося в данном случае средним; в таких условиях пойменная многорукость

не развивается. Линия типа русла (Обь здесь меандрирует) находится в верхней части эпюры, и вся эпюра расположена в поле, соответствующем развитию меандрирующего русла. Таким образом, средний интервал Q_ϕ является ответственным за формирование излучин на данном участке Оби. Аналогичный результат был получен А.М. Алабяном [1992] для меандрирующего русла Чулыма (приток Оби). Обе реки находятся в одном районе на схеме районирования по условиям прохождения Q_ϕ [Чалов, 1979].

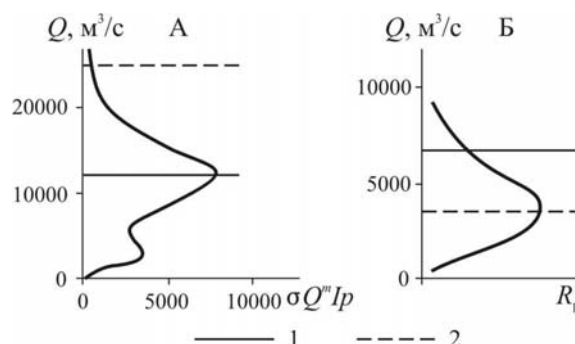


Рис. 21. Эпюры руслоформирующих расходов воды для Оби – г.п. Колпашево (А) и Чулыма – г.п. Зырянское (Б). 1 – линия поймы; 2 – линия меандрирования (по Р.С. Чалову и др., 2000; А.М. Алабяну, 1992).

Однако общим недостатком применения Q_ϕ для выявления условий развития типов русла является то, что они рассчитываются для створа конкретного гидрологического поста, и их величина и обеспеченность не всегда характеризуют условия прохождения Q_ϕ на выше- и нижерасположенных участках. Поэтому некоторые исследователи, принимая в целом подход Н.И. Маккавеева, видоизменяют методику расчета, внося в формулу поправки. Ю.И. Каменсков [1986] предлагал учитывать минимальный расход воды, при котором руслообразующие наносы не перемещаются (Q_n), и выделять на эпюре один руслоформирующий расход, рассчитанный по формуле $Q_\phi = f[(\sigma Q - Q_n)^m P I]$. И.Ф. Карасев [1986] считает, что при расчетах Q_ϕ по методике Н.И. Маккавеева занижается руслоформирующая способность максимальных расходов воды, что вызвано их очень малой обеспеченностью. Действительно, анализ результатов определения руслоформирующих расходов воды на реках Северной Евразии по 473 постам (их обобщение дано в [Чалов, Белый, 1975; 1984; Чалов, 1979; Власов, Чалов, 1991]) показал, что только в 4% случаев обеспеченность Q_ϕ верхнего интервала превышает 5% и только в 20% более 1%. И.Ф. Карасев предлагает свою методику расчета Q_ϕ , вводя понятие «руслотрансформирующего расхода», который соответствует максимальным расходам воды и имеет очень малую обеспеченность. Однако, применение «руслотрансформирующего» расхода для гидролого-морфологического анализа выглядит спорным, т.к. подобные

экстремальные расходы в большей мере участвуют в развитии поймы, а их роль в формировании форм речного русла, очевидно, зависит от ее ширины и аккумулирующей способности поймы.

Характерно, что сравнение результатов расчетов Q_{ϕ} по методике Н.И. Маккавеева с расчетами по предлагаемым его модификациям или другими приемами приводит либо к близким результатам, либо к получению одного Q_{ϕ} из трех возможных (по методике Н.И. Маккавеева). Последнее дало основание исследователям предлагать в качестве «руслоформирующих» использовать различные осредненные многолетние показатели водоносности. Л. Людин [Антроповский, 1969] в качестве такового принимает средний годовой расход воды, считая, что руслоформирующий расход должен соответствовать в равной мере всем наблюдаемым значениям расходов в году. Л. Леопольд, М. Уолман [1957], В.В. Ромашин [1968], А.С. Завадский и Р.С. Чалов [1996, 1997, 1999, 2000] использовали при гидролого-морфологических построениях средний из годовых максимальных расходов воды. Последний метод позволяет получать хорошие результаты в выявлении региональных особенностей свободного меандрирования. Однако на величину среднемаксимального расхода воды существенное влияние оказывает внутригодовая неравномерность стока, что в ряде случаев не позволяет выявлять общие закономерности в связях параметров русловых форм с природными факторами.

Поэтому при гидролого-морфологических исследованиях различные исследователи выбор руслоформирующего расхода воды ставят в зависимость от стоящих перед ними задач. В частности предлагается использовать расходы воды 30-дневной продолжительности. Сведения о них опубликованы в справочниках «Гидрологическая изученность», что очень важно при массовом анализе данных по большому числу рек. Расход воды 30-дневной продолжительности характеризует водоносность реки в наиболее полноводную фазу ее водного режима (половодье или паводочный период, в зависимости от географического положения бассейна реки). Значения его близки к руслоформирующему расходу воды среднего интервала (по Н.И. Маккавееву), в большинстве случаев несколько превышая его (табл. 3). Таким образом, очевидно, что для большинства рек Северной Евразии расход воды 30-дневной продолжительности соответствует уровням воды, предшествующим затоплению поймы. Эти условия соответствуют периоду максимальных переформирований русел, что оправдывает использование такого подхода.

Влияние стока наносов на процесс меандрирования проявляется не только как составляющая величина в формуле расчета руслоформирующих расходов воды (по Н.И. Маккавееву). Состав руслообразующих наносов прямо пропорционально связан с размерами излучин. По данным Б.В. Матвеева [1988], при прочих равных условиях излучины песчано-галечных русел в 1,6-2,2 раза больше, чем песчаных. Крупность руслообразующих наносов определяет также устойчивость русла, которая непосредственно свя-

зана с направленностью и интенсивностью русловых деформаций на излу-
чинах. Так, излучины на реках с неустойчивым и абсолютно неустойчивым
руслом (по классификации Р.С. Чалова [1997, 2000]) не могут существовать
длительное время и «разрушаются» при прохождении мощных половодий.
Это характерно для нижнего течения Хуанхэ, где излучины не успевают
приобрести закономерные формы и разрушаются – «блуждающие излу-
чины» [Чалов и др., 2000]. Наоборот, при высокой устойчивости русла форми-
руются излучины с большими значениями степени развитости, у которых
размыв сосредотачивается в привершинной части при относительной ста-
бильности длинных прямолинейных крыльев.

Таблица 3. Значения руслоформирующих расходов воды верхнего и
среднего интервалов ($\text{м}^3/\text{с}$) и расходов воды 30-дневной продолжительности
($\text{м}^3/\text{с}$) на некоторых из исследуемых рек

Река	Гидролог. пост	$Q_{\phi \text{ верх.}}$	$Q_{\phi \text{ ср.}}$	Q_{30}
Васюган	Ср. Васюган	610	530	586
Вах	Лобчинское	2800	1120	1440
Днестр	Олонешты	361	---	255
Иртыш	Тобольск	9000	4000	5890
Кеть	Максимкин Яр	1430	800	913
Конда	Болчары	690	480	601
Припять	Туров	780	500	651
Сев. Донец	Бел. Калитва	805	559	534
Чулым	Зырянское	---	2600	2030
Яна	Джангкы	6200	3600	3540

В определенных условиях большое влияние на формирование излу-
чин оказывают ледовые явления и многолетнемерзлые грунты. В районах с
вечной мерзлотой русловые деформации замедляются, что отражается в
скоростях развития излучин. Затонные и зазорные явления могут способст-
вовать развитию спрямляющих пойменных протоков или вызывать спрямле-
ние крутых излучин, как это произошло в конце XVIII века на Сухоне у
г. Великого Устюга (рис. 22).

Деформации берегов могут увеличиваться благодаря разрушению
их льдом в период прохождения половодья. Особенно интенсивно разру-
шаются вогнутые берега излучин. В некоторых случаях интенсивность раз-
рушения бровок пойменных яров во время ледохода сопоставимо с размы-
вами в период открытого русла.

Влияние растительности сказывается, в первую очередь, на интенсивности
деформаций подмываемых берегов. Густой растительный покров с хорошо
развитой корневой системой снижает скорость русловых деформаций [Руб-
цов, 1982]. Высокая залесенность поймы предохраняет ее от размыва и не

способствует спрямлению излучин. Параметры излучин, расположенных на залесенных участках поймы, имеют меньшие средние значения, чем у излучин, развивающихся на соседних участках с луговой растительностью. Однако при подмыве размываемых берегов возможен карчеход, способствующий разрушению берегов и тем самым интенсификации развития излучин [Земцов, 1976].

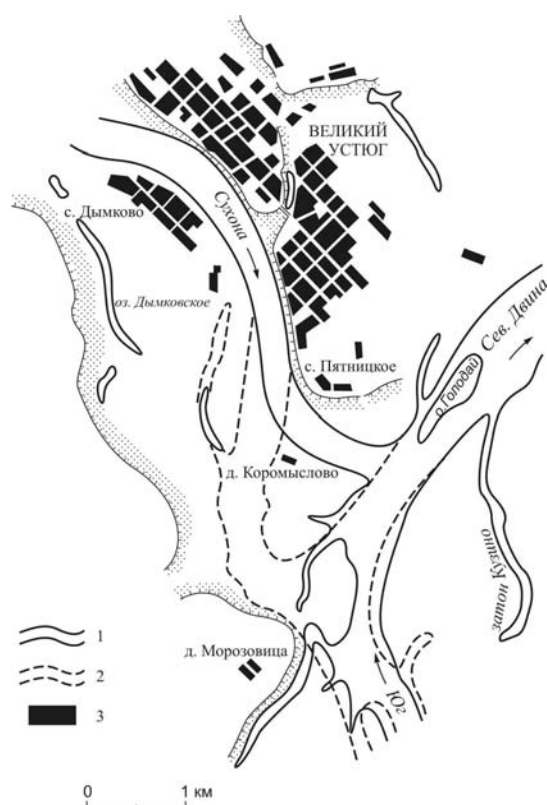


Рис. 22. Спрявление излучины р. Сухоны у г. Великого Устюга, вызванное заторными явлениями в узле слияния рек Сухоны и Юга после наводнения 1807 г: 1 – современное положение русла; 2 – положение русла в XVIII в; 3 – территория жилой застройки к началу XIX в.

2.3. Динамика потока и движение наносов на изгибе русла



Интерес к динамике потока на излучинах первоначально возник в связи с задачами выправления русел для целей судоходства. Французский инженер Л. Фарг (работы 1870-1900-х гг), основываясь на опыте работы по выправлению русла р. Гаронны вывел ряд эмпирических закономерностей, связывающих рельеф дна с кривизной русла («законы Фарга»). В частности,

ему принадлежат такие получившие впоследствии широкое признание наблюдения, как наличие сдвига плесов и перекатов вниз по отношению к перегибам и вершинам излучин, наличие прямой связи между кривизной русла и глубиной плесовой ложины и т.д. Работы Фарга, однако, касаются лишь следствия деятельности речного потока (морфологии дна русла), не затрагивая самого механизма движения потока. В конце XIX века при проектировании выправительных работ на Днепре русский инженер Н.С. Лелявский [1893], проведя детальные наблюдения за динамикой потока, обнаружил явление схождения и расхождения струй на изгибе русла: «сбойное» течение на плесах и «веерообразное» течение на перекатах. По Н.С. Лелявскому, основное течение реки не параллельно берегам, а непрерывно переходит от выпуклого берега к вогнутому. У вогнутого берега струи опускаются ко дну и производят размыв, продукты которого переносятся на нижележащий перекат. На перекате течение растекается к выпуклому берегу следующего изгиба, где происходит отложение наносов.

Основной массив информации о динамике потока на изгибе был получен в ходе лабораторных опытов. Экспериментально-теоретическую базу последующих исследований составили работы Ж. Буссинеска (решение задачи о ламинарном движении жидкости в изогнутой трубе), Дж. Томпсона (обнаружение поперечной циркуляции на изгибе русла), Н.Е. Жуковского (теоретическое обоснование вертикальных течений на изгибе), А.Я. Миловича (потенциальный характер движения потока на изгибе, изучение явлений отрыва потока от берегов), А.И. Лосиевского (обнаружение поперечной циркуляции в прямолинейном потоке) и других зарубежных и отечественных исследователей в последней четверти XIX – первой половине XX веков.

В экспериментах А.Я. Миловича [1914] поплавок с нанесенным на его поверхность крестом преодолел изгиб параллельно самому себе: обе стороны креста сохраняли свое направление неизменным, т.е. частицы жидкости на повороте сами не вращались (рис. 23). Указанная особенность интерпретировалась им следующим образом: поток при движении на изгибе русла стремится к наименьшим затратам работы на преодоление сопротивлений; поэтому сам изгиб был назван нерабочим. Постулируя минимизацию затрат энергии и отсутствие вращательного движения частиц воды, можно теоретически получить, что продольные скоро-

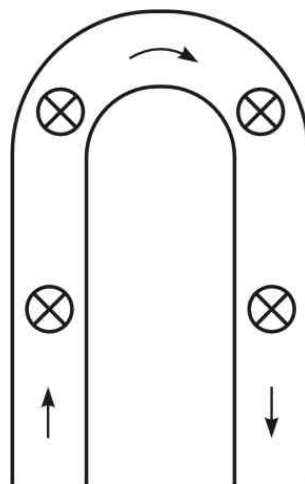


Рис. 23. Движение поплавков на изгибе русла в опытах А.Я. Миловича [1914 г].

сти течения v распределяются по поперечному сечению в соответствии с «законом площадей» (все радиус-векторы r за единицу времени вырезают одинаковую площадь): $vr = \text{const}$, т.е. в потоке, проходящем поворот русла с минимальными потерями энергии, скорости увеличиваются от внешнего (вогнутого) к внутреннему (выпуклому) берегу [Гончаров, 1962]. Н.И. Маккавеев [1955] показал, что в опытах с иными, чем у А.Я. Миловина, отношениями радиуса кривизны к ширине потока r/B_p , закон площадей не выполняется, однако для спокойного потока сохраняется основная закономерность – рост скоростей в вершине изгиба от вогнутого берега к выпуклому. Согласно К.В. Гришанину [1990], закон площадей не проявляется в межень, когда обмеление русла у выпуклого берега препятствует смещению сюда максимума скоростей в начале поворота. Однако при уровнях руслонаполнения, когда побочень у выпуклого берега затоплен, распределение скоростей приближается к закону площадей, что часто выражается в виде промоины в корневой части побочня или повышенной крупности слагающих его руслообразующих наносов. На первое обращал внимание еще Н.И. Маккавеев [1949, 1955], второе отмечено в многочисленных публикациях по русловым процессам на песчаных реках, обобщенных Р.В. Лодиной [1975]. В обоих случаях приведенные факты интерпретированы как следствие блуждания динамической оси потока в разные фазы водного режима.

Основные экспериментальные результаты по изучению движения потока на повороте русла были получены к 50-м годам XX века. Подробные обзоры этих работ сделаны Н.Н. Федоровым [1954; Кондратьев, Ляпин и др., 1959] и И.Л. Розовским [1957]. И.Л. Розовский [1957] обозначил пять характерных особенностей потока на повороте русла:

1. Возникновение *поперечного уклона* водной поверхности: у выпуклого берега уровень ее понижается, у вогнутого – повышается.

2. Движение поверхностных струй к вогнутому, придонных – к выпуклому берегу как следствие поперечного уклона. Ввиду неразрывности потока, наряду с радиальными составляющими появляются вертикальные составляющие скорости. В результате на основной поток накладывается вращение винтового характера, называемое *поперечной циркуляцией*.

3. *Перераспределение скоростей течения* как по вертикали, так и по ширине потока благодаря наличию поперечного уклона (по закону Бернулли в местах повышения свободной поверхности скорости должны уменьшаться, в местах понижения – увеличиваться) и поперечной циркуляции (обмен количеством движения между плановыми струями). В результате в начале закругления происходит увеличение скоростей у выпуклого берега и уменьшение их у вогнутого, ниже по течению максимум скорости постепенно передвигается к вогнутому берегу закругления.

4. *Явление отжима (отрыва) потока* от стенок и образование водоворотных зон при очень резком плановом искривлении.

5. Наличие *дополнительных потерь энергии* потока на закруглении, вызываемых увеличением неравномерности скоростей по живому сечению,

удлинением пути отдельных частиц благодаря винтовому характеру движения, усилению обмена количеством движения между отдельными струйками.

Первые три особенности кинематики потока на изгибе иллюстрируются рис. 24. Перераспределение продольных скоростей приводит и к перераспределению расхода воды по ширине. При равномерном распределении скоростей на подходном участке в каждой половине ширины русла протекает половина общего расхода. В начале изгиба половина расхода проходит уже в меньшей части русла вблизи выпуклого берега, а на выходе из поворота – у вогнутого берега. Таким образом, возникает явление смещения водных масс от берега к берегу на протяжении поворота. Скорости этого смещения изменяются по длине поворота. Процессы смещения возникают еще на прямолинейном участке до начала поворота. Скорости смещения к выпуклому берегу достигают максимума вблизи вершины изгиба, в районе вершины падают до нуля, а далее вновь увеличиваются в противоположном направлении – к вогнутому берегу [Гончаров, 1962]. Измерениями местных скоростей можно определить лишь полные поперечные (радиальные) скорости, которые складываются из местных скоростей смещения и поперечной циркуляции. Точно разделить те и другие невозможно, существуют лишь приближенные графические и аналитические приемы.

Явление отрыва потока было изучено А.Я. Миловичем [1914], который установил критическое для начала отрыва значение относительной кривизны изгиба: $r/B_p = 2,5$, где r – радиус кривизны, B_p – ширина потока. Н.И. Маккавеев [1955] считает, что условия безотрывного обтекания берегов устанавливаются, если форма естественных излучин описывается соотношением $r/B_p > 3,5$. Однако И.Л. Розовский [1957] наблюдал безотрывное движение и при значительно больших значениях кривизны (вплоть до $r/B_p = 1$). Причиной образования водоворотных зон является распределение уклонов свободной поверхности на изгибе и за ним [Розовский, 1957]. В результате возникновения поперечного уклона образуются две зоны с противоположными продольными уклонами, где можно ожидать отрыва потока и образования водоворотных зон: при входе в закругление (перед вершиной излучины) у вогнутого берега и на выходе (ниже вершины) – у выпуклого (рис. 25).

Поскольку причиной отрыва является тормозящее действие берегов на поток, возможность отрыва возрастает с увеличением трения о берег, т.е. с ростом глубины и выполаживанием берега [Розовский, 1957]. Из этого следует, что для речных потоков с весьма малым значением h/B_p возможно образование водоворотов у выпуклых берегов при весьма крутых поворотах; у вогнутых, которые обычно имеют крутой откос, это менее вероятно. Однако на реальных реках с крутыми излучинами нередко наблюдается отрыв потока от вогнутого берега и образование возле него водоворотной зоны, в которой происходит аккумуляция наносов.

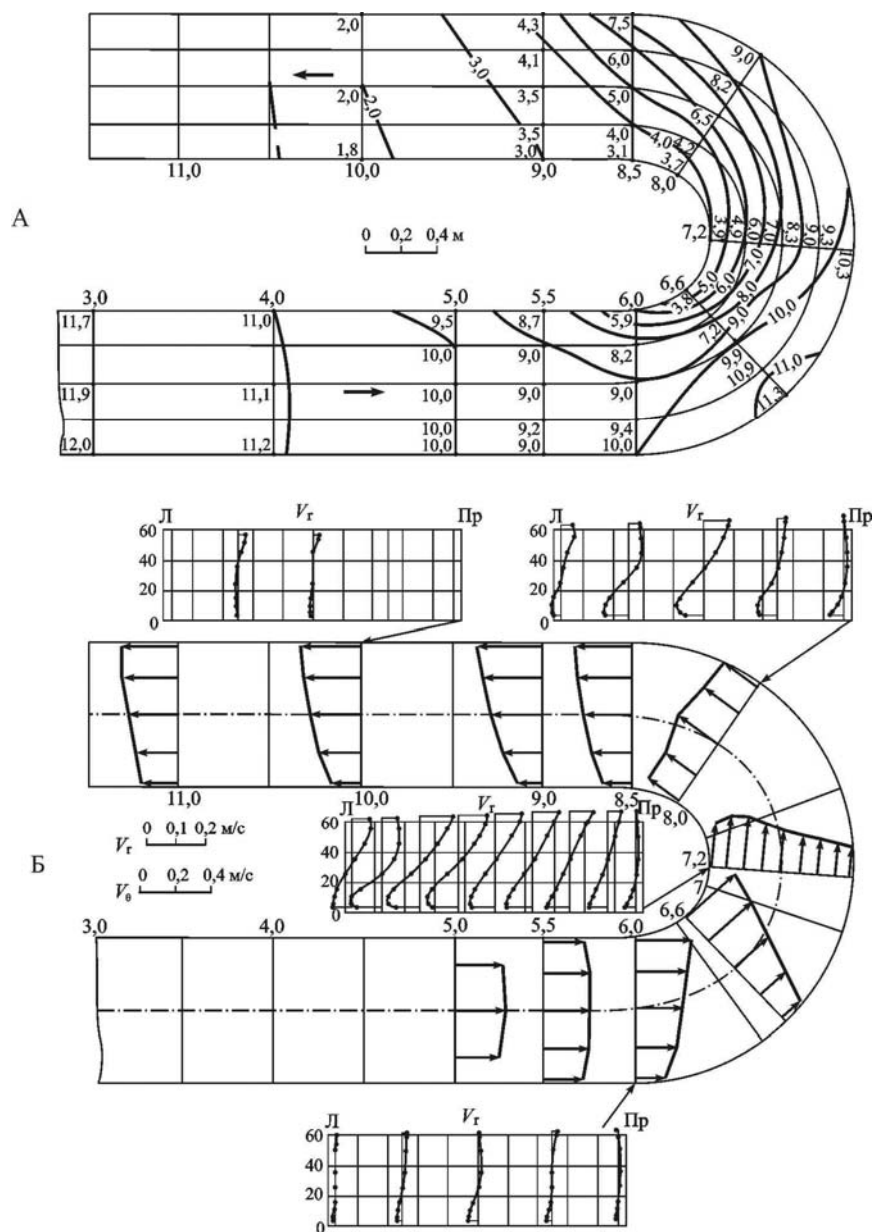


Рис. 24. Характеристики потока на изгибе в лотке с шероховатым дном [Розовский, 1957]: А – рельеф поверхности воды (отметки даны в миллиметрах); Б – распределение продольных (тангенциальных) V_θ и поперечных (радиальных) V_r скоростей.

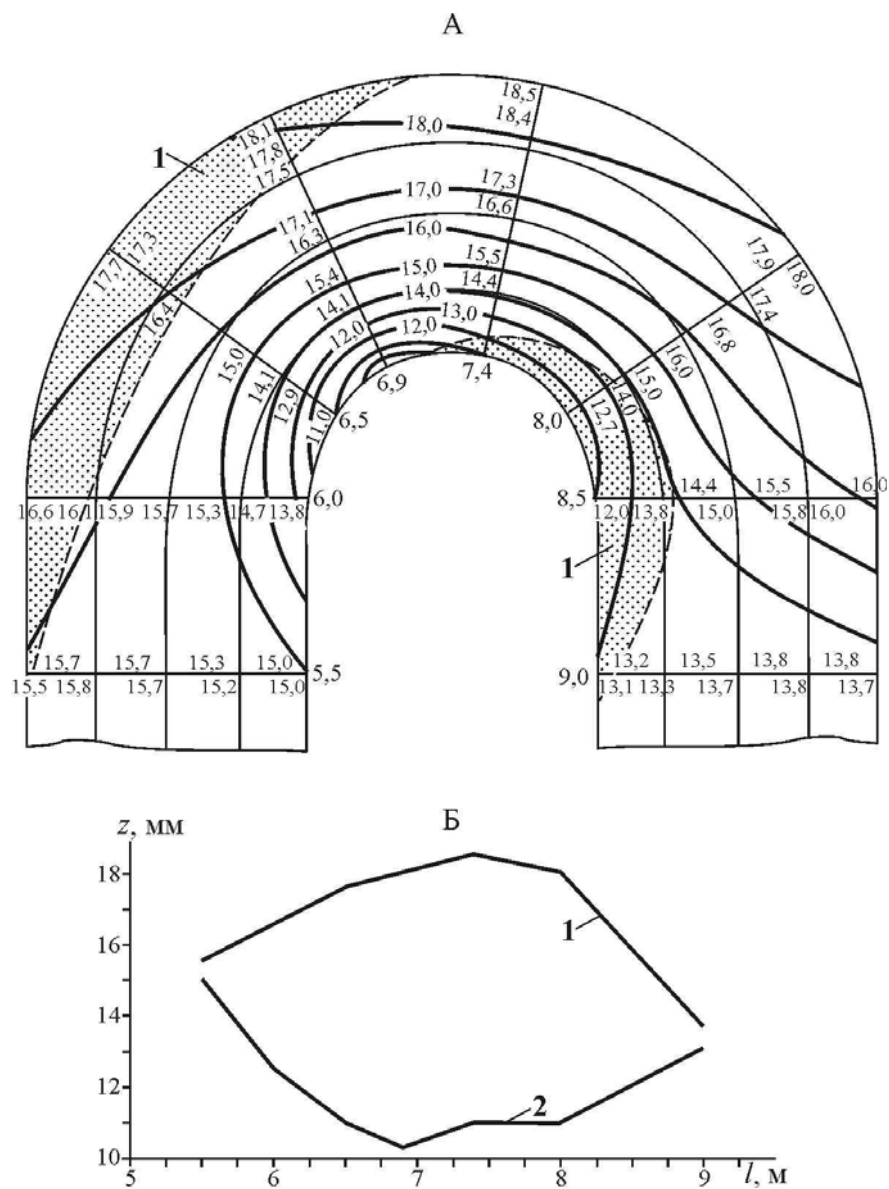


Рис. 25. Образование водоворотных зон на изгибе русла [Розовский, 1957]: А – рельеф водной поверхности (1 – водоворотные зоны); Б – продольный профиль водной поверхности (1 – у вогнутого берега; 2 – у выпуклого берега); отметки даны в миллиметрах.

При большом стоке наносов вогнутость перекрывается отмелями (рис. 26А). Струи потока, по наблюдениям Н.А. Ярных [1978] на излучине протоки Быстрой на р. Иртыше и на ее лабораторной модели, сходятся у выпуклого берега в вершине, оставляя у выпуклого обширную водоворотную зону; непосредственно ниже вершины, где русло поворачивает почти на 180° по отношению к верхнему крылу излучины, водоворотная зона формируется также у выпуклого берега (рис. 26Б). Смещение динамической оси потока к выпуклому берегу обуславливает его размыв, а сам берег приобретает вид крутого откоса (рис. 26В).

Большинство опытов по изучению кинематики потока было проведено на одиночном изгибе. Между тем в природных потоках излучины чаще встречаются сериями, и важным представляется взаимовлияние соседних изгибов. Эксперименты на сложном повороте (рис. 27) показывают, что свободная поверхность в пределах каждого изгиба аналогична поверхности потока на элементарном изгибе. В начале каждого изгиба поток успевает перестроить поле продольных скоростей. Однако поперечная циркуляция, возникающая на первом изгибе, сохраняется на прямолинейном участке и затухает лишь на середине второго поворота, где развивается циркуляция противоположного направления. В результате в начале каждого последующего изгиба наблюдается двухвинтовая циркуляция [Барышников, Попов, 1988]. Н.И. Маккавеев [1955] считает, что влиянием остаточной циркуляции, препятствующей развитию новой излучины непосредственно ниже существующей, объясняется образование небольших устойчивых прямолинейных участков («вставок») между смежными излучинами.

Большинство экспериментов проводилось в лотках прямоугольного или симметричного сечения с недеформируемым дном. Между тем, на излучинах рек формируется характерный русловой рельеф, обуславливающий изменение сечения потока на протяжении изгиба. Поэтому более близкую к естественным потокам картину дают эксперименты в лотках с размываемым дном. Примером такого рода исследований являются работы З.М. Великановой [1968].

Поток сформировал на серии излучин систему плесовых лоцин и побочней в соответствии с наблюдавшимся в предшествующих экспериментах распределением продольных скоростей: максимум скоростей расположен у выпуклого берега в вершине излучины, а ниже вершины он перемещается к вогнутому берегу. Придонные скорости отклоняются от поверхностных в сторону выпуклого берега (рис. 28). Однако поперечные составляющие скорости почти на всем протяжении изгиба направлены к вогнутому берегу, и лишь в придонной части в плесе ниже вершины излучины – к выпуклому. Это указывает на более значительную, по сравнению с поперечной циркуляцией, роль поступательного движения потока, инерционных сил в распределении скоростей. Этот результат имеет важное значение для понимания роли поперечной циркуляции в развитии излучин.

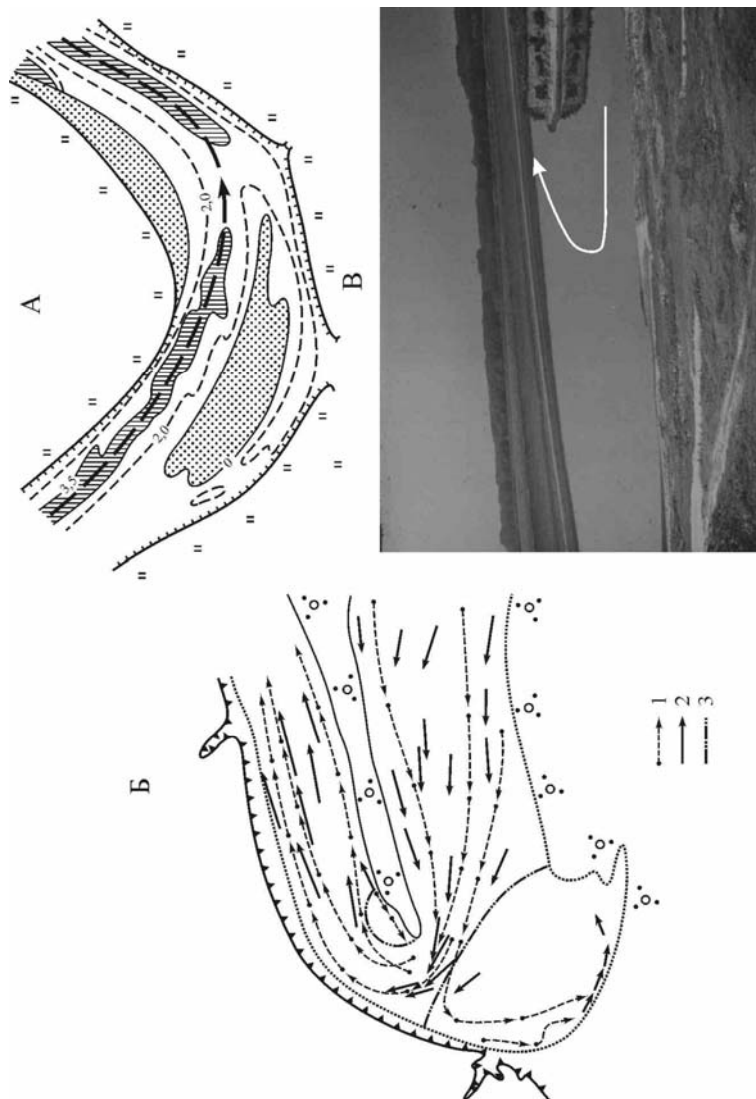


Рис. 26. Отрыв динамической оси потока от вогнутого берега и ее расположение у выпуклого на крутых излучинах.

А – р. Обь (Таганская выпущенная излучина); Б – поле скоростей потока в вершине излучины протоки Быстрой р. Иртыша [Ярных, 1978]; 1 – траектории движения поплавков по натурным данным; 2 – векторы скоростей потока по лабораторным данным; 3 – границы водоворотных зон; В – р. Днестр (свободные излучины): отчетливо виден подмываемый яр правого выпуклого берега (стрелка – направление течения).

Фото Р.С. Чалова.

При всей значимости результатов экспериментов, лабораторные потоки не дают полного подобия природным. Поэтому большой интерес представляют натурные исследования структуры потока на излучинах. Обзор немногочисленных натурных наблюдений, выполненных к середине XX века, был сделан И.Л. Розовским [1957]. В дальнейшем эти исследования продолжались [Кондратьев и др., 1959; Виноградов, 1970; Ярных, 1978; Зайцев, 1979], но число их невелико. В целом натурные измерения подтверждают основные результаты лабораторных экспериментов и теоретических построений. Однако выявляется определенная специфика, связанная, прежде всего, со значительно большей распластанностью речных потоков по сравнению с лабораторными, а также с влиянием природных факторов, исключенных в лабораторном эксперименте (неровность береговой линии, сложная конфигурация излучин и русловой рельеф, неустановившийся характер течения воды и т.д.).

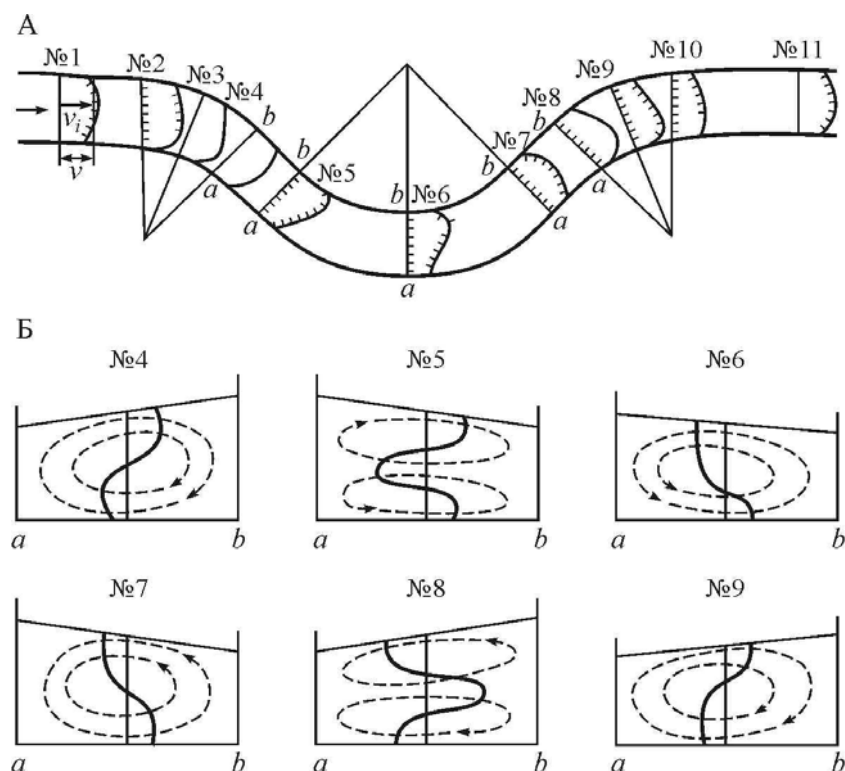


Рис. 27. Распределение продольных (А) и циркуляционных (Б) скоростей на сложном изгибе русла [Барышников, Попов, 1988].

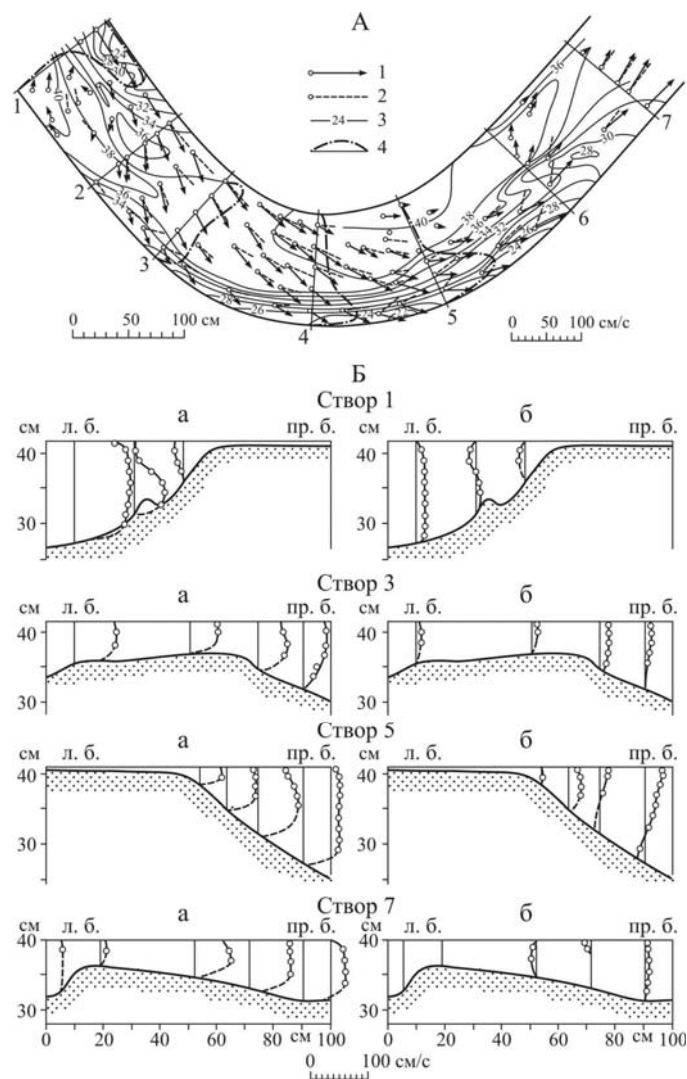


Рис. 28. Распределение скоростей (А) и вертикальные эпюры продольных (а) и поперечных (б) составляющих скорости (Б) на излучине в опытах с деформируемым дном [Великанова, 1968]: 1 – поверхностные скорости; 2 – донные траектории; 4 – горизонталы в см; 3 – эпюры распределения расхода в створах.

Ряд исследователей высказывал мнение, что спиральное вращение имеет место только в лабораторных и небольших русловых потоках с малым отношением ширины к глубине; речные же потоки обладают столь не-

большой относительной глубиной, что такого рода движение в них физически не может возникнуть (Н. Vogel et. al. и Р. Thompson, G. Matthes – по И.Л. Розовскому, 1957). Ранее это было установлено М.В. Потаповым [1936] и Н.И. Маккавеевым [1955]. Для проверки этого предположения И.Л. Розовским [1957] проведены наблюдения на реках Десне и Снови. На рис. 29 изображено распределение поперечных составляющих скоростей течения по ширине русла в вершине излучины р. Десны, где отчетливо проявляется отклонение поверхностных струй к вогнутому и придонных струй к выпуклому берегу.

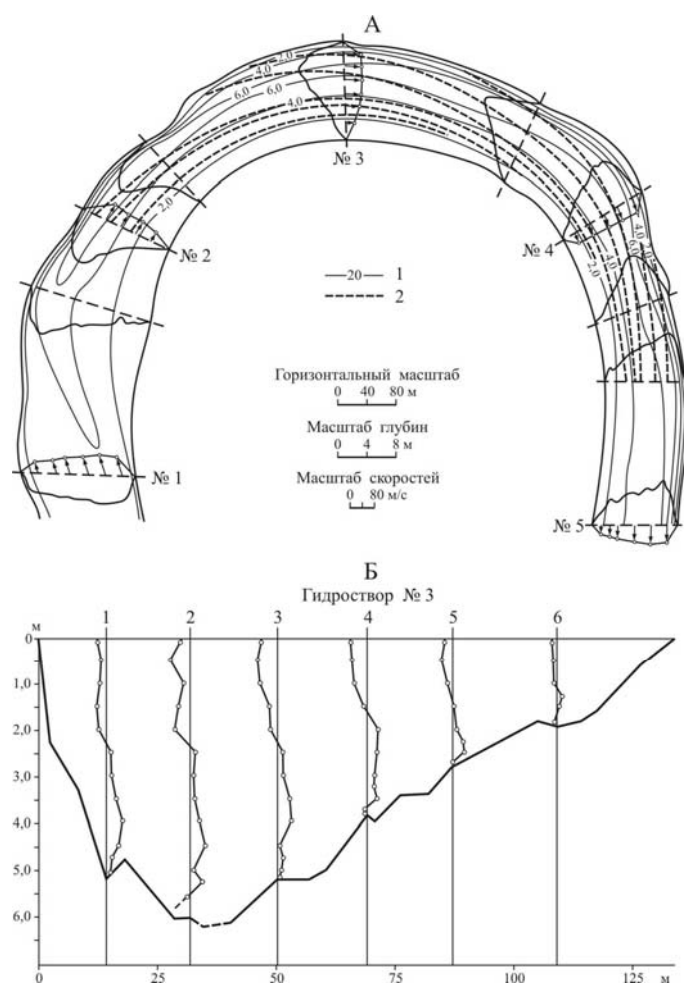


Рис. 29. Схема излучины р. Десны (А) с рассчитанными донными траекториями и эпюры поперечных составляющих скоростей в вершине излучины (Б) [Розовский, 1957].

По мнению И.Л. Розовского, это подтверждает наличие поперечной циркуляции на излучинах крупных рек.

Однако, как полагает Н.Н. Федоров [Кондратьев, Ляпин и др., 1959], эти исследования не являются достаточными, чтобы подтвердить или опровергнуть высказывания некоторых ученых (Н.Н. Жуковского, Н.И. Маккавеева, Е.В. Берга и др.) о том, что на повороте широкого речного потока циркуляция должна проявляться в виде серии разнонаправленных винтов. С другой стороны, результаты натурных наблюдений И.Л. Розовского больше напоминают экспериментальные данные М.А. Великанова на размываемых моделях, которые свидетельствуют не о поперечной циркуляции в виде винтообразных течений, а лишь об отклонении донных скоростей в сторону депрессии водной поверхности у выпуклого берега.

Пример детальных натурных исследований рельефа свободной поверхности и поля скоростей потока на излучине в период половодья дают работы В.А. Виноградова [1970, 1973] на р. Поломети. Их результаты подтверждают экспериментально установленные факты: наличие поперечного уклона от вогнутого к выпуклому берегу в вершине излучины, отклонение придонных скоростей от поверхностных в сторону выпуклого берега (рис. 30). Рельеф водной поверхности отражает распределение скоростей потока по длине излучин: наибольшим скоростям течения соответствуют наибольшие уклоны. Поэтому, наибольшие продольные уклоны приурочены к выпуклому берегу в начале излучин и к вогнутому берегу в их нижних частях. Наименьшие продольные уклоны наблюдались на участке максимального изгиба, где продольные уклоны были меньше поперечных. Вдоль берегов русла отмечались зоны отрыва потока в виде мертвых пространств, водоворотов и т.д. В зависимости от конфигурации берегов на разных излучинах зоны отрыва располагались у выпуклого берега ниже вершины, у вогнутого перед вершиной, либо и там, и здесь. Такое положение зон отрыва теоретически и экспериментально было установлено И.Л. Розовским [1957]. На границах таких зон с транзитным течением отмечается повышенная турбулентность и размывы дна русла. Образование вихревых зон связано с появлением местных максимумов отметок водной поверхности вдоль вогнутого берега. Выше максимума отметок обычно наблюдались вихри с вертикальной осью и горизонтальный размыв, ниже – вихри с горизонтальной осью и глубинный размыв.

По измерениям В.А. Виноградова [1970, 1973], поперечные скорости смещения (0,4-0,5 м/с) значительно превышают скорости циркуляции (менее 0,2 м/с) (рис. 31).

В лабораторных лотках прямоугольного сечения наблюдалась обратная картина [Гончаров, 1962], но в опытах с деформируемым дном и формированием характерного для излучин треугольного сечения [Великанова, 1968] смещение потока также преобладало над циркуляционными движениями. К.В. Гришанин [1990] отмечает, что роль радиальных течений велика на первых стадиях развития излучины. Увеличение глубин под вогнутым берегом и их уменьшение под выпуклым интенсифицируют попе-

речное движение воды (смещение): течение устремляется к вогнутому берегу, сжимается и вновь расширяется на выходе из излучины под воздействием рельефа дна.

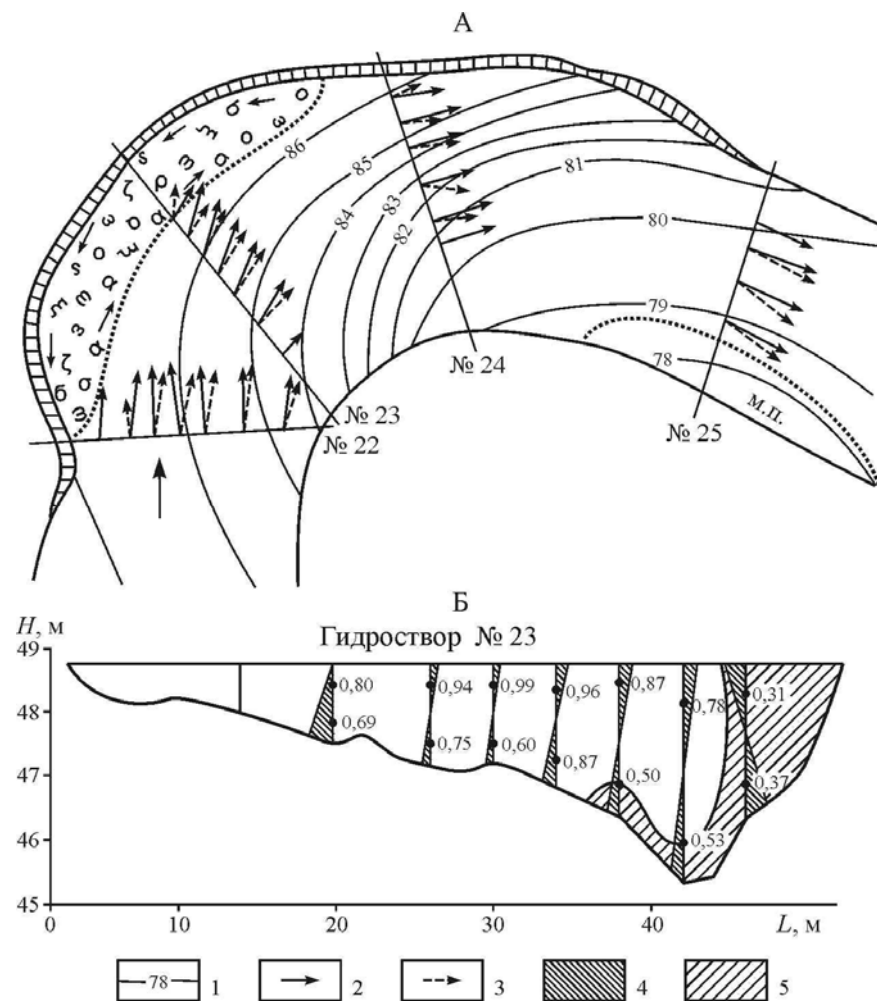


Рис. 30. Движение потока в половодье на излучине р. Поломети [Виноградов, 1973]:

А – план русла; Б – поперечный профиль. 1 – изолинии рельефа водной поверхности (в см); 2 – векторы поверхностных скоростей; 3 – векторы придонных скоростей; 4 – вертикальные эпюры поперечной составляющей скорости; 5 – область обратных продольных скоростей (водоворотная зона).

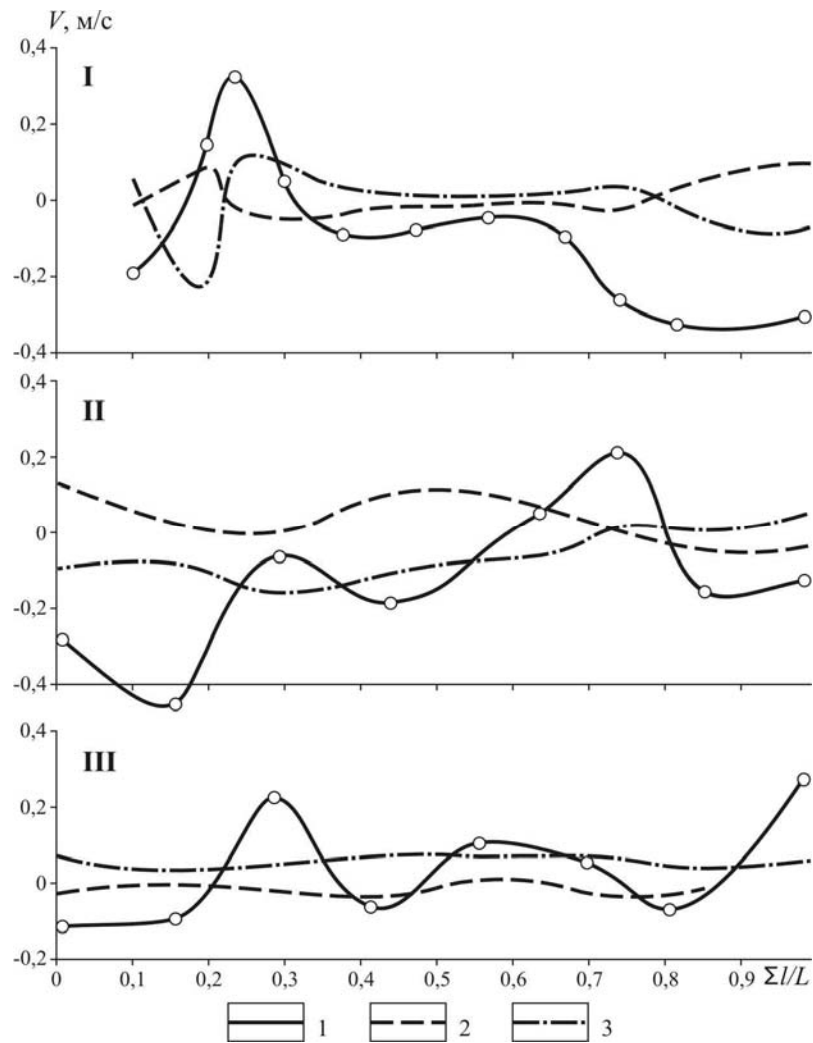


Рис. 31. Распределение поперечных скоростей смещения и циркуляции по длине трех излучин р. Поломети в половодье [Виноградов, 1973]: 1 – скорости смещения; 2 – скорости циркуляции вдоль правого берега; 3 – то же, вдоль левого берега; I-III – номера излучин.

Кинематика потока в извилистом русле существенно усложняется при затоплении поймы. Лабораторные эксперименты при разных уровнях затопления поймы выявили следующие особенности [Гончаров, 1962]. В основном русле сохраняется повышение уровня у вогнутого и понижение – у выпуклого берега. Это вызывает соответственные изменения уровней воды в

пределах ближайших районов поймы, появление на них местных поперечных уклонов. Продольные скорости течения в основном русле увеличиваются от вогнутого к выпуклому берегу, но с увеличением затопления поймы и глубины воды на ней распределение скоростей по ширине русла выравнивается.

При небольшом наполнении поймы существенное возрастание скоростей пойменного потока наблюдается в местах перелива на пойму масс воды из русла (рис. 32). Обмен водными массами между руслом и поймой приводит к тому, что на протяжении сложного поворота расход воды в русле уменьшается.

При отношении глубин на пойме и в русле 1,4:6,4 см на входном прямолинейном участке по руслу проходило 74% общего расхода, в конце же поворота – лишь 40%, т.е. лишь 55% начального расхода русла проходит транзитом. При росте затопления (отношение глубин 4,7:9,7 см) транзитная часть расхода, проходящая по руслу, падает до 0. Это означает, что при высоких уровнях ни одна из водных масс руслового потока не проходит транзитом по руслу даже на небольших участках, т.к. расходы перелива из русла на пойму и обратно превышают расходы русла в начальном створе (рис. 32В). Данное явление имеет большое значение для объяснения русловых деформаций в период высоких паводков [Гончаров, 1962].

Натурные наблюдения [Попов, Гаврин, 1970] показывают, что сформировавшиеся на основе лабораторных экспериментов и теоретических разработок представления о взаимодействии руслового и пойменного потоков путем их непосредственного контакта справедливы лишь для высоких половодий, когда мощные транзитные течения охватывают весь пойменный массив. В обычные по мощности половодья для поймы меандрирующей реки характерна значительная разобщенность течений, наличие местных перепадов уровня, определяемых пойменным рельефом – сопряжением аккумулярующих емкостей, соответствующих понижениям на поверхности поймы (рис. 33). В затоплении пойм и слива с них воды большое значение имеют локальные понижения. Затопление начинается обычно с низовой, наиболее пониженной части пойменного сегмента; с ростом уровней начинается перелив воды на пойму через понижения в бровках верховой части пойменного массива [Маккавеев, 1955; Попов, Гаврин, 1970]. Слив воды с поймы обычно идет через низовую часть массива. Подобный водообмен между руслом и поймой имеет существенное значение для понимания русловых деформаций на излучине. Так, слив осветленных пойменных вод через затонскую часть побочной излучины приводит к образованию в затоне водоворотов в результате взаимодействия сливающихся вод с основным течением реки. В результате поддерживается глубина затона и происходит наращивание раздельной косы наносами [Маккавеев, 1955].

Для понимания характера русловых деформаций в извилистом русле первостепенное значение имеет движение наносов на излучине. Поскольку натурные и экспериментальные исследования обнаружили существование поперечных составляющих скоростей течения, направленных в

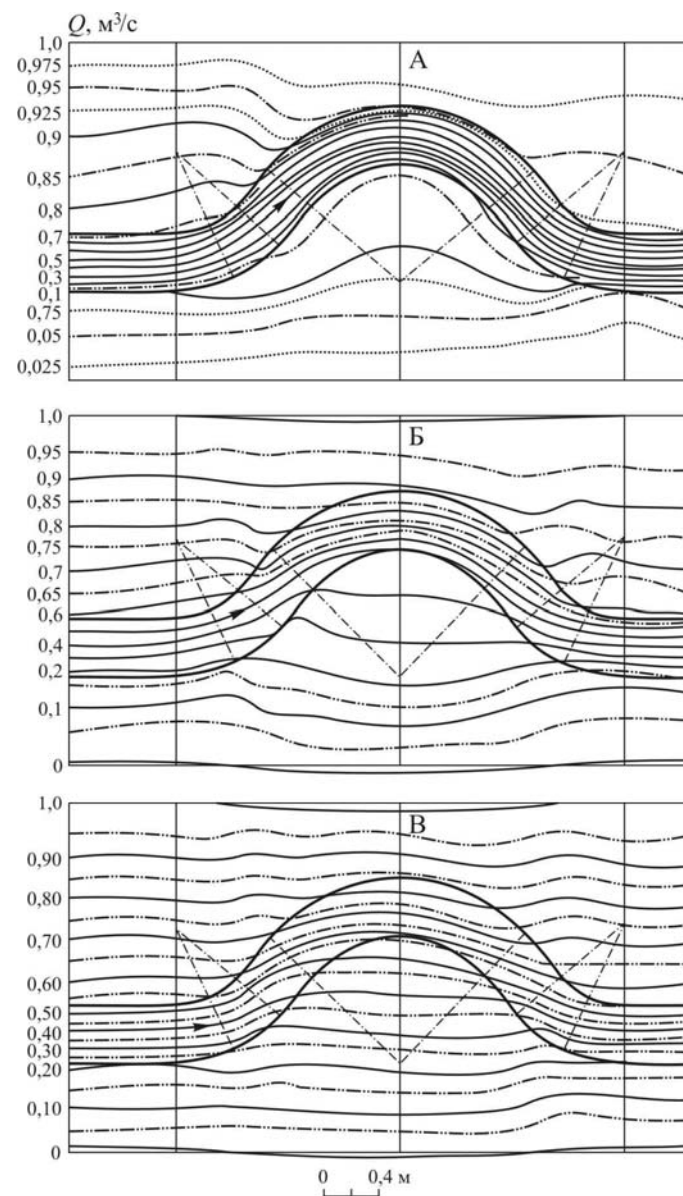


Рис. 32. Планы течений в лабораторном лотке со сложным изгибом при разных уровнях затопления поймы [Гончаров, 1962]:

	А	Б	В
Глубина русла, см	6,4	8,0	9,7
Глубина воды на пойме, см	1,4	3,0	4,7

придонной области потока к выпуклому берегу, можно предположить, что именно этим объясняется размыв и углубление дна русла у вогнутого берега и наращивание побочня на противоположной стороне русла. Еще Н.С. Лелявский [1893] говорил: «... вода, стекающая к фарватеру и к вогнутым берегам, не имея другого выхода, приподнимается несколько кверху и, образуя поперечный уклон от фарватера и вогнутости к выпуклым берегам, своим давлением на подводные слои способствует образованию течения по дну в обратном косвенном направлении к берегам.

Существование такого донного течения от фарватера к берегам подтверждается многими наблюдениями. Так, например, размывы песчаных вогнутых берегов, сопровождаемые почти непрерывными обвалами иногда значительных глыб иловато-песчаного грунта, не производят замеления прилежащих частей дна, причем вода, протекающая вдоль таких берегов, остается, по-видимому, совершенно чистой и прозрачной, тогда как на мелях она клокочет, вздымая со дна массу наносов. Происходит это оттого, что размываемый грунт относится от берега донным течением и разносится им вниз по течению и притом не только на нижележащую косу того же берега, но также в косвенном направлении к противоположному выпуклому берегу. Этим можно объяснить прогрессивное нарастание подводных кос у нижних оконечностей выпуклых берегов, соразмерное размыву вышележащих противоположных вогнутых берегов. Точно так же и карчи, вымываемые на фарватере, откатываются донным течением к отлогим берегам. Но самое убедительное доказательство существования донного течения, направляющегося от фарватера к пологим берегам, представляет исследование формы речного дна» (с.113).

Близкой точки зрения придерживались В.М. Маккавеев [1938], М.А. Великанов [1950, 1955], И.Л. Розовский [1957]. И.Л. Розовский теоретически вывел формулу для угла отклонения донного течения φ от среднего направления: $\operatorname{tg} \varphi = Dh/r$, где D – константа, равная, по экспериментальным данным, $10\div 12$. На основе этой формулы им был разработан метод построения планов придонных течений, который дал хорошее соответствие с результатами экспериментов в лотках с прямоугольным сечением. Поскольку угол отклонения прямо зависит от кривизны русла, с увеличением крутизны излучины увеличивается доля донных струй, пересекающих русло от вогнутого к выпуклому берегу (рис. 34). И.Л. Розовский построил схему донных траекторий для участка р. Десны, из которой следует, что продукты размыва вогнутого берега в верхнем крыле излучины должны по диагонали пересекать русло и накапливаться в нижнем крыле у выпуклого берега (рис. 29А). Другая точка зрения отдает роли поперечной циркуляции в движении наносов второстепенное значение. В опытах Дж. Фридкина [Friedkin, 1945] лишь небольшое количество песка, размываемого на вогнутом берегу, пересекало русло, большая же его часть переоткладывалась ниже по течению на том же берегу. В опытах З.М. Великановой [1968] траектории донных струй отклонялись от вогнутого берега по всей ширине только в начале

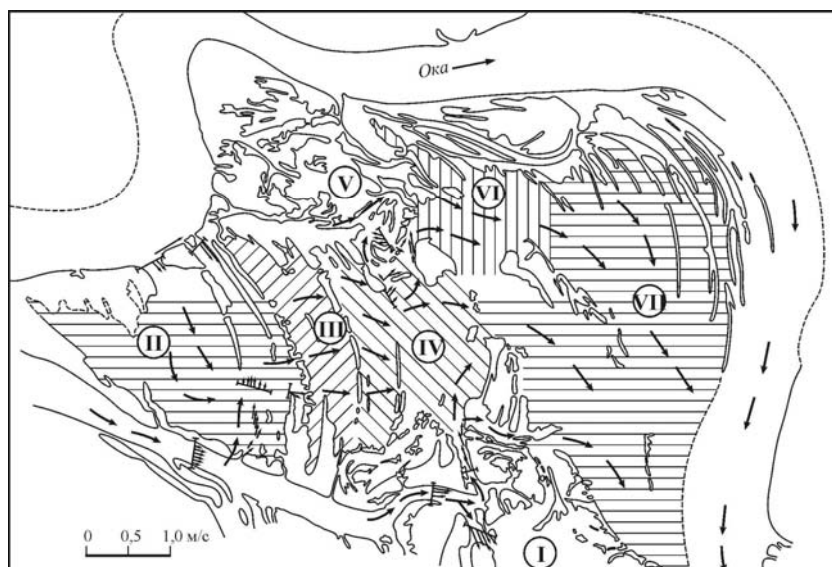


Рис. 33. Течения на пойме в излучине р. Оки на пике половодья [Попов, Гаврин, 1970, с дополнениями]. Римские цифры означают последовательность заполнения аккумулирующих пойменных емкостей.

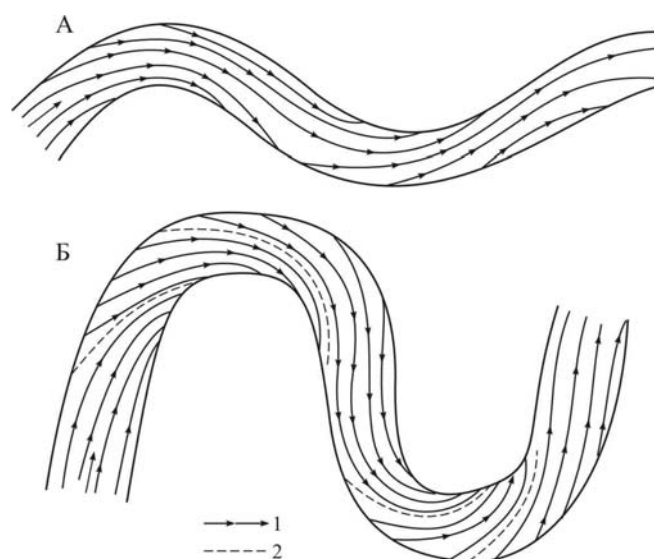


Рис. 34. Траектории донных струй на пологой (А) и крутой (Б) излучинах в лотках прямоугольного сечения, построенные по методу И.Л. Розовского [Кондратьев, Ляпин и др., 1959]: 1 – траектории донных течений; 2 – линия раздела траекторий, пересекающих и не пересекающих русло.

опыта при ровном дне потока, что близко к условиям опытов А.Я. Миловича, И.Л. Розовского, Н.И. Маккавеева и других исследователей, проводившихся в лотке с прямоугольным сечением. Когда же сформировался типичный для излучины русловой рельеф, придонные слои отклонялись только в плесовой ложине, в то время как на затопленном побочне их траектории были направлены к вогнутому берегу (рис. 35). Измерения расхода наносов на лабораторной излучине показали [Великанова, 1969], что на перекате в верхнем крыле излучины он распределен равномерно по ширине. В вершине излучины у выпуклого берега проходит лишь небольшая часть расхода наносов; большая его часть идет по плесовой ложине. Такая же ситуация сохраняется и в нижнем крыле. Из этих результатов можно заключить, что у выпуклого берега происходит остановка транзитных наносов и наращивание побочня, тогда как у вогнутого – интенсивный транспорт наносов.

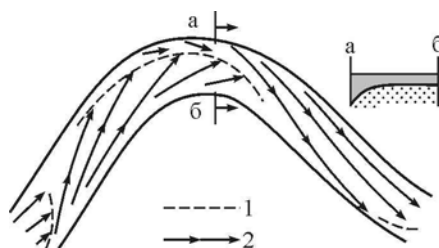


Рис. 35. Схема донных траекторий на лабораторной излучине при наличии плесовой ложины и переката [Великанова, 1968]: 1 – гребень переката; 2 – донные траектории.

Натурные наблюдения за траекториями движения донных наносов не проводились. Однако имеется ряд косвенных наблюдений и заключений в пользу отсутствия массового транспорта наносов поперек русел, особенно на больших реках. В отличие от лабораторных потоков, они характеризуются большой шириной и распластанностью. А.А. Зайцев [1979] полагает, что в крупных естественных потоках поперечные перемещения струй затушевываются турбулентными пульсациями и случайными отклонениями от различных препятствий. По оценкам К.В. Гришанина [1990], при $r/h_p=100$ донная радиальная скорость составляет лишь 5% от средней на вертикали продольной скорости. Поэтому шаг винтового вращения очень велик, и в реках жидкие частицы никогда не успевают перейти от одного берега к другому в пределах одной и той же излучины. На основе наблюдений на реках бассейна Миссисипи Г. Мэтзис [Matthes, 1941] установил, что большая часть продуктов размыва вогнутых берегов излучин переоткладывается у выпуклого берега нижележащей излучины; русло пересекает лишь малая часть наносов.

Отсутствие поперечного переноса наносов и водных масс подтверждает визуальные наблюдения на адаптированных излучинах р. Днестра у

с. Криуляны в нижнем бьефе Дубосарского водохранилища (рис. 36). Между ГЭС и с. Криуляны (10 км выше по течению) с правого берега впадает р. Реут, по которой во время наблюдения проходил дождевой паводок. Мутная вода Реута четко отделялась от осветленных водохранилищем вод Днестра, прослеживаясь вдоль правого берега и оконтуривая примерно по 0,25 ширины русла Днестра сначала вогнутый, а затем выпуклый берег. Ширина русла на данном участке 150 м, глубина в плесовых ложбинах – 4-5 м.



Рис. 36. Излучины р. Днестра у с. Криуляны в нижнем бьефе Дубосарского водохранилища в период прохождения дождевого паводка на притоке – р. Реуте. Отчетливо видна граница мутной воды вдоль правого берега. *Фото Р.С. Чалова.*

Таким образом, выявляются две различные точки зрения на наличие и роль поперечного транспорта наносов на излучинах русла. Компромиссом между ними могут служить взгляды Н.И. Маккавеева [1955, 1971; Проектирование судовых ходов ..., 1964], которые здесь изложены близко к первоисточнику. Н.И. Маккавеев полагал, что наращивание отмели у выпуклого берега излучины происходит как благодаря поперечному перемещению придонных струй, непрерывно поставляющему наносы к выпуклому берегу, так и вследствие продольного изменения поля скорости потока на крыльях излучин вдоль вогнутого и выпуклого берегов. Последнее определяет чередование зон ускорения и замедления течения. Это заключение базируется на данных опытов в лотках с прямоугольным сечением и гладким дном, где нередко наблюдалось, как донные поплавки, пройдя вершину кривой, поворачивают в сторону выпуклого берега под углом к основному течению до 50° . Растущая отмель отжимает течение к вогнутому берегу, стимулируя его размыв. Однако Н.И. Маккавеев предостерегает от преуве-

личения роли поперечной циркуляции, т.к. на повороте русла максимальные значения продольного уклона создаются именно у выпуклого берега, и здесь может происходить увеличение скорости и размыв не менее интенсивный, чем у вогнутого. Кроме того, в чередовании на излучине участков размыва берегов и аккумуляции наносов с формированием прирусловой отмели значительна роль продольного движения наносов, скорости которого изменяются в соответствии с особенностями поля продольных скоростей на изгибе русла.

Обозначив длину пути элементарной струи, проходящей у вогнутого берега, l_1 , а у выпуклого – l_2 , радиусы, которыми описаны струи, – r_1 и r_2 , Н.И. Маккавеев получил:

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{\pi r_1}{\pi r_2} = \frac{r_1}{r_2}, \quad (2.16)$$

т.е. длина пути элементарной струи прямо пропорциональна радиусу, которым она описана. Полагая, что на подходе к изгибу и в его конце водная поверхность не испытывает перекоса, можно принять падение водной поверхности ΔH на протяжении излучины одинаковым для всех струй. Тогда относительная величина среднего уклона по длине элементарных струй определится выражением

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2}{r_1}, \quad (2.17)$$

т.е. величины уклонов обратно пропорциональны радиусу элементарной струи потока и достигают максимальных значений у выпуклых берегов. Заменяя в (2.17) значения уклонов скоростями течения, Н.И. Маккавеев на основании лабораторных экспериментов получил следующее выражение [Проектирование судовых ходов ..., 1964]:

$$k \sqrt{\frac{V_1}{V_2}} = \frac{r_2}{r_1}, \text{ или } r \sqrt{V} = \text{const}, \quad (2.18)$$

одновременно отметив, что на излучинах, где имеются зоны отрыва потока от берегов, наблюдается распределение скоростей по ширине русла, соответствующее выражению $rV = \text{const}$ или $r V^2 = \text{const}$, что прямо соответствует квадратической зависимости скорости падения уклона (по Шези). В излучинах, где поперечное сечение отличается от прямоугольного, на поле скоростей оказывает влияние распределение глубин по ширине русла. Поэтому в вершине изгиба (по Н.И. Маккавееву):

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{r_2 h_1}{r_1 h_2}}, \quad (2.19)$$

где h_1 и h_2 – глубины у вогнутого и выпуклых берегов. Поэтому в русле, где плесы располагаются у вогнутых берегов, возле последних наблюдаются

максимальные скорости течения в меженном потоке. С повышением уровня воды влияние рельефа дна сказывается все слабее на распределении скоростей течения, и максимум последних располагается у выпуклых берегов.

Своеобразное распределение скоростей течения приводит к образованию по длине всей излучины в потоке половодья чередующихся зон ускорения и замедления течения (рис. 37А, Б). Поскольку в вершине излучины у вогнутого берега скорость течения минимальная, а у выпуклого – максимальная, то на протяжении верхнего ее крыла вдоль выпуклого берега от места изменения знака кривизны до вершины скорость течения возрастает (зона ускорения), а ниже вершины до конца излучины убывает (зона замедления). В зоне замедления течения (рис. 37Г) происходит аккумуляция транзитных наносов, тогда как в зоне ускорения течения потока берега размываются и формируется (плесовая ложина). Вдоль вогнутого берега под изменением скорости течения противоположный: соответственно, ниже вершины вдоль выпуклого берега располагается зона аккумуляции наносов, а у вогнутого берега – зона размыва.

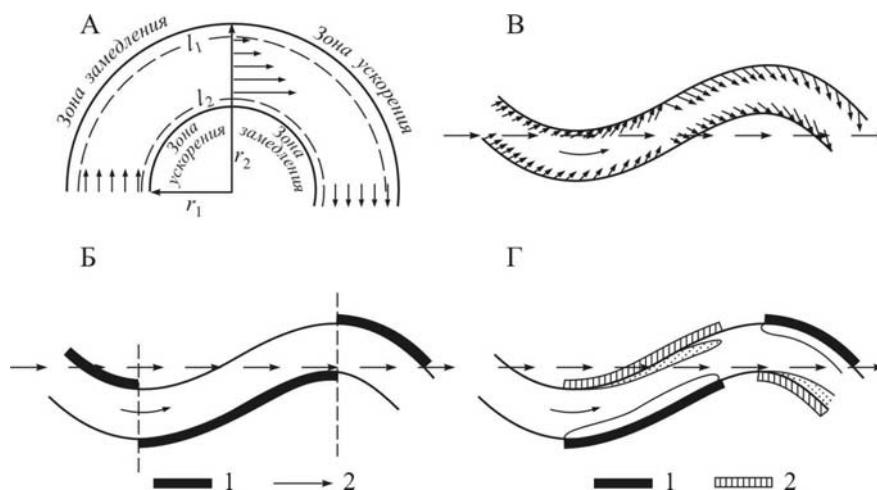


Рис. 37. Скоростное поле потока и его воздействие на берега в излучине русла [Маккавеев, 1955]. А – векторы средних скоростей течения; Б – расположение сбойных берегов: 1 – прижимной берег, 2 – направление весеннего течения; В – направление циркуляционных течений в придонном слое; Г – зоны аккумуляции и эрозии: 1 – зона преимущественной эрозии, 2 – зона преимущественной аккумуляции.

Таким образом, на излучине в потоке половодья чередуются в шахматном порядке зоны ускорения и замедления течения, определяющие последовательность образования вдоль берегов зон эрозии или аккумуляции:

один из берегов на всем протяжении между вершинами соседних излучин преимущественно подмывается, а противоположный – наращивается. В результате излучины испытывают продольное (т.е. вдоль по длине русла) перемещение.

Неравномерное распределение скоростей течения на излучинах является непосредственной причиной возникновения поперечного уклона поверхности воды: в зоне ускорения течения h_p убывает и уровень воды понижается, образуется депрессия водной поверхности, максимум которой приурочен к выпуклому берегу в вершине излучины. Поперечный уклон возникает также в результате действия центробежной силы, развивающейся при движении струй потока по криволинейным траекториям. Водная поверхность стремится расположиться нормально к равнодействующей центробежной силы и силы тяжести. Разница уровней у вогнутого и выпуклого берегов зависит от ширины русла, радиуса изгиба, средней скорости течения и характера изменения скоростей по живому сечению; поперечный уклон определяется по формуле:

$$I_{non} = \frac{\alpha V^2}{rg}, \quad (2.20)$$

где α – корректив скорости.

Поперечный уклон водной поверхности в сторону выпуклого берега вызывает образование в потоке циркуляционных течений, донные ветви которых отклоняются от поверхности в сторону выпуклого берега на всем протяжении излучины (рис. 37В). Поперечные перемещения донных струй способствуют формированию в вершинах излучин у выпуклых берегов отмелей, а у вогнутых – плесовых лощин: в местах перевала стрежня потока от одного берега к другому, несколько ниже пунктов изменения знака кривизны русла располагаются гребни перекатов. Это объясняется некоторой инертностью циркуляционных течений, не сразу перестраивающих свою систему при изменении знака поперечного уклона. Если излучина переходит в прямолинейный участок, несимметричная форма поперечного профиля русла, вследствие инерционных явлений, прослеживается от конца изгиба на расстоянии порядка 1,5 ширин потока.

Благодаря циркуляционным течениям излучина перемещается в поперечном, по отношению к продольной оси долины, направлении. В верхнем крыле излучины влияние циркуляционных течений на расположение зон преимущественной эрозии и аккумуляции не совпадает с воздействием на развитие излучины скоростного поля потока. В нижнем крыле оба фактора действуют однонаправлено. Аккумуляция наносов придонными ветвями циркуляционных течений у выпуклого берега в верхнем крыле излучины ослабляет действие продольных скоростей, а при определенных условиях может полностью его нейтрализовать. В результате совместного воздействия скоростного поля и циркуляционных течений излучины, перемещаясь

вниз по реке, одновременно перемещаются и поперек долины. Чем больше кривизна излучины, тем больше поперечный уклон в сторону выпуклого берега и, соответственно, интенсивнее возбуждаемая на повороте поперечная циркуляция. У пологих излучин с большим радиусом кривизны циркуляционные течения развиты слабо, и главным фактором развития излучины является неравномерное поле скоростей. По мере искривления излучины все большую роль начинают играть циркуляционные течения. В результате происходит выравнивание продольной и поперечной составляющих скорости переноса наносов, а когда излучина становится крутой – начинают преобладать последние. Благодаря циркуляционным течениям зона аккумуляции наносов на крутой излучине распространяется на весь выпуклый берег. Особенно отчетливо это проявляется на малых реках (и в лабораторных лотках), где ширина и глубина русла – величины соизмеримые. Таким образом, в зонах ускорения течения происходит размыв берегов и наращивание прирусловых отмелей как за счет замедления или прекращения продольного перемещения наносов, так и за счет подпитки отклоняющимися к выпуклому берегу донными струями. Развивая взгляды Н.И. Маккавеева, Р.С. Чалов [1979] пришел к заключению, что наносы, переносимые циркуляционными течениями, не могут образовывать большую отмель у выпуклого берега, а лишь накапливаются у ее края, способствуя частичному ее расширению и удлинению. Иными словами, циркуляционные течения участвуют в формировании прирусловой отмели у выпуклого берега, но не определяют его. Лишь на малых реках (при $B_p < 15-20h_p$ [Потапов, 1936]), особенно при большой кривизне излучин, возможна ведущая роль этого фактора в развитии излучин и формировании прирусловых отмелей у выпуклых берегов.

Действительно, пересекающие русло донные траектории наблюдались лишь в опытах в лотках с прямоугольным сечением. В опытах с характерным для излучин русловым рельефом поперечное перемещение захватывало лишь плесовые ложины. В естественных потоках, отличающихся от лабораторных значительно большей шириной и распластанностью, поперечное движение наносов имеет место, но охватывает лишь небольшую часть ширины русла. Движение наносов на излучине реки и формирование характерного руслового рельефа представляется как комбинация продольной (преобладающей) и поперечной (подчиненной) составляющих. При этом наличие поперечной составляющей не означает, что наносы в пределах излучины по диагонали пересекают русло от одного (размываемого) к другому (наращиваемому) берегу. Размыв и аккумуляция имеют место не в результате прямого перемещения наносов, а вследствие изменения баланса общего стока наносов на разных участках дна при трансформации поля скоростей потока на изгибе русла.

В период половодья происходит обмен наносами между руслом и поймой. Н.С. Знаменская [1973], основываясь на материалах натурных и лабораторных исследований, выделила три участка выноса наносов из русла на пойму (рис. 38А):

1) выносы с переката в верхнем крыле излучины на выпуклый берег при образовании транзитного течения по пойме; на крупных реках песчаные языки в верховой части пойменного массива достигают 150-200 м [Великанова, Ярных, 1970];

2) выносы с побочня на кромку выпуклого берега в низовой части массива поймы;

3) выносы из плеса на кромку вогнутого берега при больших затоплениях поймы [Маккавеев, 1955; Ярославцев, 1966], когда у берегового откоса происходит смена знака циркуляции и образуются восходящие струи, взмывающие наносы на кромку пойменного яра; этот механизм участвует и в разрушении вогнутого берега излучины, причем продукты размыва участвуют в формировании наносов, поступающих на пойму (рис. 38Б).

Перечисленные случаи показывают, что при изучении деформаций извилистого русла нельзя ограничиваться только рассмотрением внутрируслового транспорта наносов. Многочисленные наблюдения показывают, что практически все донные и большая часть взвешенных наносов, попадающая из русла на пойму, осаждаются на поверхности поймы, и при сливе с поймы русловой поток получает лишние наносы (осветленные) воды, что служит дополнительным фактором размыва русел и формирования глубоких плесов ниже по течению. Нередко в местах слива пойменных вод формируются глубокие затоны, и вдоль них возможно при большом затоплении поймы образование мощного транзитного потока и спрямление излучины [Маккавеев, 1955].

Различаются взгляды и на механизм размыва вогнутого берега излучины. По Н.С. Лелявскому [1893], это – результат опускания частиц воды от поверхности (сбойное течение). Однако И.Л. Розовский [1957] показал, что вертикальные составляющие скорости слишком малы, чтобы оказывать заметное влияние на касательные напряжения у дна. Другие исследователи полагают, что у вогнутого берега размывающая способность повышается благодаря увеличению турбулентности, однако это предположение не находит теоретического подтверждения [Кондратьев, Ляпин и др., 1959]. Большинство исследователей [Маккавеев, 1955; Кондратьев, Ляпин и др., 1959; Нооке, 1975] указывают на роль поперечной циркуляции – наличие поперечных составляющих придонных скоростей, удаляющей наносы от вогнутого берега.

Н.И. Маккавеев [1955] связывает зоны размыва берегов с зонами ускорения течения на изгибе (рис. 37). Близкого мнения придерживается Н.Н. Федоров [Кондратьев, Ляпин и др., 1959], полагающий, что размыв вогнутого берега происходит в результате смещения к этому берегу линии максимальных скоростей в нижнем крыле излучины. При этом линия стрежня может располагаться вдоль откоса русла, где смещению донных частиц способствует и сила тяжести. Имеет значение также сбойный (по терминологии Н.Г. Лелявского) характер течений в зоне ускорения потока, проявляющийся в сгущении струй возле берегового откоса. В результате

происходит сжатие потока, сопровождающееся ростом его скоростей. Это способствует формированию отмели у противоположного берега.

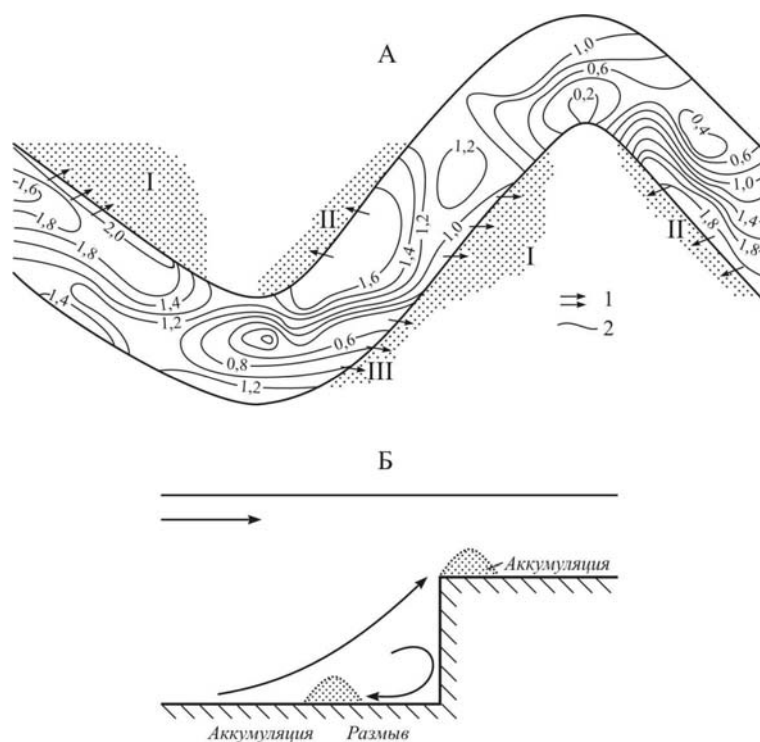


Рис. 38. Выносы наносов из русла на пойму на модели излучин р. Дона [Знаменская, 1973] (А) и циркуляционные течения, возникающие возле кромки затопленного вогнутого берега при переливе воды из русла в пойму [Маккавеев, 1955] (Б): *I* – выносы донных наносов с переката при больших затоплениях пойм; *II* – выносы донных наносов с отмели при малых затоплениях пойм; *III* – выносы донных наносов при больших затоплениях из плесовых лощин; *1* – направление выноса донных наносов, *2* – горизонтали дна в условных отметках.

С точки зрения механизма процесса интересны взгляды Г. Мэтзиса [Matthes, 1941], который полагает, что наиболее интенсивный размыв вогнутого берега происходит на спаде уровней, когда создаются благоприятные условия для обрушения водонасыщенного берегового откоса и разнос материала облегчается благодаря тому, что линия максимума скоростей близко подходит к вогнутому берегу. Прижим стрежня к вогнутому берегу действительно имеет место в высокую межень или на спаде половодья (паводка). Во время пика половодья распределение скоростей по ширине русла приближается к закону площадей [Гришанин, 1990], и стрежень смещается

к выпуклому берегу. Поэтому наиболее интенсивное развитие излучин (по наблюдениям на р. Селенге) происходит во время средних по высоте половодий; при прохождении же паводков редкой повторяемости побочни у выпуклого берега размываются и даже отторгаются от них [Клавен, Снисенко, 1978].

Значительную роль в размыве вогнутых берегов могут играть водовороты, благодаря которым в русле «высверливаются» ямы, многократно превышающие обычную глубину плесов. Размывы берегов в зонах водоворотов обычно выражаются в фестончатых очертаниях береговой линии. Образование водоворотов является частым, но не всеобщим явлением, и лишь накладывается на общий поступательный размыв берегов на излучинах.

Г. Габрехт [Garbrecht, 1953] для объяснения процесса меандрирования выдвинул идею удара и отражения потока от вогнутого берега. Эта идея была развита рядом отечественных исследователей [Кондратьев, 1982; Грачев, 1983]. Согласно «принципу отражения», водный поток из верхнего крыла излучины под действием сил инерции набегает на вогнутый берег вблизи ее вершины и изменяет свое направление (отражается) под углом, равным углу подхода, как это свойственно всем процессам отражения. Если направление отраженной струи не совпадает с общим направлением потока (изгиб очень пологий или очень крутой), вновь происходит набегание его на берег (соответственно, на противоположный или на тот же самый) и так далее, пока направление отраженной струи не совпадет с направлением русла. Как отмечает Н.Н. Федоров [Кондратьев, Ляпин и др., 1959], данный принцип интересен для объяснения регулярности распространения излучин (формирования правильных повторяющихся форм), однако влияние набегających струй на размыв берега, по-видимому, невелико. Подъем уровня у вогнутого берега, происходящий в результате действия центробежных сил, обычно не превышает на естественных реках 5-10 см, что составляет ничтожную долю глубины потока, т.е. сам по себе этот подъем заметного действия на берег оказать не может. Напротив, благодаря увеличению потенциальной энергии происходит уменьшение скоростей течения, т.е. его размывающей способности. С другой стороны, в лабораторных опытах с увеличением угла разворота (кривизны русла) в пределах излучины формируется две плесовых ложбины [Великанова, 1969]. Расположение ложбин соответствует местам инерционного набегания потока на вогнутый берег и отражения (сначала одиночного, затем повторного), причем углы, образованные набегающим и отраженным потоком с линией берега, близки. Явление раздвоения плесовой ложбины широко распространено на излучинах с большой степенью развитости. Такие явления, трудно объяснимые с позиции теории поперечной циркуляции и с точки зрения теоретического распределения скоростей на изгибе русла, показывают, что изучение кинематики потока и движения наносов на излучинах рек еще далеко от завершения.



ГЛАВА 3



СВОБОДНЫЕ ИЗЛУЧИНЫ



3.1. Формы и механизм смещения излучин

Распределение скоростей потока по его длине, циркуляционные течения, связанные с ними особенности движения наносов и положения зон эрозии (размыва) и аккумуляции на излучинах русла (рис. 37) обуславливают их направленное смещение, отступление размываемых берегов и рост отмелей у противоположных, аккумулятивных. При этом первый фактор – распределение скоростей потока – обуславливает продольное смещение излучин, второй – циркуляционные течения – поперечное (по отношению к оси пояса меандрирования). Продольное перемещение излучин связано с тем, что в зонах ускорения течения происходит размыв выпуклого берега в верхнем крыле и вогнутого в нижнем крыле. Наоборот, в зонах замедления течения создаются благоприятные условия для аккумуляции переносимого рекой твердого материала, и здесь происходит образование прирусловых отмелей (побочней, кос или, на больших реках, осередков). У сегментных излучин они протягиваются сначала вдоль выпуклого берега от вершины излучины, а затем вдоль вогнутого смежной нижерасположенной излучины вплоть до ее вершины. Такая схема деформации, свойственная сегментным, в основном, пологим излучинам обусловлена слабой выраженностью циркуляционных течений из-за больших радиусов кривизны и незначительных поперечных уклонов свободной поверхности (2.20). Примером такого преобладающего продольного смещения является р. Десна в нижнем течении (рис. 39); средние скорости размыва пойменных берегов здесь составляют 5 м/год, максимальные достигают 8-10 м/год [Русловой режим ..., 1994].

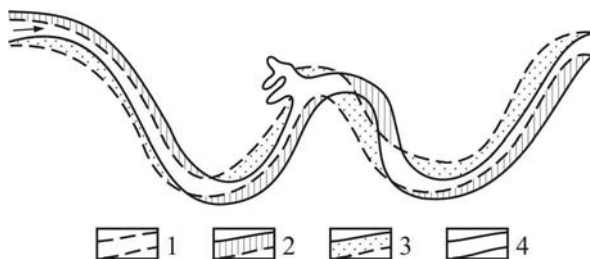


Рис. 39. Продольное смещение сегментных излучин р. Десны в нижнем течении: 1 – граница русла в 1962 г.; 2 – размыв русла за период 1962-1985 гг.; 3 – вновь образованные участки поймы на отмелях за тот же период; 4 – граница русла в 1985 г.

Возникающая под влиянием изгиба потока даже самой незначительной кривизны поперечная циркуляция со временем приводит к искривлению излучины и, как следствие, увеличению поперечного перекоса водной поверхности и активизации самих циркуляционных течений. В результате совместного воздействия скоростного поля потока и циркуляционных течений излучины, смещаясь вниз по реке, одновременно испытывают поперечное смещение. Однако разная направленность воздействий скоростного поля и поперечной циркуляции в верхнем крыле излучины и совпадение их только в нижнем, а также значительно меньшая роль поперечной циркуляции в перемещении наносов приводит к тому, что скорости продольного смещения излучин, как правило, больше скоростей поперечного. По лабораторным опытам Н.И. Маккавеева и Н.В. Хмелевой [1965; Экспериментальная геоморфология, 1969], средние скорости продольного смещения в 5,2 раза больше поперечного. Однако в натурных условиях (были сопоставлены планы р. Дона 1704 г с лоцманской картой 1949 г и р. Иордана по съемкам 1928-1935 гг и 1962 г) средняя скорость продольного смещения только в 1,4-1,5 раза больше, чем поперечного (табл. 4); максимумы скоростей обоих направлений смещения сближаются при преобладании продольного или выравниваются. Аналогичные результаты были получены на верхней Оби [Беркович, Гаррисон и др., 1990]: здесь средние скорости поперечного и продольного смещения излучин составляют 15 и 30 м/год соответственно, т.е. различаются в 2 раза. Н.И. Маккавеев причину разницы между натурными и экспериментальными данными объясняет большей кинетичностью потока лабораторной «реки»: число Фруда для Дона колеблется в пределах 0,03-0,10, для лабораторного потока 0,2-0,5. При этом скорость продольного смещения излучин находится в прямой зависимости от числа Фруда, тогда как поперечная скорость при $Fr > 0,2$ имеет обратную форму связи [Экспериментальная геоморфология, 1969]:

$$U_{non} = \frac{0,128}{Fr - 0,2}. \quad (3.1)$$

Таблица 4. Скорости (м/год) продольного и поперечного смещения излучин рек Дона и Иордана [Экспериментальная геоморфология, 1969]

Река, участок	Продольное смещение		Поперечное смещение	
	среднее	максимум	среднее	максимум
Дон				
среднее течение	7,0	13,7	4,6	11,8
нижнее течение	4,5	13,3	3,5	9,5
Иордан				
среднее течение	0,4	4,8	0,6	4,8
нижнее течение	0,9	9,7	0,4	6,6

Очевидно, с этим связано не только относительно небольшая интенсивность поперечных смещений русел горных рек, на что указывал Н.И. Маккавеев с соавторами [Экспериментальная геоморфология, 1969], но и вообще преобладание на полугорных и горных реках (при их меандрировании) пологих сегментных излучин, смещающихся почти исключительно вниз по долине.

Искривление излучин русла способствует тому, что перемещающиеся по участку русла гряды, в том числе побочни, в зонах замедления течения задерживаются и увеличиваются в размерах, а в зонах ускорения течения смещаются быстрее и частично размываются [Чалов, 1963]. Это способствует активизации поперечного смещения излучин, т.к. продвижение побочни на выпуклый берег вызывает стеснение потока и местное увеличение его скорости. Например, на нижней Вычегде скорости размыва берегов при поперечном смещении излучин в среднем равны 12 м/год; в вершинах излучин при продвижении побочней на отмели у выпуклых берегов они периодически возрастают до 25-30 м/год. При этом фронт размыва распространяется на всю привершинную часть излучины, захватывая частично ее верхнее крыло. В результате скорости продольного и поперечного смещения выравниваются, а при трансформации излучины в крутую скорости поперечного смещения становятся больше продольных (табл. 5).

Таблица 5. Скорости смещения излучин р. Вычегды
в сужениях и расширениях дна долины

Характер дна долины	Форма излучины	Скорость смещения, м/год	
		Продольное	Поперечное
Сужение	Пологая	20-40	---
Расширение	Пологая	15-20	8-10
	Крутая	10-20	25-40

Последнее приводит к тому, что у крутых излучин начинает преобладать поперечное смещение (рис. 40), что, в свою очередь, сопровождается дальнейшим их искривлением. Характер изменения соотношения темпов продольного и поперечного смещения излучин в процессе развития можно продемонстрировать графиком связи их скоростей с радиусами кривизны (рис. 41): чем меньше радиус кривизны русла на излучине, тем меньше скорость продольного и больше скорость поперечного смещения. Например, на верхней Оби поперечное смещение крутых излучин возрастает в несколько раз по сравнению с пологими, достигая 20-50 м/год (против 7-15 м/год). Повидимому, с этим связаны большие скорости поперечного смещения излучин р. Иордана (табл. 4) в среднем течении по сравнению с продольным и таковыми же в нижнем течении: по длине рек увеличение водности обычно приводит к смене крутых излучин более пологими [Завадский и др., 1997].

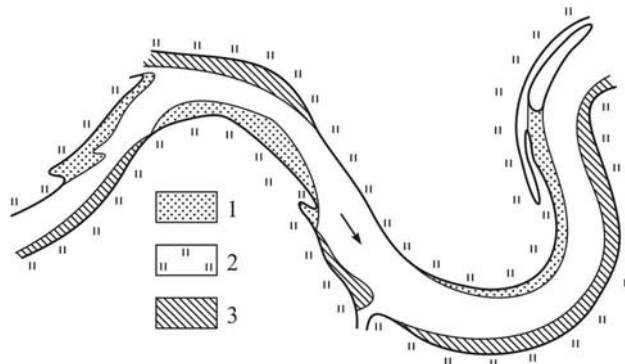


Рис. 40. Поперечное смещение крутой сегментной излучины р. Вычегды: 1 – приустьевые отмели; 2 – пойма; 3 – разрыв (отступление) берега за 1910-1994 гг.

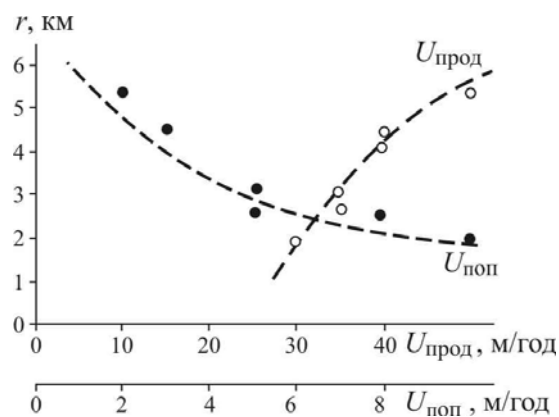


Рис. 41. Зависимость скорости продольного $U_{\text{пр}}$ и поперечного $U_{\text{поп}}$ смещения излучин р. Вилуя от радиусов их кривизны [Белый, Борсук и др., 1983].

К близкому эффекту приводит относительное сужение поймы (дна долины). В расширениях, где удельные руслоформирующие расходы воды уменьшаются вследствие распластывания потока половодья по пойме, скорость продольного смещения излучин существенно меньше, чем в сужениях, где удельные руслоформирующие расходы растут и где этот вид смещения является абсолютно преобладающим.

Следствием поперечного смещения и искривления излучины является ее удлинение, изменение параметров (радиуса кривизны, шага), увеличения степени развитости l/L (табл. 6), а также трансформация самой формы излучины и ее спрямление (рис. 42).

Таблица 6. Изменение параметров свободных излучин р. Вычегды
(по Б.В. Белому, В.В. Иванову и др., 2001)

Расстояние от устья, км	Название излучины	Годы	Радиус кривизны r , км	Степень развитости l/L
210-204	Яренская	1910	1,5	1,76
		1953 ¹⁾	1,2	2,04
186-182	Харловская	1910	1,5	1,42
		1994	1,4	1,57
182-178	Кулигская	1910	1,5	1,63
		1994	1,25	1,71
158-154	Ошлапьевская	1910	1,5	1,5
		1994	1,4	1,43
154-149	Верх. Княжинская	1910	1,25	1,48
		1994	1,0	2,05
149-146	Ниж. Княжинская	1910	3,5	1,44
		1994	1,1	2,07

¹⁾ в середине 50-х годов излучина спрямилась.

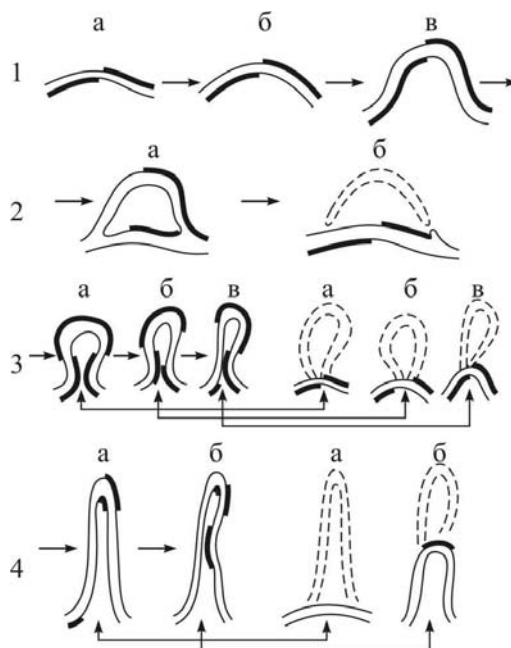


Рис. 42. Схема эволюции формы свободных излучин в процессе их продольного и поперечного смещения и изменение положения зон размыва берегов: 1 – смещение сегментных излучин; 2-4 – пути возможной трансформации крутых излучин (2 – прорывная; 3 – петлеобразная (омеговидная); 4 – синусоидальная (пальцеобразная). Стрелками показаны пути эволюции, утолщенными линиями – зоны размыва берегов; а, б, в – стадии развития излучин разной формы.

Активизация размывов берегов при искривлении (увеличении степени развитости) излуины в известной мере оказывается в противоречии с другими явлениями, которые при этом имеют место. Так, Н.И. Маккавеев [1965], основываясь на лабораторных данных, а также на результатах натурных исследований, получил степенную (квадратичную) связь между средней скоростью смещения излуин U (неразделенной на составляющие) и уклоном I :

$$U = kI^2, \quad (3.2)$$

где k – коэффициент, зависящий от устойчивости русла. По мере искривления русла и увеличения длины излуины уклон закономерно уменьшается и обратно пропорционально связан со степенью развитости: $I=f(l/L)^{-1}$. Скорость смещения излуин уже при величине степени развитости около $l/L=1,40$, исходя из зависимости Н.И. Маккавеева (3.2), должна уменьшиться в два раза (т.е. на 50%) по сравнению с первичным изгибом русла. Такой же вывод вытекает из анализа потерь энергии потока (суммарного напора) в ходе развития излуины и трансформации ее из пологой в крутую. Н.И. Маккавеев [1955] потери напора на излуине определяет по формуле А.Я. Миловича

$$I = \frac{0,0256V^2 h_p}{r} \quad (3.3)$$

(здесь h_p – средняя глубина русла) и модифицированной формуле Ж. Буссинеска

$$I = \frac{V^2}{RC^2} \left(1 + 0,75 \sqrt{\frac{B_p}{r}} \right) \quad (3.4)$$

(R – гидравлический радиус, C – коэффициент Шези), которая показывает, что уменьшение радиуса кривизны приводит к росту потерь энергии потока; сравнение же формул (3.3) и (3.4) обнаруживает неоднозначное влияние глубины русла на потери напора. Из формулы (3.3) также вытекает, что если на излуине возникают водоворотные зоны, связанные с нарушением безотрывного обтекания потоком берегов ($r/B < 3$), потери напора заметно возрастают.

В реальных условиях развитие излуин до определенных пределов сопровождается активизацией русловых деформаций и увеличением скоростей смещения. Этот факт обусловлен тем, что рост потерь напора компенсируется, по Н.И. Маккавееву [1955], ростом кинетической энергии (живой силы) потока на излуине как следствие увеличения неравномерности скоростного поля потока, роста скорости у выпуклого берега и снижения у вогнутого в вершине излуины. На пологих сегментных излуинах этот рост

существенно превышает потери напора, т.к. живая сила потока пропорциональна кубу скорости [Милович, 1914; Маккавеев, 1955]:

$$F = \frac{\gamma Q V^3}{2g} \quad (3.5)$$

(γ – объемный вес воды), тогда как потери напора, в соответствии с (3.3) и (3.4) – квадрату скорости. Это обеспечивает рост эрозионной и транспортирующей способности потока, способствуя активизации русловых деформаций и размывам берегов на излучинах русла по мере их искривления.

Вместе с тем, согласно исследованиям А.Я. Миловича [1914], повышение кинетической энергии потока на излучине по отношению к прямолинейному руслу при прочих равных условиях может быть лишь двукратным. Н.И. Маккавеев [1955: Проектирование судовых ходов ..., 1964] установил, что предельное соотношение длины русла на излучине l и шага излучины L (т.е. степени развитости), при достижении которого утрачивается гидравлическая выгодность извилистой формы русла, приближенно устанавливается по формулам:

$$\left(\frac{L}{l}\right)^{1,5} = \frac{1}{2}, l = 1,575L. \quad (3.6)$$

Близкое к приведенным выше соотношение $l/L=1,60$ было получено для показателей средней извилистости свободномандрирующих русел [Попов, 1965] и средней степени развитости спрямляющихся излучин [Лысенко, 1977]. Затухание русловых деформаций при превышении этой величины было получено И.В. Поповым [1965] при анализе зависимости скорости разворота свободных излучин $\Delta\lambda/t$, где t – время, от степени их развитости (рис. 43).

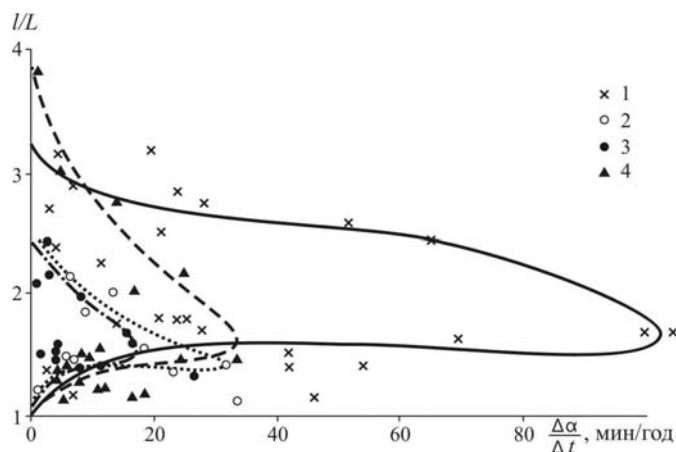


Рис. 43. Связь скорости развития свободных излучин со степенью их развитости [Попов, 1965]: 1 – р. Иртыш (г. Павлодар – с. Урлютюб); 2 – р. Ока (г. Рязань – устье р. Прони); 3 – р. Ока (устье р. Прони – с. Юшта); 4 – р. Ока (с. Юшта – с. Рубецкое).

Выражения (3.6) были получены по лабораторным данным для идеальной жидкости. В реальных условиях, по данным натурных исследований на конкретных реках [Казанцев, 1947; Печкуров, 1950; Маккавеев, 1955], приращение кинетической энергии потока за счет формирования определенного поля скоростей течения на изгибе изменяется от 50% до 80%. Если принять среднюю величину приращения 65%, то, используя математические выкладки Н.И. Маккавеева, можно придти к выражению:

$$(L/l)^{1,5}=1/1,65 \text{ или } l=1,40L, \quad (3.7)$$

т.е. к критическому значению степени развитости, равному 1,40. Таким образом, при величине $l/L=1,40$, завершается период развития извилистой формы русла, энергетически выгодной для потока; соответственно, переход формы излучины через эту величину означает возможное спрямление излучины или, если оно не происходит, начало снижения интенсивных русловых деформаций на излучине. При превышении этого значения и продолжающемся искривлении излучины (и ее удлинении) дальнейшее увеличение неравномерности поля скорости оказывается незначительным или прекращается, тогда как, в соответствии с формулами (3.3) и (3.4), уменьшение радиуса кривизны обеспечивает рост потерь напора. Поскольку при этом увеличиваются глубина русла (3.3) и возможно нарушение безотрывного обтекания потоком берегов, эти потери оказываются большими, чем выигрыш в живой силе потока.

Значение $l=1,40L$ выделяется рядом исследователей также как величина, соответствующая началу перестройки структуры русла на излучине. По мнению В.А. Виноградова [1973], оно является граничным при разделении на излучины, рельеф дна русла у которых состоит из одного «морфологического комплекса», т.е. представлен одной плесовой ложниной, расположенной в ее вершине, и перекатов в местах изменения знака кривизны излучины, и излучины с несколькими «морфологическими комплексами», т.е. с двумя и более плесовыми ложнинами и перекатами между ними. Выделяемые им группы излучин, различаются по характеру распределения глубины и ширины русла по длине, особенностям гидродинамической структуры потока, скорости и направленности смещения.

По мере поперечного развития сегментных излучин и приближения степени их развитости к критическому значению ($l/L=1,40$) фронт размыва вогнутого берега распространяется на всю привершинную часть излучин, захватывая их верхние крылья. Помимо влияния периодически надвигающихся на выпуклый берег побочней, стесняющих поток, этому способствует усиление циркуляционных течений. Наибольший перекоп водной поверхности наблюдается в вершине излучины. Соответственно, в прилегающей к ней части русла со стороны верхнего крыла поперечная циркуляция способствует, с одной стороны, отвлечению от вогнутого берега поступающих к нему транзитных наносов, количество которых в нижней части зоны замедления течения невелико, возникновению их дефицита и, как следствие, раз-

мыву самого вогнутого берега. С другой стороны, благодаря поперечной циркуляции увеличивается поступление наносов к выпуклому берегу. Это явление (смещение фронта размыва на выпуклый берег выше вершины излучины) уже само по себе способствует трансформации сегментной формы излучины в петлеобразную. Однако оно, как правило, совпадает с потерей гидравлической выгоды извилистой формы русла и постепенным затуханием русловых деформаций. В результате время развития излучин – от момента зарождения до превращения в крутую сегментную в 2-3 раза короче, чем превращение сегментной излучины в петлеобразную и ее спрямление за счет сближения крыльев.

Таким образом, при превышении критической величины степени развитости свободные излучины либо спрямляются за счет формирования пойменного протока через их шпоры (рис. 42-2), либо трансформируются в излучины петлеобразной (рис. 42-3) или синусоидальной формы (рис. 42-4) с последующим затуханием деформаций. Спрявление излучин сопровождается активизацией русловых деформаций. Так, средние темпы смещения свободных излучин в нижнем течении р. Сеяхи (полуостров Ямал) составляют 0,5-0,7 м/год, в то время как на участках недавних (40-50 лет) спрямлений вновь сформировавшиеся излучины русла смещаются со скоростями, которые в 5 раз превышают средние, а на участках спрямлений, произошедших 200-250 лет назад – в 3-4 раза. При трансформации излучины в петлеобразную при преимущественно поперечном ее смещении фронт размыва охватывает практически весь вогнутый берег, включая верхнее крыло. Одновременно, вследствие искривления русла в привершинной части, начинается размыв того же выпуклого берега со стороны нижнего крыла излучины и выпуклого берега в начале верхнего крыла смежной нижерасположенной излучины, куда поток направляется формирующейся выбоиной в линии вогнутого берега в привершинной части излучины. Такое распространение фронта размыва берегов на крутой сегментной излучине хорошо видно на рис. 40. В конечном итоге это приводит к образованию петлеобразной излучины, продольное смещение которой может быть трансгрессивным (верхнее крыло) и регрессивным (нижнее крыло), а для всей излучины характерно поперечно-продольное смещение (рис. 44А).

Вследствие встречного размыва берегов на крыльях излучин, сегментная излучина фактически распадается на три излучины, из которых центральная наследует привершинную часть исходной сегментной, а две другие развиваются на ее крыльях. Благодаря им происходит сближение участков одного и того же берега реки на крыльях исходной излучины; встречный размыв образующегося в шпоре излучины перешейка приводит к спрямлению русла и образованию на месте излучины староречья. Такое развитие омеговидной (петлеобразной) излучины И.В. Попов [Кондратьев, Ляпин и др., 1959] назвал (до момента спрямления) разворотом излучины, поскольку сопряжение вновь сформировавшихся излучин на крыльях исходной, наследующих ее привершинную часть, благодаря направляющему воз-

действию на поток вогнутых берегов происходит в точках перегиба, относительно устойчивых в плане (рис. 44Б). И.В. Попов эти места (точки) назвал узлами вращения. Благодаря им по рельефу пойм меандрирующих рек, используя аэро- или космические снимки, можно восстановить различные положения русла в процессе развития излучин за время формирования поймы. Методика такого восстановления была разработана И.В. Поповым [Кондратьев, Ляпин и др., 1959], но он распространил ее и на сегментные излучины, у которых места (точки) перегиба между смежными формами постоянно меняют свое положение при продольном смещении излучин. Поэтому предложенная И.В. Поповым методика исследования динамики излучин русла может применяться только для анализа петлеобразных излучин. Характерно, что в более поздних работах [Барышников, Попов, 1988] разворот излучины вокруг точки перегиба И.В. Попов также ограничивает переходом от сегментной формы к петлеобразной (S-образной, по И.В. Попову).

Развитие излучин от сегментной до петлеобразной и ее спрямления может быть проиллюстрировано на примере участка р. Янцзы в пределах равнины Лянху (рис. 45). В середине XVII века здесь были две пологие сегментные излучины и одна (нижняя) крутая. В первой половине XIX века (через 175 лет) первые две представляли собой уже крутые сегментные излучины, вершины которых сместились у первой на 2 км, у второй – на 3 км. Третья излучина спрямилась, и на ее месте образовалась новая, к этому времени также крутая сегментная излучина. В последующий период, вплоть до начала XX века, все излучины заметно искривились, причем смещения русла составили 2,5-3,5 км (при его ширине 0,6-0,8 км). Средняя скорость смещения (и, соответственно, размыва берегов) равнялась 20 м/год, достигая в отдельные периоды 30-40 м/год. В первую половину XX века произошла полная перестройка излучин, и уже план 1958 г фиксирует новую их систему [Чалов и др., 2000].

Рассмотренная схема эволюции свободных излучин широко известна: она обычно приводится в учебной литературе не только по теории русловых процессов, но и по гидрологии, геоморфологии и др. Иногда ей придается универсальное значение, причем только за петлеобразными излучинами сохранился термин «свободные», тогда как другим формам меандрирования даются особые определения [Попов, 1965; Кондратьев и др., 1982]: например, незавершенное (аналог прорванных излучин), ограниченное (аналог сегментных излучин с продольным перемещением).

Н.Е. Кондратьев [1982] процесс образования петлеобразных излучин объясняет на основе принципа отражения потока на повороте. Очевидно, в этом случае возникновение извилистости объяснимо лишь на коротком отрезке ниже вершины излучины. Другое, более общее объяснение связано с предположением, что формирование излучин начинается вследствие огибания меженным потоком побочня и размыва при этом противоположного берега реки.

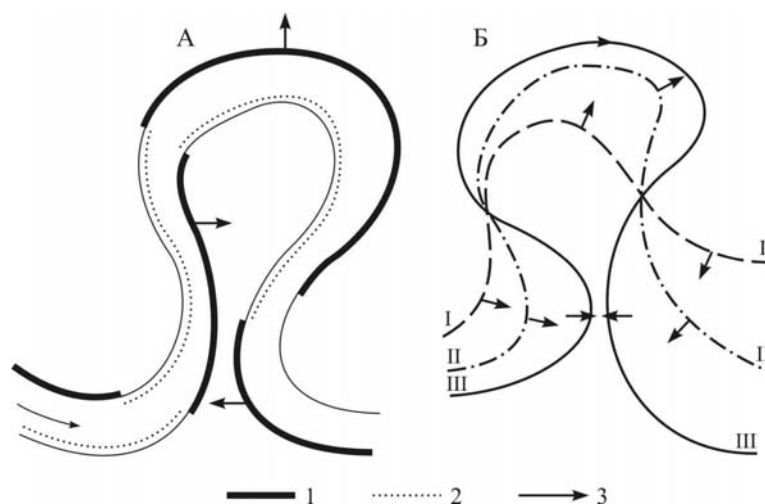


Рис. 44. Расположение фронта размыва и зон аккумуляции наносов (А) и схема продольно-поперечного смещения (разворота) (по И.В. Попову [Кондратьев, Ляпин и др., 1959]) петлеобразной излучины (Б): 1 – фронт размыва; 2 – зоны аккумуляции наносов; 3 – направления смещения излучины.

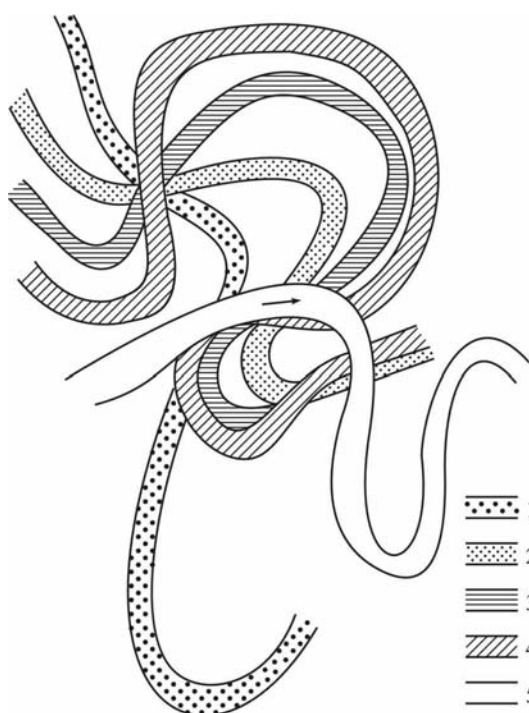


Рис. 45. Переформирования петлеобразных излучин р. Янцзы в районе г. Цэбахоу (равнина Лянху). Конфигурация русла: 1 – в 1644 г.; 2 – в 1820 г.; 3 – в 1875 г.; 4 – в 1907 г.; 5 – в 1958 г.

В этом случае в момент зарождения излучина своими параметрами наследует размеры такой структуры рельефа русла, как система «перекат-плес-перекат» с плесовой ложбиной напротив центрального побочня (рис. 46А). При этом происходит размыв берега, возле которого находится плесовая ложбина, и он приобретает вогнутые очертания. Размеры данной системы зависят от характеристик меженного потока (руслоформирующих расходов воды большой обеспеченности), в то время, как развивающаяся излучина постепенно перестраивается в соответствии с руслоформирующим расходом воды, проходящим в многоводную фазу режима. В итоге при дальнейшем росте длины русла в пределах излучины величина ее шага может превышать шаг переката, характерного для данного участка реки, в несколько раз (рис. 46Б). В таком случае возможно формирование новых плесовых ложбин в пределах крыльев [Шанцер, 1951; Кондитерова, Попов, 1969; Keller, 1972; Levin, 1976; Чалов, Алабян и др., 1998]. На излучине вместо «одноплесовой» (с плесом в вершине) формируется «многоплесовая» структура рельефа русла. На месте вновь сформировавшихся плесовых ложбин начинают развиваться вторичные изгибы, развитие которых в дальнейшем может привести к трансформации формы всей излучины в петлеобразную (омеговидную).

Концепция динамической устойчивости извилистой формы русла как следствия максимального увеличения на изгибе кинетической энергии потока, его живой силы, эрозионной и транспортирующей способности, приводит к гидродинамической гипотезе о причинах трансформации сегментной формы излучин в петлеобразную. При достижении критического значения степени развитости излучины выигрыш в живой силе потока утрачивается, и деформации русла затухают. Однако поскольку «поток-русло» представляет собой саморегулирующуюся систему, поток, обеспечивая сохранение кинетической энергии, начинает образовывать дополнительные изгибы, восстанавливая неравномерность скоростного поля потока. Этому, по-видимому, благоприятствует то, что в условиях затухающих деформаций и снижения транспортирующей способности потока на прямолинейной «вставке» между смежными излучинами формируется перека́т, огибая побочни которого поток делает новый изгиб.

Эта гипотеза объясняет также то обстоятельство, что по мере развития петлеобразной излучины вновь активизируются деформации русел, причем скорости размыва берегов могут быть больше, чем при продольном смещении сегментных излучин. Активизация деформаций связана, главным образом, с развитием вторичных излучин на крыльях петлеобразной. На Оке это происходит, когда излучины достигают степени развитости $l/L=3,0-3,5$. На нижней Вычегде скорость изменения параметров излучин в 2-3 раза выше, а повторная активизация русловых деформаций после достижения излучинами петлеобразной формы происходит при величине $l/L \approx 2,0$. Очевидно, эти различия связаны с меньшей устойчивостью русла Вычегды.



А



Б

Рис. 46. Соответствие параметров сегментных излучин размерам системы «плес-перекат-плес»: А – побочень и размываемый берег р. Вычегды; Б – пологая сегментная излучина р. Ануя (приток верхней Оби).
Фото Р.С. Чалова.

Вероятность активизации деформации русла при трансформации формы излучины в петлеобразную нашла отражение в формуле

В.И. Замышляева [1983] для расчета максимальной скорости поперечного смещения излучин U_{non} :

$$\frac{L}{EV^2} \cdot U_{non} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\lambda^0}{\exp[(\alpha/4)^2]}, \quad (3.8.)$$

в которой она прямо зависит от угла разворота α^0 , который достигает наибольших значений у излучин петлеобразной формы (здесь – E – коэффициент пропорциональности в размерности времени).

Повторная активизация русловых деформаций в процессе эволюции свойственна только излучинам, которые при этом становятся петлеобразными. Она не происходит у синусоидальных и пальцеобразных излучин, которые описаны в основном для рек, поймы которых сложены тяжелыми глинистыми грунтами (реки низкого Заволжья [Шанцер, 1951], Днестр [Беркович, Злотина и др., 1992]), имеют сильную залесенность (малые реки бассейна Оби) или заболоченную пойму (Неман, Северский Донец [Завадский, 2001]). Американские и канадские исследователи [Shen et al., 1979; Nanson, 1980] выделяют эти излучины в качестве особого подтипа меандрирующих русел. Скорости их смещения незначительны (до 1 м/год) и часто находятся в пределах точности измерений.

Синусоидальные (пальцеобразные) излучины представляют один из вариантов эволюции излучин (рис. 42-4). Исследование подобных излучин на Днестре [Матвеев, 1988; Беркович, Злотина и др., 1992] выявило специфический механизм их развития, в соответствии с которым, достаточные для эффективного размыва глинистых грунтов, слагающих дно и берега реки, скорости достигаются лишь непосредственно в вершине излучины. Сопоставление вычисленных максимальных придонных скоростей течения при прохождении руслоформирующих расходах воды Q_ϕ на прямолинейных участках (0,15-0,36 м/с) с размывающими V_p для глинистых грунтов (0,33-0,43 м/с) свидетельствуют о том, что скорости течения в прямолинейном русле, как правило, недостаточны для размыва грунтов дна и берегов. В то же время в вершинах излучин увеличение максимальных скоростей течения по отношению к средней (по живому сечению) составляет более чем 20% [Розовский, 1957], что приводит к превышению ими размывающих скоростей. В результате излучины смещаются почти исключительно в поперечном направлении очень медленно (скорости размыва берегов 1-1,5 м/год) с образованием между вершинами смежных излучин сравнительно протяженных прямолинейных вставок с относительно стабильными берегами. С другой стороны, ограничение фронта размыва коротким отрезком вогнутого берега в вершине излучины при стабильности ее 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 $r=3B$. Возле вогнутого берега возникает водоворотная зона, в которой происходит отложе-

ние наносов (рис. 26); размыв его прекращается, а динамическая ось потока смещается к выпуклому берегу в вершине излучины, который частично размывается (по наблюдениям Н.А. Ярных [1978] на Иртыше скорость размыва выпуклого берега достигает 3 м/год), но в целом происходит консервация излучины и общая стабилизация планового положения русла. При этом степень развитости может достигать величин $l/L=5,0-6,0$. Наличие водоворотной зоны у вогнутого берега и размыв выпуклого обуславливает общее расширение русла в вершине синусоидальных (пальцеобразных) излучин, в пределах которых в разные фазы водного режима блуждает динамическая ось потока [Маккавеев, 1955; Грачев, 1985]. А.Ю. Сидорчук [1992] излучины с $r < 2B$ по своей морфологии и динамике характеризует как неустойчивые, отмечая, что динамическая ось потока на них периодически смещается от выпуклого берега к вогнутому.

Таким образом, скорости и формы смещения излучин зависят от степени их развитости l/L , уклона, состава грунтов, слагающих дно и берега рек и, соответственно, от устойчивости русел, а также от водности реки, высоты берегов, их залесенности и других факторов. Абсолютные значения скорости продольного и поперечного смещения определяются по формуле Н.И. Маккавеева [Маккавеев, Чалов, 1986]

$$U = A \left(\frac{V - V_{кр}}{V_{кр}} \right)^n \frac{Q_f I}{H_6^m}, \quad (3.9)$$

где $V_{кр}$ – критическая скорость, при которой начинается размыв грунта, слагающего берег, м/с; V – фактическая скорость при руслоформирующем расходе Q_f ; H_6 – высота пойменных берегов, м; показатель степени $m = 3$, $n = 2$, исходя из условий размерности; A – эмпирический коэффициент, имеющий разные значения на конкретных реках.

Наблюдения на нижнем Вилуе [Белый, Борсук и др., 1983] показали, что средняя скорость размыва берегов на свободных излучинах при снижении устойчивости русла (коэффициента стабильности Н.И. Маккавеева K_c от 8,0 до 2,4) увеличивается с 7-10 до 20, а в отдельных случаях – до 35 м/год.

И.В. Попов [Кондратьев и др., 1982], оценивая связь размеров рек с размывами берегов на излучинах, используя в качестве показателя первых ширину русел в меженных бровках (рис. 47), получил, что до ширины русел 400 м скорости смещения вогнутых берегов нарастают медленно от минимальных значений до 19 м/год, после чего увеличиваются, составляя при ширине русла 600 м – 32 м/год, 800 м – 50 м/год. Это определяет закономерное увеличение абсолютных значений интенсивности смещения излучин и размывов берегов в их пределах вниз по течению рек.

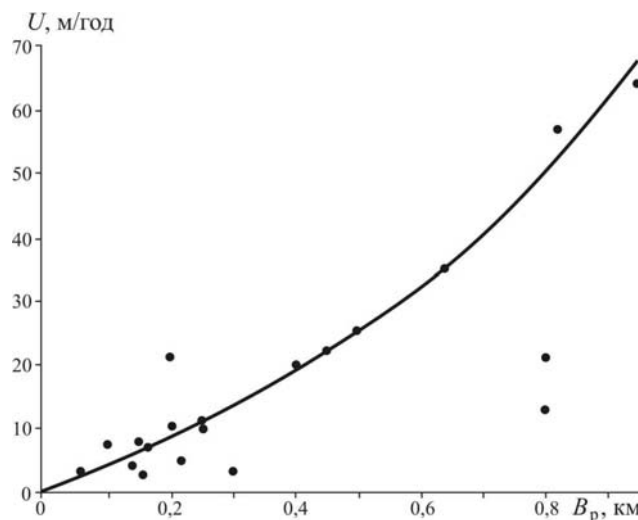


Рис. 47. Связь скорости смещения вогнутых берегов излучин U м/год с шириной русла B_p км (по И.В. Попову [Кондратьев и др., 1992]).

3.2. Стадии развития и условия спрямления излучин



Эволюция излучин от их зарождения до спрямления заключается в постоянном изменении их форм и направления (относительно оси пояса меандрирования) смещения, что, в свою очередь, определяется совокупностью гидродинамических явлений и их трансформацией по мере увеличения кривизны русла. По существу в классификациях излучин (вне зависимости от заложенных в них принципов), каждый выделенный вид представляет собой определенный этап в эволюции излучин, характеризующийся своей формой, преобладающим направлением смещения, темпами размыва и намыва берегов [Никитина, Чалов, 1998].

Общая схема развития свободных излучин уже давно стала общепризнанной, однако, она в целом, как и выделение в ней определенных стадий, носит качественный характер. Во-первых, отсутствуют критерии, по которым каждую конкретную излучину можно отнести к тому или иному виду. При этом названия видов излучин и их разновидностей основаны на схожести плановых очертаний с геометрическими, хотя каждому из них соответствует вполне определенный механизм смещения, рельеф русла и т.д. Во-вторых, не ясны граничные условия, определяющие переход от одной стадии развития излучины к следующей, от одной формы к другой. Попытки обоснования критериев таких переходов в литературе встречаются очень редко. Н.И. Маккавеев [1955; 1971] принимал равенство стрелы прогиба h и радиуса кривизны r излучины как критерий для отнесения излучин

к пологой или крутой; им же обоснован критерий $l=1,58L$ как условие для образования прорванной излучины или трансформации сегментной в излучину более сложной формы, в частности, петлеобразную. Заслуживают внимания исследования С.И. Пиньковского [1954], по мнению которого, при значении степени развитости $l/L \approx 2,0$ происходит переход формы излучины от «извилины» (сегментной излучины) к «петле» (омеговидной излучине). Действительно, после достижения излучиной степени развитости, близкой к 2,0, ее очертания перестают напоминать «сегмент», и дальнейшая эволюция формы зависит в частности от сложившегося соотношения других морфометрических параметров. Эта смена формы излучины объясняется, с точки зрения русловых процессов, тем, что при такой степени развитости длина излучины становится больше шага переката, формируется многопесочная структура руслового рельефа и возможна активизация вторичных изгибов на крыльях. Поэтому критерий $l/L=2,0$ представляется вполне правомерным.

Результаты анализа форм свободных излучин и особенностей их развития сведены в классификацию свободных излучин, основанную на соотношениях морфометрических параметров (рис. 48), характеризующих излучины каждого типа.

При таком построении классификация основывается на схеме эволюции излучин и стадийности их развития, вследствие чего они представляют собой единую разветвляющуюся сеть возможных изменений форм русла от момента зарождения излучины до ее спрямления и отмирания.

В классификации в виде блоков показаны основные разновидности свободных излучин с характерными для каждого типа соотношениями

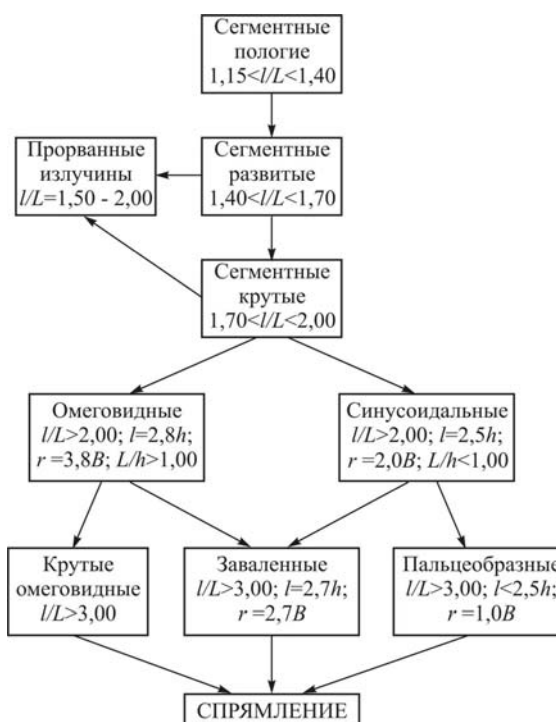


Рис. 48. Классификация свободных излучин по стадиям их развития и соответствующие им соотношения морфометрических параметров.

морфометрических параметров. Стрелками отмечено общее направление развития излучины, возможные пути трансформации ее формы и последующее завершение эволюции излучины как русловой формы.

Развитие излучины сегментной формы имеет несколько этапов (стадий), различающихся по интенсивности и направленности трансформации плановых очертаний самой излучины, а также по степени гидравлической выгоды извилистой формы русла. Наиболее четко выделяются три стадии развития сегментной излучины: «сегментная пологая», «сегментная развитая» и «сегментная крутая». Границы перехода от одной стадии к другой можно определять, исходя из морфометрических характеристик с учетом гидравлических особенностей потока и используя показатель степени развитости излучин l/L . Значения l/L , при которых развиваются сегментные излучины, находятся в интервале от 1,10-1,15 до 2,00 (как было предложено С.И. Пиньковским [1954]). Разделив его на 3 равных части, получаем интервалы l/L от 1,10 до 1,40, от 1,40 до 1,70, от 1,70 до 2,00, в пределах каждого из которых излучины отличаются интенсивностью и направленностью трансформации своих очертаний, кинематической структурой потока и его гидравлическими характеристиками. По этим признакам: на стадии сегментной пологой ($1,10-1,15 < l/L < 1,40$) преобладает продольное смещение с размывом выпуклых берегов в верхних крыльях и вогнутых – в нижних (рис. 42-1а); на стадии сегментной развитой ($1,40 < l/L < 1,70$) – происходит замедление продольного и усиление поперечного смещения, размывы распространяются на вогнутые берега в привершинной части (рис. 42-1б); на стадии сегментной крутой ($1,70 < l/L < 2,00$) начинает преобладать поперечное смещение излучины над продольным, скорости размыва берегов снижаются (рис. 42-1в). На стадиях сегментной развитой и сегментной крутой излучин возможно образование спрямляющего протока через ее шпору и формирование прорванной излучины (рис. 42-2), т.к. уже при $l/L > 1,40$ утрачивается, как было показано выше, гидравлическая выгода извилистой формы русла. Спрявление излучин на этой стадии может происходить несколькими способами (рис. 49). В условиях, когда нет гидрологических предпосылок для спрямления излучины через ее шпору (руслоформирующий расход воды проходит при затопленной форме), речной поток может уменьшать уже невыгодную для него в гидравлическом плане степень развитости путем отчленения от выпуклого берега побочня. Происходит это в том случае, если поток в вершине излучины обтекает большой стабильный побочень, расположенный у выпуклого берега (рис. 49, 50). Особенно типично это для рек со слабоустойчивым руслом. Подобным образом произошли спрямления излучин на Вычегде в районе сел Парчег, Римья, Сенгородок, Запань Яренга. Очень сильно распространен этот процесс на притоках средней Оби – Кети (290, 229, 225, 157, 139, 101 км), Вахе (362, 237, 192, 28 км), Агане (95 км). Подобная форма спрямления нередко наблюдаются уже на начальном этапе формирования сегментной развитой излучины, т.е. при значениях l/L , близких к 1,40.

На реках с разветвленно-извилистым руслом поток спрямляет излучины благодаря перемещению основного расхода воды из одного рукава в другой, проходящий среди островов, расположенных у выпуклого берега в вершине излучины, и имеющий меньшую степень развитости (кривизны) (рис. 49Б).

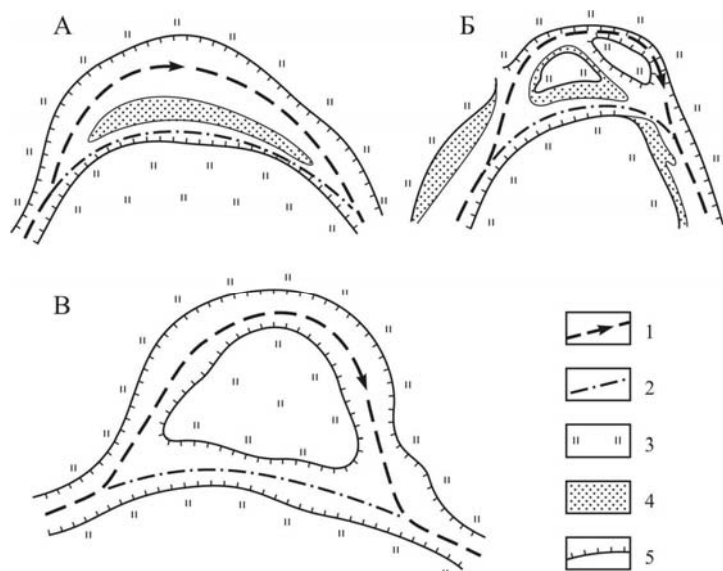


Рис. 49. Формы спрямления развитых и крутых сегментных излучин (А), излучин разветвлено-извилистого русла (Б) и образование прованных излучин (В). Положение динамической оси потока: 1 - первоначальное; 2 - при спрямлении излучины. 3 - пойма; 4 - прирусловые отмели; 5 - уступы поймы.



Рис. 50. Развитие спрямляющей протоки между выпуклым берегом и побочнем в вершине излучины (р. Чулым). Фото Р.С. Чалова.

Нередко они представляют собой закрепленную растительностью, отторженную от выпуклого берега часть побочня. Поэтому данный процесс может быть сходен в развитии с вышеописанным процессом отчленения побочня от выпуклого берега. На некоторых реках острова в вершинах или на крыльях излучин – явление довольно распространенное, что дало основание для выделения такого русла в классификации МГУ как разветвленно-извилистое. На р. Вахе, например, на излучины с крупными островами приходится 15% от общего числа излучин. При этом они, нередко, вытянуты вдоль всей привершинной части излучины, составляя изогнутую часть сегмента. Много излучин с островами на р. Агане и на других меандрирующих реках – притоках Оби. На Вычегде у с. Курчима, благодаря переходу основного русла в протоку между островом и выпуклым берегом, в период с 1931-1946 гг степень развитости уменьшилась с 1,75 до 1,62. На нижней Вычегде развитие рукавов среди островов, составляющих шпору излучин, было использовано в 70-е годы при регулировании русла для отвода потока от правого вогнутого берега, размыв которого в нижнем крыле (со скоростью 10-20 м/год) угрожал разрушению архитектурного памятника XV века – Благовещенского собора в г. Сольвычегодске (рис. 51). После спрямления излучины капитальной прорезью новый рукав стал искривляться (в 1984 г радиус его кривизны составлял 2,4 км, к 1995 г сократился до 1,7 км), образовалась новая излучина ($l/L=1,15$), правый вогнутый берег которой размывается со скоростью 10 м/год. Такие формы спрямления излучин распространены очень широко и встречаются на большинстве рек с песчаными руслообразующими наносами. При этом по мере снижения устойчивости русла отчленение побочней от выпуклого берега приобретает все более массовый характер. Прослеживается также тенденция увеличения частоты подобных спрямлений с ростом водности рек, ширины русла и, соответственно, уменьшением соотношения глубины и ширины (h_p/B_p). Это характерно для нижнего течения таких рек, как Вычегда, Вах, Аган, Чулым. Объясняется это, по-видимому тем, что при незначительной водоносности (малые реки) речной поток на изгибе русла имеет вид компактной струи с четко выраженным стрежнем. С увеличением водоносности соотношение h_p/B_p уменьшается, компактность потока (его квазиоднородность, по И.Ф. Карасеву [1975]) нарушается. Начинает проявляться блуждание динамической оси потока по ширине русла, либо его разделение на несколько обособленных ветвей течения. Благодаря этому при прохождении половодья, когда побочни перекатов находятся под водой, поток может сформировать в легкоразмываемых русловых отложениях протоку, отделяющую побочень от выпуклого берега. В дальнейшем, обладая гидравлически более выгодной формой, эта протока получает преимущественное развитие, а старое русло отмирает.

В интервале степени развитости l/L от 1,40 до 1,70 по мере снижения транспортирующей способности потока появляется вероятность формирования прорванных излучин (рис. 49В). В этом случае в шпоре излучины при ее затоплении разрабатывается спрямляющий рукав вдоль пониже-

ния тыловой части пойменного сегмента, заканчивающийся у вогнутого берега смежной нижерасположенной излучины. При этом само спрямление развитой сегментной излучины связывается с прохождением руслоформирующих расходов воды при затопленной пойме [Чалов, 1979].

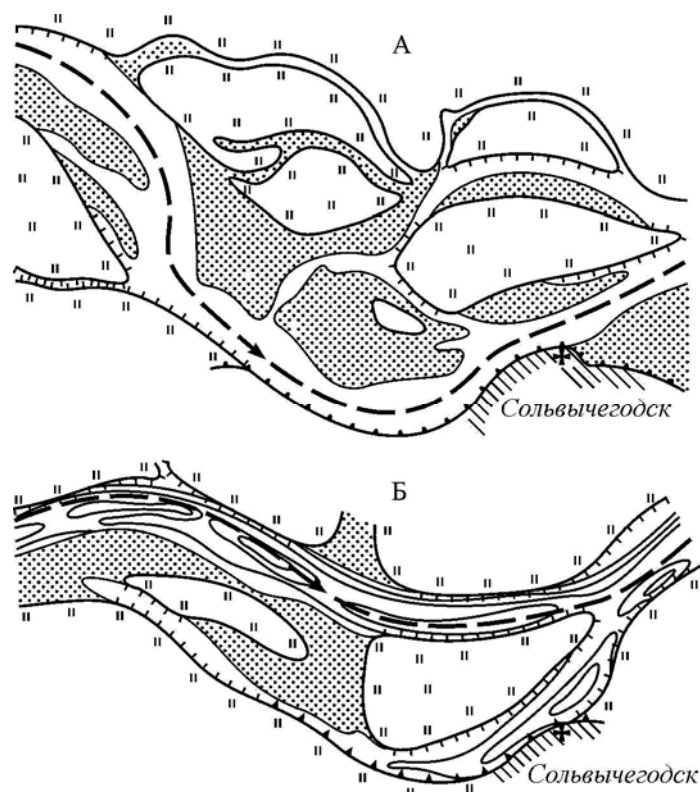


Рис. 51. Морфология Сольвычегодской излучины (разветвленно-извилистое русло) на р. Вычегде: А – до регулирования (1959 г); Б – после регулирования (1997 г).

Характерно, что формирование спрямления при благоприятных условиях происходит не при $l/L=1,40$, а на более поздних этапах развития излучины. Максимум вероятности спрямления таких излучин, как показывает опыт, приходится на значения степени развитости, близкие к $(l/L)_{кр}=1,575$. При этом значении l/L излучина приобретает форму «полукруга», имеющего диаметр, равный шагу излучины, а радиус, соответственно, равный его половине. Стрела прогиба h в этот момент равна радиусу кривизны r , а их соотношение $r/h=1,00$. Критическое значение $(l/L)_{кр}$ есть отношение длины излучины к диаметру окружности с радиусом, равным радиусу кривизны

излучины, т.е. $\pi/2=3,14/2=1,57$. Так как именно в интервале $l/L=1,40-1,70$ возможна трансформация сегментных излучин в прорванные, то именно излучины, расположенные в этом интервале l/L , соответствуют стадии сегментных развитых излучин. Критическое значение $(l/L)_{кр}$, полученное Н.И. Маккавеевым, должно занимать в нем центральное положение как максимум вероятности спрямления излучины, а не граничное, как предлагалось раньше (например, [Никитина, Чалов, 1998]).

Формирование прорванных излучин возможно при условии прохождения руслоформирующего расхода выше бровок поймы и при его достаточной обеспеченности. При этом «проран», в который со временем переходит новое русло, развивается в шпоре излучины, размывая пойменные отложения. Дальнейшая эволюция старого русла (бывшей излучины) может быть двоякой: либо оно образует заболоченное старичное озеро или заболоченную ложбину с нижним концом в виде залива (курьи), либо оба рукава длительное время сосуществуют одновременно, являясь уже компонентом пойменной многорукавности. Последний вариант характерен для рек, на которых руслоформирующие расходы воды верхнего интервала имеют высокую обеспеченность (Вычегда, Виллой, притоки средней Оби ниже устья Кети).

Спрямление излучин путем развития спрямляющей протоки через ее шпору требует гораздо большего времени и затрат энергии потока. Кроме необходимых гидрологических предпосылок, связанных с водным режимом реки и условиями прохождения руслоформирующих расходов воды, для образования прорванных излучин требуются благоприятные ландшафтные и литологические условия: слабая залесенность или луговой характер поймы, легкоразмываемый состав пойменного аллювия и т.д. Важно также, чтобы основной поток воды в половодье (транзитное пойменное течение) направлялся через шпору излучины, а не вдоль русла. Поэтому окончательное спрямление излучины, характеризующееся переходом основного расхода воды в спрямляющий рукав, происходит чаще уже на следующей стадии развития сегментной излучины – крутой сегментной в интервале степени развитости l/L от 1,70 до 2,00. Так, на нижней Вычегде, за последние 60 лет произошло спрямление трех излучин при средней степени развитости 1,98. На среднем Амуре подобное значение l/L составляет 1,79.

Таким образом, на стадии крутой сегментной излучина либо спрямляется, становясь составной частью пойменной многорукавности и завершая, таким образом, цикл развития русловой формы, либо продолжает свою эволюцию. В последнем случае интенсивность русловых деформаций существенно снижается по сравнению с двумя первыми этапами, а поперечная составляющая смещения начинает преобладать над продольной. Поэтому данная третья стадия развития сегментной излучины является переходной от сегментной формы к другим видам.

Если спрямления сегментной излучины не происходит, то дальнейшая эволюция заключается в трансформации ее в излучину более слож-

ной формы. Плановые очертания уже характеризуются не только соотношением l/L , но и других морфометрических параметров между собой (стрелы прогиба h , радиуса кривизны r , ширины русла B). В большинстве случаев излучины приобретают петлеобразную (омеговидную) или синусоидальную форму. Для первых характерно развитие на крыльях двух смежных вторичных излучин, благодаря которым происходит встречный размыв берегов и сужение шпоры излучины в ее основании. Синусоидальные излучины сильно вытянуты поперек оси пояса меандрирования, и их крылья имеют нередко вид прямолинейных «вставок», а критической формой их дальнейшей трансформации являются пальцеобразные излучины, у которых крылья расположены субпараллельно друг другу. Завершающим этапом развития омеговидных (петлеобразных) излучин является их спрямление путем размыва потоком перешейка шпоры во время прохождения руслоформирующих расходов воды за счет сближения крыльев и встречного размыва берегов перешейка между ними. Наиболее часто это наблюдается на малых реках при большой высоте или залесенности поймы (рис. 52А), тяжелом составе пойменной фации аллювия. На крупных реках чаще происходит образование спрямляющего протока между крыльями петлеобразной излучины (рис. 52Б), чему способствует большая разница уклонов по руслу и через перешейки во время затопления поймы. При этом размыв поймы сосредотачивается вдоль естественных понижений ее поверхности, либо благодаря образованию рытвин (промоин) в бровке поймы в месте слива воды из поймы в русло в нижнем крыле. Концентрируя в себе поток, рытвина развивается регрессивно (подобно оврагу) и в конце концов пререзает бровку со стороны верхнего крыла излучины.

Спрямление излучин за счет встречного размыва берегов происходит чаще всего на стадии крутой омеговидной излучины ($l/L > 3,50$). Среднее значение степени развитости l/L стариц (бывших русел) на меандрирующих реках бассейна верхней и средней Оби составляет около 4,50. После спрямления новое русло интенсивно развивается, приобретая параметры (ширину, глубину), соответствующие гидравлическим характеристикам основного потока. В течение нескольких лет основной расход воды полностью перераспределяется в пользу спрямляющего рукава. Старое русло может еще длительное время сохранять течение, «но обычно, довольно быстро отмирает, не только вследствие заполнения наносами, но и в результате энергичного врезания русла на участке прорыва, вызывающего «посадку» горизонта воды» [Маккавеев, 1955; с.284]. Через некоторое время в новом русле возможно восстановление русловых деформаций, свойственных данному участку реки, – оно снова начинает меандрировать. При этом направление развития формирующейся излучины может как совпадать, так и быть противоположным старому руслу [Гендельман, Попов, 1987].

Спрямление пальцеобразных излучин происходит на очень поздних стадиях развития во время прохождения экстремальных половодий. Спрямляющий поток может сформироваться в любом месте шпоры излучины, где

оказался нарушенным почвенно-дерновый покров на пойме. Иногда 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.

Таким образом, в ходе эволюции выделяются три стадии развития сегментных излучин, каждой из которых соответствует определенное значение степени развитости, форма смещения и интенсивность русловых деформаций. На стадиях сегментной развитой и сегментной крутой излучины возможно образование спрямляющего протока и формирование прорванной излучины. Если спрямления сегментной излучины и образования прорванной не происходит, то дальнейшая эволюция заключается в трансформации ее в омеговидную или синусоидальную излучину. Вид излучины на стадии сегментной излучины определяется по соотношению l/L . Для характеристики формы излучин, находящихся на более поздней стадии развития ($l/L > 2,00$), этого соотношения уже недостаточно. Поэтому для них нужна идентификация формы, основанная на анализе соотношений других морфометрических параметров. В частности, можно использовать соотношения стрелы прогиба к шагу: при $h/L < 1,00$ принимается, что излучина имеет омеговидную форму; при $h/L > 1,00$ – синусоидальную. Более достоверен анализ соотношения стрелы прогиба h и длины излучины по руслу l . Связи этих двух параметров (рис. 53) для синусоидальных излучин аппроксимируются уравнением $l = 2,5h$, для омеговидных – $l = 2,8h$.

Кроме того, омеговидные и синусоидальные излучины различаются по соотношению других параметров (табл. 7). Наиболее ярко это проявляется на самых поздних стадиях развития излучин. Например, для крутых синусоидальных (пальцеобразных), а также «треугольных» излучин, о которых будет сказано ниже, характерно очень малое соотношение радиуса кривизны r и ширины русла B в вершине излучины (r/B). Оно близко, в среднем, к 1,00 для первых и 1,40 – для вторых. Это соотношение также должно учитываться при анализе плановых очертаний излучин. Довольно часто омеговидные и синусоидальные излучины не достигают стадии крутых, либо трансформируются в другую форму, например, в «заваленную».

Это происходит, если интенсивность размыва берегов на крыльях оказывается неодинаковой или, по каким-либо причинам, на одном из них прекращается. И.В. Попов [Кондратьев и др., 1982] считает, что возникновение асимметрии как следствие смещения вершины излучины по отношению к ее геометрической оси является обязательным условием развития петлеобразной (омеговидной) излучины. Возможным объяснением этого может быть совпадение направленности воздействия неравномерности распределения скоростей на изгибе русла (поля скорости) и циркуляционных течений в нижнем крыле излучины и их разнонаправленности в верхнем крыле. Это обстоятельство, по-видимому, обуславливает сравнительно более высокие темпы размыва вогнутого берега ниже вершины излучины, что со временем приводит к ее смещению вниз по отношению к оси симметрии самой излучины.

А



Б

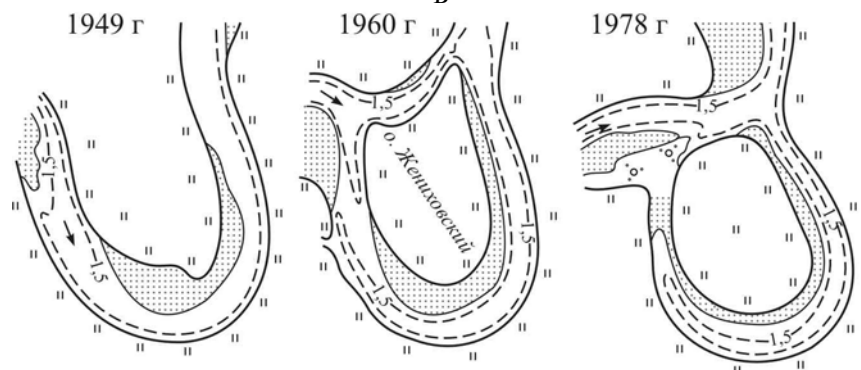


Рис. 52. Спряmlение петлеобразной излуины: А – в результате встречного размыва берегов на крыльях (р. Харампур, фото Е.Г. Ребьева); Б – путем образования промыва через перешеек между крыльями (Обь выше г. Барнаула).

Другими причинами могут быть особенности гидрологического режима в период прохождения половодья. Например, в магистральных рукавах дельты р. Яны образование заваленных излучин связывается с подпорными явлениями во время нагонов; при этом они особенно характерны для тех участков рукавов, куда нагоны распространяются наиболее регулярно.

но [Коротаев, Лодина и др., 1978]. Излучина в результате «заваливается» вверх или вниз по течению своей вершиной относительно геометрической оси.

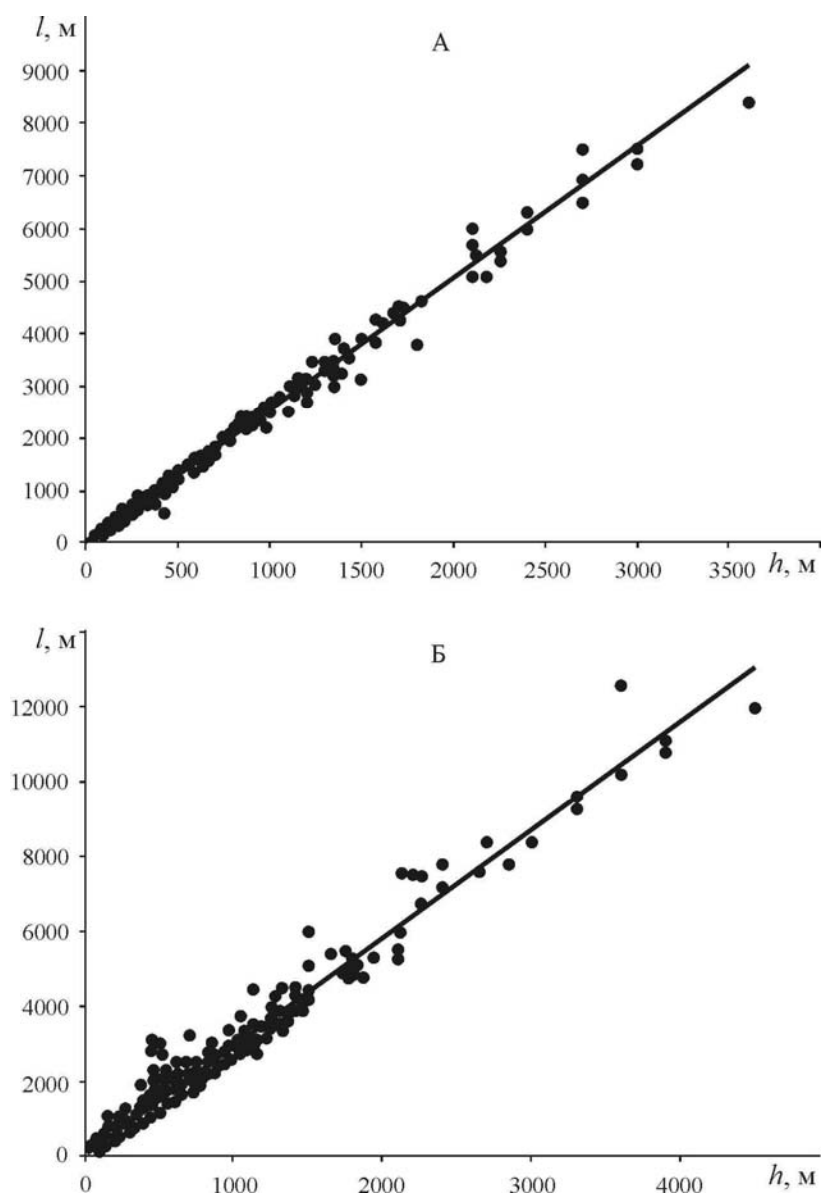


Рис. 53. Зависимость между длиной излучин l и стрелой прогиба h для синусоидальных (А) и омеговидных (Б) излучин.

Таблица 7. Средние значения коэффициентов в соотношениях морфометрических параметров для различных типов (стадий развития) свободных излучин (по данным 3500 излучин рек бассейна верхней и средней Оби)

Вид излучины	l/h	r/B	L/h	l/L
Омеговидные	2,8	3,8	$>1,0$	$>2,0$
Синусоидальные	2,5	2,0	$<1,0$	$>2,0$
Пальцеобразные	$<2,5$	1,0	$<1,0$	$>3,0$
Заваленные	2,7	2,0	1,0	$>3,0$
Треугольные	3,1	1,4	1,6	1,4-2,0

Заваленные излучины обычно хорошо определяются визуально. Тем не менее для их характеристики можно использовать два новых морфометрических параметра: h_{cp} – стрела прогиба, полученная путем построения перпендикуляра из середины отрезка, представляющего собой шаг излучины, до стрежня потока; h^* – стрела «завала», равная расстоянию от середины отрезка, представляющего собой шаг излучины, до вершины излучины (рис. 54). На излучинах с четко выраженным смещением вершины вверх или вниз по течению относительно оси симметрии, отношение h^*/h_{cp} превышает величину 1,30. Это значение рекомендуется использовать в качестве граничного для выделения заваленных излучин. Спрявление заваленных излучин происходит, подобно синусоидальным или пальцеобразным, путем формирования спрямляющей протоки в период прохождения половодья.

Иногда еще на стадии крутой сегментной на излучине начинают формироваться четко выраженная конусообразная вершина с повышенной шириной русла и радиусом кривизны, соизмеримым с шириной (рис. 55А). Такие излучины, обычно, имеют меньшие размеры по сравнению со смежными. Их предлагается называть «треугольными». Формирование треугольных излучин, как правило, не связано с гидравлическими особенностями потока и показателями водности реки и объясняется особенностями перестроения русла на конкретном участке или вмешательством внешних факторов. Например, нередко, они являются следствием спрямления излучин или целой их серии. Иногда треугольные излучины встречаются в местах впадения притоков или при подходе реки к коренному берегу с крупной овражно-балочной формой. Процесс «втягивания меандра в устье притока» отмечал еще Н.И. Маккавеев [1955].

Формы некоторых излучин трудно классифицировать в связи с их нестандартным видом. На их развитии сказывается влияние местных особенностей, в частности, специфическое строение размываемых пойменных отложений. Так, при неоднородном строении пойменного массива могут формироваться «П-образные» излучины с удлиненной привершинной ча-

стью (рис. 55Б). И.В. Попов [Кондратьев, Ляпин и др., 1959] считает, что такие излуины являются следствием объединения двух или нескольких излучин при их спрямлении. Вообще в процессе развития смежных, следующих друг за другом излучин переформирования и изменения конфигурации верхних оказывают существенное влияние на формы нижерасположенных, распространение в них зон размыва и аккумуляции, направленность смещения и т.д.

Например, спрямление на р. Вычегде в начале 90-х годов XX века Емышевской излуины, достигшей степени развитости $L/L_0=1,54$ (старое русло при этом обмелело: сверху оно перекрылось обсыхающим в межень и зарастающим побочнем – лишь снизу сохранилось в виде залива – курьи), привело к тому, что у нижележащей Заболотной излуины стал размываться выпуклый берег (со скоростью 30-50 м/год), который за 10 лет получил вогнутую форму, а возле вогнутого сформировалась большая зарастающая кустами отмель, превратившая его в выпуклый (рис. 56). Многочисленные примеры различных преобразований излучин под влиянием деформации вышерасположенных приводит И.В. Попов [Кондратьев, Ляпин и др., 1959].

Излуины, формы которых не связаны с их естественной эволюцией, в классификационную схему (рис. 48) не включены, поэтому она не охватывает всего многообразия возможных форм излучин. Однако предлагаемая схема может служить базой не только для выделения стадий развития излучин, определения отклонений от нормального процесса эволюции, но и стандартизации применения терминов при обозначении излучин разных форм.

Переход от одной стадии развития излуины к другой приводит к количественными изменениями ее параметров. Эти изменения обуславливают качественный скачок в развитии самой излуины, сопровождающийся изменениями динамических характеристик (скорости и направленности смещения, трансформации скоростного поля, циркуляционных течений и т.д.) и формы самой излуины. При этом если увеличение длины и стрелы прогиба при увеличении кривизны русла является закономерным следствием эволюции излуины, то изменение таких параметров, как шаг, радиус кривизны и ширина русла носит более сложный характер и разными исследователями трактуется неоднозначно. Широкое распространение получила гипотеза о существовании фиксированных точек в местах изменения знака кривизны, относительно которых происходит формирование излучин [Попов, 1955, 1956; Кондратьев, Ляпин и др., 1959]. Соответственно, принимается, что шаг излуины, который равняется расстоянию между этими устойчивыми точками, является величиной постоянной. В некоторых работах [Кондитерова, Попов, 1969] указывается на увеличение шага излуины в процессе ее развития, что объясняется возникновением асимметрии ее плановых очертаний и, соответственно, изменением положения точек перегиба русла.

Для определения степени и направленности изменения параметров свободных излучин при переходе из одной стадии развития в другую были проанализированы средние значения шага L , стрелы прогиба h , длины l , радиуса кривизны r и ширины русла B в вершине излучин, находящихся на разных стадиях развития.

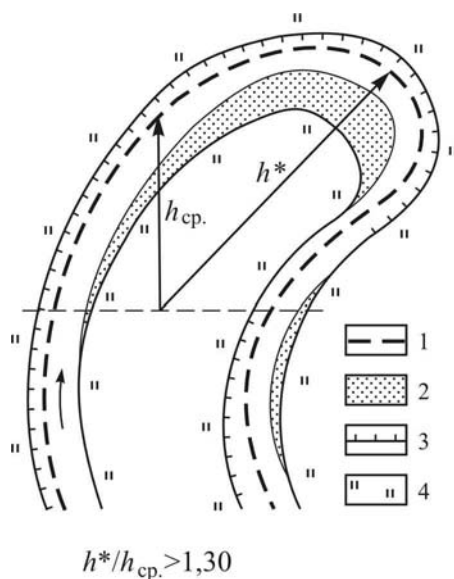


Рис. 54. Заваленная излучина ($h^*/h_{cp} > 1,30$) на р. Тыме: 1 – динамическая ось потока; 2 – прирусловые отмели; 3 – подмываемые берега; 4 – пойма.

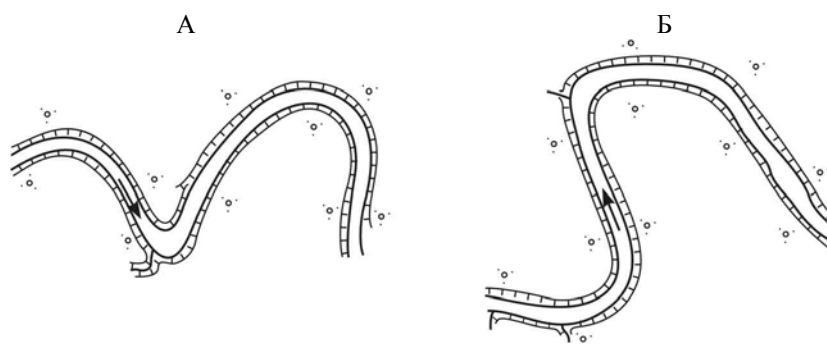


Рис. 55. Специфические формы крутых излучин р. Васюгана: А – треугольная; Б – П-образная.

При этом использовались данные только по тем рекам и их участкам, где число излучин, находящихся на данной стадии развития, было дос-

точно велико (не менее 20). Не учитывались также экстремально большие и экстремально малые значения параметров, которые, существенно влияя на средние показатели, в то же время обычно обусловлены воздействием других, внешних по отношению к реке факторов. Средние и большие реки, по длине которых существенно изменяются показатели водоносности, разделялись на отдельные бесприточные участки.

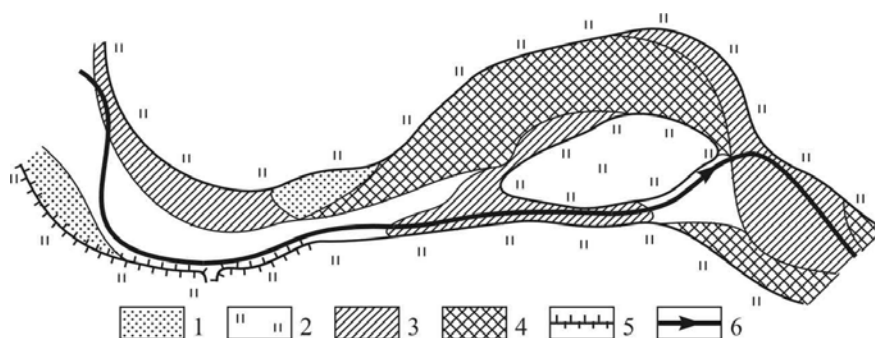


Рис. 56. Сопряженное переформирование Емышевской и Заболотьевской излучин на р. Выгегде (90-е годы XX века): 1 – зоны аккумуляции наносов до спрямления Емышевской излучины; 2 – пойма; 3 – размывы русла; 4 – места аккумуляции наносов после спрямления излучины; 5 – берегоукрепительные сооружения; 6 – современное положение динамической оси потока и направления течения после спрямления излучины [Белый, Иванов и др., 2001].

В качестве основной модели изменения параметров излучины в процессе ее развития была принята схема последовательного перехода излучины из сегментной пологой в сегментную развитую и далее в сегментную крутую с последующей трансформацией ее или в омеговидную или в синусоидальную излучину. За начальные значения принимались средние величины параметров сегментной пологой излучины. Их дальнейшее изменение рассматривалось как соотношение среднего значения параметра на каждой стадии развития к начальному значению $P_{сн}$. В результате были получены коэффициенты трансформации параметров на всех стадиях: $K_{транс} = P_{стад}/P_{сн}$, где индекс $транс$ соответствует трансформации каждого параметра (r, h, L, l, B) – K_r, K_h, K_L, K_l, K_B ; $P_{стад}$ – среднее значение анализируемого параметра для излучин, находящихся на определенной стадии развития. В дальнейшем они были осреднены по всем рекам и отдельным участкам (табл. 8).

По знаку направленности изменения (увеличение – уменьшение) относительно начальной стадии все параметры излучин разделяются на две группы (рис. 57).

К первой группе относятся стрела прогиба h и длина излучины l , которые последовательно возрастают, достигая максимальных значений у излучин омеговидной или синусоидальной формы. Стрела прогиба увели-

чивается в среднем в два раза. Длина излучин на омеговидных излучинах возрастает более чем в полтора раза. Для синусоидальных излучин значение коэффициента трансформации длины (табл. 8) представляется существенно заниженным.

Таблица 8. Значения коэффициентов трансформации параметров свободных излучин, находящихся на разных стадиях развития

Тип излучины (стадия развития)	K_L	K_h	K_b	K_r	K_B
Сегментная пологая	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Сегментная развитая	0,92	1,38	1,15	0,82	0,97
Сегментная крутая	0,82	1,61	1,24	0,72	0,97
Омеговидная	0,77	2,05	1,58	0,81	0,91
Синусоидальная	0,57	1,91	1,29	0,55	1,04

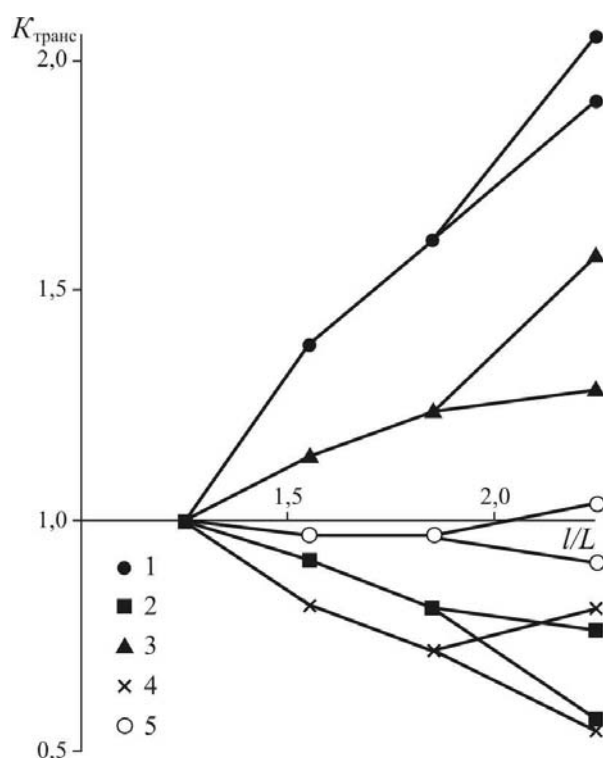


Рис. 57. Изменение параметров свободных излучин в процессе развития (увеличения степени развитости l/L): 1 – h ; 2 – L ; 3 – l ; 4 – r ; 5 – B .

Это связано с тем, что формирование этих излучин в большей мере связано с спецификой природных условий и в меньшей мере с руслоформирующими расходами воды. Они обычно имеют несколько меньшие размеры, чем соседние с ней излучины, имеющие иную форму. Это же относится и к коэффициентам трансформации других параметров синусоидальных излучин (шага K_L , стрелы прогиба K_h и радиуса кривизны K_r), но в меньшей степени, что позволяет не исключать синусоидальную форму из общей схемы.

Вторую группу параметров составляют шаг L , радиус кривизны r и ширина русла в вершине излучины B . В отличий от параметров первой группы, рост которых от стадии к стадии вполне очевиден и закономерен, их изменения носят другую направленность (они уменьшаются), что в ряде случаев противоречит данным других исследователей [Попов, 1965; Кондигерова, Попов, 1969]. Шаг излучины L в процессе ее развития последовательно уменьшается и на конечной стадии развития снижается примерно в 1,5 раза. Это не подтверждает гипотезу о наличии фиксированных точек развития меандрирующего русла, упоминавшуюся ранее. Точки изменения знака кривизны русла неустойчивы во времени и смещаются сначала вследствие продольного смещения излучины, а затем при удлинении ее крыльев и формирования на них новых плесовых и перекатных участков.

Радиус кривизны излучин r уменьшается при переходе от пологой к крутой сегментной форме за счет сближения крыльев. Однако в дальнейшем его значения несколько возрастают при формировании омеговидной излучины, чему способствуют развивающиеся выше и ниже по течению смежные излучины. В случае трансформации сегментной излучины в синусоидальную, радиус кривизны продолжает уменьшаться благодаря интенсивному поперечному смещению и формирующейся вытянутой, нередко, близкой к треугольной формы вершины. Это сопровождается увеличением ширины русла B . В результате у вогнутого берега возникает водоворотная зона, стрежень потока смещается к выпуклому берегу и последний начинает размываться. В случае перехода сегментной излучины в омеговидную ширина русла постепенно уменьшается, хотя и не существенно, что объясняется сжатием потока из-за образования сбойного течения у вогнутого берега и роста размеров отмели у выпуклого.

Проведенный анализ трансформации параметров свободных излучин был основан на обширном материале для рек, различающихся по размерам и условиям руслоформирования, и дает общее представление об этом процессе. На каждой конкретной реке или отдельном ее участке возможны отклонения от полученных закономерностей, связанные с особенностями развития процесса меандрирования.

Для выявления различий в динамике излучин на разных этапах их развития по данным сопоставления лоцманских карт рек Чулыма (1974-1992 гг), Оки (1928-1976 гг), Вычегды (1946-1982 гг) были получены [Завадский и др., 2002] сведения об изменениях за принятые интервалы време-

ни значений степени развитости излучин $\Delta(l/L)=(l/L)_1/(l/L)_2$, стрелы прогиба $\Delta h=h_1/h_2$, длин размываемых берегов $\Delta S=S_1/S_2$ и отношения длины размываемых берегов S к длине излучины l , т.е. $\Delta(S/l)=(S/l)_1/(S/l)_2$, где индексы 1 и 2 означают, соответственно, первый и последний год временного интервала (годы издания лоцманских карт). Показатель Δh свидетельствует об изменении формы излучины за счет поперечного смещения; ΔS и $\Delta(S/l)$ – соответственно, об абсолютном и относительном (по отношению к длине излучины l) изменении длины фронта размыва за временной интервал. При увеличении степени развитости излучины l/L происходит изменение этих показателей, отражая интенсивность трансформации ее формы. Зависимость $\Delta(S/l)=f[\Delta(l/L)]$ обратная: увеличение степени развитости излучин приводит к уменьшению величины соотношения S и l , означая, что удлинение фронта размыва вогнутого берега происходит быстрее удлинения самой излучины, распространяясь постепенно на всю ее длину. Для всех излучин (без их разделения на стадии) эта зависимость прослеживается лишь в виде общей тенденции. При разделении на стадии она дифференцируется по ним, коэффициенты корреляции увеличиваются в 1,5-3 раза, хотя в ряде случаев оказываются достаточно низкими ($<0,5$). По-видимому, это объясняется малой точностью исходного материала (лоцманских карт) в отношении показа размываемых берегов и изменением требований к их составлению и условных знаков между сроками издания.

Несмотря на низкую точность, эта зависимость имеет важное значение при прогнозировании размыва берегов рек как одного из основных проявлений русловых процессов. Характерно, что коэффициенты в уравнении регрессии на разных стадиях развития сегментных излучин невелики, сначала уменьшаются, потом возрастают (у пологих излучин они равны – 0,16, развитых – 0,07, крутых – 0,21), но при переходе к омеговидным резко возрастают, достигая у крутых форм – 1,26. Аналогичная закономерность проявляется у зависимости $\Delta S=f[\Delta(l/L)]$: коэффициенты в уравнении регрессии по 5 стадиям равны: -0,16; -0,07; -0,12; -0,36; -2,92. Это подтверждает схему изменения интенсивности деформаций излучин, согласно которой развитие омеговидных излучин сопровождается активизацией русловых деформаций за счет образования вторичных излучин на крыльях исходной и общего удлинения фронта размыва берегов.

Лучшие результаты дает связь $\Delta h=f[\Delta(l/L)]$ (рис. 58, табл. 9). В отличие от предыдущих, она линейная. Эта связь значима для всех излучин, но при дифференциации ее по стадиям развития коэффициенты корреляции возрастают.

Коэффициенты в уравнениях регрессии растут до стадии развитых (Чулым) или крутых (Ока) сегментных излучин, но при переходе к следующим стадиям уменьшаются и в дальнейшем практически не меняются. Это совпадает с выводами И.В. Попова [Кондратьев и др., 1982] об изменении угла разворота излучин, свидетельствуя о том, что на стадии крутых сегментных или омеговидных излучин поперечное смещение излучин замедляется, и

стрела их прогиба изменяется незначительно. То есть, развитие омеговидных излучин осуществляется в основном за счет удлинения фронта размыва берегов, включающего встречный размыв на их крыльях, где развиваются вторичные излучины.

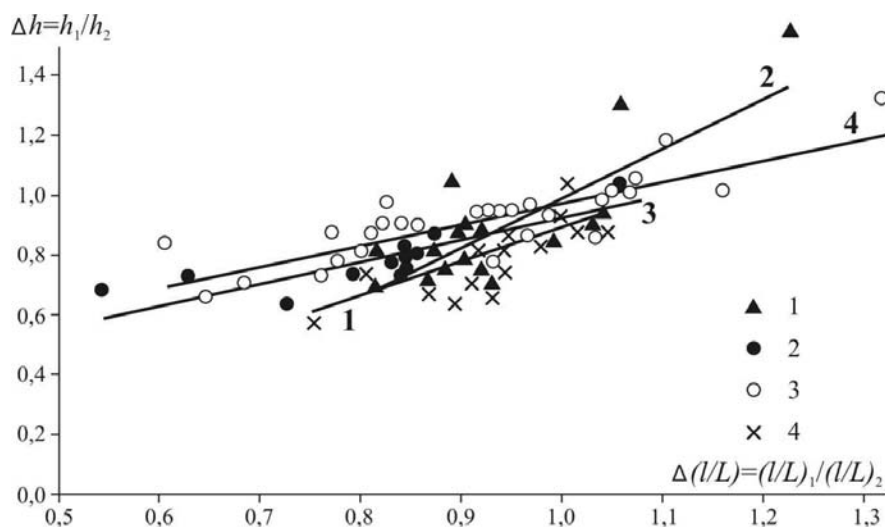


Рис. 58. Зависимость изменения стрелы прогиба $\Delta h = h_1/h_2$ в зависимости от изменения степени развитости излучин $\Delta(l/L) = (l/L)_1/(l/L)_2$ р. Чулыма: l – длина излучины (1); L – шаг (2); l/L – степень развитости (3); h – стрела прогиба (4); S – длина фронта размыва берега (индексы 1 и 2 соответствуют первому (1974) и последнему (1992) году).

Таблица 9. Коэффициенты уравнений регрессии $\Delta h = f[\Delta(l/L)]$ и коэффициенты корреляции R

Река		Без разделения на стадии	Стадии развития излучин			
			$1,15 < l/L < 1,4$	$1,4 < l/L < 1,7$	$1,7 < l/L < 2,0$	$l/L > 2,0$
Чулым	k	0,91	1,13	0,71	0,77	0,76
	R	0,71	0,69	0,80	0,89	0,85
Ока	k	1,32	2,01	2,08	2,15	0,78
	R	0,62	0,71	0,72	0,46	0,69
Вычегда	k	3,48	5,58			
	R	0,66	0,76			

3.3. Асимметрия формы излучин



Асимметрия формы излучин в плане широко распространена на меандрирующих реках, причем она характерна для условий как ограниченного (врезанных русел), так и свободного (широкопойменных русел) развития русловых деформаций. Поэтому попытки объяснить причины этого явления чередованием по длине излучин участков, различающихся по устойчивости к размыву, не находят подтверждения. В настоящее время большинство исследователей склоняется к гидромеханической природе асимметрии излучин, т.е. связывают ее с особенностями кинематики потока и транспорта наносов на изгибе русла. Усложнение извилистой формы русла, в частности, иногда представляется результатом воздействия на формирование излучины в течение всех фаз водного режима расходов воды различной обеспеченности (руслоформирующих расходов воды разных интервалов), которые различаются по эрозионной и транспортирующей способности. Так, И.Г. Джуха [1990] при исследовании русла р. Юга выделил излучины двух порядков, различающиеся по размерам и соответствующих различным интервалам руслоформирующих расходов воды. При этом излучины меньшего порядка являлись составной частью более крупных изгибов русла. Аналогичные результаты были получены М.В. Крашенинниковым [1979] на равнинных реках Сибири, на которых были выделены изгибы русла трех порядков, первый из которых соответствовал меженным расходам воды, второй – расходу воды в пределах пойменных бровок (руслонаполняющему), третий – расходу воды при затоплении поймы.

В большей мере развитие асимметричной формы излучины связано с направленностью деформации берегов в процессе ее развития. Уже на начальной стадии формирования излучина получает преимущественно продольное смещение, когда в основном размывается выпуклый берег в верхнем крыле и вогнутый в нижнем. При распространении зоны аккумуляции у выпуклого берега и фронта размыва вогнутого на всю привершинную часть излучины вероятность возникновения асимметрии возрастает из-за смещения вершины вверх или вниз по отношению к геометрической оси излучины.

В ходе дальнейшего развития излучины закреплению асимметричной формы способствует характер распределения по ее длине грядовых форм рельефа русла. По мере увеличения длины излучины нарушается схема распределения перекатных участков и плесовых ложин, иногда в пределах одной излучины может формироваться до 6-8 плесов [Кондратьев и др., 1992]. При этом возле наиболее глубокой плесовой ложины происходит более интенсивный размыв берегов [Попов, 1954]. Асимметрия формы в большинстве случаев не наблюдается, если излучина сохраняет в процессе своего развития «одноплесовую» структуру, или если ее эволюция не нарушается спрямлением смежных излучин на выше- и нижерасположенных участках. Асимметричные излучины гораздо реже развиваются на реках со слабоустойчивым или неустойчивым руслом (например, на нижней Выгегде

или Хуанхэ). Это объясняется быстрым смещением побочной перекатов на таких реках, благодаря чему, плесовые ложины не занимают в русле устойчивого положения; соответственно, интенсивный местный размыв берегов на отдельном участке излучины носит временный характер.

Изучением явления плановой асимметрии излучин начали заниматься в 60-е годы XX века. Обзор результатов исследований, выполненных рядом зарубежных ученых (Р. Киношито, М. Карсоном, М. Лапойнтом, Г. Паркером, Г. Чангом, Л. Леополдом, В. Ланбейном) приведен в работах В.А. Савицкого [1995], А.Ю. Сидорчука и А.Н. Михинова [1985]. Было установлено, что для большинства развитых излучин характерная асимметрия очертаний в плане возникает в большинстве случаев как следствие смещения вершины излучины относительно оси симметрии, либо увеличения длины одного из крыльев излучины относительно другого. Однако попытки описания формы асимметричных излучин с помощью подбора аналитических кривых, аппроксимирующих осевую линию русла, не привели к достоверным результатам, т.к. математические модели не учитывают всей совокупности природных факторов, влияющих на формирование русловых форм.

В отечественной литературе изучению асимметрии излучин уделяется существенно меньшее внимание. В основном исследователи ограничиваются разработкой общих схем формирования асимметричных излучин и критериев, с помощью которых возможно оценить степень отклонения изгиба речного русла от симметричной формы. В последнем случае предлагаются как геометрические (площадные) характеристики [Савицкий, 1995], так и критерии, основанные на соотношениях морфометрических параметров излучин (шага, стрелы прогиба, углов входа и выхода и т.д.), а также их комбинации [Завадский, 2001; Замышляев, Майский, 1988; Кондратьев и др., 1982; Савицкий, 1995].

При классификациях свободных излучин по внешнему виду иногда выделяют [Завадский, Чалов, 2000] сильноасимметричные излучины в отдельный тип, называя их «заваленными» (термин Н.И. Маккавеева [1971]), т.к. для таких излучин характерна чрезмерная деформация одного из крыльев, благодаря чему вершина смещается относительно оси симметрии вверх или вниз по течению. Н.П. Матвеев [1970] подобные излучины назвал «асимметричными меандрами». Причину формирования их он видит в смещении вершины излучины вниз по течению без изменения положения точек изменения знака кривизны на излучине, хотя причины такого смещения им не рассматриваются.

Несмотря на то, что об асимметричности излучин упоминается в работах многих исследователей, практически отсутствует анализ асимметрии излучин на конкретных реках. Исключением является работа В.А. Савицкого [1995], который провел расчет показателей асимметрии на излучинах различных рек полуострова Ямал и выполнил их регрессионный анализ.

Для изучения особенностей формирования асимметричных излучин был проведен анализ этого явления на свободномеандрирующих руслах рек

Вычегды и Чулыма. Оценка степени плановой асимметрии свободных излучин проведена по двум показателям, основывающимся на соотношениях основных морфометрических параметров излучины – шага L , длины l – и параметров, учитывающих положение вершины излучины относительно базовых точек (D – расстояние от проекции вершины излучины на ось пояса меандрирования до центра отрезка, представляющего собой шаг излучины; $l_в$ и $l_н$ – длины верхнего и нижнего крыльев излучины по руслу, равные, соответственно, расстоянию от верхней точки смены знака кривизны излучины до оси симметрии и расстоянию от оси симметрии до нижней точки смены знака кривизны (под осью симметрии понимается перпендикуляр, проведенный из середины отрезка, представляющего собой шаг излучины) (рис. 59): 1) вершинная асимметрия $A_{верш}$ – отношение удвоенной величины D к шагу излучины $A_{верш} = 2D/L$; 2) показатель асимметрии крыльев $A_{кр}$ – отношение разницы в длине верхнего ($l_в$) и нижнего ($l_н$) крыльев излучины к общей длине излучины $A_{кр} = (l_в - l_н)/l$. Оба предлагаемых показателя асимметрии равны нулю, если русло делает симметричный изгиб. Показатель асимметрии крыльев всегда имеет значения меньше 1. Величина вершинной асимметрии может превышать 1, если излучина очень сильно «завалена» вверх или вниз по течению, и проекция вершины попадает на продолжение линии шага. Принимается, что оба показателя имеют положительное значение, если вершина излучины смещена относительно оси симметрии вверх по течению и отрицательное – при смещении вниз.

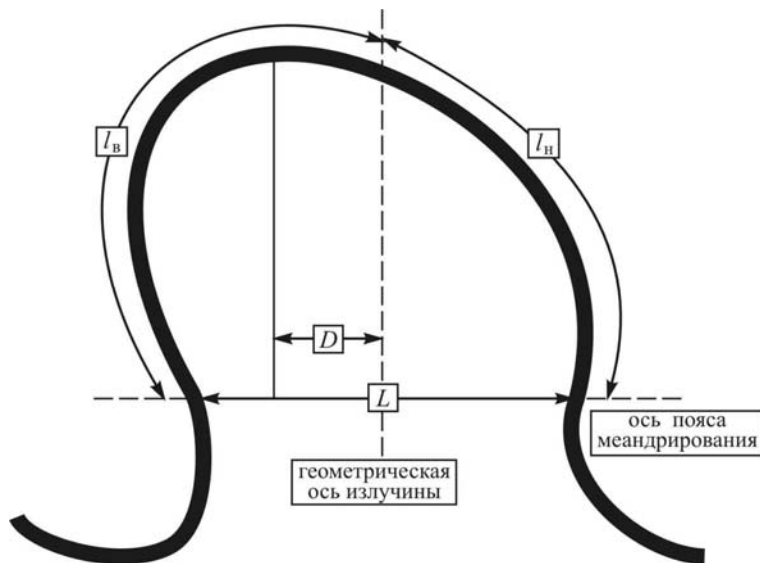


Рис. 59. Морфометрические параметры, используемые для оценки асимметрии излучин в плане: L – шаг излучины; $l_в$, $l_н$ – длина верхнего и нижнего крыла излучины; D – отклонение проекции вершины излучины от оси симметрии.

В большинстве случаев знак у показателей асимметрии совпадал, а их значения связаны между собой достаточно тесной связью. На рисунке 60 представлены графики зависимости между показателями асимметрии излучин рек Вычегды (А) и Чулыма (Б). Они имеют линейный характер, достаточно высокий коэффициент корреляции (порядка 0,8-0,9) и аппроксимируются уравнением регрессии $A_{кр}=0,3A_{верш}$

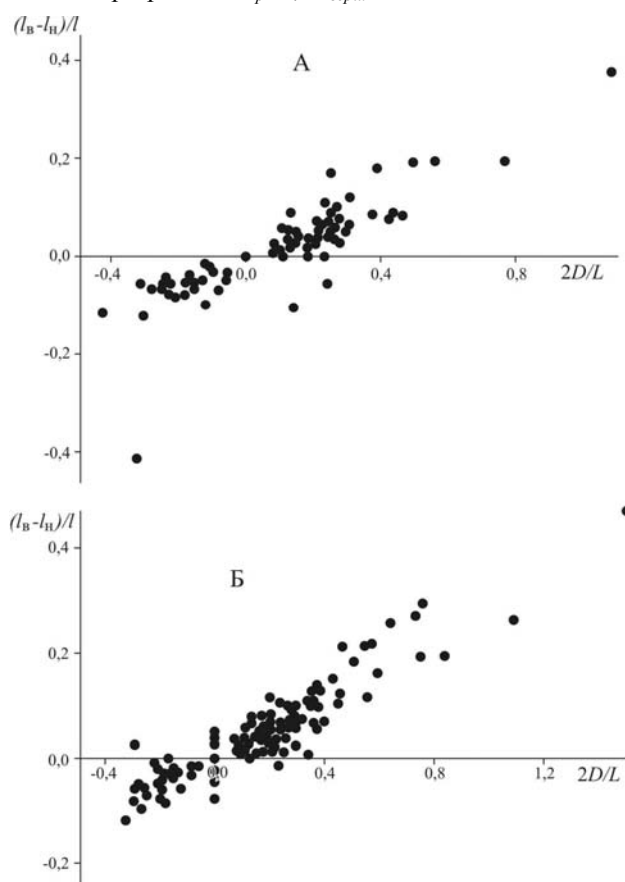


Рис. 60. Связь между показателями асимметрии излучин на реках Вычегде (А) и Чулыме (Б).

Однако в связи с тем, что форма излучины имеет иногда довольно сложные очертания, достоверно оценить степень асимметрии одним показателем не всегда удастся. Так, равенство нулю одного из критериев асимметрии не является гарантией симметричности формы излучины; в некоторых случаях симметричное расположение вершины излучины наблюдается при различии в длинах верхнего и нижнего крыльев и наоборот. Поэтому для

характеристики асимметрии излучин используются одновременно оба показателя, и судить о симметричности излучины русла можно только при равенстве нулю обоих показателей.

Вычисление показателей асимметрии проводилось по всем свободным излучинам на Вычегде и Чулыме. Одновременно для каждой свободной излучины определялась ее форма (вид) (рис. 61) по упрощенному варианту классификации излучин (рис. 48): сегментные излучины делились на две группы – пологие, со значением степени развитости $l/L < 1,58$ и крутые с $l/L > 1,58$. Не выделялись также прорванные излучины; они относились к одной из разновидностей сегментных в соответствии со значением l/L .

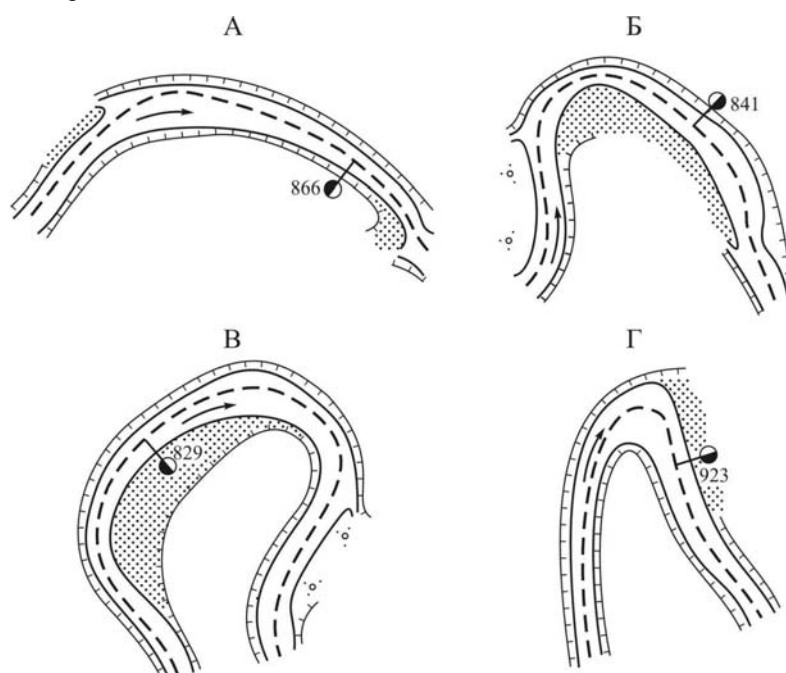


Рис. 61. Асимметричные излучины Вычегды разных видов: А – сегментная пологая; Б – сегментная крутая; В – омеговидная; Г – синусоидальная.

Для каждого вида излучин были рассчитаны средние значения показателей вершинной асимметрии $A_{\text{верш}}$ и асимметрии крыльев $A_{\text{кр}}$ (табл. 10). Минимальная асимметричность формы у свободных излучин наблюдается на начальной стадии развития, после чего средние значения показателей асимметрии последовательно увеличиваются по мере роста степени развитости, достигая максимума у омеговидных и синусоидальных излучин. Такая тенденция отчетливо прослеживается на обеих реках, подтверждая представления о влиянии многопесочной структуры рельефа дна излучин на развитие их асимметрии. Максимальные средние значения асимметрии ха-

рактарны для заваленных излучин. Однако в данном случае это – следствие того, что излучины с большими значениями показателей асимметрии выделяются в самостоятельный тип.

Сравнение средних показателей асимметрии различных типов излучин Вычегды и Чулыма показывает, что они имеют в целом близкие значения и существенно различаются только для заваленных излучин, доля которых не превышает 3%. При этом для Вычегды характерно несколько более высокие значения показателей $A_{\text{верш}}$ и $A_{\text{кр}}$. Однако, если учитывать в анализе и симметричные излучины, то средние значения показателей асимметрии будут существенно меньше, а большие значения будут характерны для Чулыма. Объясняется это более широким распространением на Чулыме излучин с развитой асимметрией. При этом важную роль играют различия в устойчивости русел и объеме стока наносов. У слабоустойчивого русла благодаря большой скорости смещения побочней асимметричные излучины развиваются реже. Русло Вычегды, особенно ниже слияния с Сысолой, в основном является слабоустойчивым, скорости смещения перекастов достигают здесь 150-200 м/год [Русловой режим рек ..., 1994]. Вследствие этого на Вычегде в целом преобладают симметричные излучины – 54%, причем максимально распространены сегментные пологие – 61%, что делает средние показатели асимметрии свободных излучин ниже, чем на Чулыме. На Чулыме даже у сегментных пологих излучин доля симметричных не превышает 40%, а по всем видам излучин эта величина составляет в среднем 28% (табл. 10).

Характерно, что на Вычегде и Чулыме преобладают излучины с положительной асимметрией. На Чулыме их число более, чем в три раза, а на Вычегде – в два раза превышает число излучин с отрицательной асимметрией, т.е. имеющих смещение относительно оси симметрии вниз по течению. Аналогичные данные приводит В.А. Савицкий [1995] по рекам Ямала: 60% излучин имеют положительную асимметрию, 40% – отрицательную. Это, однако, не соответствует представлениям некоторых исследователей [Сидорчук, Михинов, 1985], по мнению которых излучины должны иметь преимущественно отрицательные показатели асимметрии благодаря поперечной циркуляции, совпадению ее влияния с полем скоростей течения в нижнем крыле и расположению наиболее глубокого плеса ниже вершины излучины.

Поскольку изменение показателей водоносности вниз по течению сопровождается трансформацией преобладающей формы излучин, соответственно происходит изменение средних показателей асимметрии. Для оценки влияния изменения водоносности вниз по течению на асимметрию свободных излучин в плане каждая река (Вычегда, Чулым) была разделена на три относительно однородных по водоносности участка, границами которых служили места впадения наиболее крупных притоков. Для каждого участка были определены средние значения показателей асимметрии излучин (табл. 11).

Таблица 10. Показатели асимметрии для свободных излучин различной формы на Вычегде и Чулыме

Форма (вид) излучины	Вершинная асимметрия $(2D/L)_{cp}$	Асимметрия длины крыльев $\left(\frac{l_g - l_n}{l}\right)_{cp}$	Излучины с положительной асимметрией, %	Излучины с отрицательной асимметрией, %	Симметричные излучины, %
Вычегда					
Сегментные пологие	0,19	0,048	27	12	61
Сегментные крутые	0,23	0,074	34	19	47
Омеговидные	0,34	0,117	29	21	50
Синусоидальные	0,32	0,117	50	37	13
Заваленные	1,08	0,373	100	0	0
П-образные	0,33	0,147	67	0	33
Все	0,24/0,11 ¹⁾	0,074/0,034 ¹⁾	31	15	54
Чулым					
Сегментные пологие	0,14	0,030	42	19	39
Сегментные крутые	0,23	0,055	66	16	18
Омеговидные	0,35	0,112	62	20	18
Синусоидальные	0,32	0,073	60	10	30
Заваленные	0,79	0,259	100	0	0
П-образные	0,39	0,133	66	17	17
Все	0,22/0,16 ¹⁾	0,059/0,043 ¹⁾	55	17	28

¹⁾ в знаменателе – с учетом симметричных излучин

Таблица 11. Показатели асимметрии свободных излучин на отдельных участках Вычегды и Чулыма

Участок, км	$Q_{cp}, \text{м}^3/\text{с}$	$(l/L)_{cp}$	Вершинная асимметрия $(2D/L)_{cp}$	Асимметрия длины крыльев $\left(\frac{l_g - l_n}{l}\right)_{cp}$	Симметричные излучины, %
Вычегда					
936-784	80	1,69	0,26	0,079	53
784-419	300	1,58	0,23	0,076	59
419-0	870	1,38	0,20	0,054	46
Чулым					
900-401	230	1,92	0,24	0,068	26
401-218	530	1,70	0,18	0,041	14
218-0	740	1,45	0,12	0,027	46

Увеличение водоносности реки и, соответственно, размеров самих излучин, способствует снижению общей извилистости русла. Доля пологих излучин, для которых характерны наименьшие значения показателей асимметрии, возрастает. Вследствие этого с увеличением размеров реки вниз по течению уменьшаются средние значения показателей асимметрии излучин (рис. 62). Это достаточно четко проявляется на Вычегде и Чулыме, где оба показателя снижаются от участка к участку по мере нарастания водоносности рек.

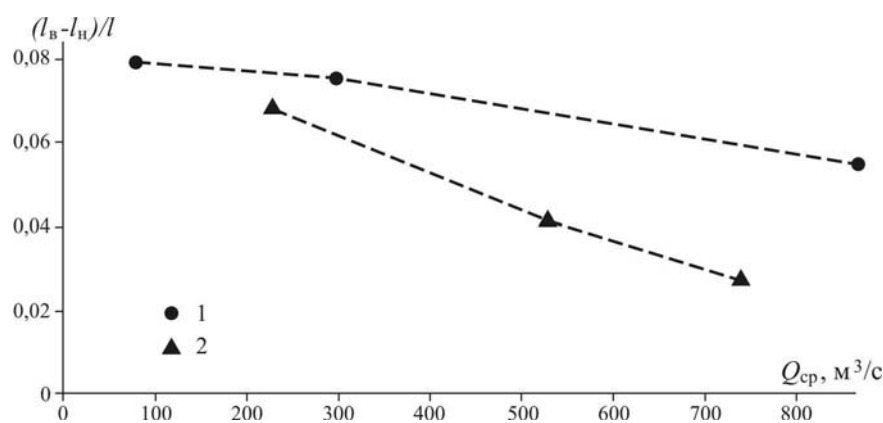


Рис. 62. Связь показателя асимметрии крыльев с среднегодовым расходом воды для асимметричных излучин рек Вычегды (1) и Чулыма (2).

Подобная закономерность – снижение асимметрии излучин от верховьев реки к ее устью отмечается также для излучин каждого вида: омеговидные, синусоидальные и другие виды развитых излучин имеют в целом более асимметричную форму в верхнем течении реки по сравнению с излучинами этих же видов ниже по течению. Однако это менее четко выражено, чем для средних значений по всем видам излучин.

Полученные выводы об увеличении асимметрии излучин с ростом извилистости русла должны указывать на их связь с характеристиками степени развитости. Однако проведенный анализ таких зависимостей показал, что эта связь неоднозначна и неустойчива, коэффициенты корреляции не превышают 0,5. Единственным параметром, с которым прослеживается относительно устойчивая связь, является коэффициент формы (отношение радиуса кривизны к стреле прогиба излучины r/h) (рис. 63). Он имеет максимальные значения в начальный момент формирования излучины русла, когда асимметрия излучин минимальна, и постепенно уменьшается в процессе развития излучины, принимая значения, близкие к единице при достижении излучиной степени развитости $l/L \approx 1,58$. При дальнейшем увеличении кривизны излучины и, соответственно, росте показателей асимметрии

излучин, параметр r/h продолжает уменьшаться, достигая в некоторых случаях величины 0,2-0,3.

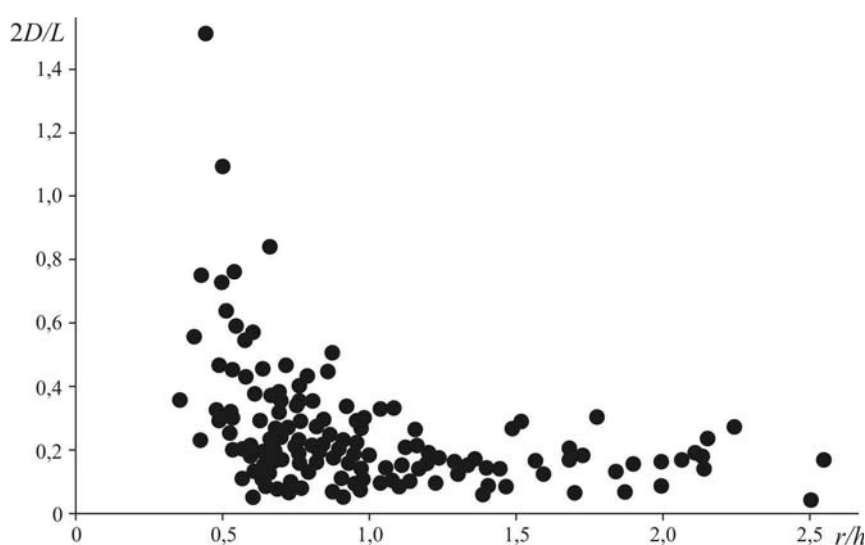


Рис. 63. Зависимость показателя вершинной асимметрии $2D/L$ от коэффициента формы r/h для асимметричных излучин Чулыма.

Отсутствие устойчивых связей показателей асимметрии с параметрами, характеризующими развитость излучин, говорит о многофакторности этого явления. Отдельные излучины достигают в своем развитии крутой омеговидной или синусоидальной формы, сохраняя при этом симметричные очертания, что свидетельствует об отсутствии общих закономерностей в процессе трансформации формы излучин. Например, на Вычегде доля симметричных омеговидных излучин составляет 50%.

Проведенный количественный анализ показателей асимметрии свободных излучин позволяет сделать вывод о том, что по крайней мере на исследованных реках (Вычегде и Чулыме) преобладают симметричные излучины и излучины с незначительной асимметрией. Если рассматривать в качестве примера показатель вершинной асимметрии, то у большинства свободных излучин значение $A_{\text{верш}}$ находится в интервале от -0,2 до 0,2, что иллюстрируется гистограммами распространения коэффициента вершинной асимметрии на Вычегде и Чулыме (рис. 64). Используя этот показатель, можно классифицировать излучины по характеру асимметрии в плане, разделив их на три группы: симметричные и слабо асимметричные излучины; излучины с умеренной асимметрией; сильно асимметричные излучины (табл. 12).

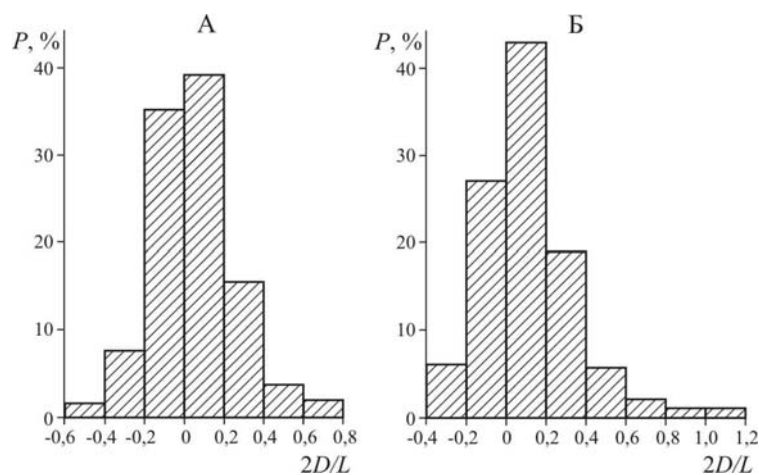


Рис. 64. Гистограммы распределения коэффициентов асимметрии вершины на свободных излучинах рек Выгеды (А) и Чулыма (Б).

Таблица 12. Классификация излучин по степени вершинной асимметрии

Характер асимметрии	Вершинная асимметрия $2D/L$	Распространение, %	
		Выгедга	Чулым
Слабая	от -0,2 до 0,2	72	67
Умеренная	от 0,21 до 0,41	23	26
Сильная	Более 0,41	5	7

Слабая асимметрия характерна для сегментных излучин. Омеговидные, синусоидальные и П-образные асимметричные излучины, в большинстве случаев, имеют умеренную асимметрию. К сильно асимметричным закономерно относятся заваленные излучины.





3.4. Гидролого-морфологический анализ



Эмпирически очевиден факт, что размеры излучин зависят от размера реки (чем крупнее река, тем крупнее излучины). Это побуждает исследователей к конструированию зависимостей между параметрами излучин и характеристиками водоносности рек. Однако первая проблема, встающая на этом пути, состоит в чрезвычайной вариабельности размеров излучин, которые на относительно бесприточных участках рек при одинаковых уклонах и близкой морфологии долины могут различаться на порядок величин. Теоретическое объяснение этому факту попытались дать К.В. Гришанин и В.И. Замышляев

[1985]. Исследовав методом малых возмущений систему базовых уравнений гидродинамики в форме «функция тока – вихрь», они получили, что возмущения береговой линии с длиной волны $\lambda_m > 6,3B_p$ имеют положительную скорость роста, достигающую максимума при $\lambda_m = 8,9B_p$ (рис. 65А).

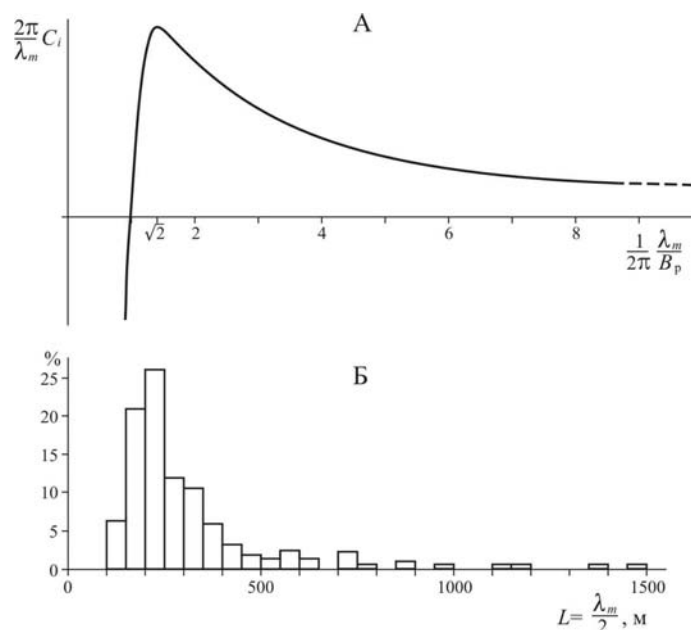


Рис. 65. Зависимость скорости роста возмущений береговой линии C_i от длины волны λ_m [по К.В. Гришанину и В.Н. Замышляеву, 1985] (А) и спектр размеров свободных излучин меандрирующего русла (Б) р. Сала (участок п. Вольный – устье р. Загисты).

Отсюда, наиболее вероятная длина волны излучины составляет порядка 9 ширин русла, что близко к эмпирической зависимости Л. Леопольда и М. Уолмана (2.1). Однако полный спектр размеров возмущений, имеющих вероятность превратиться в излучины, весьма широк. Он имеет нижний предел (при $\lambda_m = 8,9B_p$), физический смысл которого состоит в ограничении максимально возможной кривизны русла. В подтверждение известного правила А.Я. Миловича, Р. Багнольд [Bagnold, 1960] установил, что при радиусе кривизны русла менее двух ширин русла у выпуклого берега формируется зона отрыва течения, резко увеличивающая гидравлические сопротивления. Натурные наблюдения за динамикой речных излучин показывают, что по достижении такого критического значения дальнейшее искривление излучины практически прекращается [Hickin, 1974].

Из результатов построений К.В. Гришанина и В.И. Замышляева следует также, что верхний предел размеров излучин не существует. Для

возмущений крупнее 9 ширины русла вероятность их проявления в форме русла уменьшается и с ростом длины волны стремится в пределе к нулю, но все же имеет положительные значения. График скорости роста начальных возмущений (рис. 65А) по существу выражает вероятность появления излучин тех или иных размеров в условиях свободного развития русловых деформаций. Его характерная асимметрия объясняет тот факт, что спектр размеров излучин на произвольном участке меандрирующего русла обычно наилучшим образом описывается γ -распределением. Для иллюстрации на рисунке 65Б представлена гистограмма распределения величин шага излучин на одной из рек юга Русской равнины с очень динамичным руслом. Размеры излучин различаются на порядок, шаг наиболее крупных излучин в 6-7 раз превышает модальное значение. Характерные для реки высокие темпы русловых деформаций позволяют считать, что это является отражением стохастической природы меандрирования в современных, относительно неизменных условиях руслоформирования.

С другой стороны, вариабельность размеров излучин связана с тем, что даже на одном участке излучины находятся на разных стадиях развития и отличаются не только размерами, но и формой. Поэтому при проведении гидролого-морфологического анализа представляется ошибочным применять метод осреднения всех значений параметра и использовать их среднюю величину на участке. Смешивание излучин, находящихся на разных этапах развития, происходит и при применении в качестве характерных параметров значений 50%-ной обеспеченности, получаемых с помощью построения кривых обеспеченности. Более обоснованным представляется проводить выборку излучин на основе представлений о том, что наиболее полно отражают условия формирования русла излучины со степенью развитости L/L от 1,40 до 1,70, т.е. наиболее близкие по своей форме к полукружности. Далее для значений параметров излучин, удовлетворяющих условиям выборки, строятся диаграммы распределения, которые позволяли отбросить экстремально большие и экстремально малые значения. После этого оставшиеся значения осредняются, и полученная величина принималась за характерную на конкретном участке. С помощью этого метода удается избежать ошибок при гидролого-морфологическом анализе, которые могут возникнуть в случае сопоставления излучин, находящихся на разных стадиях своего развития.

Наиболее близким по результатам является построение диаграмм распределения параметров с заданным интервалом значений для всех излучин на участке и последующим определением их модальных значений [Завадский, Чалов, 1997; Завадский, 2000; Chalov, Zavadskiy, 1999]. Для примера в таблице 13 приведены характерные значения параметров свободных излучин на участках р. Агана (бассейн Оби), рассчитанные различными методами: 1) средних значений для излучин со степенью развитости L/L от 1,40 до 1,70 (этот метод использован в дальнейшем); 2) модальных значений; 3) определения среднеарифметического значения параметра на участке; 4) ве-

личины 50%-ной обеспеченности (медианных значений). Наиболее консервативным параметром в наименьшей мере зависящем от методики, является ширина русла (полученные значения различаются не более чем на 10%). Для других параметров различия могут быть существенными, возрастая на участках с омеговидными и синусоидальными излучинами. В наибольшей мере это отражается на таких параметрах, как стрела прогиба и длина излучины.

Таблица 13. Характерные значения параметров свободных излучин на участках русла р. Агана, рассчитанные по разным методикам

Параметр, м	Метод расчета	Участок, км		
		335-290	290-148	148-0
L	1. Используемый в работе	640	750	950
	2. По модальному значению	600	750	900
	3. Среднее значение	590	730	1000
	4. 50 %-ной обеспеченности	560	690	880
h	1. Используемый в работе	280	400	430
	2. По модальному значению	300	400	450
	3. Среднее значение	290	390	480
	4. 50%-ной обеспеченности	290	340	420
l	1. Используемый в работе	920	1290	1430
	2. По модальному значению	1000	1150	1300
	3. Среднее значение	960	1250	1560
	4. 50%-ной обеспеченности	930	1120	1350
r	1. Используемый в работе	280	370	420
	2. По модальному значению	250	350	400
	3. Среднее значение	280	350	470
	4. 50 %-ной обеспеченности	280	340	400
B	1. Используемый в работе	85	95	115
	2. По модальному значению	85	90	110
	3. Среднее значение	90	100	120
	4. 50 %-ной обеспеченности	90	100	110

Характерные значения безразмерных параметров (степени развитости, коэффициента формы) на бесприточных участках определяются путем осреднения. Это позволяет оценить развитость излучин на разных участках и анализировать общие закономерности процесса меандрирования [Завадский, 1996; 2000].

Традиционным методом исследования меандрирующих рек является построение эмпирических зависимостей между параметрами излучин и количественными показателями, характеризующими условия формирования русла. Этот подход, приводящий к установлению гидролого-морфологических зависимостей, получил широкое распространение, как в нашей стране, так и за рубежом. В качестве факторов, влияющих на русловые процессы, используют различные показатели водоносности (руслоформирующие, среднегодовые, руслонаполняющие расходы воды, расходы воды в половодье, расходы воды различной обеспеченности), площадь водосбора, уклоны долины и водной поверхности (продольные и поперечные) [Кондратьев и др., 1959, 1982; Маккавеев, 1955, 1971, 1986]. Известны также формулы, учитывающие скорость водного потока, крупность донных отложений, показатели шероховатости русла и его устойчивости, ширину поймы [Антроповский, 1969]. В качестве показателей процесса меандрирования, кроме параметров излучин, некоторые исследователи используют ширину пояса меандрирования, количество излучин на участке, различные показатели динамики излучин.

Наибольшее распространение получили эмпирические зависимости параметров излучин (в первую очередь, шага L и радиуса кривизны r) от характерных расходов воды. Выбор этих параметров обуславливается тем, что они наиболее полно характеризуют размер излучины и претерпевают наименьшую трансформацию в процессе эволюции излучины, по сравнению с такими параметрами как стрела прогиба h и длина l , которые зависят от ее формы и существенно изменяются. Для безразмерных характеристик (степени развитости l/L ; показателя формы r/h) подобного рода зависимости отличаются большой неустойчивостью и часто вообще не выявляются.

Н.И. Маккавеевым [1949] для рек СССР было установлено, что радиус кривизны изгибов динамической оси потока пропорционален корню квадратному из руслоформирующего расхода воды. Проанализировав в дальнейшем влияние уклона на размеры излучин, им была предложена формула, связывающая радиус кривизны с расходом воды и уклоном:

$$r = kQ_{\phi}^{0,5} \Gamma^{-1} \quad (3.10)$$

В работах других исследователей, проводивших анализ подобных гидролого-морфологических зависимостей [Антроповский, 1969; Кондратьев, 1953, 1954, 1968; Попов, 1965; Ромашин, 1968; Матвеев, 1985; Розовский, 1957], также указывается на степенной характер связи размеров излучин с показателями водоносности.

Подобные исследования проводились и за рубежом [Carlston, 1965; Ackers, Charlton, 1970; Milne, 1983; Callander, 1978; Hickin, 1977; Schumm, 1977]. Их результаты, полученные при анализе излучин на реках и в лабораторных условиях, также говорят о том, что связи параметров излучин с расходами воды аппроксимируются степенными зависимостями. При этом за-

рубежные исследователи предпочитают использовать в качестве основного параметра, характеризующего размер излучины, ее шаг. Показатель степени в подобных эмпирических зависимостях близок к значению, полученному Н.И. Маккавеевым (0,5), изменяясь у разных авторов и для различных условий руслоформирования от 0,39 до 0,66.

В отмеченных гидролого-морфологических построениях применялись традиционные методы определения параметров свободных излучин. Они заключаются в осреднении значений параметров всех излучин, находящихся на участке без учета стадии их развития и степени развитости, либо используются значения параметров различной обеспеченности. Иногда проводится выборка наиболее развитых излучин на рассматриваемом участке, исходя из представления, что именно они отвечают условиям руслоформирования. Такой подход вносит элемент субъективизма и не соответствует физике процесса развития излучин.

Полученные степенные зависимости радиуса кривизны r и шага излучин L от показателей водоносности $r(L) = kQ^n$, где $n < 1,0$, имеют эмпирический коэффициент k , смысл которого не раскрывается или устанавливается его связь с шириной дна долины [Чалов, 1979]. В то же время, результаты исследований гидролого-морфологических зависимостей отдельно на малых, средних и больших реках показали, что параметры излучин связаны с расходами воды линейной зависимостью. Таковы работы И.Г. Джухи [1990] по малым рекам таежной зоны (в пределах Вологодской области), И.Н. Павлова [1994] по малым рекам равнинной части Алтайского края, исследования А.С. Завадского и Р.С. Чалова [1996, 1997, 2000; Chalov, Zavadskiy, 1999], В.В. Ромашина [1968] на средних и крупных меандрирующих реках Северной Евразии.

Опыт региональных исследований показывает, что в разных регионах характерные размеры излучин одинаковых по водности рек могут различаться, иногда весьма значительно. Иллюстрацией могут служить данные по рекам бассейнов Дона и Восточной Сибири, для которых по крупномасштабным картам были измерены размеры излучин на относительно беспри точных широкопойменных участках рек. По бассейну Дона они характеризуют 40 участков, по Восточной Сибири, где преобладают врезанные русла, а сеть гидрологических наблюдений редка – лишь по 8 (на реках Енисее, Алдане, Муе, Чуне, Бирюсе, Оленеке, Индигирке). В соответствии с принятым подходом выбирались участки с излучинами сегментной формы и соотношением $l/L=1,4-1,7$. Участки с пологими или петлеобразными излучинами не рассматривались с целью избежать эффектов влияния стадии развития на параметры излучин. Поскольку далеко не всегда пригодные для морфометрических измерений участки рек были обеспечены гидрологической информацией, данные о расходах воды в таких случаях были получены путем интерполяции между гидрологическими постами (с рядом измерений не менее 20 лет) с учетом нарастания площади водосбора. В качестве характеристики водоносности рек принят среднегодовой расход воды Q_{cp} , интер-

поляционная процедура для которого дает более приемлемые результаты. Связь шага свободных излучин и среднегодового расхода воды приведена на рис. 66. Для рек бассейна Дона она описывается формулой $L = 119Q_{cp}^{0,37}$ ($R=0,85$), для рек Восточной Сибири – формулой $L = 172Q_{cp}^{0,45}$ ($R=0,67$). Два ряда данных пересекаются в интервале расходов 100-1000 м³/с. В этом интервале средний шаг излучин восточносибирских рек в 2-2,25 раза больше, чем в бассейне Дона.

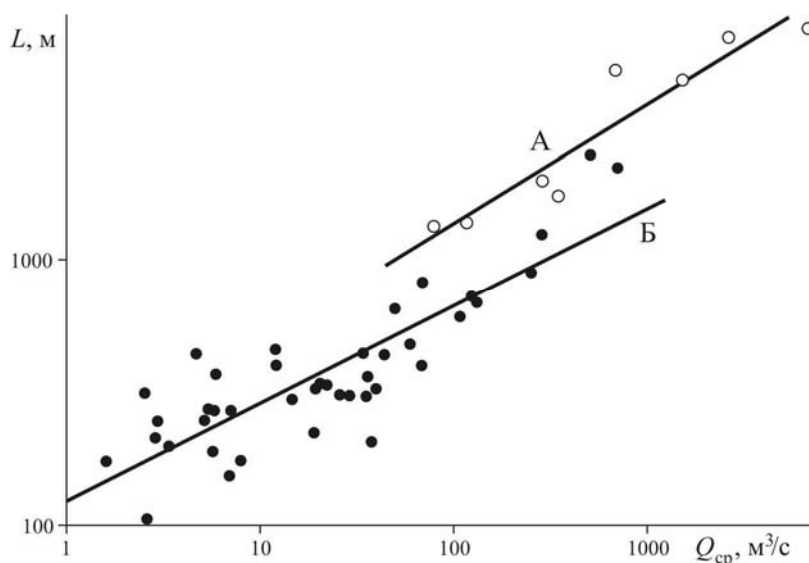


Рис. 66. Зависимость шага излучин L от среднегодового расхода воды Q_{cp} для рек Восточной Сибири (А) и бассейна Дона (Б).

Поскольку связи параметров русла с расходами воды имеют не физический, а корреляционный характер, они узко локализованы в пространстве (имеют региональный характер) и ограничены во временном измерении. По большому массиву данных Л. Леопольд и В. Уолман [Leopold, Wolman, 1960] получили низкую корреляцию между длиной волны (удвоенным шагом) излучин и руслонаполняющими расходами воды, сделав вывод, что размеры излучин зависят от ширины русла, а ширина определяется расходами воды, т.е. связь длины волны излучин и расходов воды – косвенная. Аналогичных представлений придерживается А.Ю. Сидорчук [1992], полагающий, что шаг меандрирования определяется размерами побочней – наиболее крупных образований в иерархии грядовых форм, которые в свою очередь контролируются шириной русла. Подтверждением этому служит график связи шага излучин с шириной русла в бровках поймы для излучин рек бассейна Дона и Восточной Сибири, которые ложатся на одну линию

(рис. 67). Однако ширина русла определяется, по крайней мере, шестью факторами: водоносностью реки, уклоном, морфодинамическим типом русла, стадией развития излучины, условиями развития русловых деформаций (свободные или ограниченные), устойчивостью русла. Это означает, что ширина русла, а значит и размер излучин, отражает всю совокупность компонентов природной обстановки в их историческом развитии, включая как ландшафтно-климатические, так и геолого-геоморфологические условия.

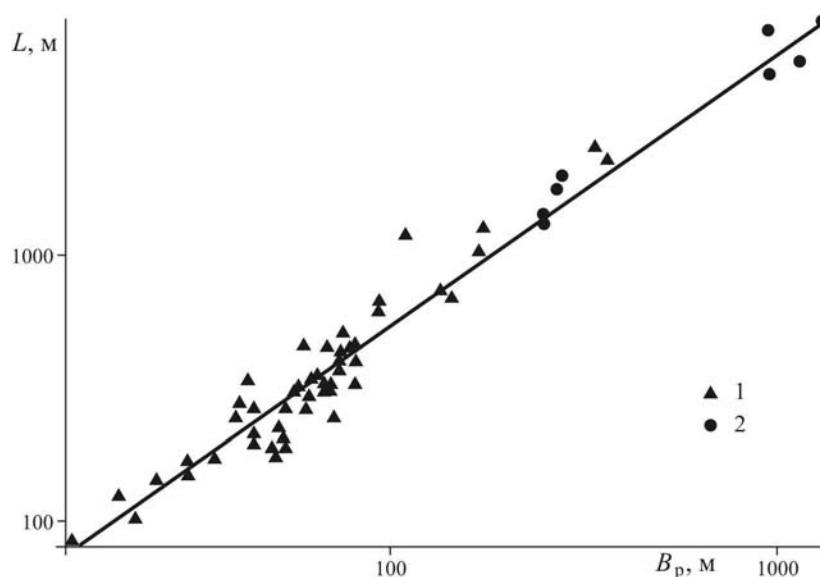


Рис. 67. Связь шага свободных излучин L с шириной русла в бровках поймы B_p : реки бассейна Дона (1) и Восточной Сибири (2).

С другой стороны, из рис. 67 следует, что в рассматриваемых регионах (бассейн Дона, Восточная Сибирь) ширина одинаковых по водоносности рек различается в 2-2,5 раза. Объяснение этому можно найти в прямой зависимости ширины широкопойменного русла от уклона. Действительно, при одинаковой водоносности рек уклоны дна долин восточносибирских рек в среднем в 2-3 раза выше по сравнению с таковыми в бассейне Дона (рис. 68). К. Карлстон [Carlston, 1965] приводит ряд примеров, иллюстрирующих увеличение шага излучин с увеличением уклона. Наиболее крупные излучины формируются в разветвленно-извилистых руслах, имеющих предельно высокие для меандрирующих рек данной водоносности уклоны.

Вместе с тем имеются основания говорить о том, что уклон русла оказывает на размеры излучин неоднозначное влияние. Д. Фридкин [Friedkin, 1945] наблюдал параллельное уменьшение ширины русла и шага

меандров с уменьшением наклона гидравлического лотка. Однако на реках можно найти примеры, когда значительные изменения уклона не сказываются на размерах излучин или размеры излучин уменьшаются с ростом уклона. Проблема состоит в многофакторности процесса: изменение уклона сопровождается (или, напротив, бывает вызвано) изменением скоростного поля потока, крупности наносов, морфометрических параметров русла (ширины, глубины), что, в свою очередь, может неоднозначно сказываться на размерах излучин. Подробно исследовавшие эту проблему Н.И. Маккавеев с соавторами [Экспериментальная геоморфология, 1969] заключают, что наилучшим образом синтезировать влияние этого множества факторов удается путем использования безразмерных критериальных показателей, таких как предложенный Н.И. Маккавеевым коэффициент стабильности русла $K_c = 1000 d/B_p I$. Лабораторные эксперименты показали, что с ростом стабильности русла шаг излучин убывает обратно пропорционально корню квадратному из K_c . Таким образом, если с ростом уклона устойчивость русла не снижается (например, уклон растет за счет увеличения относительной шероховатости русла – при зарастании русла водной растительностью), размеры излучин могут убывать. Если же с увеличением уклона растет кинетическая энергия потока и устойчивость русла снижается, радиус кривизны и шаг излучин должны возрастать.

Для устранения противоречий в вопросе оценки характера зависимости размеров форм меандрирующего русла от показателей водоносности, а также для выявления региональных различий в морфологии свободных излучин были исследованы свободномеандрирующие реки разных порядков со среднегодовыми расходами воды от 5 до 6500 м³/с. Для гидролого-морфологического анализа в качестве наиболее устойчивых параметров излучин были приняты шаг L и радиус кривизны r . Это позволило проводить сопоставление полученных результатов с данными других исследователей. В качестве показателей, характеризующих водоносность рек, были приняты среднемаксимальный расход воды (Q_{max}) и расход воды 30-дневной продолжительности (Q_{30}), наиболее близкий к руслоформирующим расходам воды среднего интервала (руслонаполняющему) и отображающий в первом приближении средний расход воды в период прохождения половодья.

График $r=f(Q_{30})$ для исследованных рек приведен на рис. 69А. Характер связи для всех рек – малых, средних и больших – представлен единой степенной зависимостью

$$r = 10,2(Q_{30})^{0,6}.$$

Аналогичную форму связи имеет зависимость $L=f(Q_{30})$ (рис. 69Б):

$$L = 23,3(Q_{30})^{0,6}.$$

Параметры уравнений регрессии для них, а также для аналогичных гидролого-морфологических зависимостей с использованием других пара-

метров свободных излучин приведены в таблице 14. Полученный результат подтверждает выводы Н.И. Маккавеева и других исследователей об общей степенной форме связи размеров излучин с показателями водоносности. При этом использование расхода воды 30-дневной продолжительности позволяет нивелировать, хотя и не в полной мере, региональные различия речных бассейнов и давать единую картину формирования свободных излучин.

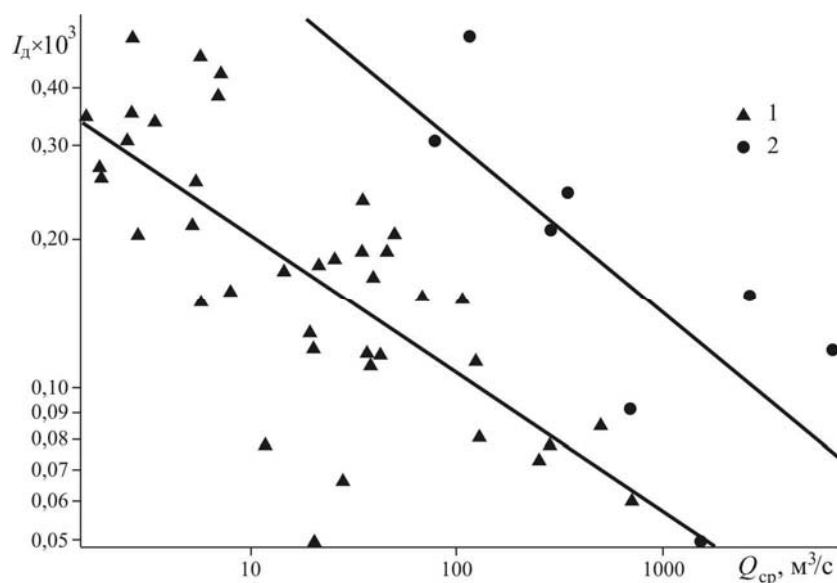


Рис. 68. Связь уклона дна долины и среднегодового расхода воды:
1 – излучины; 2 – разветвления.

Однако более подробный анализ зависимостей $r(L) = f(Q)^n$ позволяет разделить их на три части, каждая из которых соответствует малым, средним и большим, а также крупнейшим рекам. Это тем более целесообразно из-за достаточно большого разброса точек в общей зависимости, вследствие чего она может рассматриваться лишь как отражение общей закономерности вне зависимости от особенностей развития излучин в разных природных условиях. Для гидролого-морфологического анализа излучин малых рек были исследованы свободномеандрирующие участки русел притоков средней Оби, а также участки верхнего течения более крупных рек, которые здесь относятся еще к категории малых рек. При этом за малые принимались, в соответствии с исследованиями О.М. Пахомовой [2000], реки до 9-10 порядков (по системе А. Шайдеггера), у которых площади водосборов не превышают 20000 км², а среднегодовые расходы воды – менее 150 м³/с. В качестве средних и больших рассматривались реки со среднегодовым расходом воды менее 2000 м³/с.

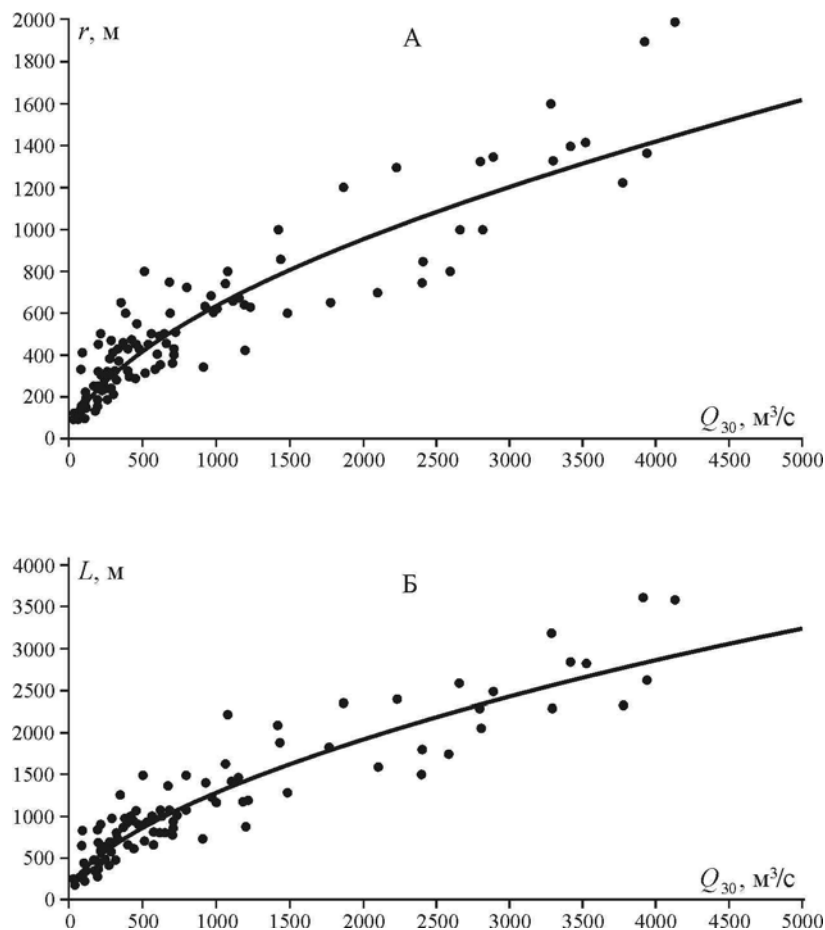


Рис. 69. Зависимость радиуса кривизны r (А) и шага L (Б) свободных излучин от расхода воды 30-дневной продолжительности Q_{30} для малых, средних и больших рек.

Для малых рек зависимость $r=f(Q_{30})$ имеет линейный характер. Она трансформируется в степенную при абсолютных значениях Q_{30} свыше 400 м³/с, что соответствует среднегодовым расходам воды порядка 150 – 200 м³/с. При этом происходит переход реки в категорию «средних». Аналогичная форма связи была получена И.Г. Джухой [1990] для рек Вологодской области. На средних реках график связи $r(L)=f(Q_{30})$ снова приобретает линейный вид и остается таковым для всех средних и больших рек. Таким образом, нелинейную зависимость параметров свободных излучин от показателей водоносности можно представить в виде двух линейных связей отдельно для «малых» и «средних-больших» рек (рис. 70).

Таблица 14. Параметры уравнений регрессии $y = aQ_{30}^x$ зависимостей параметров свободных излучин (y) от расхода воды 30-дневной продолжительности

Параметры уравнения	Параметры излучин				
	L	r	h	L	B
a	23	10	12	40	5
x	0,58	0,60	0,55	0,56	0,51

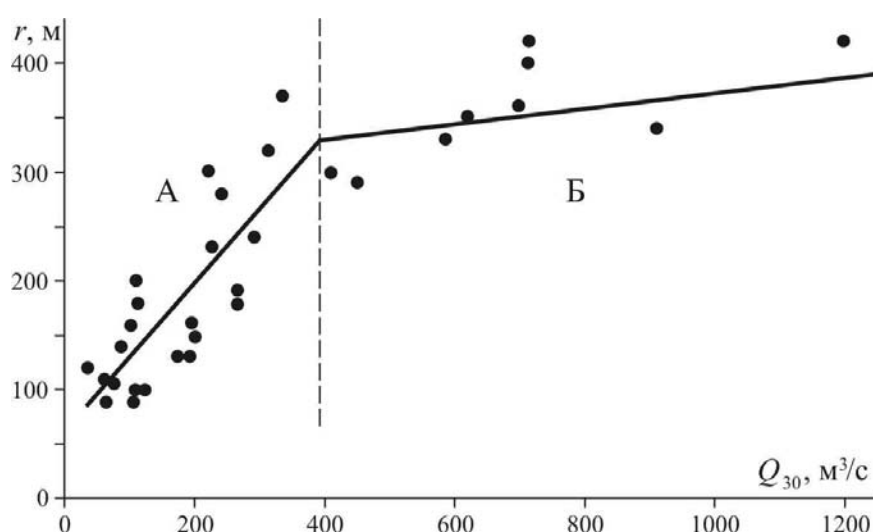


Рис. 70. Зависимость радиуса кривизны свободных излучин r от расхода воды 30-дневной продолжительности Q_{30} для малых (А) и средних (Б) рек (на примере рек бассейна Оби).

На крупнейших реках со среднегодовыми расходами воды, превышающими $2000 \text{ м}^3/\text{с}$, зависимость параметров излучин от расходов воды не прослеживается. К таковым относятся средний Амур и Иртыш в нижнем течении, причем последний – единственная в Северной Евразии река таких размеров, имеющая свободноеандрирующее русло практически до самого устья. Свободноандрирующий участок Иртыша (от г. Павлодара до устья) можно разделить на две части: до устья Тобола и ниже устья Тобола. До слияния с Тоболом Иртыш относится к большим рекам (по порядку и расходам воды). На этом участке (со среднегодовыми расходами воды менее $2000 \text{ м}^3/\text{с}$) характерные параметры излучин закономерно увеличиваются вниз по течению по мере роста водоносности. На нижнем Иртыше дальнейшее увеличение водоносности не приводит к изменению характерных параметров излучин, связь радиуса кри-

визны и шага излучины с расходами воды отсутствует (коэффициенты корреляции близки к нулю). Аналогичная картина наблюдается на среднем Амуре (между устьями Зеи и Уссури). Увеличение водоносности при впадении крупных притоков – Буреи и Сунгари – более чем в два раза не сказывается на значениях параметров свободных излучин. Характерные радиусы кривизны на различающихся по водоносности участках не изменяются, составляя около 3500 м [Завадский и др., 2000].

Различия в характере связей параметров излучин с показателями водоносности на малых и средних-больших реках можно объяснить особенностями скоростного поля потока и условиями развития поперечной циркуляции на излучинах рек разных порядков. Эти явления, обуславливающие формирование изгиба русла, по-разному проявляют себя в зависимости от относительной глубины потока – соотношения глубины h_p и ширины русла B_p . На реках первых порядков (малые реки) глубина и ширина потока представляют собой соизмеримые величины, в пределах от 0,1 до 0,02. Поперечная циркуляция, которая формируется на изгибе русла, охватывает в этом случае весь поток, вследствие чего руслоформирующий расход воды полностью участвует в формировании излучины. На реках более крупных порядков (средние и большие реки) относительная глубина составляет менее 0,01. В этих условиях поток, в соответствии с критерием квазиоднородности кинематической структуры И.Ф. Карасева (2.2), разделяется на несколько динамических осей. Поэтому непосредственное влияние на развитие излучины оказывает только часть расхода, формирующего русло. На крупнейших реках поперечная циркуляция, а также показатели водоносности перестают вообще сказываться в формировании излучин. Видимо, для каждой меандрирующей реки существует критический расход воды, превышение которого уже не приводит к росту параметров излучин.

Особое место занимают реки самых первых порядков со среднегодовыми расходами воды в первые $\text{м}^3/\text{с}$. Построение гидролого-морфологических зависимостей для подобных рек существенно осложняется, а в большинстве случаев становится невозможным вследствие чрезмерной генерализации очертаний русла даже на самых крупномасштабных планах. В результате рисунок русла отображается недостоверно, что не позволяет выделять отдельные русловые формы. Обычно водотоки таких размеров имеют на картах прямолинейные очертания, хотя в реальных условиях это характерно только для русел непосредственно ниже истоков (первые километры), когда водоток имеет порядок не более, чем 1-2. На этой стадии идет процесс насыщения потока наносами, вследствие чего происходит его врезаение. Однако по мере снижения вниз по течению уклонов, насыщения потока наносами, часть их начинает образовывать аккумулятивные формы руслового рельефа, что создает предпосылки для развития процесса меандрирования. В том случае, если водоток берет свое начало не на плакоре и эрозионных склонах, а на равнинной заболоченной территории, его русло

может иметь бочажинный характер вследствие малых уклонов и специфического характера болотной растительности.

При проведении исследований были использованы планы очень крупного масштаба малой реки Инсара, что позволило проанализировать изменение форм русла от самых его истоков. Река Инсар является притоком р. Алатыря (бассейн Волги), протекает по территории Мордовии, имеет площадь водосбора 3860 км² и длину – 168 км. Русло Инсара свободно меандрирует от самых верховьев до устья, кроме первых верхних 2-3 км, где носит прямолинейный врезанный характер. Благодаря экспедиционным исследованиям [Беркович и др., 1998] были получены, наряду с планами русла необходимой точности, гидрологические сведения об изменении водоносности реки по ее длине. Средний многолетний расход воды в устье равен 14 м³/с, у г. Саранска (96 км от устья, площадь водосбора 1630 км²) – 5,5 м³/с. Наибольший объем стока приходится на весеннее половодье (около 80%). Средний максимальный расход воды в Саранске составляет 310 м³/с, в устьевом створе – более 700 м³/с.

Таблица 15. Изменение гидрологических характеристик и морфометрических параметров свободных излучин по длине р. Инсара

Номер участка	Площадь водосбора, км ²	Расходы воды		Кол-во излучин	Параметры излучин						Расстояние от устья, км
		Q_{cp} , м ³ /с	Q_{max} , м ³ /с		L	h	l	r	B	l/L	
1	80	0,3	15	21	80	40	110	45	30	1,42	162-151
2	260	0,9	49	25	150	80	250	65	30	1,36	151-135
3	540	1,8	100	40	160	80	250	85	60	1,53	135-117
4	1240	4,2	240	9	200	100	260	120	60	1,52	117-100
5	1630	5,5	310	18	200	90	300	130	80	1,66	100-85
6	2060	7,4	390	34	210	90	330	120	70	1,63	85-51
7	2940	10	560	32	200	80	310	110	60	1,66	51-33
8	3420	12	650	12	200	100	330	110	70	1,64	33-26
9	3740	14	710	36	230	100	350	120	70	1,74	26-0

По полученным материалам проведен анализ связи параметров свободных излучин со среднегодовыми расходами воды (Q_{cp}). В таблице 15

приведены характерные значения параметров излучин и расходов воды по выделенным относительно бесприточным участкам. Зависимость $r=f(Q_{cp})$ имеет степенную форму (рис. 71), причем при достижении определенной величины расходов воды (начиная с участка 4) характерные значения параметров излучин перестают существенно изменяться.

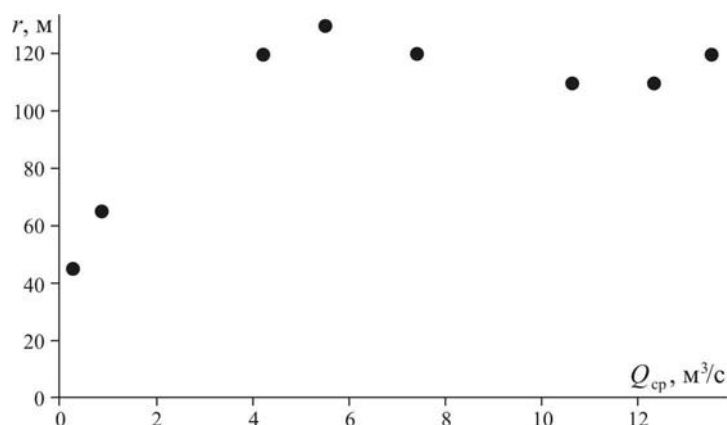


Рис. 71. Зависимость радиуса кривизны свободных излучин r р. Инсара от среднегодового расхода воды Q_{cp} .

Отличительной особенностью внутригодового распределения стока воды на малых реках является существенная дифференциация между расходами воды в межень и в период прохождения половодья. На Инсаре эти различия составляют несколько порядков. В связи с этим в русловых деформациях основная роль принадлежит расходам воды малой обеспеченности. Меженный поток протекает по сформированному в половодье руслу и практически не участвует в развитии форм русла как вследствие своей малой величины, так и недостаточной эрозионной способности. Поэтому наблюдается несоответствие между среднегодовыми расходами воды и параметрами излучин на Инсаре и на более крупных реках, имеющих аналогичные по размерам излучины (табл. 16). На более крупных реках излучины с радиусами кривизны 100-130 м формируются при величинах среднегодовых расходов воды, в 5-10 раз превышающих Q_{cp} на Инсаре.

Использование в качестве ведущего фактора формирования русла величины среднемаксимального расхода воды Q_{max} также не позволяет получить достоверных результатов. Его увеличение (более чем в два раза) в среднем и нижнем течении Инсара (от Саранска до устья) не приводит к изменению параметров русла (ширины) и размеров русловых форм (излучин). Определенная тенденция прослеживается только для верховьев реки. Ниже Саранска широкая пойма, затапливаемая в половодье, отвлекает на себя подавляющую часть потока. Вследствие этого удельный расход воды в

русле остается практически неизменным на всем протяжении реки вплоть до устья.

Таблица 16. Среднегодовые расходы воды на участках рек, имеющих близкие по размерам свободные излуины

Река, участок (расстояние от устья, км)	Характерный радиус кривизны r , м	Средний годовой расход воды $Q_{\text{ср}}$, м ³ /с
Инсар (117-0)	110 – 130	4 – 14
Нюролька (208-0)	100	30
Парабель (224-0)	190	75
Северский Донец (874-575)	150	45
Сысола (385-343)	110	25
Чая (171-131)	130	55
Чижапка (275-215)	100	30
Чузик (209-0)	90	30

Таким образом, для самых малых рек представляется необходимым разработка особых методов оценки влияния показателей водоносности на формирование русла, что существенно осложняется недостатком гидрологического и соответствующего картографического материала.

Для оценки влияния природных условий, в первую очередь – особенностей гидрологического режима, на процесс меандрирования были получены гидролого-морфологические зависимости между параметрами излучин (r , L) и среднемаксимальными расходами воды (Q_{max}). Они показывают, что общий характер связи подобен описанным выше зависимостям $r(L)=f(Q_{30})$. Графики $r(L)=f(Q_{\text{max}})$ представляет собой общую линейную зависимость для малых рек, которая постепенно трансформируется в степенную при переходе реки в разряд средней. Для средних и больших рек зависимости (рис. 72) аппроксимируются линейными функциями:

$$r(L) = aQ_{\text{max}} + C. \quad (3.11)$$

При этом для каждой реки зависимость имеет индивидуальный характер (параметры зависимости $r=f(Q_{\text{max}})$ приведены в табл. 17). Характер-

ные значения параметров излучин при одних и тех же величинах Q_{max} для каждой реки разные.

Коэффициент «а» в уравнении имеет региональный смысл, отражая особенности гидрологического режима рек. Одним из факторов, непосредственно влияющих на характер данной зависимости, является показатель внутригодового распределения стока, определяемого соотношением $Q_{cp}/Q_{max}=k$, где Q_{cp} – среднегодовой расход воды. Характеризуя естественную зарегулированность реки, коэффициент «k» закономерно изменяется, в зависимости от типа водного режима. Н.Е. Кондратьев [1968] отмечал, что внутригодовая неравномерность расходов воды сильно влияет на развитие излучин, воздействуя на их сезонные переформирования. Однако очевидно, что внутригодовое распределение стока является далеко не единственным природным фактором, определяющим региональный характер связи $r=f(Q_{max})$. На данную зависимость влияют также крупность руслообразующих наносов, уклоны дна долины, устойчивость русла и другие показатели, сочетание которых обуславливает различия в развитии свободных излучин на разных реках.

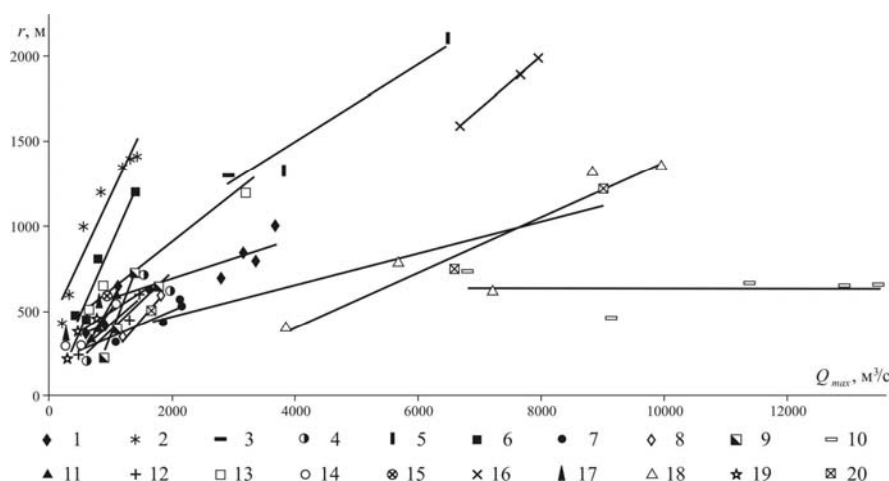


Рис. 72. Зависимость радиуса кривизны свободных излучин r от среднемаксимального расхода воды Q_{max} для средних и больших рек: 1 – Чулым; 2 – Вычегда; 3 – Кеть; 4 – Припять; 5 – Средний Иртыш; 6 – Белая; 7 – Десна; 8 – Тым; 9 – Сев. Донец; 10 – Урал; 11 – Васюган; 12 – Днестр; 13 – Неман; 14 – Конда; 15 – Аган; 16 – Вилуй; 17 – Тромъеган; 18 – Ока; 19 – Сысола; 20 – Яна.

На крупнейших реках (средний Амур, нижний Иртыш), также как и для зависимостей, где в качестве аргумента выступает Q_{30} , связи параметров излучин с Q_{max} не прослеживаются (рис. 73). Этот факт дополняется данными по р. Хуанхэ, на которой при среднемаксимальном расходе воды более

8000 м³/с параметры излучин могут принимать любые значения (при минимуме $r=2000$ м и $L=5000$ м) [Чалов и др., 2000].

Таблица 17. Параметры уравнений регрессии вида $r = aQ_{max} + C$ для средних и больших рек

Река	a	C	Коэффициент корреляции
Белая	0,83	62	96
Васюган	0,50	37	91
Вилой	0,31	-478	99
Вычегда	0,97	240	93
Десна	0,16	176	93
Днестр	0,32	103	87
Иртыш (среднее течение)	0,24	514	96
Кеть	0,43	-185	90
Конда	0,86	-61	96
Ока	0,16	-246	87
Припять	0,35	42	80
Северский Донец	0,92	-555	95
Тромъеган	0,23	268	99
Тым	1,30	-17	96
Урал	0,04	216	71
Чулым	0,16	337	77
Яна	0,09	282	87

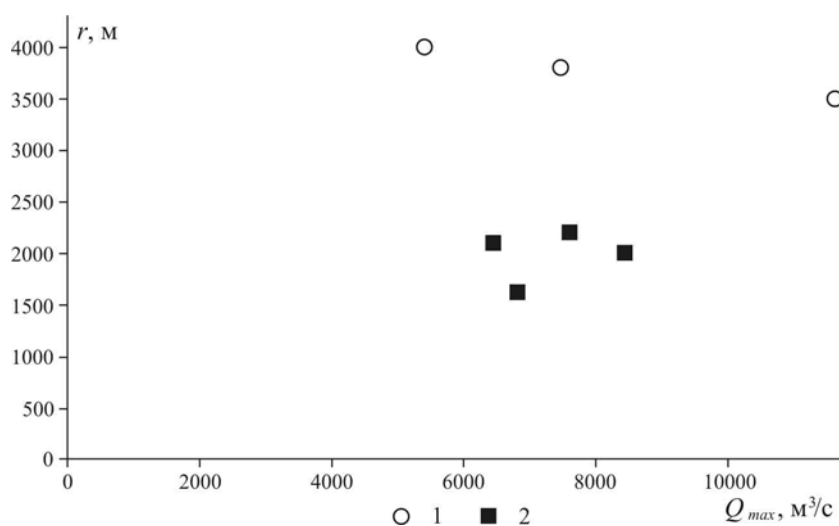


Рис. 73. Отсутствие связи радиусов кривизны свободных излучин r среднего Амура (1) и нижнего Иртыша (2) с среднемаксимальным расходом воды Q_{max} .

Таким образом, с увеличением показателей водоносности рек происходит изменение параметров излучин. Однако только радиус кривизны r и шаг излучины L обычно образуют устойчивые связи с показателями водоносности рек, возрастая при их увеличении. Для параметров, зависящих, главным образом, от формы излучин (l, h), эти связи более сложные: с изменением характерной формы излучин при увеличении размеров реки их значения могут снижаться, после чего вновь растут. Однако при разделении на стадии, соответствующие различной степени развитости излучин, была установлена однозначная линейная связь параметров l и h от среднемаксимального расхода воды для каждой стадии (рис. 74А, Б) при значениях коэффициента корреляции более 0,8.

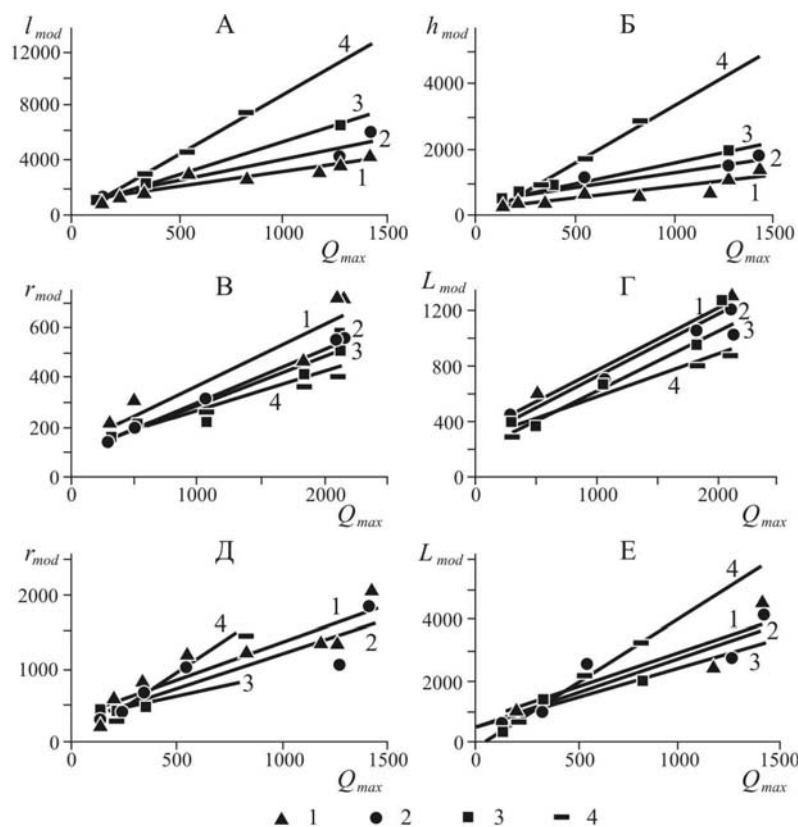


Рис. 74. Зависимость модальных значений длины $l_{\text{мод}}$ (А), стрелы прогиба $h_{\text{мод}}$ (Б) излучин р. Вычегды, радиуса кривизны $r_{\text{мод}}$ (В, Д) и шага $L_{\text{мод}}$ (Г, Е) излучин р. Десны (В, Г) и р. Вычегды (Д, Е) от среднемаксимального расхода воды Q_{max} на разных стадиях развития: 1 – сегментная пологая; 2 – сегментная развитая; 3 – сегментная крутая; 4 – омеговидная.

При этом коэффициенты в уравнениях регрессии закономерно увеличиваются от пологой сегментной к омеговидной (или синусоидальной) форме излучине (табл. 18). Таким образом, при отсутствии устойчивой связи $l(h)=f(Q)$ для всех излучин (вне зависимости от стадии развития) или модальных значений их параметров такая связь имеется для излучин, находящихся на определенной стадии развития.

Таблица 18. Коэффициенты k в уравнениях регрессии $l(h)=kQ_{cp}(Q_{max})+C$ в зависимости от стадии развития излучин

Расход воды	Стадия	Десна		Ока		Вычегда		Белая		Чулым	
		l	h	L	h	l	h	l	h	l	h
Среднегодовой, Q_{cp}	$1,1 < l/L < 1,4$	4,1	1,1	1,8	0,3	2,9	1,0	12,5	3,1	1,9	0,4
	$1,4 < l/L < 1,7$	5,2	1,9	1,9	0,5	4,1	1,3	13,0	4,1	2,6	0,9
	$1,7 < l/L < 2,0$	6,1	2,3			6,3	1,7	13,5	5,5	3,3	1,1
	$2,0 < l/L < 3,0$	6,1	2,7			11,2	4,5			3,2	1,2
Среднемаксимальный, Q_{max}	$1,1 < l/L < 1,4$	0,5	0,2	0,3	0,1	2,3	0,7	2,3	0,6	0,4	0,1
	$1,4 < l/L < 1,7$	0,7	0,3	0,3	0,1	3,3	1,0	2,6	0,8	0,5	0,2
	$1,7 < l/L < 2,0$	0,8	0,3			4,7	1,3	2,7	1,1	0,7	0,2
	$2,0 < l/L < 3,0$	0,8	0,4			8,8	3,5			0,7	0,3

Аналогичная дифференциация по стадиям развития излучин выявлена для связей параметров r и L с характеристиками стока воды (табл. 19). Но в отличие от выше рассмотренных, здесь происходит последовательное уменьшение коэффициентов в уравнениях регрессии при переходе от ранних стадий к поздним.

Таблица 19. Коэффициенты k в уравнении регрессии $r(L)=kQ_{cp}(Q_{max})+C$ в зависимости от стадии развития излучин

Расход воды	Стадия	Десна		Ока		Вычегда		Белая		Чулым	
		r	L	r	L	r	L	R	L	r	L
Среднегодовой, Q_{cp}	$1,1 < l/L < 1,4$	1,9	3,3	0,9	2,1	1,3	3,0	4,2	8,5	0,6	1,6
	$1,4 < l/L < 1,7$	1,5	3,2	0,7	1,3	1,2	2,9	4,2	7,8	0,6	1,9
	$1,7 < l/L < 2,0$	1,5	3,1			0,9	2,5	3,6	7,5	0,7	1,8
	$2,0 < l/L < 3,0$	1,2	2,3			2,3	5,4			0,6	1,3
Среднемаксимальный, Q_{max}	$1,1 < l/L < 1,4$	0,2	0,4	0,1	0,3	1,0	2,2	0,8	1,6	0,1	0,3
	$1,4 < l/L < 1,7$	0,2	0,4	0,1	0,2	0,9	2,2	0,8	1,5	0,1	0,4
	$1,7 < l/L < 2,0$	0,2	0,4			0,7	1,9	0,7	1,4	0,1	0,4
	$2,0 < l/L < 3,0$	0,1	0,3			1,8	4,2			0,1	0,3

Эта закономерность подтверждает тот факт, что в процессе развития сегментной излуины (увеличение кривизны) ее радиус кривизны и шаг постепенно уменьшаются. При переходе в стадию омеговидной излуины эти параметры могут, как продолжать уменьшаться, так и увеличиваться в зависимости от особенностей развития таких излуин на конкретном участке реки. Коэффициенты в полученных уравнениях регрессии и характер их изменения на поздних этапах эволюции излуин различны для рек, протекающих в разных природных условиях.

Таким образом, гидролого-морфологический анализ излуин, находящихся на разных стадиях развития, позволяет установить устойчивые связи параметров излуин с показателями водности, характер которых дифференцируется по рекам, определяясь региональными условиями формирования русел.

В качестве показателя водоносности при построении гидролого-морфологических зависимостей можно использовать площадь водосборного бассейна F . Этот показатель, по сравнению с среднемаксимальным расходом воды, с которым он связан через модуль стока, в еще большей мере учитывает региональные особенности условий руслоформирования. Поэтому зависимости типа $r(L)=f(F)$ также дифференцируются по рекам, причем для каждой конкретной реки связь прослеживается очень четко с высокими коэффициентами корреляции (около 0,9). Зависимость $r(L)=f(F)$ имеет степенную форму, которую также можно представить в виде двух отдельных линейных графиков для малых и средних (больших) рек (рис. 75). Характер зависимости по мере нарастания площади водосбора изменяется при $F \approx 17000 \text{ км}^2$ (для Васюгана). На других реках подобный переход также прослеживается в интервале площадей водосбора от 10000 до 20000 км^2 , что соответствует среднегодовым расходам воды (Q_{cp}) от 50 до 150 $\text{м}^3/\text{с}$.

В некоторых случаях правомерно использование в качестве показателя водоносности такого параметра как длина реки, а точнее – расстояние от истока. Это обуславливается зависимостью этого показателя от площади водосбора, который связан, в свою очередь, с расходами воды. Данный подход применим в условиях недостаточной освещенности исследуемой реки гидрологической информацией. Подобные связи на некоторых реках характеризуются высокими коэффициентами корреляции (более 0,9) и линейным видом зависимости. На рисунке 76 представлены зависимости $r=f(S)$, где S – среднее расстояние однородных по водоносности (бесприточных) участков от истока (в километрах) для Вычегды и Сысолы.

Исследования, проведенные более чем на 30 малых, средних, больших и крупнейших меандрирующих реках Европейской России, Сибири, Дальнего Востока [Пахомова, 2001] позволили выявить различия в характере связи порядковой структуры речной сети с характерными (модальными) значениями параметров свободных излуин.

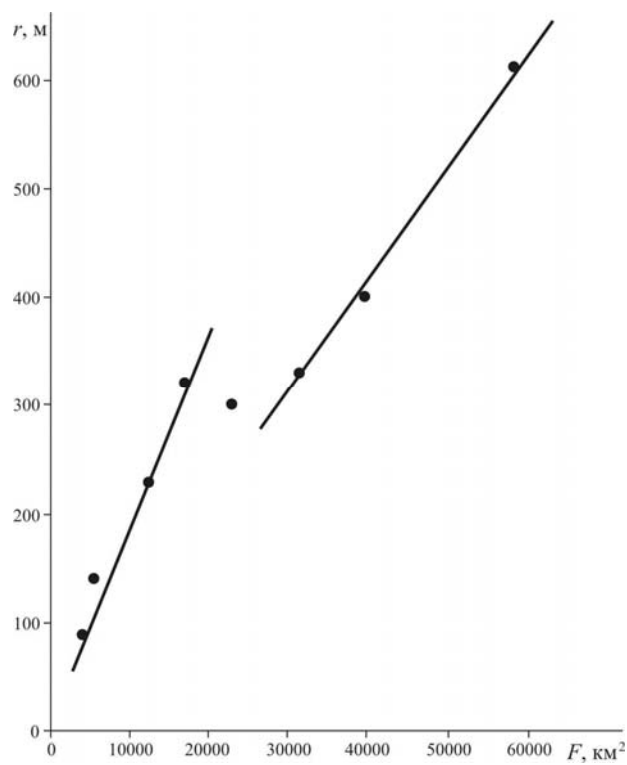


Рис. 75. Зависимость характерных значений радиусов кривизны свободных излучин r р. Васюгана от площади водосбора F .

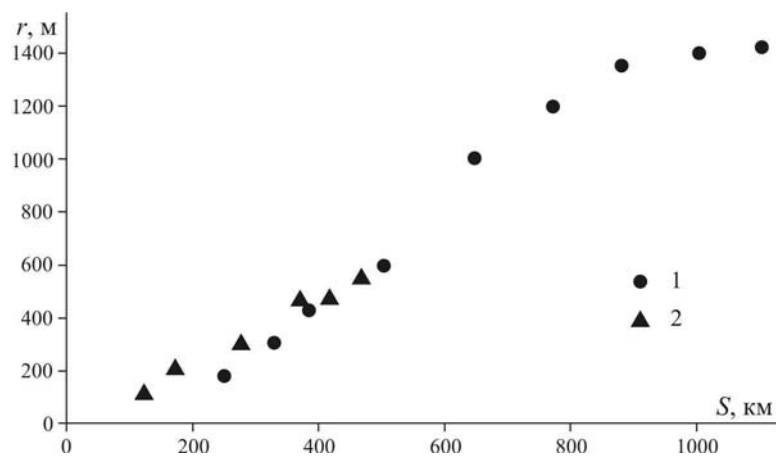


Рис. 76. Связь характерных радиусов кривизны r свободных излучин Вычегды (1) и Сысолы (2) с средним расстоянием выделенных участков S от истока.

Основные характерные параметры свободных излучин (r , h , l , L) возрастают с увеличением порядка реки N (рис. 77), что соответствует их связи с характеристиками водности рек, возрастающими в этом же направлении. Вместе с тем, анализ распределения параметров для основных типов излучин (сегментных, омеговидных и синусоидальных) выявил на графиках связи $L=f(N)$ и $r=f(N)$ (рис. 77А, Б) разделение поля точек на две большие группы – первая из них принадлежит сегментным и омеговидным излучинам, а вторая, расположенная ниже, синусоидальным. На графиках $l=f(N)$ и $h=f(N)$ (рис. 77В, Г) наоборот, верхнее поле точек соответствует омеговидным излучинам, нижнее – сегментным; синусоидальные излучины занимают промежуточную позицию.

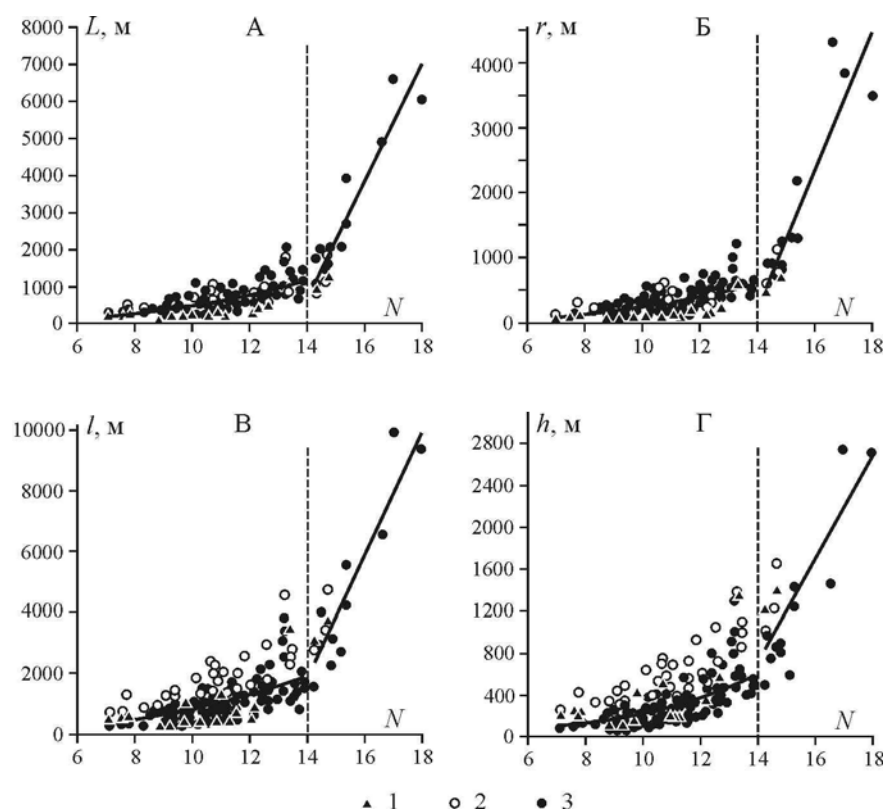


Рис. 77. Изменение параметров свободных излучин на реках различных порядков [Пахомова, 2001]: А – шага L ; Б – радиуса кривизны r ; В – длины l ; Г – стрелы прогиба h .

Таким образом, графики отражают оба варианта развития сегментных излучин: при одном и том же порядке реки они либо уменьшают шаг и

радиус кривизны при увеличивающейся стреле прогиба и длине и становятся синусоидальными излучинами, либо, практически не меняя шаг и радиус кривизны, резко увеличивают стрелу прогиба и длину и становятся омега-видными. Кроме того, для всех графиков характерно то, что точка перегиба кривых приходится на 14 порядок, выше которого зависимости принимают линейный вид. Если значение $N=14$ принять в качестве границы между средними и большими реками, то связи параметр – порядок аппроксимируются уравнениями разных видов (табл. 20).

Таблица 20. Уравнения связи между параметрами излучин и порядком рек (R – корреляционное отношение)

Порядок реки	Размеры рек	Параметры излучин			
		L	r	l	h
$N < 14$	Малые и средние	$L = 20,6e^{0,291N}$ $R = 0,71$	$r = 9,33e^{0,300N}$ $R = 0,69$	$l = 55,4e^{0,253N}$ $R = 0,65$	$h = 19,6e^{0,244N}$ $R = 0,59$
$N > 14$	Большие	$L = 1804N + 211$ $R = 0,90$	$r = 1068N - 14736$ $R = 0,92$	$l = 2078N - 27397$ $R = 0,90$	$h = 493N - 6216$ $R = 0,82$

Уточнение связей параметров излучин с характерными расходами воды возможно путем введения дополнительных критериев. Основываясь на предложенной Н.И. Маккавеевым зависимости размера излучин от расходов воды и уклона (3.10), в зависимость $r = f(Q_{max})$ для излучин р. Сысолы было дополнительно введено значение уклона водной поверхности, определенного для бесприточных участков по топографическим картам. Полученное уравнение связи

$$r = 1,9(Q_{max})^{0,5} I^{-1} \quad (3.12)$$

более точно отображает характер изменения размеров излучин вниз по течению реки (рис. 78). Таким образом, введение дополнительных критериев позволяет в ряде случаев существенно улучшать характер связи между параметрами излучин и природными факторами, влияющими на их формирование.

Количественные зависимости между отдельными параметрами, например, между шагом излучины и радиусом кривизны, шагом излучины, радиусом кривизны и шириной русла достаточно часто используются при гидролого-морфологическом анализе меандрирующих русел. Некоторые из соотношений (степень развитости l/L , коэффициент формы r/h) сами выступают в роли параметров, характеризующих стадию развития излучины. Зависимость между этими двумя параметрами имеет обратную степенную связь. На рис. 79А представлен график $l/L = f(r/h)$ для осредненных значений l/L и

r/h по всем исследованным участкам рек, который аппроксимируется уравнением

$$l/L = 2,4(r/h)^{-1,5}. \quad (3.13)$$

Между наиболее устойчивыми в процессе развития излучин параметрами (L и r) получена единая линейная связь для всех используемых в анализе излучин. Она аппроксимируется линейной зависимостью $r=0,5L+C$. Значение коэффициента практически постоянно также для каждой отдельной реки, изменяясь в пределах 15% (от 0,41 до 0,55). Нет различий в значении коэффициента и в зависимости $r=f(L)$, полученной для характерных на бесприточных участках значений параметров (рис. 79Б). Она аппроксимируется уравнением $r = 0,5L$.

Исключения составляют участки меандрирующего русла с большим числом асимметричных излучин или участки с широким распространением синусоидальных излучин, как, например, в нижнем течении Днестра, где значение коэффициента равно 0,3.

Все приведенные гидролого-морфологические зависимости относятся только к свободным излучинам. Для излучин с ограниченными условиями развития русловых деформаций характер связи между параметрами излучин имеет иную форму. Так, по данным Б.В. Матвеева [1985], для врезаемых излучин значение коэффициента в зависимости $r=f(L)$ больше полученного для свободных излучин.

Зависимости между параметрами излучин в ряде случаев существенно трансформируются в процессе эволюции излучин. Поэтому некоторые из них (зависимости длины излучины от стрелы прогиба; радиуса кривизны от ширины русла; шага от стрелы прогиба) легли в основу критериев при классификации свободных излучин по стадиям их развития. Однако дифференциация связей между некоторыми параметрами по типам излучин не препятствует выявлению общих уравнений для всех излучин, как это имеет место в случае с зависимостью $r = f(L)$. В таблице 21 приведены параметры уравнений регрессии для наиболее тесных связей между морфометрическими параметрами сегментных излучин, которые можно использовать при исследованиях морфометрии извилистых русел. Единые зависимости достаточно четко прослеживаются между большинством параметров для сегментных излучин. Если учесть, что общая доля сегментных излучин на меандрирующих реках составляет около 80%, а на ряде рек излучины других форм практически полностью отсутствуют (Амур, Вилуй, Хуанхэ), то представляется вполне правомерным использование зависимостей, полученных для сегментных излучин, для всех меандрирующих русел. Исключения стоит делать только для тех рек, где доля излучин других типов превышает 30%.

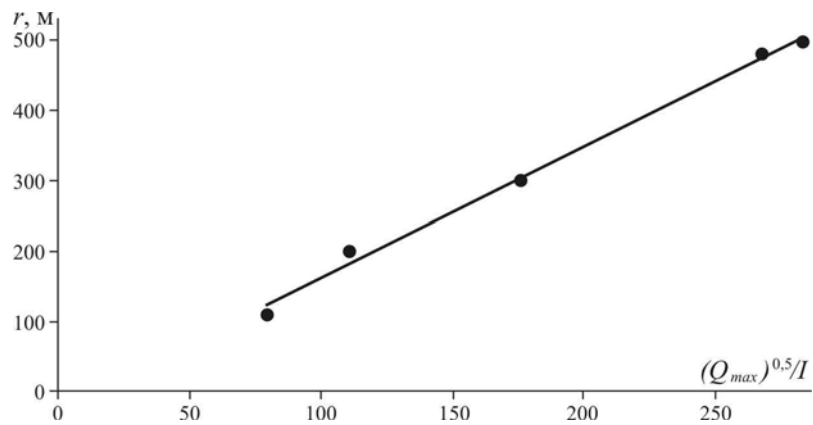


Рис. 78. Зависимость радиуса кривизны r свободных излучин р. Сысолы от показателя $(Q_{\max})^{0.5}/I$.

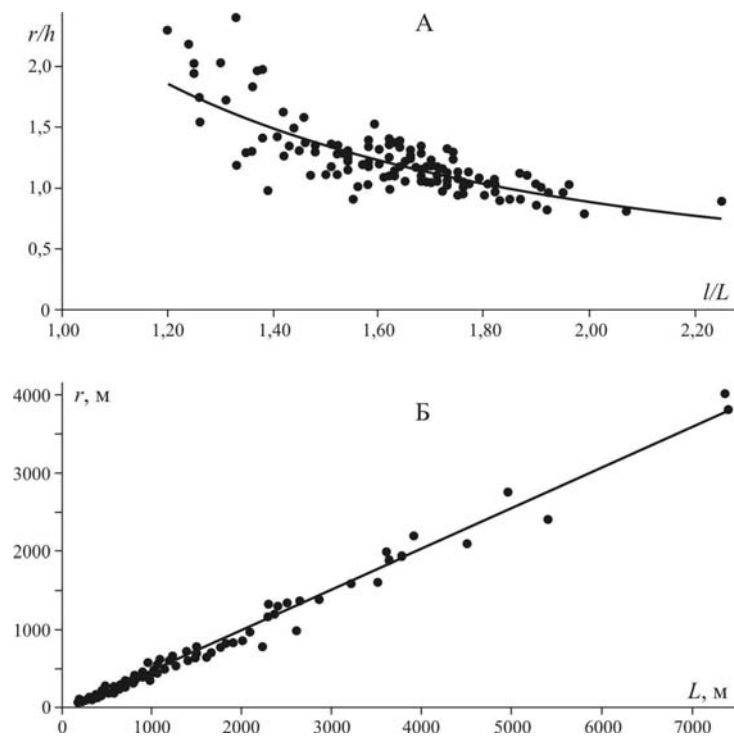


Рис. 79. Зависимости коэффициента формы r/h от степени развитости l/L свободных излучин (А) и радиуса кривизны r от шага свободных излучин L (Б).

Таблица 21. Параметры уравнений регрессии вида $y = a_l x + C$ и коэффициенты корреляции R между параметрами свободных излучин

x	Параметры уравнения	Параметры излучин “ y ”				
		L	h	l	r	B
L	a_l	-	0,4	1,34	0,52	0,14
	C	-	37	140	-23	-2
	R	-	0,92	0,98	0,98	0,83
h	a_l		-	3,52	0,96	0,21
	C		-	-48	31	29
	R		-	0,96	0,91	0,73
l	a_l			-	0,31	0,1
	C			-	12	18
	R			-	0,93	0,78
r	a_l				-	0,27
	C				-	5
	R				-	0,84

3.5. Изменение параметров излучин по длине рек



С увеличением вниз по течению водоносности и морфометрических характеристик русел рек (ширины B_p , глубины h_p и их соотношения h_p/B_p) происходит закономерное изменение характерных параметров свободных излучин: шага L , стрелы прогиба h , радиуса кривизны r , длины l и ширины русла в вершине B . Это подтверждается результатами исследований на реках Северной Евразии. Исключение составляют параметры излучин крупнейших рек – нижнего Иртыша, среднего Амура (со среднегодовыми расходами воды более 2000 м³/с), которые остаются относительно постоянными, несмотря на увеличения вниз по течению водоносности. Также нет закономерных изменений параметров излучин на р. Янцзы [Чалов и др., 2000].

При анализе изменения параметров излучин по длине рек необходимо учитывать не только показатели водоносности, но и трансформацию преобладающей формы свободных излучин по длине рек. Поэтому в качестве характерных следует рассматривать модальные (или имеющие 50%-ю обеспеченность) значения параметров на участке, определенные для всех излучин, находящихся на разных стадиях развития (в отличие от принятого выше анализа параметров излучин, находящихся на стадии развитой сегментной с соотношением $l/L=1,4-1,7$). При общей тенденции к увеличению размеров излучин с ростом водоносности, только радиус кривизны, шаг и ширина русла в вершине излучины достаточно четко подчиняются этой закономерности, хотя и для них иногда наблюдаются отклонения. Значения остальных параметров могут уменьшаться на отдельных участках рек, после чего вновь происходит их увеличение. Графики изменения по длине русла таких параметров имеют максимумы и минимумы, положения которых обычно на каждой реке совпадают. Причина таких колебаний чаще всего заключается в смене преобладающей вниз по течению формы излучин, на-

пример, сегментной развитой на сегментную пологую. Это проявляется в изменении такого относительного безразмерного показателя, как среднее значение степени развитости излучин l/L : при снижении средней величины l/L сохраняется тенденция к увеличению r , L и B , но уменьшаются характерные значения других параметров (рис. 80). Наиболее отчетливо это наблюдается в нижних течениях рек.

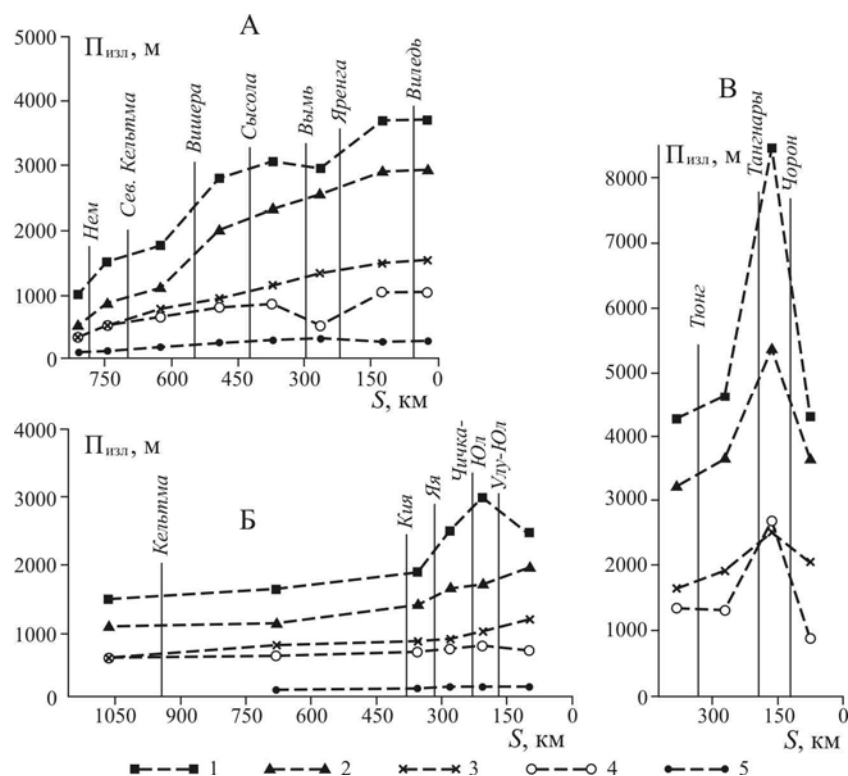


Рис. 80. Изменение модальных значений параметров свободных значений ($P_{изл}$) по длине рек: А – Вычегда, Б – Чулым, В – Вилюй; S – расстояние от устья; параметры: 1 – l , 2 – L , 3 – r , 4 – l , 5 – B .

Учет трансформации преобладающих форм излучин при анализе изменения характерных параметров вниз по течению позволяет интерпретировать это явление. Например, уменьшение некоторых параметров излучин, в частности, h и l на Вычегде (ниже слияния с р. Вымью) вызвано уменьшением общей извилистости русла и преобладающим развитием пологих сегментных излучин, а также появлением отдельных участков с разветвленно-извилистым руслом. Уменьшение параметров излучин на Вычегде было отмечено также А.Ю. Сидорчуком [1992]. Однако выполненный

им анализ изменения параметров без связи с формой излучин привел его к выводу об уменьшении размеров излучин при увеличении водоносности 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).

В некоторых случаях причиной уменьшения параметров излучин вниз по течению может служить смена морфодинамического типа русла. Это наблюдается на Вилуе, где нижний участок (122-40 км) является переходным от меандрирующего к разветвленному, и здесь преобладает разветвленно-извилистое русло, т.е. излучины, у которых шпоры представлены системой островов [Белый, Борсук и др., 1983]. Вследствие этого в период прохождения руслоформирующих расходов воды часть водных масс отвлекается в многочисленные рукава, расчленяющие пойменные сегменты, благодаря чему излучины главного русла имеют меньшие размеры по сравнению с излучинами на выше расположенных участках, где сегменты представлены консолидированными пойменными массивами.

Причина уменьшения параметров излучин на нижнем Днестре объясняется снижением водоносности вниз по течению (рис. 81А). На 155 км от устья Днестр разделяется на собственно Днестр и левый рукав – протоку Турунчук, которая отводит от 51 до 69% его стока [Беркович, Злотина и др., 1992] в зависимости от уровня воды. Это является причиной уменьшения размеров излучин ниже по течению.

Подобные явления, но в более локальных условиях, наблюдаются на реках с пойменной многорукавностью. Например, на Вычегде пойменные ответвления – полои – забирают иногда до 30-40% общего расхода воды; в результате, ниже их истоков происходит резкое уменьшение параметров излучин, а сами излучины имеют более развитую форму, хотя в целом для участка реки такие излучины не характерны.

Иногда уменьшение показателей водоносности вниз по течению объясняется особенностями водного баланса на водосборе, т.е. избыточным испарением в аридных регионах (нижний Урал), что иногда усиливается антропогенным воздействием (забор воды на орошение). Например, на Хуанхэ, наряду с испарением, происходит интенсивный водозабор, и оба эти фактора уменьшают водоносность реки более чем в 2 раза [Чалов и др., 2000]. Но если на Хуанхэ уменьшение расходов воды приводит к закономерному уменьшению параметров свободных излучин (рис. 81Б), то на Урале оно практически не сказывается на их размерах. Это свидетельствует о многообразии факторов, влияющих на русловые формы, среди которых показатели водоносности не всегда являются ведущими. Поэтому, основываясь только на картографическом материале, выявить причины уменьшения параметров излучин вниз по течению, в ряде случаев оказывается невозможно. Например, на отдельных участках рек Белой, Васюгана, Припяти, нижней Вычегды большую роль играют местные особенности речных долин (ширина днища долины, характер пойменных отложений и т.д.).

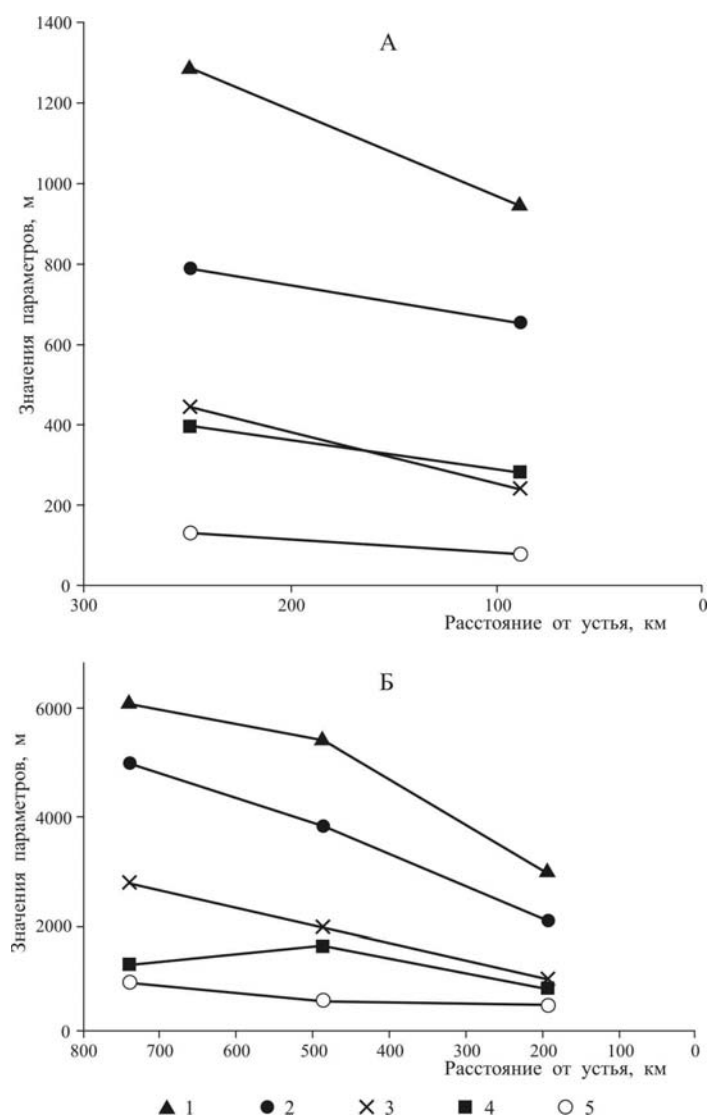


Рис. 81. Уменьшение параметров свободных излучин вниз по течению на Днестре (А) и Хуанхэ (Б): 1-5 – см. рис. 80.

Более сложный характер изменения по длине рек имеют относительные (безразмерные) параметры – степень развитости l/L и коэффициент формы излучин r/h . Поскольку с увеличением размеров излучин (и радиусов их кривизны) ослабевает роль поперечной циркуляции, свойственной извилистому руслу и являющейся одним из основных факторов его развития,

прослеживается общая тенденция к уменьшению средней величины l/L вниз по течению. Наиболее четко она проявляется на реках, значительных по протяженности, которые, по мере увеличения водоносности, последовательно переходят из категории малых в категорию больших (Вычегда, Чулым), хотя в той или иной мере это характерно для большинства рек. При прочих равных условиях, малые реки имеют более извилистое русло, чем средние и тем более большие.

Среднее значение параметра r/h также связано с характером извилистости русла, хотя его трансформация по длине имеет более неопределенный характер, т.е. может не зависеть от показателей водоносности, хотя в целом постепенно увеличивается от верхних участков к устью (рис. 82). Однако, т.к. минимальные значения r/h характерны для наиболее развитых излучин, а максимальные – для пологих сегментных излучин, то прослеживается обратная связь r/h с изменением по длине реки средней степени развитости излучин.

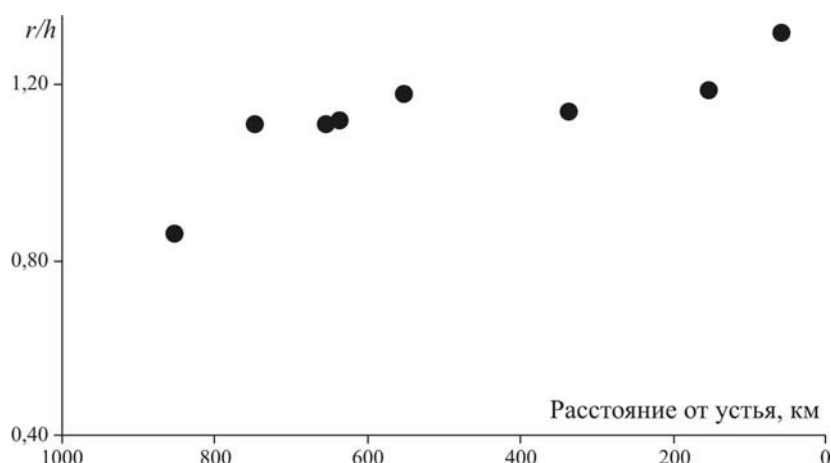


Рис. 82. Изменение показателя коэффициента формы r/h свободных излучин на р. Васюгане.

3.6. Разветвленно-извилистые русла и меандрирование рукавов



Переходной между излучинами и разветвлениями на рукава является такая форма русла, которая сохраняет извилистые в плане очертания, имеет присущие излучинам генезис и механизм смещения, но отличается образованием у выпуклого берега островов, составляющих большую или меньшую часть шпоры излучины. При этом линия подмываемого берега характеризуется четко выраженной вогнутостью, ниже плеча которой,

обычно совпадающего с точкой перегиба между смежными излучинами, формируются острова (рис. 83А). Это отличает разветвленно-извилистое русло от русла с чередующимися односторонними разветвлениями, которое в бровках поймы имеет близкие к прямолинейным очертания (рис. 83Б). Если в первом случае по мере развития излучины происходит причленение островов к пойме, что приводит к ее росту в шпоре излучины и способствует дальнейшему ее искривлению, то во втором в зависимости от местных особенностей русловых переформирований, в т.ч. связанных с перемещением побочней, кос и других крупных гряд, динамическая ось потока может периодически располагаться на перевале от одного берега к другому среди островов, составляющих шпоры смежных излучин, разрабатывая здесь рукава и обуславливая блуждание главного течения реки.

Специфической особенностью разветвленно-извилистого русла является частичное отвлечение стока воды в рукава, проходящие между островами, составляющими шпору излучины. Суммарно в них может уходить до 30% расхода воды. Как правило, водность их повышается в многоводную фазу режима и уменьшается в межень, иногда вплоть до почти полного обсыхания (доля расхода от общего сокращается до 1-2%). Это определяет снижение параметров излучин (радиуса, шага и т.д.) по сравнению с типичными излучинами, размеры которых при такой же водоносности реки оказываются большими. Например, у развитых излучин разветвленно-извилистого русла ниже Вычегды их шаг и радиус кривизны в 2,3-2,5, а на нижнем Вилюе – в 3,6-4,0 раза меньше, чем у развитых сегментных излучин на смежных участках этих рек (табл. 22).

Наличие рукавов, расчленяющих шпоры излучин разветвленно-извилистого русла, обуславливает спрямление последних уже на стадии развитой сегментной излучины при соотношении $l/L=1,4-1,7$, причем нередко оно происходит уже при его минимальных значениях (1,4-1,5). В результате излучины разветвленно-извилистого русла почти никогда не бывают крутыми.

Наряду с разветвленно-извилистым руслом часто встречаются меандрирующие рукава разветвленных русел. При этом выделяется четыре основных разновидности этого явления:

- 1) образование одной излучины рукава, шаг которой совпадает с длиной (шагом) разветвления;
- 2) формирование в рукаве двух-трех смежных излучин;
- 3) развитие излучин пойменно-русловых разветвлений;
- 4) меандрирование пойменных протоков (ответвлений) при наличии на реке пойменной многоруканности.

Первые две разновидности характерны для одиночных и сопряженных разветвлений русла [Чалов, 1979, 1997]. Известно, что оптимальной с точки зрения гидравлических сопротивлений является форма разветвления (острова), при которой соотношения длины острова (шага разветвления) L_o и его ширины B_o равно приблизительно $L_o/B_o=3-4$ [Baker, 1977; Komar,

1983]. В этом случае острова имеют каплевидную или веретенообразную форму, которая мало меняется во времени в ходе переформирования русла; рукава обычно образуют пологие изгибы возле острова, но соотношение у них $l/L < 1,10-1,15$, т.е. русла их относятся к относительно прямолинейным. Если соотношения $L_o/B_o = 3-4$ нарушается, то при $L_o/B_o < 3-4$ преобладают сопротивления формы, и в этом случае развивается излучина одного из рукавов, а остров растет за счет увеличения его ширины в поперечном к оси долины направлении; при $L_o/B_o > 3-4$ в потоке растут сопротивления трения, вследствие чего острова удлиняются, и в рукавах создаются условия для образования излучин или разветвлений 2-го порядка.

Меандрирование рукавов первого типа чаще всего встречается у одиночных разветвлений (рис. 84). Развитие излучины одного из рукавов до соотношения $l/L = 1,4-1,5$ приводит к перераспределению стока между рукавами, главное течение реки перемещается в более прямой рукав, тогда как извилистый мелеет и, если нет поддерживающих его условий (например, направляющего воздействия мыса коренного берега), отмирает. Во вновь развивающемся рукаве или сформировавшемся при отмирании извилистого рукава относительно прямолинейном русле возникает новое разветвление, один из рукавов которого начинает меандрировать, и весь процесс повторяется. В приведенном на рис. 84 примере (Елобогатское разветвление на р. Оби) развитие излучины рукава и его отмирание за 100-летний период происходило два раза, причем последний раз – в 80-е годы XX столетия, когда этот процесс был ускорен разработкой дноуглубительной прорези по развивающемуся прямому левому рукаву. Анализ топографических, лоцманских карт и аэрофотоснимков показал, что в прошлом такие переформирования – развитие излучины рукава и ее спрямление – повторялись неоднократно. Характерно, что в данном примере полного отмирания рукавов с развитой излучиной не происходило. В результате возникло разветвление веерного типа.

На р. Янцзы весь цикл переформирования (образование острова – образование излучины рукава – его отмирание – формирование нового острова) составляет от первых нескольких десятков до 150 и более лет. При этом на Янцзы распространены асимметричные разветвления, в которых изогнутый рукав, находящийся под направляющим воздействием плеча коренного берега, приобретает вид заваленной излучины, вершина которой смещена вниз по течению ("голова утки", по терминологии китайских исследователей). На рис. 85 показано развитие одного из самых динамичных таких разветвлений, в котором за 50 лет дважды происходило спрямление русла. Размыв вогнутого берега в рукаве развивающейся излучины составляет 80-90 м/год.

Роль выступов и мысов в формировании веерных разветвлений с заваленными излучинами отчетливо прослеживается на рис. 86. Здесь еще в середине XIX столетия горный массив непосредственно выше по течению плавно обтекался рекой, не образуя вдающегося в реку мыса. По мере его

обособления и усиления направляющего воздействия на поток стржень потока все более отклонялся от правого берега, происходило увеличение размеров острова и развитие излучины левого рукава возле него. В начале 60-х годов соотношение l/L по этому рукаву достигло 2,2, вследствие чего поток переместился в более прямой рукав, в начале которого уже зафиксировано формирование нового острова.

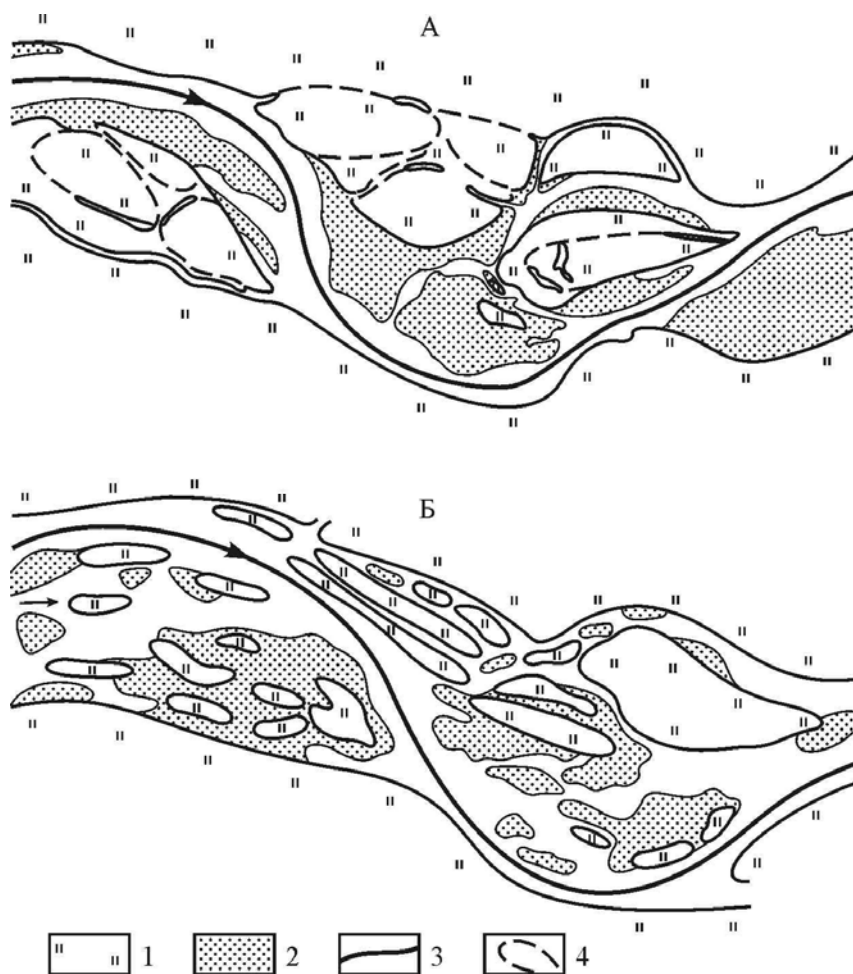


Рис. 83. Разветленно-извилистое русло р. Вычегды в нижнем течении (А) и русло р. Оби с чередующимися односторонними разветвлениями (Б): 1 – пойма; 2 – песчаные отмели; 3 – динамическая ось потока; 4 – контуры причленившихся к пойме островов.

Таблица 22. Параметры развитых сегментных излучин и излучин разветвленно-извилистого русла на нижней Вычегде и нижнем Вилуе

Река	$Q_{ср.}$ м ³ /с	Разветвленно-извилистое русло		Развитые сегментные излучины	
		r , м	L , м	r , м	L , м
Вычегда	1000	600	1100	1400	2800
Вилуей	1360	500	1000	2000	3600

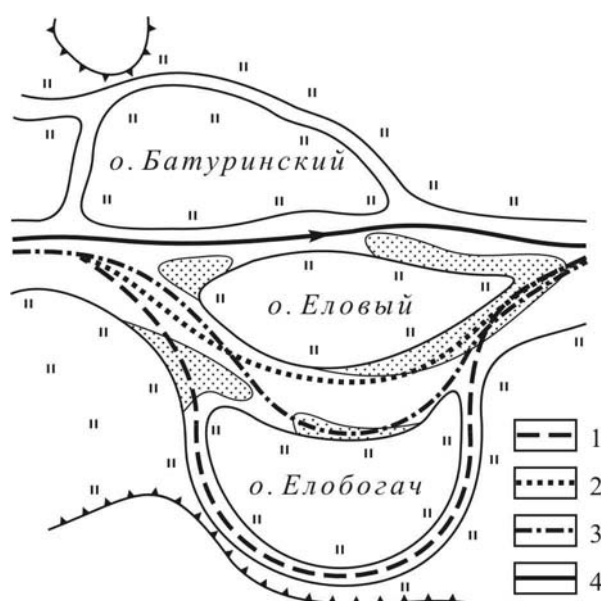


Рис. 84. Развитие излучин рукавов одиночного разветвления веерного типа на р. Оби. Положение стрежня потока: 1 – в конце XIX в.; 2 – в 30-е годы XX в.; 3 – в 60-е годы XX в.; 4 – современное.

В разветвлениях второго типа меандрирование рукавов начинается как следствие их избыточного удлинения, когда шаг их (длина острова) L_o превышает шаг излучин L , свойственный данной реке. Однако, т.к. в рукаве сосредотачивается только часть расхода воды, формирующиеся излучины имеют параметры, отвечающие его водности и, соответственно, меньшие, чем у излучин на неразветвленных участках русла или участках с чередующимися разветвлениями, в которых основной рукав забирает до 90% расхода воды (табл. 23). При этом часты случаи, когда такие излучины рукавов развиваются по схеме образования разветвленно-извилистого русла, т.е. сопровождаются образованием островов у выпуклых берегов. Таковы, на-

пример, центральные излучины левых рукавов у Умревинского и Барковского островов на Оби (рис. 87А). Обычно острова, образующие шпору излучины, формируются в центральной части рукава возле береговой поймы, тогда как излучины на заходе в рукав и в нижней его части представляют собой типичные сегментные излучины. На средней Лене, для которой меандрирование несвойственно, ниже г. Якутска распространены чередующиеся односторонние разветвления.

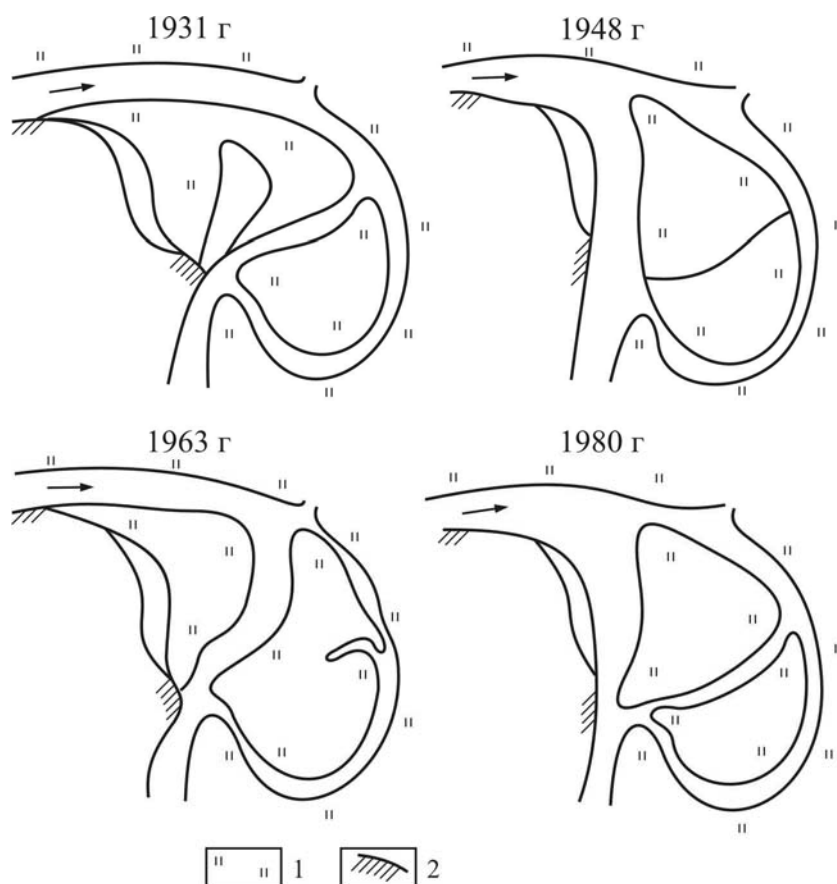


Рис. 85. Формирование заваленной излучины в веерном одиночном разветвлении на р. Янцзы в районе г. Туаньфэна: 1 – пойма; 2 – коренные берега.

Ниже их находится Хайтылаахское трехрукавное разветвление русла (70 км выше узла слияния с Алданом), в левом рукаве которого формируются сегментные излучины (рис. 87Б). Характерно, что еще в 40-е годы

это разветвление было двухрукавным. Грандиозный ледяной затор, возникший в половодье у оголовка разделяющего рукава острова и связанный с ним подпор привели к тому, что поток направился в обход ледяной «плотины», разработав пойменную Хайтылаахскую протоку, которая превратилась в третий рукав разветвления, забирающий от 30% расхода воды в межень до 42% в половодье и являющийся самым глубоким и относительно узким. В отличие от двух других рукавов, характеризующихся разветвлениями 2-го порядка, вновь образовавшийся меандрирует; в нем сформировалось несколько смежных сегментных излучин, степень развитости которых l/L за 40 лет возросла с 1,2 до 1,5. Вогнутые берега излучин размываются со скоростью до 20 м/год; развитие одной из излучин, вогнутый берег которой представлен островом между этим рукавом и центральным, может привести к расчленению острова (ширина его в самом узком месте сейчас около 400 м против 700-800 м в конце 60-х годов; со стороны центрального рукава остров также размывается со скоростью около 10 м/год). Аналогичная ситуация складывается в Битеневском разветвлении р. Оби, где перешеек между вогнутым берегом излучины левого рукава и правым рукавом составляет всего 150 м.

Активное развитие излучин происходит часто в рукавах пойменно-русловых разветвлений. На средней Оби в Вороновском разветвлении этого типа в 40-50 годы XX столетия преимущественное развитие получил правый, более короткий рукав. В нем сформировалась серия излучин, имеющих сегментную форму и развивающихся со скоростью до 20-30 м/год. Параметры этих излучин и излучин некоторых других пойменно-рукавных разветвлений Оби, а также Киренги, Чулыма и других рек приведены в табл. 24. Их величины зависят от водности рукавов и, соответственно, всегда меньше, чем у типичных излучин. Их трансформация во времени связана не только с эволюцией самих излучин, но и вследствие постоянно происходящих изменений водности рукавов.

В пойменно-русловых разветвлениях, рукава которых имеют русла разных типов – один меандрирует, другой характеризуется вторичными разветвлениями – распределение стока между ними обычно неравномерно. Большая часть его сосредотачивается в более коротком рукаве, который получает преимущественное развитие. Как правило, меандрирующие рукава оказываются заметно (до 1,5-2 раз) длиннее; соответственно, более многоводными являются спрямляющие их рукава со вторичными разветвлениями (Киренга, Амур). Это обуславливает то, что параметры излучин и рукавов оказываются несопоставимо меньше, чем излучин самой реки на участках с меандрирующим руслом. Например, на среднем Амуре характерные значения r и L излучин равны, соответственно, 3,8 и 7,4 км; в то же время в левом меандрирующем рукаве Усть-Буреинского пойменно-руслового разветвления они составляют 0,5-0,8 и 1,15-1,95 км.

Наиболее сложные переформирования русла в пойменно-русловых разветвлениях происходят при меандрировании обоих рукавов. Обычно

такие пойменно-русловые разветвления характерны для меандрирующих русел, поэтому С.И. Пиньковский [Кондратьев, Ляпин и др., 1959] называл их разветвленными меандрирующими руслами.

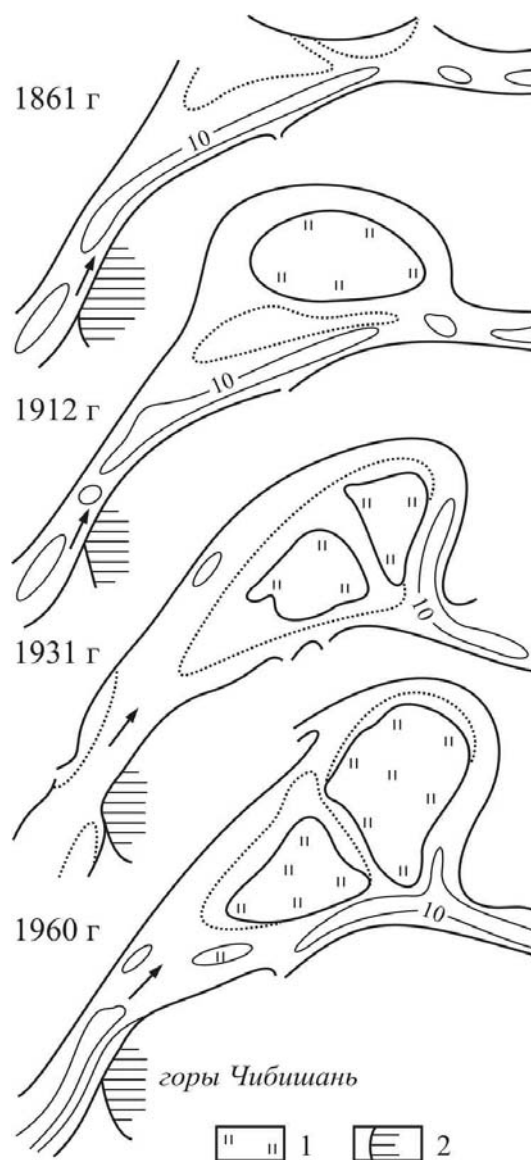


Рис. 86. Влияние мыса коренного берега на развитие заваленной излучины рукава на р. Янцзы: 1 – пойменные острова; 2 – коренной берег.

Таблица 23. Параметры излучин рукавов (Л – левого; П – правого)
в разветвлениях русел рек Оби и Лены, излучин Оби и изгибов русла Лены
в чередующихся односторонних разветвлениях

Река	$Q_{ср}$, м ³ /с	Разветвление (излучина)	Рукав	Параметры излучин, км				
				№	r	L	l	h
Обь	1740	Умревинское	Л	1	1,9	2,5	3,0	0,75
				2	1,7	2,5	3,0	0,8
		Барковское	Л	1	1,65	2,3	3,0	0,7
				2	2,6	2,8	3,5	0,5
		Битеневское	Л	1	1,25	1,7	2,0	0,4
				2	2,1	1,9	2,75	0,75
				3	1,75	2,2	2,7	0,8
		Камешковская Сосновская Саргатская		1	2,55	4,5	6,0	1,5
				2	3,75	4,0	5,0	1,4
				3	2,0	3,75	4,5	1,3
Лена	7150	Хайтылаахское	Л	1	1,0	2,3	3,1	0,95
				2	2,2	2,9	3,4	0,65
				3	1,2	2,8	3,45	0,75
		Чередующиеся односторонние ниже г. Якутска	П	1	3,3	7,0	8,95	2,25
			Л	2	4,6	10,0	13,0	3,65
			Л	3	2,5	4,6	5,7	0,75
			П	4	3,0	5,4	6,5	1,25

На реках с разветвленным руслом рукава в разветвлениях этого типа или не меандрируют (нижний Амур), или излучины формируются только у одного рукава (Ворновское разветвление на Оби, Киренга, средний Амур). Расходы воды по меандрирующим рукавам распределяются примерно поровну, но благодаря тому, что развитие и спрямление излучин происходит несинхронно, на разных этапах доля стока оказывается несколько больше в том из них, который имеет меньшую длину. В то же время это приводит к активизации развития в нем излучин, длина его растет и становится больше, чем длина второго рукава. Происходит перераспределение стока в пользу последнего, и процесс повторяется. Нередко эти переформирования осложняются за счет встречного размыва берегов излучин в обоих рукавах, вер-

шины которых ориентированы навстречу друг другу, что приводит к образованию поперечных протоков между рукавами.

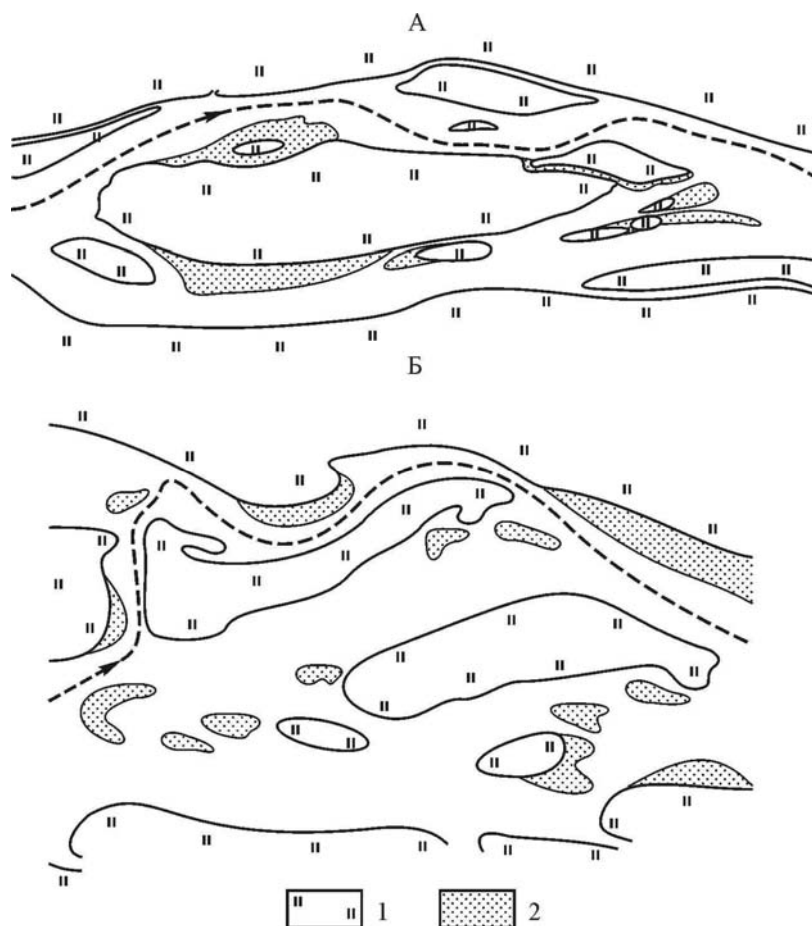


Рис. 87. Излучины рукавов разветвлений русла: *А* – образовавшиеся по схеме разветленно-извилистого русла (р. Обь, Умревинское разветвление); *Б* – сегментные (р. Лена, Хайтыалахская протока). 1 – пойма; 2 – прирусловые отмели.

Пример подобных сложных деформаций извилистых русел рукавов дает Рассказихинское пойменно-русловое разветвление на верхней Оби (рис. 88). Рукава соединены между собой поперечными извилистыми протоками, забирающими до 30% общего расхода воды. Левый рукав (протоки Зудилиха – Тихая), являющийся в настоящее время судоходным, располагается между левобережной поймой и островами, отделяющими его от правого рукава. Правый рукав (Рассказихинская протока) подходит к уступам

правобережных террас; в межень он сверху перекрывается массивным по-
бочнем, и связь между ним и левым рукавом осуществляется по попереч-
ным протокам Халтурихе и Татарский.

Таблица 24. Параметры излучин рукавов пойменно-русловых разветвлений
(рукава: Л – левый; П – правый)

Река	$Q_{ср}$, м ³ /с	Развет- ление	Рукав	Параметры излучин, м				
				№	r	L	l	h
верхняя Обь	1470	Рассказин- ское	Л	1	660	1460	2450	825
				2	800	1400	3000	1020
				3	900	2300	3550	1200
			П	1	1600	3400	4400	1600
средняя Обь	1740	Вороновское	Л	2	1050	1800	2100	320
				2	1050	1650	1980	400
				3	800	1600	2050	550
			П	1	1900	3150	3500	550
				2	2500	4000	4550	800
				3	750	1800	2340	600
Чулым	770	Николаевский узел	Л	1	600	1260	2460	870
			П	1	440	920	1400	450
				2	480	780	2250	800
				3	360	730	1620	630
Киренга	650	Щучье	Л	1	400	840	1050	270
				2	600	1100	1350	300
			П	1	500	910	1050	200
				2	400	800	1000	200
Амур	3500	Усть- Буреинское	Л	3	520	900	1250	300
				1	500	1150	2400	950
				2	600	1100	2300	800
				3	800	1950	2850	850
				4	800	1750	3250	950

В процессе развития русла спрямлялись отдельные крутые излучи-
ны рукавов и происходило перераспределение стока между основными ру-
кавами. В начале XX века главное течение было сосредоточено в правом
извилистом рукаве, современные левые рукава – протока Зудилиха и Тихая
были относительно маловодными. Шаг излучин правого рукава составлял 3-
3,5 км, стрела прогиба – не менее 2,5 км.

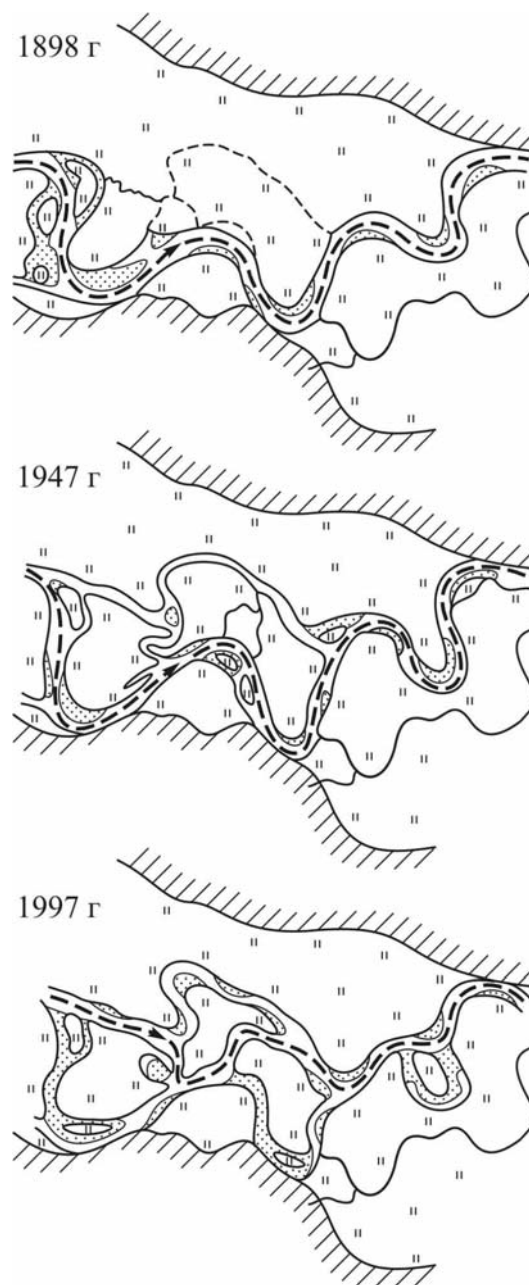


Рис. 88. Переформирования излучин в рукавах Рассказихинского пойменно-руслового разветвления на верхней Оби.

В начале 30-х годов начинается оживление левого рукава: в нем происходит спрямление серии из четырех излучин. Главное течение перемещается в протоки Зудилиху и Тихую спустя 10-15 лет, т.е. в конце 40-годов. Русло этого вновь развивающегося рукава искривляется, в нем формируются излучины. Старое русло сохраняется, однако между ним и новым руслом возникает значительный поперечный уклон, что привело к возникновению поперечной протоки Халтурихи, забирающей до 38% общего расхода воды из основного русла. Эти массы воды вскоре возвращаются обратно по протоке Татарской, т.к. нижняя часть протоки Рассказихи имеет низкую пропускную способность. Все это создает сложный рисунок русла, приводит к развитию излучин большой кривизны; так, радиус кривизны излучины непосредственно ниже истока протоки Халтуриха составляет всего 650 м, шаг – 1 км. Активные деформации происходили и в поперечных протоках: в 80-е годы спрямлялась крутая излучина протоки Халтурихи, ее длина сократилась, а пропускная способность возросла. Развитие некоторых излучин происходило в ходе образования островов и причленения их к выпуклому берегу, спрямление излучин – вдоль заиленных прежде проток; другие излучины приобретали омеговидную (петлеобразную.) форму, и их спрямление происходило при соотношении $l/L > 2,0$.

В.Г. Смирновой [2002] описаны своеобразные пойменно-русловые разветвления с активно меандрирующими рукавами на реках предгорной равнины Алтая – Катунь, Чарыше, Каменке. При ширине русла Чарыша ($Q_{cp}=194 \text{ м}^3/\text{с}$; $Q_{max}=1150 \text{ м}^3/\text{с}$) 110 м длина рукавов в таких разветвлениях достигает 12 км, при ширине русла Каменки до 50 м – 6 км. Шаг одного из таких разветвлений на нижней Катунь составлял в начале XIX века 10 км, к концу XX века увеличился до 21 км вследствие причленения к основному массиву – межукавью (по терминологии В.Г. Смирновой) других островов и подобных же островных массивов. Русла рек с такими пойменно-русловыми разветвлениями В.Г. Смирнова [2002] предложила называть раздвоенными.

Морфометрические параметры излучин рукавов раздвоенного русла благодаря разделению по ним расхода воды существенно меньше, чем излучины неразветвленного русла. Например, на Чарыше в районе с. Колов мыс значения длины и шага излучин рукавов, ширины русла в их пределах в 2 раза меньше, чем на смежных излучинах русла реки (табл. 25). В то же время интенсивность деформаций русла на излучинах реки и на излучинах рукавов раздвоенного русла практически одинакова и не превышает 5,2-5,5 м/год, хотя в других раздвоениях этого типа при спрямлении излучин рукавов и в маловодные годы зафиксированы скорости размыва берегов 25-60 м/год.

Излучины пойменных ответвлений (при наличии на реке пойменной многорукавности), их динамика и гидролого-морфологические характеристики являются наименее изученными. При этом под пойменной многорукавностью понимается отшнуровавшиеся от русла протоки (ответвления, по Н.И. Маккавееву, 1955), возникшие на месте части обмелевших рукавов

при причленении островов к пойме или стариц при спрямлении излучин, сохранивших связь с основным руслом и периодически соединяющихся с ним, отличающиеся от него маловодностью, удаленные от русла на большие расстояния, соизмеримые с шириной поймы и по протяженности с морфологически однородными участками русла, соединяющихся между собой поперечными протоками и расчленяющие пойму на отдельные крупные пойменные массивы¹.

Таблица 25. Параметры излучин и скорости их деформаций на р. Чарыше (район с. Колов мыс) [Смирнова, 2002]

Характеристика	Параметры				Скорость деформаций, м/год
	l , км	L , км	l/L	B , м	
Излучины рукавов разветвленного русла					
Средняя	0,78	0,55	1,42	114	2,6
Максимальная	4,3	1,1	3,91	140	5,2
Минимальная	0,2	0,19	1,10	95	-
Излучины русла					
Средняя	1,54	1,02	1,51	278	2,6
Максимальная	3,45	1,82	1,90	430	5,5
Минимальная	0,4	0,35	1,14	210	-

Каждое такое пойменное ответвление забирает из русла обычно не более 5-10 % общего расхода воды в реке. На Лене, например, в Табагинскую протоку в половодье уходит всего – 5% стока, в Городскую, еще в 30-е годы XX века составлявшую левый рукав сопряженных разветвлений, – от 8-10% в половодье, до 1-2% в летнюю межень [Русловой режим..., 1977]; река Ахтуба как левый пойменный рукав (ответвление) р. Волги в своем начале у г. Волгограда до проведения регулярных мероприятий в связи с сооружениями Волгоградской ГЭС забирала 2,5% стока из Волги (среднегодовой расход Ахтубы 211 м³/с), в настоящее время – 1,3% ($Q_{cp}=101 \text{ м}^3/\text{с}$). Вниз по течению, особенно в нижнем течении рек (Обь, Таз, Волга), пойменные ответвления, располагающиеся в тыловой части поймы, принимают иногда не только другие пойменные протоки, но и крупные притоки реки (в левую Обь, например, впадает Северная Сосьва и Собь), вследствие чего они имеют свою, отличную от главной реки водосборную площадь (на эту

¹ Расширенное определение пойменной многорукавностью дается в связи с различиями в понимании этого термина у авторов книги и в трудах ГГИ [Кондратьев, Ляпин и др., 1959; Кондратьев и др., 1982; Попов, 1965].

их особенность указывал еще Н.И. Маккавеев [1955]). В результате водность их увеличивается вниз по течению, они превращаются в многоводные рукава (до 30-40% общего стока реки), иногда самостоятельно соединяющиеся с дельтовыми рукавами (Ахтуба) или образующими практически самостоятельные дельты (Таз) [Коротаяев, Лодина и др., 1976].

Если пойменная многорукавность развивается на меандрирующих реках, их русла в значительной мере наследуют бывшие излучины главной реки, частично их трансформируя в соответствии с меньшей водностью. Однако пойменные ответвления меандрирующих рек отличаются от таковых на реках с другими типами русла повышенной водностью. На Вычегде к ним относятся Лука-полой, полой Прось, Ленский, Иртинский полои и другие. Лука-полой забирает в половодье до 47% расхода воды, в межень – до 40%; полой Прось – 30-35%, причем с конца 50-х годов XX века наблюдается общая тенденция к сокращению его водности. Поэтому параметры излучин пологие меньше, чем у излучин русла самой Вычегды. Полой Прось образует три излучины со средней степенью развитости $l/L=1,8$ (в том числе одна – заваленная), что больше чем у излучин основного русла Вычегды на этом участке (две излучины с $l/L=1,5$ и $l/L=1,3$); скорости размыва вогнутых берегов излучин полая – 8 м/год. В Иртинском полове такие деформации привели к уменьшению радиусов кривизны излучин за период 1910-1994 гг в 1,2-1,5 раза.

Также меандрируют пойменные протоки средней Оби (между устьями Томи и Иртыша) и нижнего Иртыша, имеющие извилистые русла. На разветвленных реках, где пойменные ответвления следуют вдоль бывших рукавов реки, развитие излучин представляет новый процесс в результате чего происходит практически полная морфодинамическая трансформация бывших русел. Таковы, например, полои на Северной Двине, имеющей разветвленное русло. Ее пойменные ответвления (полои), в которые впадают правобережные притоки реки (Уфтыога, Сефтра), интенсивно меандрируют.

3.7. Излучины динамической оси потока в прямолинейном русле



Образование в относительно прямолинейном русле перекатов с побочными, расположенными в шахматном порядке, или самостоятельных побочных, последовательно причлененных к противоположным берегам реки, обуславливает в период спада уровней и снижения водности искривление динамической оси потока. Н.И. Маккавеев [Проектирование судовых ходов..., 1964] приводит по данным лабораторных исследований общую картину возникновения извилины (излучины) динамической оси меженного потока (рис. 89), причем ему принадлежит сам термин, обозначающий эту первичную извилистость русла. Поскольку $r=f(Q)$, то изменения водности реки от многоводной фазы режима (половодья, паводка) к межени являются основной причиной все большего искривления потока. Оно происходит при

обсыхании побочней и сопровождается размывом дна русла между ними, формированием седловины и корыта переката или сосредоточением потока на перевале от одного берега к другому в подвалье вышерасположенного побочня (в межгрядовом понижении).

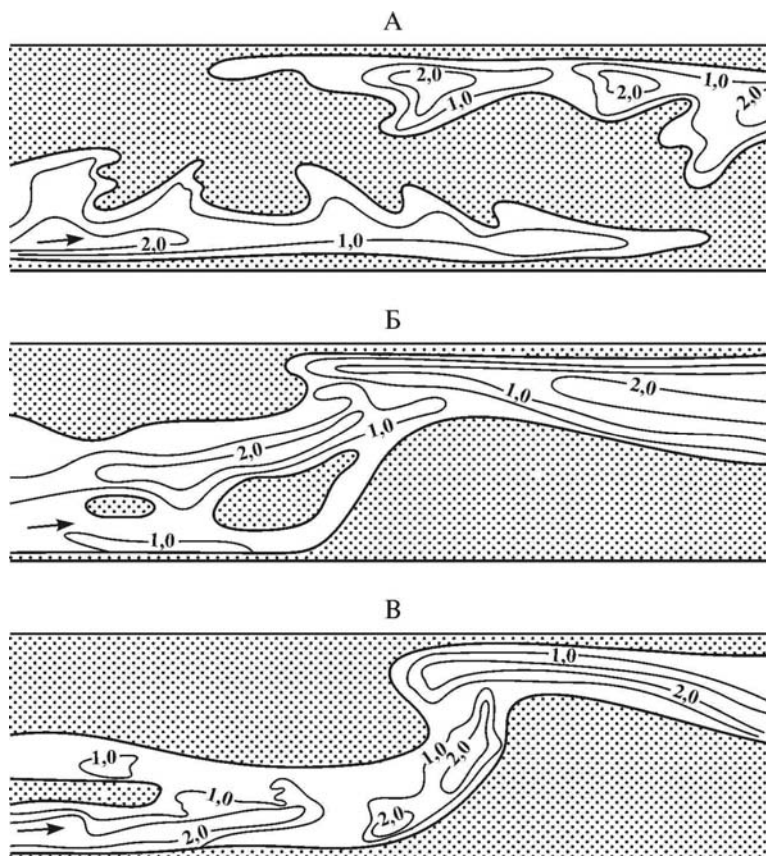


Рис. 89. Образование излучин динамической оси потока и формирование побочней перекатов в половодье (А), в период спада уровней (Б) и в межень (В) [Проектирование судовых ходов ..., 1964].

Такое русло с побочнями, расположенными в шахматном порядке, соответствует, по классификации ГГИ [Попов, 1965; Кондратьев и др., 1982; Барышников, Попов, 1985] «побочневому типу руслового процесса». При этом оно рассматривается как самостоятельный тип русла вне видимой связи с формированием излучин и извилистостью потока. Такой же подход характерен и для других исследований, посвященных побочневой форме движения наносов [Кудряшов, 1959; Шарашкина, 1959]. Исключение пред-

ставляет исследования Н.И. Маккавеева и Н.В. Хмелевой [Экспериментальная геоморфология, 1969], которые, на основе лабораторных опытов, показали, что зарождение излучин русла начинается с формирования побочней, расположенных в шахматном порядке, и аналогично формированию излучин динамической оси потока.

Н.И. Маккавеев [1949] на основе большого статистического материала по перекатам равнинных рек с развитыми побочнями получил известную зависимость (3.10) радиуса кривизны динамической оси потока от руслоформирующего расхода воды и уклона свободной поверхности, которая стала основополагающей как для дальнейших исследований процесса меандрирования вообще, так и для трассирования землечерпательных прорезей на перекатах, войдя как установленный факт в научную, учебную и производственно-техническую литературу [Садовский, 1960; Гринько, Розовский, 1962]. Именно эта зависимость в дальнейшем была распространена на излучины русла [Маккавеев, 1955, 1971; Великанов, 1958]. При этом и сам Н.И. Маккавеев, и другие исследователи исходили из того, что в начальный период трансформации изгибов потока возле побочней в излучины шаг побочня равен шагу формирующей излучины. Это, однако, относится только к начальным формам излучин, образовавшимся при закреплении растительностью и превращения в пойменный сегмент элементарного побочня, и, очевидно, первым стадиям их развития (пологие и развитие сегментные). Дальнейшая эволюция зародившихся излучин и переход ее в последующие стадии развития сопровождаются все большей дифференциацией скоростного поля потока и активизацией циркуляционных течений, что приводит к росту побочней у выпуклых берегов. Последние представляют собой морфологически уже сложные образования, составленные несколькими крупными грядами – макроформами руслового рельефа, сместившимися к выпуклому берегу или образовавшимся возле него в зоне замедления течения (табл. 26). По-видимому, это обстоятельство дало И.В. Попову [1965; Кондратьев, Ляпин и др., 1959] основания называть отмели у выпуклых берегов излучин пляжами, хотя с точки зрения морфологии перекатов, расположенных на перегибах между смежными излучинами, эти отмели остаются их побочнями². В результате в процессе эволюции излучин ее параметры все больше начинают отличаться от параметров излучин динамической оси потока.

В целом излучины динамической оси меженного потока в относительно прямолинейном русле могут рассматриваться как своеобразные натурные модели развития сегментных излучин (об этом, в частности, свидетельствуют результаты лабораторных опытов, выполненных под руково-

²Термин «пляж» авторами не употребляется, т.к. во-первых, он исторически раньше стал широко использоваться в геоморфологии морских берегов [Морская геоморфология..., 1980] и его применение в русловедении приводит к терминологической путанице; к тому же неудачным является ассоциация с общепринятым толкованием этого слова как места купания людей в любом водоеме.

Таблица 26. Параметры излучин динамической оси потока в относительно прямолинейном русле, первичных излучин и излучин на разных стадиях развития

Река	Q_{cp} м ³ /с	Форма русла	Параметры, км			
			L	h	l	r
Вычегда	1000	Изгиб дин. оси	1,8-2,0	0,3-0,4	2,0-2,3	1,1-1,4
		Сегм. полог. изл.	3,0	0,9	3,7	1,7
		Сегм. разв. изл.	2,5	1,1	3,5	1,2
		Сегм. кр. изл.	3,1	1,9	5,5	1,3
Днестр	310	Изгиб дин. оси	0,45-0,5	0,15-0,2	0,5-0,6	0,2-0,3
		Сегм. полог. изл.	1,1	0,35	1,3	0,5
		Сегм. разв. изл.	0,8	0,4	1,2	0,4
		Сегм. кр. изл.	0,7	0,45	1,25	0,4
Виллой	1350	Изгиб дин. оси	1,7-1,9	0,25-0,35	2,0-2,2	0,8-1,2
		Сегм. полог. изл.	3,4	0,9	4,1	2,0
		Сегм. разв. изл.	3,6	0,9	4,3	2,1
		Сегм. кр. изл.	2,2	1,0	3,1	1,2
Северная Двина	2500	Изгиб дин. оси	2,2-2,5	0,4-0,6	2,4-2,7	1,2-1,4
		Сегм. полог. изл.	4,0	1,0	5,0	2,1
		Сегм. разв. изл.	3,5	1,3	5,5	2,0
Обь	930	Изгиб дин. оси	1,8-2,0	0,25-0,35	2,0-2,2	0,65-0,9
		Сегм. полог. изл.	2,3	0,5	2,9	1,5
		Сегм. разв. изл.	3,0	1,0	4,6	1,5
		Сегм. кр. изл.	2,2	1,8	4,0	1,3
Ока	950	Изгиб дин. оси	1,3-1,7	0,2-0,25	1,5-1,9	0,8-1,0
		Сегм. полог. изл.	3,3	1,0	4,2	1,6
		Сегм. разв. изл.	2,3	1,0	3,3	0,9
		Сегм. кр. изл.	2,8	1,5	4,9	1,3

дством Н.И. Маккавеева [Экспериментальная геоморфология, 1969] на размываемой модели методом свободного моделирования). Различие между сегментной излучиной и излучиной динамической оси потока заключается в том, что крылья последних располагаются между аккумулятивными образованиями – побочнями, вследствие чего зона размыва берегов сосредотачивается в ее привершинной части, достигая максимума напротив наиболее выступающей в реку центральной части побочней. Аналогом зоны аккумуляции на крыльях таких излучин служит надвижение сюда верхнего побочня и развитие в его ухвостье кос, а зоны размыва – смещение нижнего побочня вниз; циркуляционные течения и структура скоростного поля потока сказывается в сезонном режиме перекатов в пределах их седловин, располагающихся, исходя из морфологических элементов излучин, в местах сопряжения их крыльев.

Напротив каждого побочня берег реки размывается; при смещении побочней фронт размыва также смещается вниз по течению, а его бывшее местоположение перекрывается надвинувшимся на него вышерасположенным побочнем, находящимся возле того же берега (рис. 90).

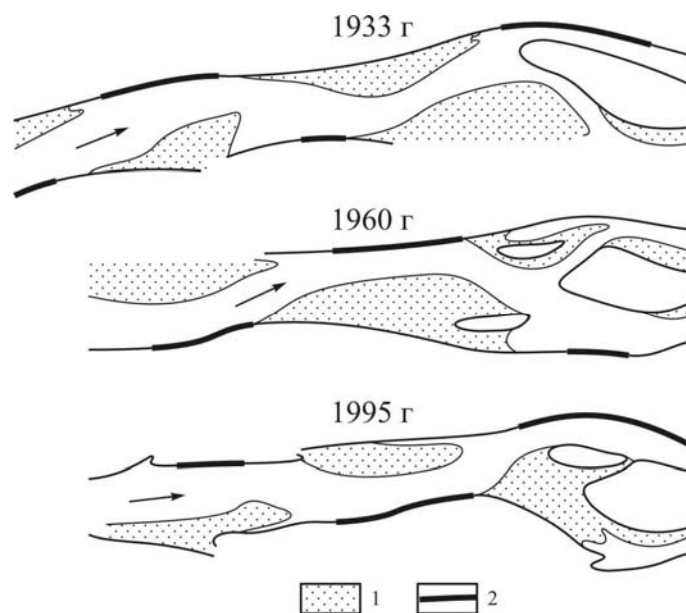


Рис. 90. Смещение побочней (1) и зон размыва берегов (2) в относительно прямолинейном неразветвленном русле р. Вилюя (Ржаницинские пороги).

При песчаном строении пойменные берега, обрывающиеся к плесовым лощинам, размываются со скоростями до 20 м/год, реже больше [Чалов, 1974]. Скорости смещения побочней и зон размыва достигают 50-250

м/год в зависимости от размеров реки и устойчивости русла [Чалов, 1964]. Это свидетельствует об абсолютном преобладании продольного вектора русловых деформации и, как следствие, консервативности прямолинейной формы русла по отношению к возможности ее преобразования в извилистую. Действительно, она сохраняется, если при таких скоростях время, за которое побочни смещаются на полную свою длину, недостаточно для их закрепления растительностью (например, на реках Европейской части России для этого требуется 7-10 лет). В этом случае русло остается прямолинейным, и его трансформация в извилистое не происходит.

Таким образом, вероятность превращения излучин динамической оси потока в излучину русла определяется длиной (шагом) побочни $L_{поб}$, его высотой $H_{поб}$, обеспечивающей длительность вегетационного периода, необходимого для появления кустарниковой растительности, и темпами накопления наила на зарастающей пригребневой его части u_a , скоростью смещения побочней $C_{поб}$, а также величиной стрелы прогиба выбоины противоположного берега $h_{выб}$, возникшей вследствие его размыва при огибании потоком побочни (она равняется длине перпендикуляра от линии, соединяющей точки начала и конца размыва берега, к точке наибольшей вогнутости размываемого берега). Последняя, в свою очередь, обеспечивает направляющее воздействие размываемого берега на поток, вызывая его изгиб. При этом в зависимости от соотношения $h_{выб}$ и ширины русла B_p это воздействие охватывает только часть потока или весь поток, огибающий побочень. Опыт показывает, что изгиб потока, при прочих равных условиях, поддерживается выбоиной, если $h_{выб} > 0,4B_p$. В целом время, за которое излучина динамической оси потока превращается в сегментную излучину русла, может быть определено как

$$\frac{L_{поб}}{C_{поб}} < T = f(H_{поб}, u_a, h_{выб}, T_{зар}), \quad (3.5)$$

где $T_{зар}$ – время, необходимое для появления сплошных кустарниковых зарослей на побочне. Это хорошо видно на рис. 90, на котором даны сопоставленные планы русла р. Вычегды за многолетний период; аналогичные переформирования описаны на других участках Вычегды [Чалов, 1974], Оби [Беркович, Гаррисон и др., 1990], Волге [Попов, 1963], Пинеге [Жила, 1978] и других реках. На р. Хуанхэ (нижнее течение), отличающейся абсолютно неустойчивым руслом (число Лохтина $< 0,5$) и стоком наносов, на два-три порядка превышающим таковой на реках России того же порядка, в межень сравнительно маловодный поток образует излучины среди массивных (шириной до нескольких километров) побочней (рис. 91). Эти побочни смещаются со скоростями в 1-1,5 тысячи метров в год и более, вследствие чего через каждые 3-5 лет происходит полная перестройка руслового рельефа (рис. 92), а само русло остается относительно прямолинейным. Параметры излучин меженного потока на одном из участков нижнего течения р. Хуанхэ ($Q_{cp}=1530 \text{ м}^3/\text{с}$; $Q_{max}=2830 \text{ м}^3/\text{с}$; $Q_{min}=447 \text{ м}^3/\text{с}$) приведены в таблице 27.

При ином соотношении скорости смещения побочной и времени их зарастания, образовавшиеся возле них изгибы меженного русла закрепляются в бровках поймы, поскольку заросшая часть побочной представляет собой уже пойменную шпору формирующейся сегментной излуины. Шероховатость ее поверхности существенно больше, чем русла и непокрытых растительностью побочной, скорости потока в половодья (паводки) над ней снижаются, становятся недостаточными для транспортировки руслообразующих наносов, а аккумуляция взвешенного материала приводит к увеличению высоты шпоры и образованию пойменной (более тяжелой по составу) фации аллювия. Последнее, в свою очередь, способствует дальнейшему развитию пойменной растительности, которая вместе с сформировавшейся на месте побочной шпорой вызывает образование на изгибе потока присущих ему гидравлических явлений (распределение скоростей и циркуляционные течения).

Таблица 27. Параметры излуин меженного потока (динамической оси) среди побочной в нижнем течении р. Хуанхэ (по данным на 1985 г)

№ излу- чины	Параметры, м					
	r	L	l	h	$B_M^{1)}$	$B_{II}^{1)}$
1	2800	4600	5900	1500	1400	2500
2	1200	2500	3300	1000	500	1100
3	3200	5500	7200	1600	800	1650
4	4400	7600	9000	1500	1200	2000
5	2000	4100	5000	1000	800	1700

¹⁾ Индексы М и II соответствуют руслу в межень и половодье

В процессе смещения размеры побочной и параметры излуин динамической оси потока изменяются. В случае слабой изогнутости русла ($l/L < 1,10$) каждый побочень периодически попадает то к вогнутому берегу изгиба, где скорости его смещения увеличивается, а сам он частично размывается, уменьшаясь в размерах, то смещается вдоль выпуклого берега, замедляется и увеличивается в размерах [Чалов, 1964]; смена знака изгиба по длине участка реки приводит к изменению скоростей смещения побочной. Соответственно изменяются шаг побочной и радиусы кривизны излуин динамической оси потока: в первом случае они уменьшаются, во-втором – увеличиваются. Трансформация параметров происходит также в нижней части относительно прямолинейных участков русла, где смещающиеся побочни – излуины динамической оси потока – оказываются под влиянием других форм русла (разветвления, вынужденной излуины). Вызывая перестройку гидравлической структуры потока и оказывая подпорное воздействие на него, они приводят к явлению, которое получило название «сжатия излуин» [Кондратьев, Ляпин и др., 1959; Маккавеев, 1971]. На рис. 93 показан план русла р. Оби (непосредственно выше устья Томи), в пределах которого находятся Базанаковские, Монастырские перекаты с побочными, расположенными в шахматном порядке; параметры излуин динамической оси потока на этом участке представлены в табл. 28.



Рис. 91. Излучина меженного русла р. Хуанхэ среди массивных илисто-песчаных, частично заросших травой побочней. Фото Р.С. Чалова.

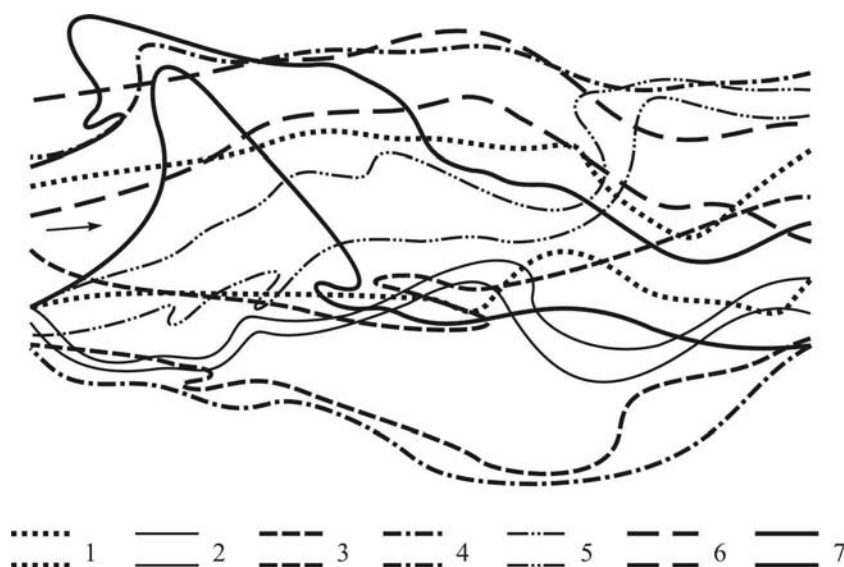


Рис. 92. Переформирования относительно прямолинейного, неразветвленного русла р. Хуанхэ с побочнями. Положение русла: 1 – 1935 г.; 2 – 1956 г.; 3 – 1960 г.; 4 – 1964; 5 – 1972; 6 – 1976; 7 – 1982 г. (по «Атласу русловых процессов ...», 1985).

Участок завершается разветвлением русла, образованным о-вом Битеневым; кроме того, на формирование русла оказывает влияние периодический подпор во время половодья со стороны р. Томи. Особенностью участка является стабильность верхнего правобережного побочня, основу которого составляет галечная высыпка; ухвостье его и остальные побочни смещаются вниз по течению. Приближаясь к оголовку о-ва Битенева и попадая в условия все большего подпора, побочни и излучины динамической оси потока замедляют свое смещение, что вызывает их сжатие: степень развитости l/L изменяется от 1,06 у верхнего побочня до 1,15 у нижнего. В последнем случае это привело уже в период проведения съемки к отторжению правобережного побочня Г и спрямлению излучины динамической оси потока перед разветвлением русла.

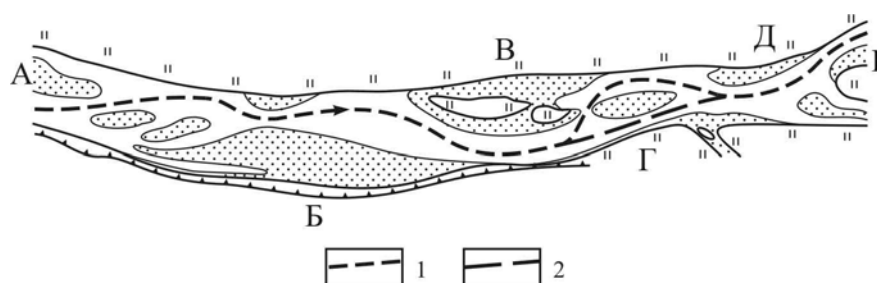


Рис. 93. Излучины динамической оси потока (1 — положение на период съемки русла (1959 г); 2 — положение после отторжения побочня) на участке р. Оби выше слияния с р. Томью и разветвления русла о-вом Битеневым. А, Б, ... — индексы излучин и побочней (сверху вниз по течению).

Таблица 28. Параметры излучин динамической оси потока на участке Базанаковских-Монастырских перекатов р. Оби

Индекс излучин (побочня), рис. 93	Параметры, м					
	r	L	l	h	B_{pM}	l/L
А	3100	3750	3975	250	375	1,06
Б	2000	2325	2550	375	375	1,10
В	1800	2600	2900	400	200	1,12
Г	1900	2000	2300	375	350	1,15

Удлинение ухвостья правобережного побочня Б приводит к двум противоположным явлениям. Первое, отраженное на рис. 93, связано с уменьшением l/L излучины и образованием дополнительного изгиба динамической оси потока в связи с формированием возле левого берега небольшого побочня. Второе явление заключается в отторжении ухвостья верхнего левобережного побочня А. В этом случае излучина возле побочня Б приобретает параметры, характерные для излучин, свойственных Оби выше устья

Томи, особенно если в верхнем ее крыле (на Верх. Базанаковском перекате) стрежень потока переходит в крайнее нижнее положение возле правобережного побочня. Отторгнутая часть ухвостья побочня А причленяется к правобережному побочню Б, вызывая, с одной стороны, увеличение его размеров, а, с другой, ускоренное смещение его и нижележащих побочней вниз по течению.

Если смещающиеся побочни надвигаются на развитую или крутую излучину, сжатие излучин динамической оси потока не происходит. Один из побочней непосредственно надвигается на побочень у выпуклого берега излучины, другой, попадая в зону ускорения течения возле вогнутого берега, отторгается от него и также причленяется к побочню у выпуклого берега. Оба эти процесса обуславливают импульсивный рост последнего и активизацию развития излучин русла в целом [Чалов, 1964].

Возникновение излучин динамической оси потока в прямолинейном русле иногда происходит под влиянием направляющего воздействия мысов коренных берегов или пойменных яров (в последнем случае – из-за неоднородности их строения). Возникновение побочня, которое обычно приурочено к маловодным годам, усиливает это воздействие, побочень разрастается, вызывая развитие излучины динамической оси потока вплоть до достижения критического соотношения $l/L=1,4$. После этого происходит спрямление излучины вдоль ведущего берега, и весь процесс повторяется (рис. 94).

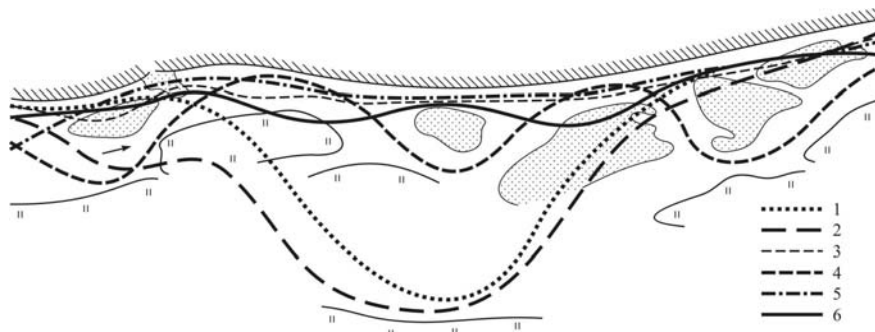


Рис. 94. Переформирования русла верхней Оби (развитие излучин динамической оси потока и их спрямление) на участке ниже устья Чарыша на протяжении XX века: 1 – 1936 г.; 2 – 1960 г.; 3 – 1970 г.; 4 – 1977 г.; 5 – 1991 г.; 6 – 1994 г.

На верхней Оби, русло которой близко к неустойчивому (число Лохтина $l/L=1-1,5$), продолжительность циклов подобных переформирований составляет 5-10 лет, что сближает прямолинейные участки русла ниже устья Чарыша (строго говоря, здесь речь идет о левом рукаве односторонних раз-

ветвлений русла, в котором в межень сосредотачивается до 95% расхода воды в реке) с руслом Хуанхэ.

Проверка формулы Н.И. Маккавеева (3.10) по имеющимся материалам, характеризующим излучины динамической оси потока на прямолинейных участках русел рек Вычегды, Оби, Вилюя и некоторых других рек, показала ее справедливость; в то же время все реки отличаются величиной коэффициента k , который, очевидно, зависит от удельной (отнесенной к ширине реки) ее водоносности, значений стока руслообразующих наносов, внутригодовой неравномерности стока, подобно связи параметров развитых излучин с среднемаксимальным расходом воды (3.11), или от ширины дна долины и доли руслоформирующего расхода воды верхнего интервала (при условии его прохождения), сосредотачивающегося в русле во время разлива реки по пойме. В последнем случае напрашивается аналогия с пологими и развитыми сегментными излучинами: на Вычегде, например, коэффициент k в формуле (3.10) равен 0,29 в сужениях и 0,15 в расширениях при прочих равных условиях. Так как величины шага побочня и шага излучины до стадии развитой ($l/L=1,4-1,7$) сопоставимы, такое предположение можно считать приемлемым.



ГЛАВА 4



ВЫНУЖДЕННЫЕ И АДАПТИРОВАННЫЕ ИЗЛУЧИНЫ



4.1. Излучины адаптированного русла

Адаптированные излучины как тип русла развиваются в относительно узких долинах ($B_p < B_n < 2-3B_p$), в которых коренные берега частично контролируют или ограничивают их развитие (главным образом, в поперечном к оси долины направлении). Они встречаются также в виде отдельных форм широкопойменного русла, возникая там, где оно подходит к коренному берегу и делает изгиб вдоль него. Возникающая при этом вынужденная излучина представляет собой переходную одиночную форму от меандрирующего или разветвленного русла к прямолинейному, расположенному вдоль коренного берега с односторонней поймой.

Термин «адаптированные излучины» впервые введен Н.И. Маккавеевым [Экспериментальная геоморфология, 1969] для обозначения первичных излучин русла лабораторной реки при моделировании в размываемом лотке, когда процесс формирования русла еще не привел к образованию широкой поймы, вследствие чего развитие излучин и их форма контролируются «коренными» берегами. Впоследствии [Маккавеев, 1971; Чалов, 1979; Маккавеев, Чалов, 1986] было дано более широкое толкование термина, приведенное выше. Однако в литературе еще раньше (см. главу 1) широко использовался другой термин – вынужденные излучины, под которым понимался любой изгиб потока на подходе его под достаточно большим углом к коренному берегу; последний в этом случае вынуждает поток сделать изгиб, который поворачивает вдоль него. При этом не делается различия между изгибом широкопойменного русла или русла с относительно узкой поймой (адаптированного). Учитывая оба подхода термины «вынужденные» и «адаптированные» излучины обычно применяются вместе для обозначения одного и того же типа излучин, хотя вынужденные представляют собой одну из разновидностей адаптированных.

Выделяется четыре вида излучин адаптированного русла (рис. 95): 1) сегментные, касающиеся своими вершинами бортов долины; 2) с верхним крылом в пойменных берегах и нижним, располагающимся вдоль коренного берега – вынужденные; 3) с верхним крылом у коренного берега и нижним – в пойменных берегах; иногда только эту разновидность излучин называют адаптированными, добавляя слово «собственно»; 4) с привершинной частью, вогнутый берег которой является коренным – вписанные (термин предложен В.П. Букреевым, 1987). Излучины первых трех видов формиру-

ются в долинах, коренные берега которых сложены трудноразмываемыми породами; последние формируются возле легкоразмываемых берегов (песчаных, супесчаных), что обуславливает их размыв и образование дугообразных выбоин в вершине излучин. Обычно такие берега представлены обрывами аккумулятивных террас.

Сегментные излучины в узких долинах в ходе своего развития быстро достигают таких размеров, при которых их вершины касаются коренных берегов, ограничивающих возможность их дальнейшего поперечного смещения. Поэтому в классификации ГГИ [Попов, 1965; Кондратьев и др., 1982] процесс их формирования назван ограниченным меандрированием. При этом сама форма излучин предполагает их продольное смещение (рис. 96), которое, по данным И.В. Попова [1965], происходит на больших реках со средними скоростями от 3 до 20 м/год. При этом сами излучины характеризуются очень малой изменчивостью параметров во времени. По данным И.В. Попова на участке р. Оки с. Рубецкое – устье р. Мокши за почти 70-летний период (1879-1946 гг) степень развитости отдельных последовательно расположенных излучин оставалась неизменной, равной 1,25, 1,16 и 1,50.

Однако в природе типичные сегментные адаптированные излучины встречаются сравнительно редко. И.В. Поповым [1965] они отмечены на Оке и Иртыше, Б.Ф. Сنيщенко [Кондратьев и др., 1982] на Днепре, Ю.С. Ющенко [1987] на Сухоне. В то же время, выполняя анализ русловых процессов на конкретных реках, некоторые исследователи [Ющенко, 1987] в ряде случаев к этому типу русла относят также свободные сегментные излучины, находящиеся на первой стадии своего развития (пологие, с $l/L=1,10-1,40$) и характеризующиеся, соответственно, преобладанием продольного смещения. При этом нарушается главный признак выделения излучин, формирующихся по схеме ограниченного меандрирования, разработанный в ГГИ: ограничение поперечного смещения смежных излучин коренными бортами долины, которых излучины касаются в своих вершинах. Иногда это объясняется глинистым строением пойменных яров, размыв которых осуществляется со скоростями меньшими, чем отмеченные И.В. Поповым. Еще более распространено отнесение к ограниченному меандрированию комбинации «свободная – пологая вынужденная излучина», причем даже в тех случаях, когда нижнее крыло последней переходит в прямолинейное русло возле коренного берега реки. Такова, например, трактовка переформирования излучин р. Оби выше и ниже г. Барнаула [Кожевников, 1982], смещение которых приводит к нарушениям работы коммунального и промышленного водозаборов, расположенных у подножья левого коренного берега реки; Обь здесь имеет правобережную пойму шириной более 10 км. Чтобы избежать этого, В.С. Кожевников [1982] заменяет термин «ограниченное меандрирование» характеристикой продольного смещения излучины – «сползание вдоль коренного берега» (с. 106), уходя тем самым от принятой терминологии.

Значительно более распространено сочетание *вынужденных* и *собственно адаптированных излучин* (рис. 95Б, В). Их морфология и деформации описаны на Днестре [Беркович, Злотина и др., 1992], Чумыше [Русловые процессы..., 1996], Немане [Дарбутас, 1992], а существование отмечено на многих реках России и ближнего зарубежья [Русловой режим..., 1994].

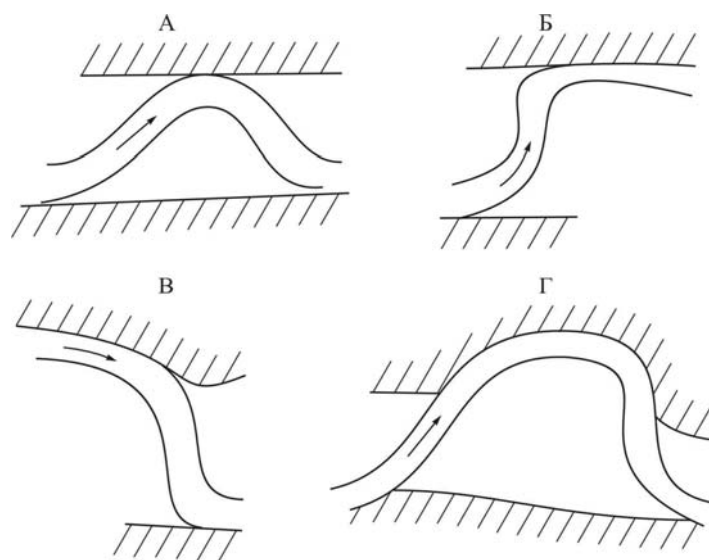


Рис. 95. Разновидности адаптированных излучин: А – сегментная; Б – вынужденная; В – собственно адаптированная; Г – вписанная.

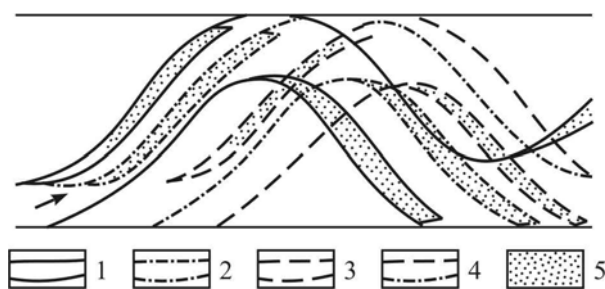


Рис. 96. Продольное смещение сегментной адаптированной излучины: 1-4 – контуры русла при последовательном смещении излучины; 5 – прирусловые отмели.

Система вынужденных и адаптированных излучин, образующих морфологически однородный участок, является следствием трансформации серии сегментных излучин в узкой долине. Это происходит благодаря пере-

углублению русла в вершине излучины вследствие слива сюда осветленных пойменных вод во время половодья (рис. 97). При нормальной глубине плесовых ложин в 8-10 м в ямах размыва в вершине таких излучин глубины достигают нередко 20 м и более, вследствие чего они славятся у рыбаков как «осетровые», «стерляжи» и т.д.

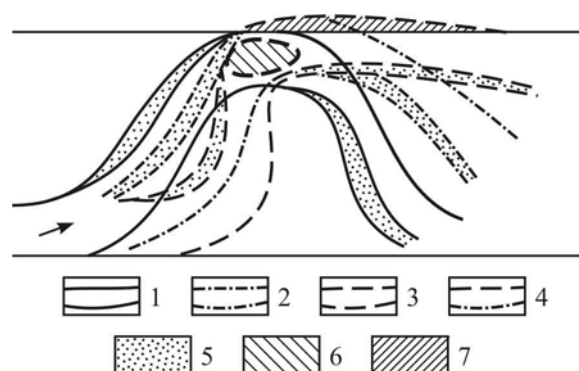


Рис. 97. Схема трансформации сегментной адаптированной излучины в вынужденную и последующее ее развитие: 1-4 – контуры русла при последовательном смещении излучины; 5 – прирусловые отмели; 6 – переуглубление русла в вершине излучины; 7 – размыв коренного берега.

В свою очередь углубление русла и соответствующее ему увеличение пропускной способности русла способствуют его сужению, которое обеспечивается аккумуляцией наносов и формированием прирусловых отмелей вдоль пойменного берега и их зарастанием в тыловой части. Положение вершины стабилизируется, в то время как пойменный берег в верхнем крыле излучины продолжает размываться, само крыло смещается, а русло оказывается ориентированным по нормали к коренному берегу, поворачивая возле него на 90° . 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. В результате сама излучина из сегментной смещающейся превращается в крутую вынужденную. Нижнее крыло бывшей сегментной излучины продолжает смещаться, вследствие чего возникает прямолинейный участок русла вдоль коренного берега между вершиной вынужденной излучины и местом отхода русла от него. Одновременно из-за увеличения угла подхода потока к коренному берегу по мере искривления вынужденной излучины подмыв последнего усиливается, на нем активизируются склоновые процессы, он со временем получает слабо вогнутые очертания, а вдоль него формируется глубокая плесовая лощина. Образующееся при этом плечо коренного берега оказывает на поток направляющее воздействие, фиксируя место отхода русла от него. Согласно исследованиям К.В. Гришанина и В.И. Замышляева

[1985], если длина такой вогнутости (возмущение береговой линии) достигает величины, равной девяти ширинам русла, возникает динамическая устойчивость потока, находящегося под воздействием выбоины (возмущения). Это практически соответствует реальным данным: при ширине русла около 1 км шаг вогнутости (длина волны возмущения) коренного берега в нижнем крыле вынужденной излучины равен не более 8-9 км. Однако рост вогнутости, т.е. увеличение стрелы ее прогиба, ограничивается геологическими условиями (строением коренного берега, сложенного трудноразмываемыми породами); это же обстоятельство обуславливает иногда меньший, по сравнению с теоретическими расчетами, шаг выбоины (длину возмущения).

Наличие плеча коренного берега и его направляющее воздействие на поток обеспечивает стабилизацию нижнего крыла излучины. В результате возникает сложная трапецевидная (сундучная, по Н.И. Маккавееву, 1971) система излучин, прекративших свое активное развитие и испытывающих лишь местные деформации, связанные с режимом перекаатов. Спрявление таких излучин затруднено из-за возникновения специфических гидравлических явлений в протоке (поперечные перекосы в сторону переуглубления в вершине, направляющего воздействия плеч коренных берегов, образование водоворотных зон и т.д.), и подобные факты, за исключением создания искусственных прорезей – каналов, неизвестны.

Таким образом, трансформация сегментных адаптированных излучин в систему вынужденных – адаптированных (трапецевидных, или сундучных) излучин обуславливает общую стабилизацию русла.

Вписанные излучины очень редко составляют самостоятельный морфодинамический тип русла (и, соответственно, образующие морфологически однородный участок), как это показано на рис. 95Г. Чаще они чередуются с вынужденными и собственно адаптированными излучинами, что связано с неоднородным строением бортов долины. Обычно один из них представлен обрывом или склоном приречной части плато, сложенных коренными трудноразмываемыми породами, другой – уступами низких аккумулятивных террас. Именно такое соотношение отражено на фотографии скандинавской реки (рис. 14).

Адаптированные излучины этого типа – вписанные (с привершинной частью в коренных берегах), как правило, характеризуются очень высокими темпами размыва вогнутых песчаных берегов (до 30-50 м/год на больших реках) и стабильностью своего положения по длине реки благодаря их направляющему воздействию. Наибольшей интенсивностью деформаций характеризуются вписанные излучины, чередующиеся с вынужденными и собственно адаптированными. Это объясняется, помимо особенностей динамики потока, дефицитом наносов перед вписанной излучиной. Он возникает из-за аккумуляции наносов вдоль пойменного берега между вынужденной и адаптированной излучинами выше по течению, который не компенсируется поступлением в поток твердого материала при подмыве рекой коренного берега, сложенного трудноразмываемыми породами.

Благодаря направляющему воздействию плеча коренного берега, образующего верхнее крыло собственно адаптированной излучины, стрелень потока прижимается к вогнутому берегу в привершинной части смежной вписанной излучины. Это также способствует повышенной интенсивности размыва уступа песчаной террасы. При этом, также вследствие направляющего воздействия плеча противоположного коренного берега место подхода потока к уступу террасы оказывается зафиксированным. Все это способствует преобладанию поперечного смещения вписанной излучины и направленному увеличению стрелы прогиба вогнутости (выбоины) береговой линии. В то же время вниз по длине фронта размыва вогнутого берега его интенсивность ослабевает из-за поступления больших масс песка в поток. По подсчетам А.А. Зайцева [1979], на нижнем Вилное размыв вогнутого берега высотой 25-30 м поставляет в поток ежегодно 1,7 млн. тонн наносов при скорости его отступления 20-25 м/год. Поэтому нижнее крыло вписанной излучины смещается по сравнению с привершинной ее частью медленнее, а со временем, по мере развития стрелы прогиба вогнутости береговой линии, практически стабилизируется. В результате вся система вынужденных – собственно адаптированных и вписанных излучин русла в узкой долине получает устойчивое положение в плане.

Форма привершинной части вписанных излучин близка к форме развитой сегментной излучины, а ее параметры соответствуют водности реки, с учетом сравнительного небольшого растекания потока по пойме в многоводную фазу режима.

4.2. Вынужденные и вписанные излучины широкопойменного русла



Широкопойменное русло вне зависимости от его морфодинамического типа в процессе блуждания, вследствие общего изгиба долины, предопределенного геолого-геоморфологическим строением территории, и в целом несовпадения направления течения реки ориентировке долины периодически соприкасается с коренными бортами долины или уступами аккумулятивных террас. В этом случае оно образует одиночные вынужденные (при подходе к коренному берегу, сложенному трудноразмываемыми породами) или вписанные (при размыве уступов песчаных террас) излучины. Если при этом русло на значительном по протяженности участке располагается вдоль борта долины, периодически отходя от него под влиянием неровностей береговой линии и вновь возвращаясь к нему, вынужденные или вписанные излучины могут встречаться неоднократно, чередуясь с другими типами русла. На верхней Оби (рис. 98А) выше и в районе г. Барнаула перед коленообразным изгибом долины на участке длиной около 40 км русло образует три вынужденные излучины, сопрягающиеся сверху с свободными сегментными излучинами и вниз по течению – с относительно прямолинейным руслом вдоль левого коренного берега.

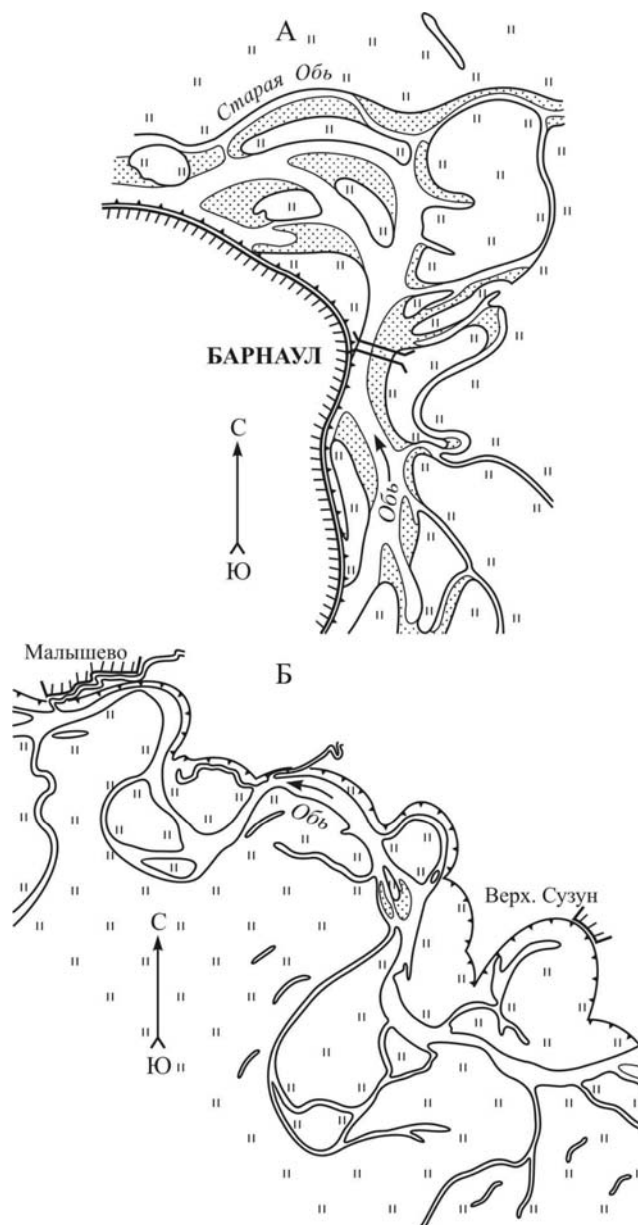


Рис. 98. Встречаемость вынужденных (А) и вписанных (Б) излучин на верхней Оби при расположении русла, соответственно, вдоль левого коренного берега (район г. Барнаула) и уступов правобережных террас (район сел Сузуна и Малышево).

Ниже г. Барнаула (на широтном участке долины) сначала наблюдается аналогичная картина на участке длиной около 100 км, где река продолжает течь вдоль уступов Предалтайского степного плато высотой 80-100 м. Затем она переваливает к правому борту, образованному уступами песчаных террас. Здесь русло на участке длиной около 40 км представлено несколькими вписанными излучинами, разделенными сериями свободных излучин (рис. 98Б). В целом вынужденные и вписанные излучины широкопойменного русла встречаются достаточно часто, но их доля по отношению к свободным излучинам невелика, и они не образуют морфологически однородных участков.

Форма, параметры и деформации *вынужденных излучин* каждой реки определяются: 1) углом встречи реки с бортом долины; 2) конфигурацией и типом русла на вышележащем участке; 3) параметрами смежных форм русла (излучины, разветвления) выше по течению; в свободномеандрирующем русле имеет значение, одиночную излучину или серию излучин образует оно на подходе к борту долины.

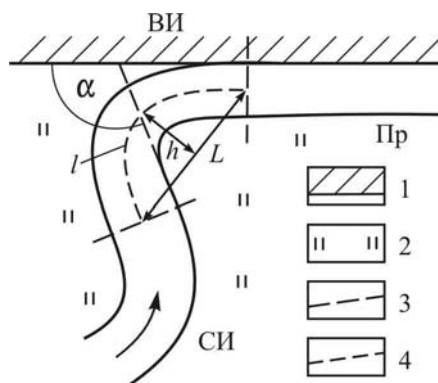


Рис. 99. Схема для определения параметров вынужденной излучины: α — угол встречи потока с коренным берегом; L — шаг; l — длина; h — стрела прогиба излучины. СИ — смежная свободная излучина; ВИ — вынужденная излучина; Пр — прямолинейное русло. 1 — коренной берег; 2 — пойма; 3 — граница вынужденной излучины; 4 — геометрическая ось русла.

Степень выраженности вынужденных излучин зависит от угла встречи (подхода) русла реки с коренным берегом α (рис. 99). При этом степень выраженности является аналогом степени развитости свободных излучин и определяется соотношением тех же параметров — l/L . Однако, если со стороны верхнего крыла установление верхней границы вынужденной излучины затруднений не вызывает (она соответствует таковой для свободных излучин, показанной на рис. 6), то в нижнем крыле возникает неопределенность, связанная с его переходом в прямолинейное русло. Поэтому длину нижнего крыла предлагается принимать равной длине верхнего. Угол

встречи при этом определяется между линией коренного берега, направленной сверху вниз по течению реки, и касательной к линии выпуклого берега излучины в верхнем ее крыле перед поворотом русла. От угла встречи α зависит также вероятность и величина подпора, возникающего в потоке в многоводную фазу режима при его набегании на берег, образующий по отношению к нему встречное препятствие. С ним связан и характер взаимодействия руслового потока с водами, стекающими с выклинивающегося к вершине излучины пойменного массива. Если использовать классификацию схем взаимодействия пойменного и руслового потоков, предложенную Н.Б. Барышниковым [1984], то при малых углах встречи ($\alpha < 85^\circ$) происходит плавное их соединение (тип III); при больших углах пойменный поток оказывает тормозящее воздействие на русловый поток и вызывает в нем подпорные явления (тип IV). Это проявляется в уменьшении скоростей и расходов воды при схождении осей руслового и пойменного потоков, перегибу или изменению направления кривых $Q=f(h_p)$ и особенно $V=f(h_p)$ при уровнях затопления поймы.

В процессе развития вынужденной излучины происходит трансформация ее формы, которая идентична до определенного момента рассмотренной выше для вынужденных излучин адаптированного русла. При этом изменяются не только угол подхода потока к коренному берегу, но и параметры самой излучины, гидравлические характеристики потока, усиливающие подпорные явления, и т.д. Иными словами, вынужденные излучины в процессе своего развития проходят несколько стадий. Используя уже примененный прием (рис. 48), эволюция вынужденных излучин с соответствующими каждой стадии их развития соотношениями параметров, дополненных значениями угла встречи верхнего крыла с коренным берегом, может быть представлена в виде схемы на рис. 100А. Схематические формы вынужденных излучин, соответствующие последовательным стадиям их развития, с обозначением углов встречи, показаны на рис. 100Б. Это подтверждается зависимостью степени развитости вынужденных излучин от угла встречи потока с коренным берегом (рис. 101).

На стадиях I-III развитие вынужденных излучин широкопойменного русла происходит по той же схеме, что и у таковых, но в узкой долине (адаптированное русло). Однако дальнейшая эволюция присуща только широкопойменному руслу, т.к. у адаптированного стадия III завершается консервацией форм русла, их стабилизацией. Трансформация вынужденных излучин на IV и V стадиях осуществляется, главным образом, из-за продолжающегося развития смежных форм русла, особенно – свободных излучин. Последние продолжают смещаться, вовлекая в этот процесс верхнее крыло вынужденной излучины, что приводит к превращению последней сначала в заваленную, а затем в гипертрофированную вплоть до пальцеобразной, у которой верхнее крыло располагается субпараллельно коренному берегу, но против общего уклона дна долины и общего направления течения реки. По-

ворот потока в вершине такой излучины происходит под углом $\alpha \approx 180^\circ$. По существу именно на такой гипертрофированной вынужденной излучине

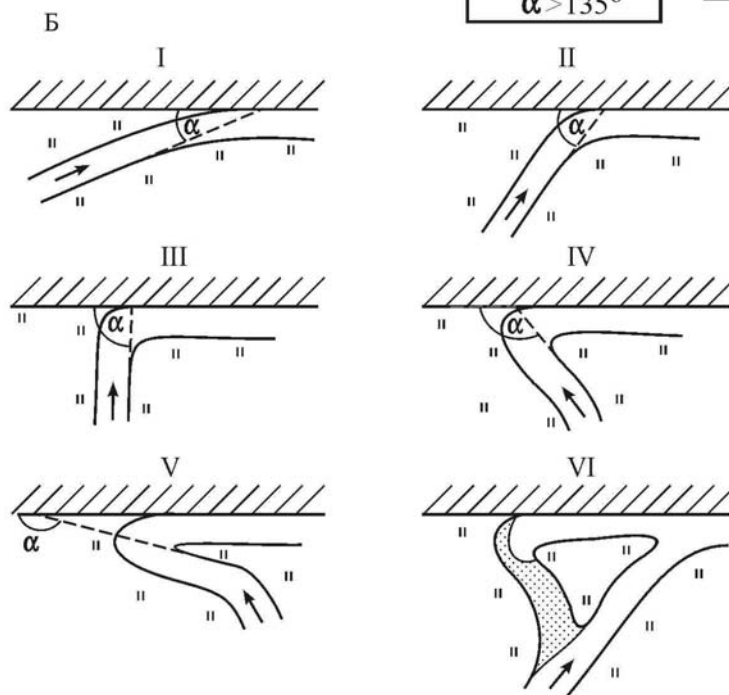
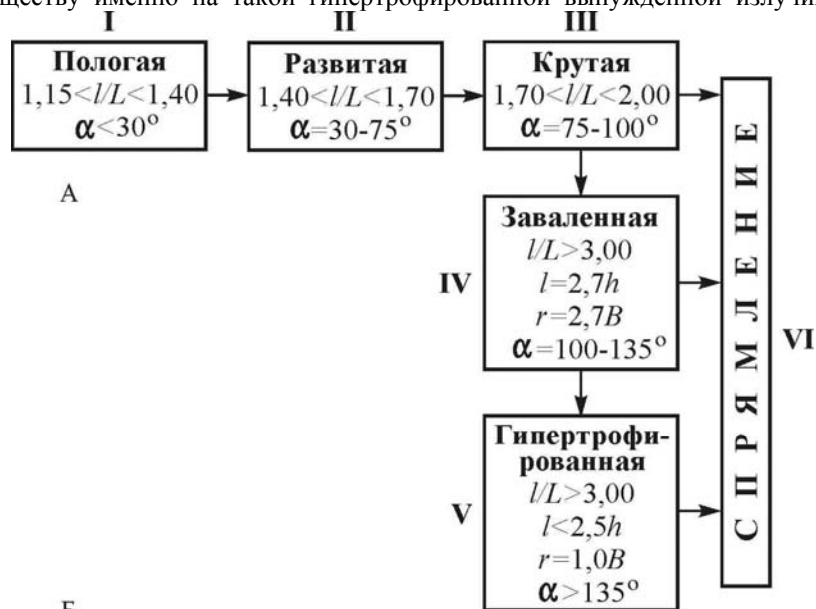


Рис. 100. Классификация вынужденных излучин широкопойменного русла (А) и стадии (I-VI) их развития (Б).

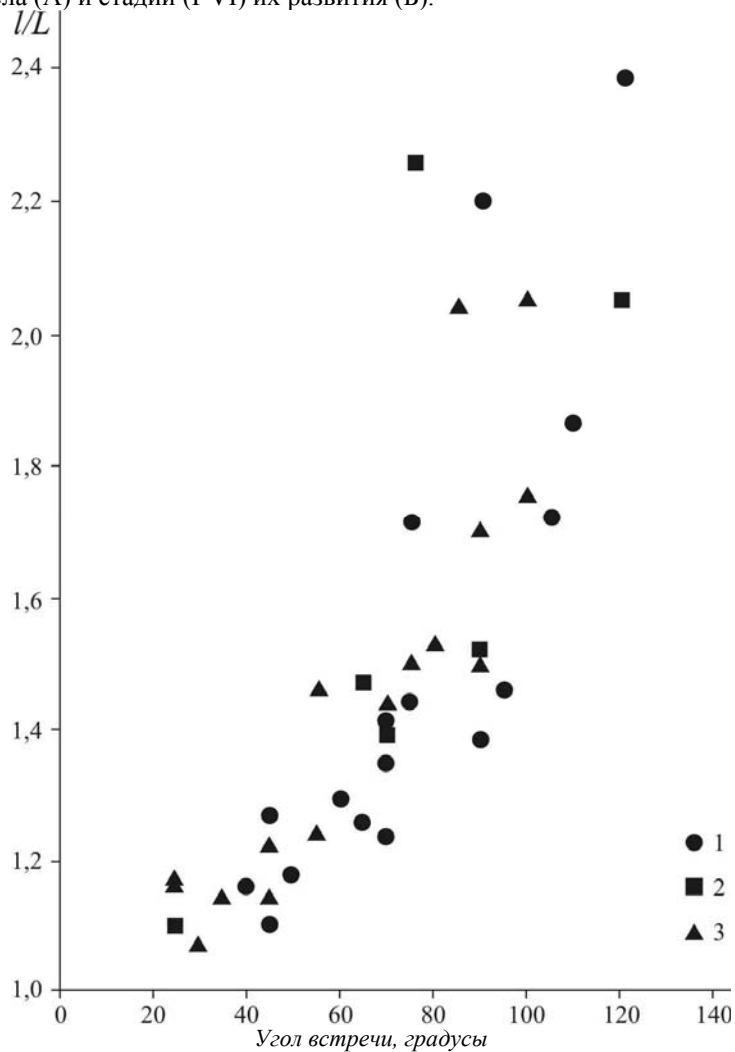


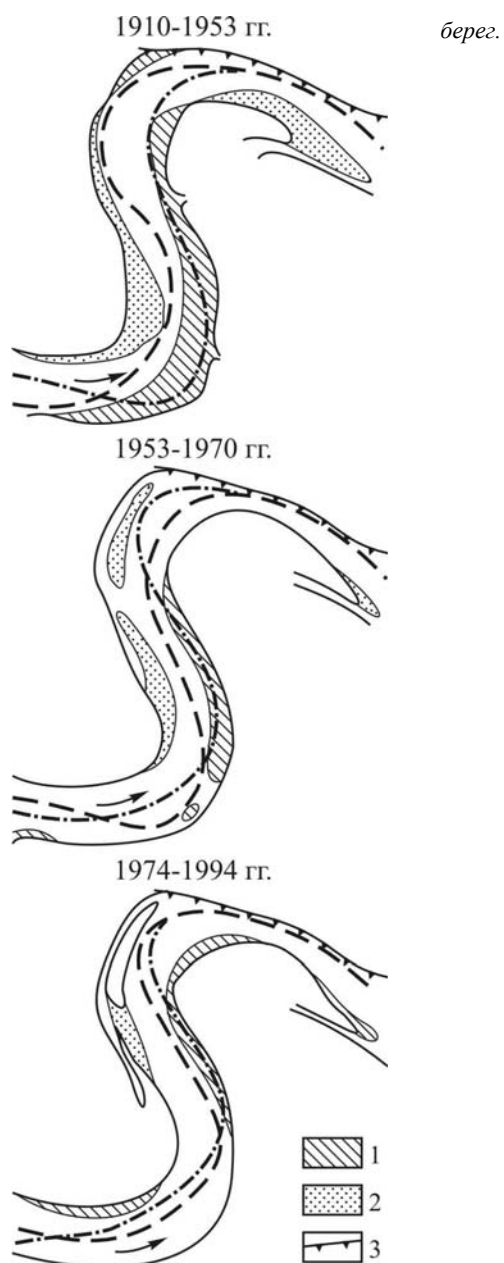
Рис. 101. График зависимости степени развитости вынужденных излучин от угла встречи потока с коренным берегом: 1 – р. Пинега; 2 – р. Тобол; 3 – Тура.

пойменной протоки р. Иртыша Н.А. Ярных [1978] изучал структуру потока в условиях, когда $r=B$ и у вогнутого берега в вершине излучины образовалась водоворотная зона (рис. 26Б). По его данным в верхнем крыле излучи-

ны выпуклый берег размывается со скоростью 3 м/год, вследствие чего шпора излучин за 65 лет сузилась до 70 м (при ширине русла – 200 м).

Пример эволюции вынужденной излучины приведен на рис. 102, на котором даны сопоставленные и совмещенные планы русла Вычегды почти за 100-летний период.

Рис. 102. Трансформация вынужденной Целибо-Вожемской излучины р. Вычегды за период 1910-1994 гг (по сопоставленным картам русла): *1 – области размыва; 2 – области аккумуляции; 3 – коренной*



На фотографии (рис. 103) показана вынужденная излучина выше г. Барнаула. Ее развитие на стадии развитой излучины с преимущественным продольным смещением было рассмотрено И.В. Поповым [1965] в связи с прогнозом заносимости коммунального водозабора г. Барнаула, сооружен-

ного непосредственно ниже вершины излучины (он виден на первом плане в правой части рис. 103). До 60-х годов эта излучина смещалась вниз по течению со скоростью до 15-20 м/год, что в итоге привело к тому, что водозабор оказался в затонине, и для его функционирования стала требоваться регулярная разработка средствами землечерпания подходов к нему. Одновременно в связи с смещением вершины излучины под угрозой разрушения оказалась построенная возле нее на правом пойменном берегу опора ЛЭП. Более интенсивное смещение смежной свободной излучины привело к переходу вынужденной излучины в стадию крутой. Уже в 80-е годы дальнейшее смещение вершины излучины практически прекратилось, тогда как выше по течению пойменный берег продолжает размываться с той же скоростью. Этому способствовало его закрепление каменной наброской для предотвращения разрушения опоры ЛЭП. В результате верхнее крыло излучины оказалось ориентированным под углом $\alpha \approx 90^\circ$ к левому коренному берегу; динамическая ось потока прижимается к нему лишь ниже водозабора, а подходы к водозабору оказались в водоворотной зоне, аккумуляция наносов в которой явилась новым фактором (после смещения излучины) заносимости водозабора.

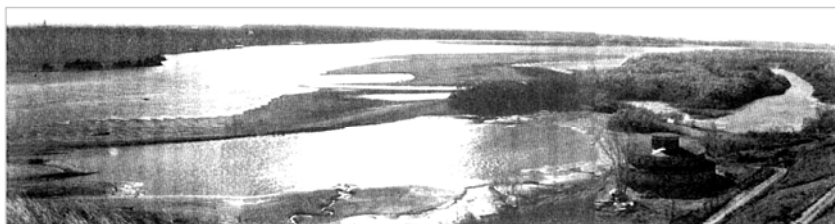


Рис. 103. Вынужденная излучина р. Оби выше г. Барнаула (на переднем плане справа – городской водозабор). *Фото В.Н. Дьячкова.*

Спрявление вынужденных излучин (стадия VI) может прервать их эволюцию, начиная с приобретения ими крутой формы, т.е. со стадии III. Обычно они спрямляются благодаря развитию смежных свободных излучин, развитию спрямляющего протока при прохождении руслоформирующих расходов воды в условиях затопленной поймы или развитию второстепенного рукава среди островов, составляющих шпору излучины (в разветвленно-извилистом русле). В этих случаях возможно исчезновение самой вынужденной излучины как формы русла.

Подпор потока выше слива вод к вершине вынужденной излучины с вышерасположенного пойменного массива в многоводную фазу режима при подходе русла под большим углом к коренному берегу распространяется на верхнее крыло излучины. Вследствие этого здесь может сформироваться одиночное разветвление русла (рис. 104), либо излучины на крыльях осложняются разветвлениями второго порядка. В первом случае переформирования разветвления оказывают существенное влияние на развитие из-

лучины. Если развивается рукав, сопрягающийся с верхним ее крылом, процесс искривления излучины активизируется, т.к. усиливаются размывы выпуклого берега. Наоборот, при развитии противоположного рукава угол подхода потока к коренному берегу уменьшается, смещение верхнего крыла излучины прекращается или становится менее активным: развитие излучины в целом затормаживается.

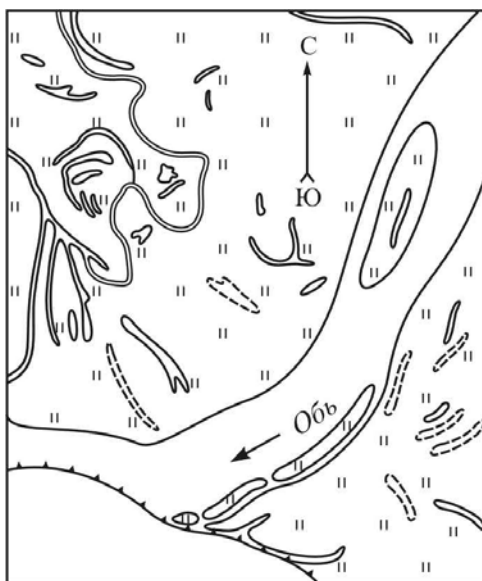


Рис. 104. Разветвление русла верхней Оби в верхнем крыле вынужденной излучины.

В том случае, если вынужденная излучина завершает серию свободных излучин, то под влиянием стабилизации и искривления вынужденной излучины при продолжающемся смещении смежных свободных излучин происходит их сжатие. Радиусы кривизны излучин при этом от верхней в серии до замыкающей вынужденной изменяются согласно зависимости [Матвеев, 1985]:

$$r = k \left(\sum_{i=1}^m l \right)^{-0,4}, \quad (4.1)$$

где $\sum_{i=1}^m l$ – длина русла от начала серии до вершины данной излучины (сумма длин всех излучин). Коэффициент $k = 4,8$ на среднем и нижнем Вилюе; на других реках, очевидно, он приобретает другие значения.

Параметры вынужденных излучин широкопойменного русла для ряда рек, различающихся по водоносности, в зависимости от стадии их развития приведены в таблице 29. Очевидно, что наличие внешнего воздействия (коренной берег, сложенный трудноразмываемыми породами) делает

невозможным отыскание традиционных при изучении меандрирующих рек гидролого-морфологических зависимостей.

Таблица 29. Параметры вынужденных излучин широкопойменных русел

Река	$Q_{ср}$, м ³ /с	Излучина, км от устья	Параметры, м					
			r	L	L	h	l/L	B
Виллой	1170	412	1100	2700	3750	1150	1,39	675
	1320	322	1000	2100	2575	625	1,23	450
Вычегда	440	444	1250	2550	3550	975	1,39	350
	875	286	600	1575	2900	1100	1,84	250
	1000	173	440	1140	1550	500	1,36	300
Амур	4750	700	3400	7900	11000	3250	1,39	850
	3500	925	3600	6800	8700	2500	1,28	1000
Обь	1000	316*	1500	3325	4750	1450	1,43	420
Тобол	840	44	1200	2800	3450	900	1,23	350

* примечание: на Оби расстояние дано от слияния Бии и Катунь

Вписанные излучины широкопойменного русла в своем развитии в общем подчиняются закономерностям, свойственным свободным излучинам, а по интенсивности не только не уступают им, но нередко оказываются более активными при одинаковой устойчивости русла. Это объясняется песчаным строением их вогнутых берегов и большей сосредоточенностью потока вдоль них при отсутствии перелива воды в пределы поймы. На верхней Оби, например, максимальная скорость размыва берегов зафиксирована на Тарадановской вписанной излучине – 50-60 м/год. На перегибах русла ниже таких излучин обычно формируются самые мелководные перекаты, в пределах которых аккумулируются продукты размыва вогнутых берегов. Теоретически возможно, что вписанные излучины получают все возможные очертания и проходят все стадии развития, что и свободные излучины. Однако в действительности встречаются излучины только первых стадий – до крутой сегментной, после чего при благоприятных условиях они спрямляются. Пример подобного спрямления дает Красноярская излучина на р. Оби ниже устья Томи (рис. 105). С начала XX столетия, т.е. в течении 100 лет, в шпоре этой излучины сформировался рукав, по которому проходит современный судовый ход. Он впервые был отмечен на карте в 1929 г. В это время радиус кривизны излучины достиг критической величины для данных условий и составил менее 1,5 км, а соотношение длины излучины и шага – $l/L > 2$. После спрямления новый рукав, развившейся на месте маловодной пойменной протоки, пересекавший шпору излучины, стал интенсивно разрабатываться, а вход в бывший рукав быстро заноситься наносами.

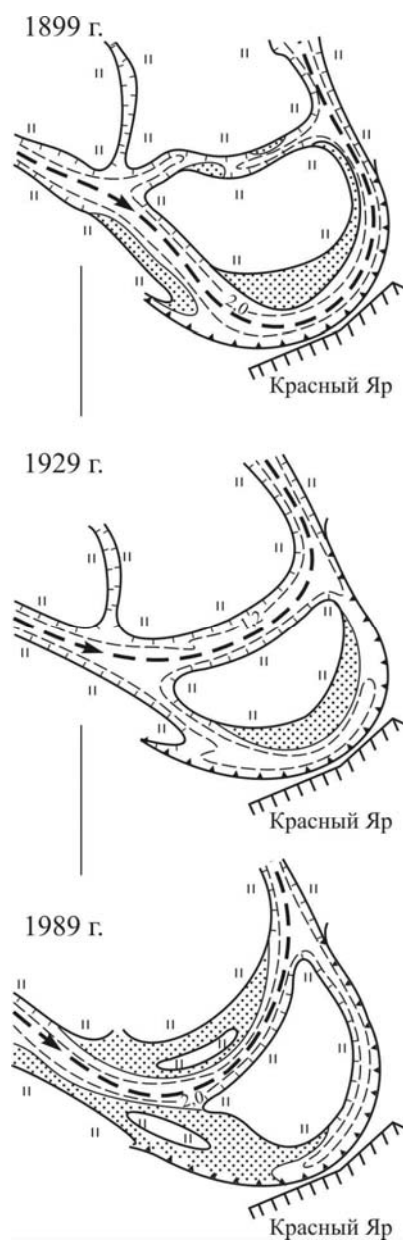


Рис. 105. Спряменение Красноярской вписанной излучины средней Оби (сопоставленные планы русла за 1899-1989 гг).

Подобные спрямления вписанных излучин известны на верхней Оби, Чумыше (рис. 106), Немане, Белой (приток Камы) и многих других реках. После спрямления следы их сохраняются не только в рельефе пойм, но и в конфигурации уступов надпойменных террас. Так как русло в процессе блуждания неоднократно подходит к террасовым уступам, то последние приобретают фестончатые очертания в плане, фиксируя положения палеоизлучин. Параметры таких фестонов можно использовать для палеоруслового анализа.



Рис. 106. Старица, образовавшаяся после спрямления вписанной излучины на р. Чумыше (1986 г). *Фото Р.С. Чалова.*



ГЛАВА 5



ВРЕЗАННЫЕ ИЗЛУЧИНЫ



5.1. Условия формирования врезанных излучин

Под врезанными обычно подразумеваются излучины, в шпорах которых имеются незатапливаемые поверхности – низкая терраса (наиболее распространенный вариант в равнинных условиях), лестница террас или выступы коренных берегов и участков междуречья (более характерно для долин, расчленяющих возвышенные равнины, предгорья и горные территории). Этот признак является лишь критерием для идентификации врезанных излучин, но основанием для выделения врезанных и свободных излучин в отдельные группы в морфодинамических классификациях речных русел служит специфика развития врезанного меандрирующего русла, приводящая к отсутствию транзитного потока через шпору в многоводную фазу режима. В результате, во-первых, врезанные излучины по достижении предела гидравлической выгоды не могут спрямляться «сверху», путем размыва ложбины на поверхности шпоры. Единственный вариант их спрямления – прорыв шейки излучины при сближении противоположных крыльев при встречном размыве берегов (спрямление «сбоку»). Во-вторых, стеснение пойменного потока незатапливаемыми берегами приводит к росту скоростей потока и удельных руслоформирующих расходов воды, по сравнению с широкопойменными руслами. Это сказывается на увеличении крупности руслообразующих наносов, размеров самих излучин и потенциала боковой эрозии (размыва берегов).

Казалось бы, естественным следствием последнего должны быть высокие скорости горизонтальных трансформаций врезанных излучин. Однако темпы развития врезанных излучин на порядки величин меньше, чем свободных. Объясняется это тем, что подмываемые берега врезанного русла обычно обладают большой противозерозионной устойчивостью, т.к. чаще всего сложены скальными породами. При рыхлом составе слагающих отложений (например, песчаный аллювий аккумулятивных террас) они представляют уступы значительной высоты или имеют цоколь из трудноразмываемых пород. Действительно, очень редко можно встретить врезанные излучины в низких и легкоразмываемых (например, песчаных) берегах: такие излучины быстро смещаются вдоль по долине, срезая незатапливаемые шпоры, и превращаются в свободные. Именно такие излучины на размываемой модели Н.И. Маккавеев и Н.В. Хмелева [Экспериментальная гео-

морфология, 1969] как начальную форму развития извилистого русла назвали адаптированными.

Исключение могут представить случаи экстремально высоких скоростей врезания рек. Например, на р. Алабуге (Центральный Тянь-Шань, приток Нарына) зафиксирована по археологическим данным и с помощью дендрохронологического метода (по спилам деревьев на пойме и надпойменных террасах) скорость врезания до 30 см/год. При галечном и галечно-мелковалунном строении аллювия и составе современных руслообразующих наносов темпы размыва берегов не превышают 1-2 м в год, а при высоте подъема уровня воды над меженью в 1,4 м максимальная высота поймы составляет 1,35 м [Панин и др., 1990]. В этих условиях врезанные излучины сохраняются в относительно легко размываемых озерных отложениях, заполняющих котловину, которую пересекает р. Алабуга. Для долины этой реки характерны, с одной стороны, ступенчатый поперечный профиль поймы и террас, образующих в шпорах излучин своеобразные “лестницы”, а с другой – вертикальные обрывы коренных берегов в вершинах таких излучин (рис. 107).



Рис. 107. Врезанные излучины р. Алабуги (Центральный Тянь-Шань). Фото Р.С. Чалова.

Основная причина формирования врезанного русла – «преобладание» глубинной эрозии над боковой [Маккавеев, 1955], т.е. такое соотношение скорости врезания и темпов горизонтальных деформаций, что время смещения русла на расстояние, равное потенциальной ширине пояса активного руслоформирования, превышает время, необходимое для превращения поймы в надпойменную террасу. В меандрирующем русле это означает, что за время смещения излучины вниз по долине на расстояние, равное ее шагу, величина врезания русла такова, что часть пойменного массива в шпоре излучины выходит из-под уровня затопления.

Механизм продольного смещения излучины состоит, как известно, в наращивании выпуклого берега в нижнем крыле и размыве его – в верхнем. Молодая пойма в нижнем крыле растет в высоту за счет накопления наилка; одновременно происходит врезание русла и снижение горизонта максимального подъема уровней воды. Для того, чтобы молодая пойма вышла из-под уровня затопления, т.е. превратилась в надпойменную террасу, необходимо некоторое время T' . Это время прямо зависит от амплитуды высоты поймы ΔH_n (разница максимальных и минимальных высотных отметок поймы – от уровня максимального подъема половодья до уровня прирусловых отмелей, на котором начинается их зарастание; все высоты отсчитываются от уровня межи) и от скорости изменения относительной высоты поверхности поймы. Последняя складывается из скорости аккумуляции (наилконакопления) U_a и скорости врезания русла U_e . Темпы наилконакопления зависят от относительной высоты элементарной площадки, изменяющейся с течением времени. Скорость врезания можно для ограниченных отрезков времени принять постоянной.

Вновь сформированный участок поймы будет размыт в ходе развития излучины, когда она сместится в продольном направлении на расстояние, равное ее шагу L . Если за это время пойма в шпоре успевает выйти из-под уровня затопления, излучина становится врезанной, т.е. врезанное извилистое русло сформируется, если:

$$\frac{L_u}{U_u} > T' = \int_{H_n^{min}}^{H_n^{max}} \frac{dh}{U_a(h) + U_e} \quad (5.1)$$

где U_u – скорость продольного смещения излучины, H_n^{max} , H_n^{min} – максимальная и минимальная относительные высоты поймы.

С ростом поймы в высоту уменьшается частота ее затопления, а значит снижаются темпы наилконакопления. Анализ нескольких одномерных моделей пойменной аккумуляции показал, что введение соответствующих зависимостей в модель (5.1) существенно усложняет решение, не приводя к качественному изменению результата [Панин, 1991]. Поэтому возможно ограничиться наиболее простым и наглядным вариантом, приняв скорость пойменной аккумуляции за постоянную величину – среднюю за время формирования данного участка поймы.

Учитывая, что шаг излучин в среднем равен 5-кратной ширине русла [Leopold, Wolman, 1960] и предполагая темпы наилконакопления U_a постоянными, из (5.1) получаем критериальное условие формирования врезанного меандрирующего русла:

$$\frac{U_u}{U_a + U_e} < 5 \frac{B_p}{\Delta H_n} \quad (5.2a)$$

или:

$$(U_s + U_a) > U_u \frac{\Delta H_n}{5B_p} \quad (5.26)$$

На рисунке 108 представлено параметрическое семейство кривых, представляющих граничные условия между формированием врезанных и свободных излучин при разных значениях ΔH_n . Из графика видно, что переход к формированию врезанных излучин становится возможен, если скорость роста относительной высоты поймы (сумма скоростей врезания и пойменной аккумуляции) является величиной одного порядка с темпами продольного смещения излучин, нормированными к ширине русла.

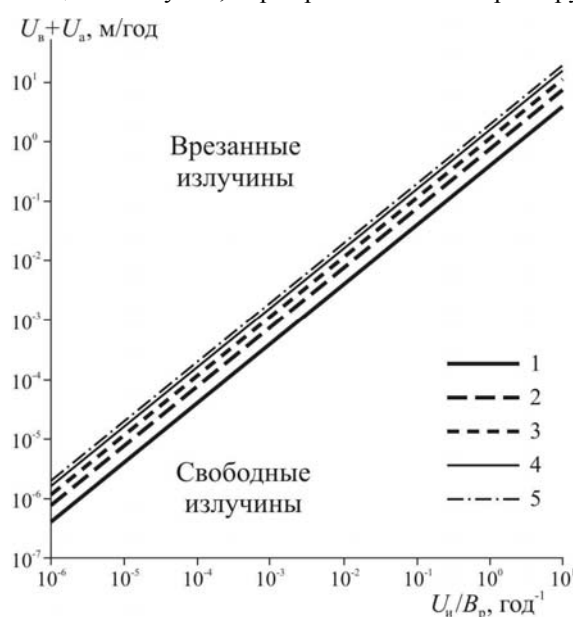


Рис. 108. Области существования врезанных и свободных излучин при разных соотношениях скоростей врезания U_v и продольного смещения излучин U_u . Амплитуда высоты поймы (разница максимальных отметок поймы и уровней зарастания песчаных отмелей): 1 – 2 м; 2 – 4 м; 3 – 6 м; 4 – 8 м; 5 – 10 м.

Обратимся к фактическим данным о темпах вертикальных деформаций речных русел. К настоящему времени накоплен обширный региональный материал, свидетельствующий о цикличности развития этих процессов – чередовании периодов направленной глубинной эрозии и направленной аккумуляции. Плейстоценовая история речной сети европейских и североамериканских равнин [Dury, 1964], северо-востока Сибирской платформы [Шофман, 1979], Дальнего Востока и Северо-Востока России [Воскресенский, 1979], гор Средней Азии [Макарова и др., 1979] и других регионов представляла собой чередование этапов врезания и заполнения до-

лин аллювием, отражавших смену природной обстановки на глобальном и региональном уровнях. Наряду с этим, террасированность современных речных долин, повсеместное наличие позднеплейстоценовых и часто – голоценовых террас свидетельствует о преобладании эрозионных тенденций в долинах большинства рек в конце позднего плейстоцена – голоцене (табл. 30).

Таблица 30. Скорости врезания рек, осредненные за разные промежутки времени

Река	Время осреднения, тыс. лет	Скорость врезания, мм/год (м/тыс. лет)	Источник
Реки равнинных территорий			
Зея	300	0,33 ¹⁾	Воскресенский, 1979
Волга, среднее течение	200	0,175 ¹⁾	Воскресенский, 1979
Миссисипи	200	0,175 ¹⁾	Воскресенский, 1979
Протва	200	0,115 ¹⁾	Воскресенский, 1979
Москва	200	0,120 ¹⁾	Воскресенский, 1979
Днестр	50	0,15-0,35 ¹⁾	Никонов, 1973
Лена, среднее течение	40-45	1-2 ¹⁾	Борсук, Чалов, 1973
Сейм	25-35	0,1-0,41)	Никонов, 1973
Ангара	30	0,56 ¹⁾	Воскресенский, 1979
Белая	21-30	0,5-0,71)	Никонов, 1973
Волга, верх. течение	8-26	0,5-0,6 ¹⁾	Нуждин, 1968
Протва	12-15	0,5-0,7 ²⁾	Панин, 2001
Огре (Латвия)	3,7	4 ¹⁾	Ильвес и др., 1981
Гауя (Латвия)	2-4	0,6-0,7 ¹⁾	Ильвес и др., 1981
Протва	0,8-1,2	1,5-3 ²⁾	Панин, Каревская, 2000
Северная Двина	0,05	7 ³⁾ 0,1-0,4 ⁴⁾	Чалов и др., 2000
Лена, нижнее течение	0,04	7 ³⁾ 4 ⁴⁾	Чалов и др., 2000
Янцзы	0,037	5-17 ³⁾ 6-10 ⁴⁾	Чалов и др., 2000
Обь, верхнее течение	0,035	15-18 ⁵⁾ 2,2-7,1 ⁴⁾	Чалов и др., 2000
Обь, верхнее течение	n×0,01	0,8 ⁴⁾	Маккавеев, Чалов, 1964
Реки горных территорий			
Берелех	2000 100	0,1 ¹⁾ 0,35 ¹⁾	Воскресенский, 1979
Инд	7-60	2-12 ¹⁾	Howard, 1996
реки Кавказа	50-55	0,5-1 ¹⁾	Никонов, 1973
Хульм (Гиндукуш)	31-37	<3,6 ¹⁾	Никонов, 1973
Яксу (Памир)	30 6-8	1,7 ¹⁾ 1,3-1,6 ¹⁾	Никонов, 1973
Карасу (Ферганский хр.)	9-11 7	3 ¹⁾ 4-7 ¹⁾	Никонов, 1973
Вахш, сред. течение	10	2,3-2,5 ¹⁾	Никонов, 1973
Алабуга (Центр. Тянь-Шань)	1,3 0,02	19 ¹⁾ 300-400 ⁶⁾	Панин и др., 1990
Гумиста, устье	n×0,01	3 ³⁾	Мандыч, Чалов, 1970
Чаткал, Пскем, Угам	0,02-0,03	10-70 ⁵⁾	Хакимов, 1992
Мзымта (Кавказ)	0,02	55 ⁵⁾	Козловский, 1951

Методика определения скорости врезания: ¹⁾датирование надпойменных террас; ²⁾датирование кровли русловой фации аллювия поймы и террас; ³⁾расчет по темпам отступления устьевых створа; ⁴⁾расчет по балансу наносов на участке реки; ⁵⁾расчет по смещению кривых связи уровней с расходами воды; ⁶⁾совмещение поперечных профилей дна

Из таблицы 30 следует, что осредненные за последние тысячи – первые десятки тысяч лет скорости врезания рек на равнинах составляют 0,1-4 мм/год (чаще всего 0,5-1 мм/год), что в среднем на порядок меньше, по сравнению с реками горных территорий. При осреднении за сотни тысяч лет скорости углубления долин составляют не более 0,35 мм/год даже для горных территорий, что отражает существование циклов врезания рек и направленного накопления аллювия. Однако расчеты и определения для последних нескольких десятилетий, основанные на применении точных методов (кривых связей уровней и расходов воды, баланса наносов), показывают, что вертикальные деформации отрицательного знака имеют темпы, превышающие установленные палеогеографическими методами в несколько раз, а иногда и на порядок величины. При этом между данными, полученными этими методами, также обнаруживаются заметные расхождения. Метод анализа кривых связей уровней и расходов воды, привязанный к конкретному створу реки, склонен завышать результат. Напротив, в методе баланса наносов, оперирующем с участком речной долины, возможно занижение результата.

Темпы роста пойм в высоту за счет накопления наилка оцениваются обычно путем датирования пойменных отложений, залегающих на различной глубине. Наличие погребенных почв в толще пойменных отложений свидетельствует о периодах ослабления или даже прекращения аккумуляции. Поэтому рассчитанные средние темпы пойменной аккумуляции зависят от времени осреднения: обычно, чем более продолжительным является расчетный период времени, тем ниже полученные величины скоростей осадконакопления (табл. 31). Осредненные за первые тысячелетия скорости пойменной аккумуляции на различных реках колеблются от долей мм до первых мм/год, т.е. составляют величину того же порядка, что и скорости врезания равнинных рек.

Общие темпы увеличения относительной высоты поймы складываются из скорости врезания реки (понижения абсолютных отметок меженного горизонта воды) и аккумуляции наилка на поверхности поймы. На равнинных реках это доли миллиметра – первые сантиметры в год, на горных – от первых миллиметров до первых десятков сантиметров в год (табл. 30, 31). Сопоставим натурные данные с критериальными условиями формирования врезанных излучин, полученными теоретическим путем (5.26; рис. 108). Возьмем типичную реку среднего размера с шириной русла 50 м, максимальной высотой половодья 7 м, уровнем зарастания прирусловых отмелей на высоте 2 м над меженью. Для такой реки $\Delta H_n = 7 \text{ м} - 2 \text{ м} = 5 \text{ м}$. При темпах продольного смещения излучин 10 м/год врезанные излучины будут формироваться при $U_a + U_s$ более 20 см/год. Это на 1-2 порядка величин превышает реальные темпы соответствующих процессов на равнинных

реках. Даже на большинстве горных рек в реальных условиях они меньше, и лишь в интенсивно воздымающихся горных странах оказываются сопоставимыми. В этом случае в горах формируются узкие ущелья и каньоны (рис. 109). Таким образом, при таких скоростях горизонтальных деформаций формирование врезанных излучин, как правило, невозможно. При темпах смещения излучин 1 м/год условие формирования врезанных излучин ($U_a + U_o$) > 2 см/год, что уже возможно для некоторых горных рек (табл. 30). При темпах продольного смещения излучин 0,1 м/год врезанные излучины будут формироваться, если скорость увеличения относительной высоты поймы превышает 2 мм/год. Такие условия складываются на большинстве горных и некоторых равнинных реках.

Таблица 31. Темпы аллювиальной аккумуляции на поймах равнинных рек

Река	Время осреднения, тыс. лет	Темпы накопления наилка, мм/год (м/тыс. лет)	Источник
Амур, нижнее течение	10 $n \times 0,01$	0,6-0,9 ⁵⁾ 0,56 ⁴⁾	по: Махинов, 1990
Яна (нижнее течение)	8	0,47 ¹⁾	Панин, 1991
Ока (среднее течение)	6	0,4 ²⁾	по: Гласко, Фоломеев, 1981
Реки Среднего Поволжья	6,8 3,0-3,9 1,2-2,4	0,4 ³⁾ 0,3-0,8 ³⁾ 0,8-1,5 ³⁾	по: Бутаков и др., 2000
Протва	2,4-5,3 0,6-1,3	0,25-0,5 ¹⁾ 0,5-0,7 ¹⁾	Панин, 2001
Шексна	5	0,46 ²⁾	Нуждин, 1994
Реки низменностей Латвии	3-4	0,1-1 ¹⁾	Ильвес и др., 1981
Реки возвышенностей Латвии	0,7-1	до 4 ¹⁾	Ильвес и др., 1981
Свапа	1,1	0,5-0,9 ³⁾	Панин и др., 2001
Кулм (Великобритания)	$n \times 0,01$	0,5 ⁴⁾	Walling, Bradley, 1989
Северная Двина (нижнее течение)	0,001	до 5 ⁶⁾ до 150 ⁷⁾	Шуравилин, 1965

Получено: ¹⁾ по ¹⁴C датированию пойменных отложений; ²⁾ по археологическим данным; ³⁾ по ¹⁴C-датировкам погребенных пойменных почв; ⁴⁾ балансовым методом; ⁵⁾ геоморфологическим методом; ⁶⁾ в годы с относительно кратковременным затоплением поймы; ⁷⁾ в годы с продолжительным затоплением поймы.

И.В. Поповым [Кондратьев, Ляпин и др., 1982] собраны данные о деформациях около 800 свободных излучин за период до 80-90 лет, полученные путем сопоставления разновременных карт. В качестве количественного показателя интенсивности деформаций принимается наибольшая среднемноголетняя скорость смещения бровки вогнутого берега, которая

оказалась связанной с меженной шириной русла (рис. 47). С увеличением размера реки скорость роста плановых деформаций увеличивается нелинейно. До ширины русла 400 м осредненная кривая медленно нарастает от 0 до 19 м/год. Далее прирост ускоряется: на реках шириной 600 м среднемаксимальное смещение излучин составляет около 32 м/год, а при ширине 800 м достигает 50 м/год. Кривые обеспеченности показали, что в 75% случаев средние многолетние смещения бровки вогнутого берега излучин превышают 3,5% меженной ширины русла, в 50% случаев – 5% и в 25% случаев – 9% ширины русла. Наибольшее значение по всей совокупности данных составило 20% ширины русла.

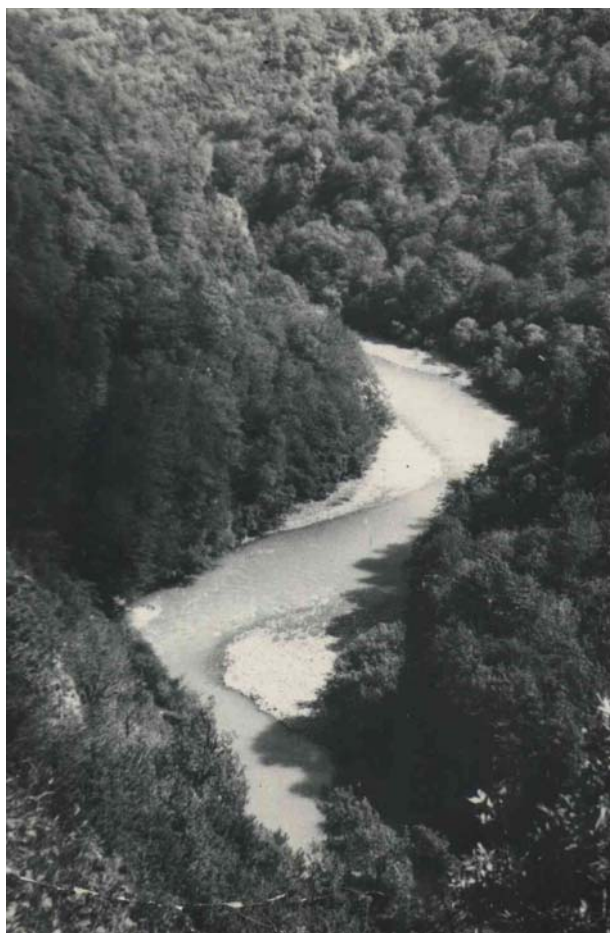


Рис. 109. Врезанные излучины горной реки (р. Бзыбь, Западный Кавказ).
Фото Р.С. Чалова.

Обратившись к формуле (5.26) и рис. 108, получаем темпы суммарного прироста поймы (за счет врезания реки и аккумуляции пойменного наилка), необходимые для формирования врезанного русла при разных ско-

ростях смещения излучин. Для скоростей смещения, отвечающих 25, 50 и 75%-м квантилям И.В. Попова, это 3,5, 5 и 9 см в год соответственно (при высоте поймы 7 м). Полученные оценки на порядок превышают типичные для равнинных рек величины, составляющие 0,5-2 мм/год (по данным табл. 30 и 31). Для формирования врезанных излучин их среднесуточное смещение не должно превышать 0,5-2% от ширины русла. Но даже и в этом случае темпы горизонтальных деформаций на два порядка величин превышают темпы врезания реки. Поэтому, если опираться на данные И.В. Попова, говорить о преобладании глубинной эрозии над боковой при формировании врезанного русла можно лишь условно. Однако эти данные представляются существенно завышенными; по-видимому, они отражают или экстремальные зафиксированные случаи размыва берегов, или должны соотноситься со сравнительно короткими отрезками времени (по отношению ко времени развития излучин), когда скорости их деформации достигают максимума.

Приведенные рассуждения приводят к парадоксальному, на первый взгляд, выводу: хотя врезание является главной причиной формирования врезанного русла, образование врезанных излучин определяется не столько темпами врезания реки, сколько темпами горизонтальных деформаций русла. Если принимать данные И.В. Попова без отмеченных выше оговорок, то следует учесть, что они все относятся к свободным условиям развития русловых деформаций, когда реки формируют свои русла в рыхлых аллювиальных отложениях, имеют сложенные ими широкие поймы и лишь местами подмывают песчаные уступы террас (вписанные излучины). Поэтому одним из основных факторов формирования врезанных излучин является противоэрозионная устойчивость берегов. Наиболее благоприятные условия складываются, если берега сложены трудноразмываемыми скальными или глинистыми породами. Скорости размыва таких берегов обычно не превышают сантиметры – первые десятки сантиметров в год, т.е. на 2-3 порядка ниже по сравнению с песчаными берегами. Соответственно, подавляющее большинство врезанных меандрирующих русел распространено в областях развития трудноразмываемых пород. В песчаных берегах врезанные излучины практически не встречаются.

С другой стороны, высокая противоэрозионная устойчивость берегов затрудняет развитие меандрирования. При этом большое значение приобретает фактор времени. На территориях, где речная сеть молода, для формирования меандров в трудноразмываемых породах может просто не хватить времени. Так, Ф. Хьюлстром [Hjulstrom, 1942] на примере равнинной части Швеции, освободившейся от ледникового покрова лишь чуть более 10 тыс. лет назад, делает вывод о меньшей распространенности меандрирующих участков рек на моренных равнинах по сравнению с районами, сложенными суглинистыми и песчаными отложениями. В ряде районов Аппалачей участки врезанных меандрирующих русел строго приурочены к так называемому Мартинбургскому поясу сланцев, где меандрирование стиму-

лируется анизотропией противоэрозионных свойств пород (контрастными различиями размываемости вдоль и поперек падения пластов) [Strahler, 1946; Hack, Young, 1959] (рис. 110). В центральном Техасе реки, прорезающие массивы гранитов, имеют прямолинейное русло, а в менее прочных известняках – врезанные меандры [Baker, 1977]. Вообще, большая часть опубликованных исследований врезанных меандров касается русел, врезанных в осадочные породы [Tart, 1924; Moore, 1926; Miller, 1935; Blank, 1970]. В магматических и метаморфических породах меандрирование развито менее широко, хотя врезанные излучины широко распространены на больших реках Восточной Сибири среди этого типа пород (верхний Алдан и его притоки, Витим и другие).

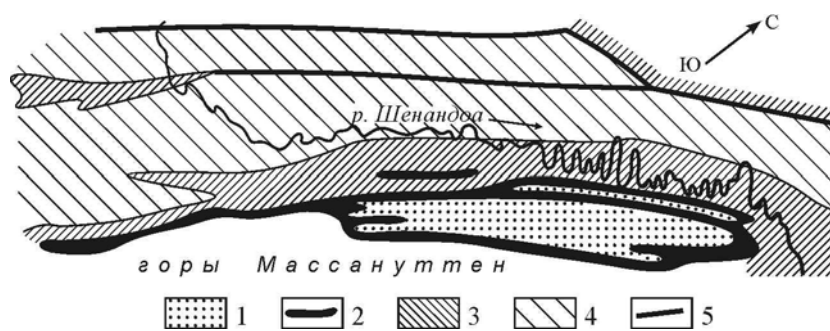


Рис. 110. Влияние литологии субстрата на образование и форму врезанных излучин (р. Шенандоа, Центральные Аппалачи) [Hack, Young, 1959]. Геологическое строение: 1 – песчаники и сланцы (силур-девон); 2 – кварциты (силур); 3 – сланцы и песчаники Мартинбургской формации (ордовик); 4 – известняки и доломиты (кембрий-ордовик); 5 – разломы.

Таким образом, врезанные излучины распространены в областях с ограниченным развитием русловых деформаций, и их образование так или иначе связано с интенсивной глубинной эрозией. При увеличении высоты берегов поперечные и продольные перемещения излучин сильно замедляются. Особенно резкое снижение скорости смещения наступает, когда перестают затопляться половодьем берега излучин. Очертания излучин фиксируются высокими берегами, и врезанные излучины как формы русла отличаются высокой стабильностью, а их очертания в плане практически неизменным рисунком, поскольку крылья излучин находятся полностью под контролем неразмываемых берегов. Весь расход воды сосредотачивается в русле, и вся кинетическая энергия потока затрачивается на размыв дна. При этом поток непосредственно контактирует с коренным ложем реки, т.к. в условиях ограниченного развития русловых деформаций имеет место отчетливо выраженный дефицит руслообразующих наносов.

Важный аспект проблемы формирования врезанных русел – временной фактор развития вертикальных деформаций. Большинство равнинных рек, по крайней мере, за пределами области распространения последнего оледенения, обладает выработанным продольным профилем. Вертикальные русловые деформации в таком случае определяются соотношением стока воды и стока наносов, которое постоянно меняется в ходе изменений ландшафтно-климатической обстановки. В результате наряду с короткопериодическими русловыми деформациями на равнинных реках проявляются более длительные циклы врезания – аккумуляции. Одним из проявлений подобной цикличности является зафиксированная на некоторых реках центра ЕТР тенденция к врезанию в течение последнего тысячелетия [Панин, Каревская, 2000], связанная с общим ростом паводковой активности [Бутиков и др., 2000]. Ввиду относительно небольшой продолжительности (столетия – первые тысячелетия) и амплитуды вертикальных деформаций (первые метры) такие циклы могут и не приводить к формированию врезанного русла, хотя на нисходящей стадии темпы врезания вполне могут удовлетворять вышеприведенным критериям.

Формирование врезанных излучин может быть связано с антропогенно обусловленными изменениями руслового режима рек, в результате которых темпы глубинной возрастают на порядки величин и за короткое время происходит врезание на значительную глубину. Особенно «благоприятны» в этом отношении нижние бьефы гидроузлов, где врезание связано с перехватом потока наносов водохранилищ. К аналогичным последствиям часто приводит межбассейновое перераспределение стока. Наглядным примером является р. Большой Егорлык (Северный Кавказ), сток которой за счет сброса вод из Невинномысского канала увеличился в 7 раз и за 5 лет (с 1948 по 1953 гг) произошло врезание русла на 3,5 м (Карасев, 1975). Аналогичная ситуация сложилась на р. Калаус в результате сброса вод Терско-Кумского канала [Беркович и др., 2000]. Массовое спрямление излучин русла верхнего Днестра в Предкарпатье, осуществленное в мелиоративных целях в начале XX века, привело к врезанию реки на 2-3 м лет за первые 10-15 после выполнения работ, т.е. скорость его составила 20-30 см/год [Афремов, 1969].

Гидравлические условия формирования врезанного меандрирующего русла выявляются в рамках режимного подхода, при котором формирование разных типов русел объясняется различными сочетаниями уклона дна долины I_0 и среднегодового расхода воды Q_{cp} . Впервые использовал I_0 в гидроморфологических зависимостях В.В. Ромашин [1968]; В.И. Антроповский [1969] обосновал преимущества этого показателя по сравнению с уклоном русла. Расходы воды различной обеспеченности внутри одного гидрологического региона связаны между собой с высокой степенью корреляции, и использование разных показателей водоносности приводит лишь к изменению коэффициентов в эмпирических зависимостях, но не к качественно иным результатам.

По топографическим картам масштаба 1:300000 и материалам сетевых гидрологических наблюдений получены данные об I_d и Q_{cp} для 60 участков врезанных и 36 участков широкопойменных рек Восточной Сибири и Северо-Востока России. Общий диапазон среднегодовых расходов воды составил от 2,4 до 16500 м³/с, диапазон уклонов – от 0,024 до 2,57‰. Для районов ограниченного развития русловых деформаций и преимущественного развития врезанных русел по геологическим картам масштаба 1:500000 определялась литология коренных пород. По противоэрозионной устойчивости породы разделены на две группы: 1) осадочные – карбонатные, глинисто-карбонатные и обломочные формации чехла восточной половины Сибирской платформы; 2) кристаллические – гранитные и гранитно-метаморфические формации Алданского щита и Байкало-Патомского нагорья, траппы Средней Сибири. Одновременно выделены следующие морфодинамические типы русла как врезанного, так и широкопойменного: 1) прямолинейное неразветвленное; 2) пологие сегментные излучины; 3) развитые и крутые сегментные излучины; 4) петлеобразные излучины; 5) одиночные разветвления; 6) разветвленное; 7) разветвленно-извилистое.

По этим данным построена диаграмма «уклон-расход» (рис. 111), на которой точки, соответствующие широкопойменным руслам разветвленного и меандрирующего типов, образовали две локализованные области, разделенные линией «критического уклона»:

$$I_c = 0,010 Q_{cp}^{-0,565} \quad (5.3)$$

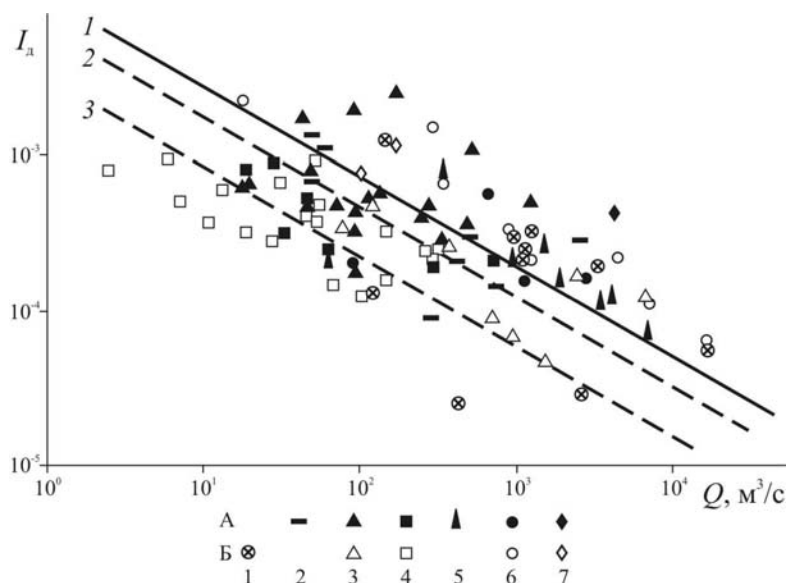


Рис. 111. Положение врезанных русел на диаграмме «расход-уклон» для рек Восточной Сибири. Типы русла: *А – врезанное; Б – широкопойменное; 1 – прямолинейное неразветвленное (без разделения на А и Б); 2 – пологие сегментные излучины; 3 – сегментные развитые и крутые излучины; 4 – петлеобразные излучины; 5 – одиночные разветвления; 6 – разветвленное; 7 – разветвленно-извилистое.*

Выше этой линии лежат все точки, принадлежащие разветвленным и разветвленно-извилистым широкопойменным руслам, ниже – 24 из 26 меандрирующих. Этот результат в целом соответствует данным раздела 2.2. В отличие от широкопойменных, все типы врезанных русел не обнаруживают четких областей существования на *QI*-диаграмме. Врезанные прямолинейные русла существуют при любых соотношениях водоносности и уклонов дна долины; соответствующие им точки располагаются как выше, так и ниже линии критического уклона меандрирования-разветвления широкопойменных русел (5.3). Аналогичным образом ведут себя прямолинейные русла (без разделения на врезанные и широкопойменные) на режимной диаграмме для рек Индии и США [Leopold, Wolman, 1967]. Совпадение областей существования врезанных русел прямолинейного и меандрирующего типов получил также В.В. Иванов [1989].

Область существования врезанного меандрирующего русла также охватывает практически все поле точек, пересекая и область разветвленных широкопойменных русел. Вместе с тем, разновидности врезанного меандрирующего русла достаточно заметно обособляются. Врезанные петлеобразные излучины локализуются в нижней половине поля точек (с малыми уклонами) и имеют общую область существования со свободными излучинами того же типа. Совпадают также нижние границы областей существования врезанных и свободных сегментных (развитых и крутых) излучин (рис. 111, линия 3). Между линиями 2 и 3 существуют все типы врезанных и свободных излучин, ниже линии 3 – только петлеобразные (как свободные, так и врезанные).

Более четко, чем врезанные излучины, на *QI*-диаграммах разделяются врезанные разветвления: 11 точек из 14, представляющих разветвленные и слаборазветвленные врезанные русла, лежат в области разветвленных широкопойменных русел. Однако две точки попадают в область петлеобразных излучин, т.е. имеют аномально низкие для разветвленного русла уклоны.

Для выяснения роли геологического фактора в формировании врезанных русел разных типов эти же данные были представлены с учетом литологии коренных пород (рис. 112).

По случайному совпадению, линия (5.3), разделяющая меандрирующие и разветвленные широкопойменные русла, одновременно отражает зависимость уклонов дна долин от состава пород для врезанных русел. Выше этой линии лежат 18 из 21 точек, относящихся к врезанным руслам в кристаллических породах, ниже – 26 из 36 в осадочных породах. Получается, что врезанные русла в кристаллических породах имеют уклоны, близкие к широкопой-

менным разветвленным, а в осадочных – близкие к широкопойменным меандрирующим. По-видимому, именно различиями в уклонах, а не составом пород как таковым, объясняется тот факт, что большая часть представленных в случайной выборке врезанных разветвленных русел развивается в кристаллических породах, тогда как большая часть врезанных меандрирующих – в осадочных. Врезанные петлеобразные излучины в кристаллических породах не встречаются совсем.

Таким образом, по сравнению со свободно меандрирующими, излучины врезанные менее уверенно вписываются в режимную теорию, согласно которой тип русла определяется соотношением уклон-расход. При этом обращают внимание два основных момента.

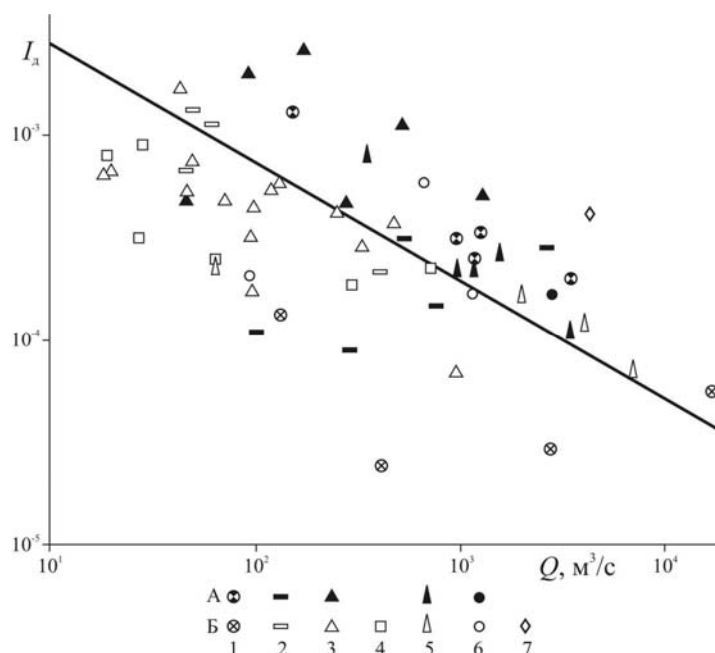


Рис. 112. Диаграмма «расход-уклон» для врезанных русел рек Восточной Сибири и Северо-Востока России с учетом литологии коренных пород. Условные обозначения – на рис. 111. Черные значки соответствуют руслам, врезанным в кристаллические породы, белые – в осадочные.

Во-первых, врезанные излучины широко распространены при больших уклонах, характерных для разветвленных русел, как врезанных, так и широкопойменных. Возможным объяснением этого является присутствия врезанным руслам дефицит подвижных фракций руслообразующих наносов, способных перемещаться в виде крупных грядовых форм и этим создавать условия для трансформации меандрирующего русла в разветвленное. Другая вероятная причина – консервативность плановой формы

врезанных русел: излучины могли зародиться еще при соотношении уклон-расход, отличающемся от современного. Кроме того, формированию разветвлений благоприятствует большая ширина русла, а высокая противозрозийная устойчивость берегов распылыванию русла препятствует (см. раздел 2.2).

Во-вторых, при благоприятных для меандрирования соотношениях уклон-расход нередко формируются врезанные прямолинейные и разветвленные русла. Прямолинейная форма русла динамически устойчива в условиях дефицита наносов и высокой противозрозийной устойчивости пород, слагающих берега [Иванов, 1989; Иванов, Чалов, 1991]. При наличии ведущего высокого берега широкопойменное прямолинейное русло может быть устойчиво благодаря возникновению специфической поперечной циркуляции, механизм которой изучен О.Н. Мельниковой и Ю.Г. Пырковым [1987]. Прямолинейные участки с двусторонней поймой обычно быстро трансформируются в извилистые или разветвленные. Во врезанном русле это не всегда возможно: формирование излучин ограничено трудноразмываемыми берегами, а формирование разветвлений, не требующее большой амплитуды горизонтальных деформаций, – дефицитом наносов. Впрочем, дефицит наносов не позволяет трансформироваться прямолинейным руслам и в извилистые. В результате, даже при благоприятном для меандрирования или разветвления соотношении уклон-расход врезанное русло остается прямолинейным.

5.2. Генетические типы врезанных излучин



Очертания врезанного русла в плане в значительной степени определяются геолого-геоморфологическими условиями. Однако сам процесс развития врезанных излучин как форм русла связан с работой водного потока по размыву берегов и транспортировке продуктов их разрушения. Исключение составляют лишь «первичные изгибы» долины и русла [Davis, 1913], или «первичные излучины» [Щукин, 1960], обусловленные топографией поверхности, которая только начинает осваиваться речной сетью, и поток еще пассивно приспосабливается к литогенно-структурной основе.

Присущая русловым потокам неустойчивость прямолинейного движения в условиях ограниченного развития горизонтальных деформаций не всегда может быть реализована в форме русла, и прямолинейное русло сохраняется, несмотря на наличие внутренних предпосылок к меандрированию. Если в условиях свободного развития русловых деформаций причиной этого служит незначительный сток руслообразующих наносов, то в данном случае – сопротивляемость размыву со стороны коренных, часто скальных берегов. В то же время при врезании реки в неоднородный геологический субстрат происходит изменение первоначальной формы русла. Темпы врезания и горизонтальных деформаций (размыва берегов) определяются

прочностью коренных пород. Наиболее вероятное положение русла отвечает участкам с меньшей противозрозионной устойчивостью. Наследование руслом ослабленных литолого-структурных участков тем более вероятно, чем более контрастны в противозрозионном отношении коренные породы; с другой стороны, чем шире пояс активного руслоформирования, в пределах которого мигрирует русло, тем большую возможность «нащупать» наименее устойчивые участки имеет поток. Пример формирования подобных *структурно обусловленных излучин* при проецировании русла реки из толщи рыхлых осадков, заполняющих долину, на поверхность коренного ложа с ортогональной сеткой разрывных нарушений, описан В. Коулом [Cole, 1930].

Длительное врезание может привести к формированию *литологически обусловленных врезанных излучин*, когда в результате селективной проработки коренного субстрата русло огибает массивы более прочных пород. Движущей силой искривления русла является работа водного потока, но непосредственной причиной – внешние (здесь – геологические) условия руслоформирования. Примером *врезанных излучин, обусловленных внешними факторами*, являются описанные на малых реках плато Колорадо [Campbell, 1973] излучины, наследующие обвально-оползневые цирки бортов долины, излучины в устьях притоков и т.д. Как правило, такие излучины имеют случайный, нерегулярный характер (одиночные или парные излучины, разделенные прямолинейными отрезками русла) и самую разнообразную форму. Серийное расположение встречается в случае структурно обусловленных излучин. Например, русло верхнего Алдана образует серию крупных (крупнее, чем обычные излучины) коленообразных изгибов (рис. 113), наследующих ортогональную систему разрывных нарушений [Матвеев, 1985]. В других случаях (р. Учур при пересечении хребта Кириккан, р. Индигирка – хребта Черского) пересекающиеся под углом складки и разрывы вызывают появление таких изгибов врезающегося русла, которые по своим очертаниям практически не отличаются от типичных врезанных излучин [Карташов, 1972].

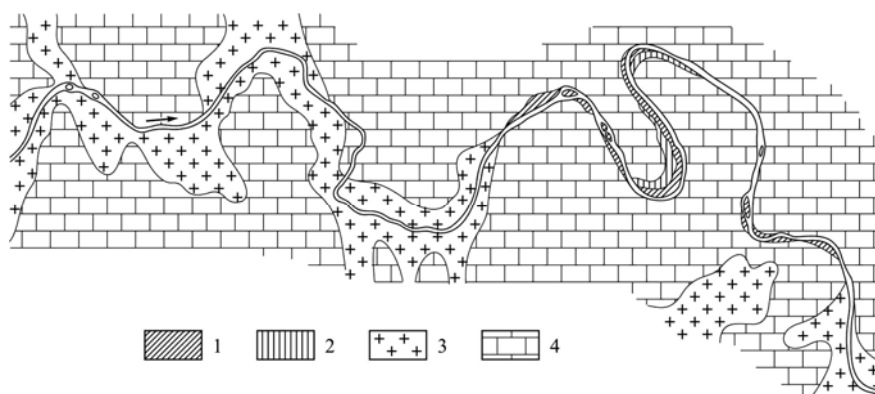


Рис. 113. Структурные излучины (макроизлучины) верхнего Алдана: 1 – пойма и низкие надпойменные террасы; 2 – высокие террасы; 3 – кристаллические породы, слагающие борта долины и междуречья; 4 – осадочные коренные породы.

Меандрирование как реализация внутренне присущей плановой устойчивости водного потока приводит к возникновению регулярных, т.е. серийно расположенных излучин плавной изогнутой формы. Физическая основа меандрирования принципиально сходна в широкопойменном и во врезанном русле. Основное отличие заключается в темпах размыва берегов и, как следствие, в скоростях горизонтальных русловых деформаций. Прочностные свойства пород, в которые врезано русло, лимитируют развитие излучин. Как правило, осадочные породы размываются легче, по сравнению с кристаллическими. Пример того, как это сказывается на развитии меандрирования, представляет верхний Алдан: поток, не способный моделировать структурно predetermined изломы русла в толще гранитов и гранито-гнейсов, в известняках формирует крутые плавной изогнутые излучины (макроизлучины), аналогичные по формам излучинам широкопойменного русла, но гораздо больших размеров (рис. 113).

Причинная обусловленность и механизм меандрирования заключены в физической природе руслового потока, но на развитие излучин оказывает влияние и локальная обстановка руслоформирования. Даже в широкопойменном русле пространственная фациальная изменчивость пойменных осадков, определяющая противозерозионную устойчивость береговых яров, влияет на форму и локализацию отдельных излучин, обуславливая образование наиболее крутых пальцеобразных излучин. В ходе горизонтальных деформаций при развитии врезанных излучин положение русла может локально фиксироваться линиями разрывных нарушений. Распределение скоростей отступления вогнутого берега по длине излучин контролируется вариациями прочности коренных пород, что в конечном итоге сказывается на форме излучин.

Существенное влияние оказывает также фактор активной тектоники. Так, врезанное меандрирующее русло среднего Днестра на отдельных участках следует линиям разломов запад-северо-западного и северо-восточного простираний, что определяет сундучную форму некоторых излучин и наличие резких поворотов русла. Этот факт считается рядом исследователей [Букатчук, Бурденко, 1967; Макареску, 1974] достаточным основанием для заключения о структурной природе врезанных излучин среднего Днестра. Однако, в шпорах отмерших меандровых петель буровыми линиями вскрыты хорошо стратифицированные толщи верхнеплиоценового аллювия [Покатилов, Букатчук, 1979], т.е. в процессе формирования излучин русло не было фиксировано, а имело широкую амплитуду горизонтальных деформаций, в ходе которых с течением времени были "нащупаны" линии разломов. Более детальное рассмотрение фактического материала показывает, что сегменты врезанных излучин соответствуют относительно опу-

щенным блокам осадочного чехла платформы (рис. 114), т.е. расположение и, возможно, размеры излучин контролируются блоковой тектоникой.

Связь врезанных излучин с тектоническими движениями, разломами, блоковой структурой фундамента неоднократно освещалась в литературе, причем нередко в обратном соотношении: реконструкция разломов и других структур по конфигурации врезанных излучин [Рождественский, 1953, 1963; Геренчук, 1960; Палиенко, 1992].

Врезанные излучины регулярного характера, не обусловленные геолого-геоморфологическими факторами, могут быть как *унаследованными* от излучин предшествовавшего свободно меандрирующего русла, так и *сформированными в процессе врезания*. Разделение этих двух генетических типов впервые произведено Д. Ричем [Rich, 1914] по морфологическим признакам: унаследованными (*intrenched*, или *entrenched meanders*) считались врезанные излучины с симметричным строением поперечного профиля долины, синхронными врезанию (*ingrown meanders*) – меандры с крутым вогнутым и пологим выпуклым «склоном сползания» (*slip-off slope*) или лестницей террас. Позднее Д. Хол [Hol, 1938] справедливо заметил, что поперечный профиль долины еще не является доказательством унаследованности врезанных меандров; об этом позволяет говорить лишь наличие остатков аллювиальной поверхности, на которой происходило свободное меандрирование. Р. Шефферд [Shepherd, 1972], основываясь на результатах лабораторных экспериментов, считает, что вертикальное проецирование излучин возможно, когда врезание осуществляется лишь во время экстремальных паводков, срывающих аллювий по всей площади русла. Однако в природе это условие практически неосуществимо.

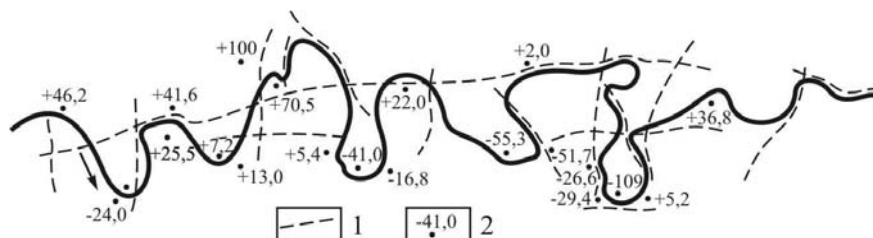


Рис. 114. Излучины (макроизлучины) среднего Днестра: 1 – геологически подтвержденные разломы (по Макареску, 1974); 2 – буровые скважины и абсолютные отметки кровли маркирующего горизонта косоугольных песчаников (по Букатчук, Бурденко, 1967).

Образование молодой врезанной излучины при пересечении рекой с широкопойменным меандрирующим руслом воздымающейся тектонической структуры описал Д.В. Рашутин [1995] на среднем Тереке (в равнинной части). Здесь в процессе врезания при пересечении разлома произошло повышение уровня высокой поймы, возник цоколь, представленный плот-

ными коренными глинами. Благодаря этому стабилизировалась излучина, имеющая синусоидальную форму. В этом случае речь идет о прекращении заметных горизонтальных деформаций, вследствие чего русло в пределах относительно стабильной излучины успевает врезаться. Поэтому профиль долины отражает соотношение глубинной и боковой эрозии при формировании врезанных излучин. Именно в связи с этим соотношением Н.В. Хмелева [Экспериментальная геоморфология, 1969] использует термины «симметричные» и «асимметричные» излучины. Симметричные врезанные излучины имеют шпору, почти полностью образованную мысом коренного берега. Это – следствие врезания русла без заметного изменения формы излучин, т.е. при абсолютном преобладании темпов врезания над темпами размыва берегов, что возможно лишь при высоких скоростях врезания в очень устойчивые к эрозии породы и наблюдается весьма редко. У асимметричных излучин верхняя часть шпору контролируется мысом коренного берега, а остальная часть шпору представляет собой площадки террас, уровни которых снижаются по направлению течения реки, т.е. наиболее молодая терраса причленена к нижней (считая по течению) стороне шпору. По типу излучины можно судить об относительной скорости поднятия локальной тектонической структуры. При прочих равных условиях образование симметричных излучин требует больших скоростей поднятия, чем асимметричных.

Унаследованные врезанные излучины регулярного характера имеют важное палеогеоморфологическое значение: средний шаг излучин слабо изменяется в процессе врезания и отражает условия руслоформирования времени существования широкопойменного русла. Действительно, в случае одиночной излучины изменение руслоформирующего расхода Q_ϕ вызовет соответствующее изменение радиуса кривизны в вершине излучины и как следствие – эрозию вогнутого (при увеличении Q_ϕ) или выпуклого (при уменьшении Q_ϕ) берега в нижнем крыле, что приведет к увеличению (уменьшению) шага излучины. При серийном расположении излучин изменение среднего радиуса кривизны может не привести к изменению их среднего шага, т.к. развитие смежных крыльев соседних излучин обуславливается динамикой потока в вершине верхней из них, и изменение ее шага сопровождается противоположным изменением шага нижележащей.

Изменение среднего размера регулярных излучин на участке реки возможно лишь путем спрямления части излучин и появления новых, отвечающих изменившимся условиям руслоформирования. Например, на участке Дона от впадения р. Воронежа до г. Ростова-на-Дону средний шаг и радиус кривизны излучин за период с 1704 по 1949 гг увеличился на 20%, но число излучин сократилось при этом со 126 до 84 [Маккавеев, Хмелева, 1965]. Сокращение числа излучин за многолетний период было отмечено также С.И. Пиньковским [1954]. Однако это может наблюдаться только у широкопойменных русел в условиях свободного развития русловых деформаций при изменении факторов русловых процессов (в частности, водонос-

ности рек). Время существования излучин, врезанных в скальные породы, составляет десятки и сотни тысяч лет, и колебания стока с более коротким периодом оказывают влияние лишь на форму излучин, не изменяя их средние размеры.

5.3. Параметры врезанных излучин



Для выявления зависимости гидролого-морфологических характеристик врезанных излучин от литологии коренных пород по среднемасштабным (1:300000) топографическим картам получены данные о морфологии 60 участков русел рек Восточной Сибири и Северо-Востока России. Выбор участков определялся лишь наличием гидрологических постов с рядом измерений расходов воды не менее 20 лет. Поэтому выборку можно считать случайной, что позволяет получить оценку относительного распространения различных типов врезанного русла (табл. 32).

Таблица 32. Распространение морфодинамических типов врезанного русла в зависимости от литологии коренных пород (реки Восточной Сибири и Северо-Востока)

Тип врезанного русла	Встречаемость, %*	
	Кристаллические породы	Осадочные породы
Прямолинейное неразветвленное	38 (1,15)	62 (0,93)
Извилистое,	26 (0,79)	74 (1,10)
в том числе:		
- пологие излучины	50 (1,52)	50 (0,75)
- сегментные излучины	25 (0,76)	75 (1,12)
- петлеобразные излучины	0	100 (1,49)
Разветвленное,	47 (1,42)	53 (0,79)
в том числе:		
- одиночные разветвления	64 (1,94)	36 (0,54)
- разветвленное и разветвленно-извилистое	17 (0,52)	83 (1,24)
В целом	33 (1,00)	67 (1,00)

* В скобках – «коэффициент предпочтения»: отношение встречаемости данного типа русла к встречаемости данной группы пород.

Общая доля русел, врезанных в кристаллические породы, составила в выборке 33%, в осадочные – 67%, отдельно для меандрирующих русел – соответственно 26% и 74%. В кристаллических породах формируются в основном пологие излучины. Доля излучин сегментной формы несколько выше в осадочных породах, а крутые петлеобразные излучины с наибольшей шириной пояса меандрирования развиваются исключительно в осадочных породах. Помимо роли противозрозионной устойчивости пород, важное значение имеет уклон дна долины: в кристаллических породах он при

прочих равных условиях выше, чем в осадочных, а рост уклона определяет «выпрямление» русла – формирование более пологих излучин или даже переход к разветвленной форме [Чалов и др., 1998]. Таким образом, во врезанных руслах влияние уклона на форму излучин проявляется аналогично тому, как это имеет место в свободных условиях развития русловых деформаций.

Интерес исследователей вызывает влияние литологии субстрата на размеры врезанных излучин и соотношение размеров врезанных и свободных излучин. А. Ваше [Vacher, 1909] и Д. Блаш [Blache, 1939, 1940] пришли к выводу, что врезанные меандры имеют большие размеры в более прочных породах. Напротив, Д. Браун [Braun, 1983] на примере рек Аппалачей показал, что в относительно мягких породах (сланцы, тонкослоистые известняки и песчаники) шаг врезанных излучин в 2-3 раза больше, чем в более прочных литологических разностях (толстослоистые и массивные известняки и песчаники). На р. Зоане в Швейцарских Альпах врезанные меандры имеют размеры близкие или чуть большие, чем свободные меандры аналогичных по размерам рек [Zeller, 1967]. Однако большинство исследователей [Hack, 1965; Хмелева, 1968; Экспериментальная геоморфология, 1969; Маккавеев, 1971; Tinsler, 1971, 1972; Иванов и др., 1983; Матвеев, 1985; Маккавеев, Чалов, 1986] приходит к заключению, что врезанные излучин при тех же расходах воды имеют в среднем заметно большие размеры, чем свободные. На р. Гранберру в Мичигане врезанные меандры в среднем в 3,7 раза крупнее свободных [Hack, 1965], на р. Вятке – в 1,7 раза [Хмелева, 1968]. На Вилюе врезанные излучины имеют в среднем больший шаг и радиус кривизны, по сравнению с адаптированными, вынужденными и свободными [Иванов и др., 1983].

Статистическая обработка данных по 54 участкам со свободными и 46 – с врезанными излучинами на 57 реках бывшего СССР привела Б.В. Матвеева [1985] к выводу, что врезанные излучины не обнаруживают зависимости от литологии субстрата, но в целом крупнее свободных. Этот вывод подтверждается и нашими данными. На рис. 115 представлена связь среднего шага меандров со среднегодовым расходом воды для 20 участков врезанных и 8 – широкопойменных русел средних и крупных рек Восточной Сибири и Северо-Востока России. Для измерений выбирались участки с излучинами сегментной формы, чтобы исключить влияние стадии развития на размеры меандров и обеспечить сопоставимость результатов по разным рекам. Связь шага излучин с водоносностью реки для свободных излучин описывается зависимостью

$$L = 170 Q_{cp}^{0,45} \quad (5.4)$$

(коэффициент корреляции – 0,67). Ниже этой линии легли лишь 4 из 20 точек, соответствующих врезанным излучинам, т.е. размеры врезанных излучин в целом оказываются больше, чем свободных. Зависимость размеров врезанных излучин от литологии пород в явном виде не выявляется: излу-

чины, врезанные как в более прочные изверженные и метаморфические породы, так и в более податливые осадочные породы на графике связи $L-Q$ образуют единое поле точек.

Таким образом, размеры регулярных врезанных излучин обнаруживают тесную связь с водоносностью реки, что указывает на ведущую роль водного потока в их формировании. При близкой водоносности рек врезанные излучины обычно имеют больший шаг, чем свободные. Одной из основных причин этого является, по-видимому, различие в руслоформирующих расходах воды. В широкопойменных руслах значительная часть расхода воды при высоких уровнях проходит по затопленной пойме, не участвуя в деформациях русла. Во врезанных руслах доля пойменного расхода меньше или вообще отсутствует. Кроме того, в долинах с врезанным руслом относительная высота поймы обычно больше, чем в широкопойменных, а значит выше и руслонаполняющие (руслоформирующие среднего интервала, проходящие перед выходом воды на пойму) расходы воды, при которых, по мнению многих исследователей, происходит максимальная трансформация меандрирующих русел.

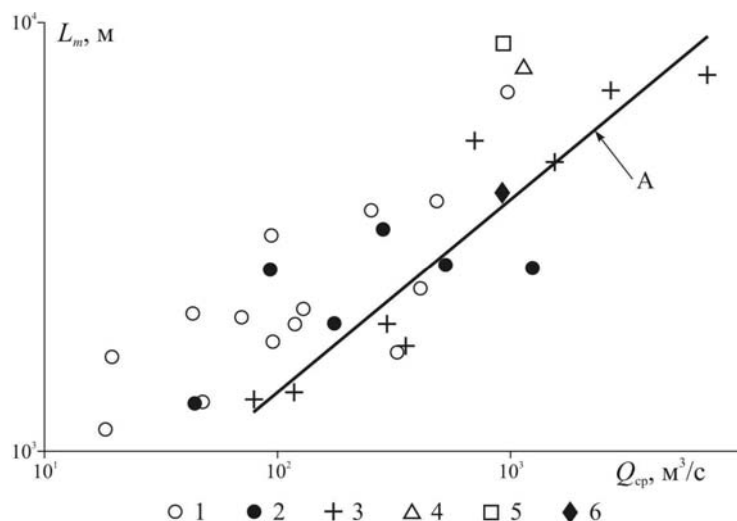


Рис. 115. Связь среднего шага свободных и врезанных излучин с среднегодовым расходом воды на реках Восточной Сибири. А – линия тренда для свободных излучин. 1 – излучины врезанные в осадочные породы; 2 – излучины врезанные в магматические и метаморфические породы; 3 – свободные излучины; 4 – петлеобразные и сегментные врезанные излучины верхнего Алдана; 5 – сегментные врезанные макроизлучины нижней Яны; 6 – вынужденные и адаптированные излучины нижней Яны.

Во многих случаях причина больших размеров врезанных излучин может состоять в консервативности плановой формы врезанного русла. В отличие от свободных излучин, характерное время существования которых измеряется сотнями – первыми тысячами лет, врезанные излучины формируются в течение целых геологических эпох, т.е. на 1-2 порядка дольше. Заложение врезанных излучин и их развитие на определенных этапах могло происходить в иных климатических условиях, при значительно более высокой водоносности реки. Нередко врезанные русла описывают меандроподобные изгибы настолько крупных размеров, что возникает сомнение в их генетической принадлежности к излучинами русла, несмотря на геометрическое сходство. С другой стороны, за время существования врезанных излучин сток воды неоднократно изменялся. В периоды высокой водоносности речной поток проявлял тенденцию к увеличению радиусов кривизны и шагов излучин. В итоге, современные очертания врезанных излучин могут отражать период наиболее высокой водоносности реки за всю геологическую историю их развития.

Вместе с тем, врезанные излучины, формирующиеся в пластичных трудноразмываемых породах (глинах, суглинках, мергелях), характерных для севера ЕТР (областей четвертичных материковых оледенений), характеризуются обычно более правильной сегментной или петлеобразной формой в плане. В этом случае они чаще относятся к излучинам, сформировавшимся в процессе врезания, а правильность их форм обусловлена однородностью и большей податливостью субстрата к размыву, по сравнению со скальными (кристаллическими и осадочными) породами.

5.4. Макроизлучины и изгибы русла, не связанные с процессом меандрирования



Наряду с «обычными» излучинами на реках широко распространены изгибы значительно более крупных размеров, за которыми в первой половине XX столетия закрепилось название «долинные меандры» (valley meanders). Однако ряд исследователей [Hol, 1938; Troll, 1954; Dury et al., 1972] считает этот термин неудачным. Действительно, аномально крупные излучины часто развиты на уровне поймы или низких террас при общих прямолинейных очертаниях долины. В последние десятилетия в англоязычной литературе стал применяться термин «большие меандры» (big meanders, или large meanders). Суждение об аномальности «больших меандров» диктуется современными представлениями о природе меандрирования. В основе его лежит взаимное регулирование водного потока и русла – закон взаимосвязи и взаимообусловленности потока и русла М.А. Великанова – Н.И. Маккавеева. В любой момент времени структура потока определяется существующей формой русла. Вследствие деформируемости твердых границ потока с течением времени проявляется обратная связь: форма русла

постепенно меняется, приходя в более полное соответствие со структурой потока, вследствие чего излучины как формы русла приобретают динамическую устойчивость. Изменение характеристик потока влечет изменение параметров русла.

Обширный натурный материал свидетельствует, что размеры излучин имеют устойчивую статистическую связь с размерами реки. В частности, шаг излучин L колеблется обычно в пределах $5\div 10$ величин ширины русла B_p в бровках поймы [Маккавеев, 1971 и др.]. Из этого Б.В. Матвеев [1985] заключает, что изгибы русла с большими относительными размерами не могут развиваться за счет процесса меандрирования, т.к. не вызывают образования характерного поля скоростей. Оно возникает лишь в привершинной части изгиба, не являясь «единым целым» с точки зрения взаимодействия потока и русла в пределах всей излучины. Для обозначения «аномально крупных изгибов врезанного русла, образование и развитие которых (как «единого целого») не связано с процессом меандрирования», Б.В. Матвеев [1985, с. 9] предлагает термин «макроизлучины». Позднее было предложено распространить этот термин на аналогичные формы широкопойменных русел [Панин, 1991; Панин и др., 1992], приблизив его трактовку в сторону его буквального значения («большая излучина»). Иными словами, макроизлучины – это аномально крупные изгибы русла, имеющие правильные меандроподобные очертания. Плавноизогнутая форма говорит об обязательном активном участии водного потока в их создании. Роль потока может состоять как в полном создании этих форм, либо ограничиваться лишь моделировкой – приданием меандроподобных очертаний крупным изгибам русла любого происхождения. Изгибы русла неправильной формы к макроизлучинам не относятся: предполагается, что поток в их образовании участия не принимал, а лишь пассивно следовал путями, предопределенными геологической средой.

Употребление термина «макроизлучина» имеет прежде всего генетический смысл: река в свободных условиях развития русловых деформаций и при современных параметрах стока не может создать излучины такого размера. Поэтому в применении к плановым очертаниям современного русла термин «макроизлучина» более предпочтителен, чем его буквальное значение «большая излучина» (big meander), которое скрадывает упомянутый генетический оттенок. С другой стороны, при палеорусловом анализе в применении к древним руслам (палеоруслам), формировавшимся в условиях более высокого стока, сочетание «большая излучина» вполне логично и несет сравнительный оттенок: в прошлом река формировала более крупные излучины, чем сейчас.

Формальным критерием для отнесения изгиба русла к макроизлучинам можно считать относительную величину шага $L/B_p > 10$. Стохастическая природа меандрирования и стадийность развития излучин обуславливают значительный диапазон размеров излучин при одинаковых условиях руслоформирования: их размеры на бесприточных участках рек могут су-

щественно различаться – от пологой сегментной до крутой омеговидной или синусоидальной. Тем не менее, выделение макроизлучин в большинстве случаев не является умозрительным. Крупные изгибы могут быть одиночными, но часто встречаются регулярными сериями и осложнены излучинами, которые удовлетворяют критерию $L/B_p < 10$. Совместное присутствие форм русла, относящихся к разным размерным диапазонам, дает наглядное основание для их разделения на действительно созданные данной рекой и те, которые для ее современных гидравлических характеристик слишком велики. Поэтому помимо формального морфометрического критерия важным аргументом для выделения макроизлучин служит их более высокое иерархическое положение в ряду существующих форм русла.

Происхождению макроизлучин (долинных меандров, или больших меандров) посвящена обширная литература. Исследованиями первой половины XX столетия [Davis, 1913; Flohn, 1935; Masuch, 1935; Hol, 1938] была установлена гетерогенная природа врезанных макроизлучин, выявлены разнообразные аспекты их структурно-литологической предопределенности, возможность наследования от свободных излучин более ранних этапов развития долин. В 1950-1960-е годы внимание исследователей сосредоточилось на объяснении размеров макроизлучин. К. Тролль [Troll, 1954] впервые выразил комплексный взгляд на проблему, отметив, что формирование макроизлучин (долинных меандров) нужно рассматривать в единстве климатической, тектонической и морфологической динамики. На примере европейских рек он показал, что развитие врезанных макроизлучин является частью климато-морфологического цикла, включающего образование флювиогляциальных поверхностей и последующее врезание рек, в процессе которого перегруженные наносами и распластаные разветвленные русла трансформировались в меандрирующие. Прямо не объясняя размеров формирующихся при этом излучин, К. Тролль неявно говорит о действии мощных флювиогляциальных потоков.

Г. Дьюри [Dury, 1954] показал, что привлечение для объяснения макроизлучин локально действующих факторов (речные перехваты, спуск ледниковых озер и т.п.) противоречит широкому, практически повсеместному их распространению (от Аляски до Пуэрто-Рико) и широкому диапазону их хронологии (от конца плиоцена до голоцена). В последующих трудах Г. Дьюри [Dury, 1964, 1965, 1970] развита климатическая теория долинных меандров (макроизлучин), объясняющая их возникновение естественными климатическими колебаниями. Расходы воды, необходимые для формирования меандров столь крупных размеров, по Г. Дьюри, превышают современные в 20-130 раз. Столь высокие расходы достигались, по мнению этого исследователя, при увеличении среднегодового количества осадков в 1,5-2 раза и при росте частоты и интенсивности ливней, что и приводило к необходимой степени увеличения руслоформирующих расходов воды. Палеоклиматические построения Г. Дьюри были подвергнуты жесткой критике [Kennedy, 1972]. Д. Гоглей [Gogley, 1973], в целом не отрицая взглядов

Г. Дьюри, предположил, что увеличение руслоформирующих расходов воды было связано в холодные эпохи плейстоцена с преимущественным выпадением осадков в твердом виде и многократным возрастанием мощности весеннего половодья на реках. Более подробно палеогеографические аспек-

ты проблемы будут освещены в последней главе. Здесь же мы остановимся на том, как проявляются макроизлучины в морфологии современного русла.

Вопросам классификации макроизлучин до сих пор практически не уделялось внимания. Лишь Г. Дьюри [Dury, 1964], классифицируя реки, испытавшие уменьшение водности (*underfit streams*), выделяет макроизлучины в широкопойменных и узкопойменных долинах, которые в обоих случаях могут быть или не быть осложнены современными («малыми») излучинами. Разделения излучин по генезису Г. Дьюри не проводит, рассматривая лишь случай унаследованности форм от прошлых эпох повышенной водоносности.

Р.С. Чалов [1997] при анализе иерархии русловых форм относит макроизлучины наряду с пойменной многорукавностью и изгибами пояса меандрирования к наиболее высокому иерархическому уровню – макроформам русла, на фоне которых развиваются собственно русловые формы. Исходя из этого, морфологическая типизация макроизлучин должна учитывать, с одной стороны, условия формирования самих макроизлучин, с другой – условия современных русловых деформаций. С этой точки зрения в речных долинах можно встретить три типа макроизлучин:

1. *Врезанные макроизлучины врезанного русла* (рис. 116). Шпоры макроизлучин представлены разновысотными террасами реки или выступами коренных берегов, что свидетельствует о последовательном врезании русла в процессе формирования макроизлучин. Пойма реки имеет незначительную ширину вследствие малой интенсивности и незначительной амплитуды горизонтальных русловых деформаций в голоцене.

2. Причиной этого является высокая противозрозионная устойчивость бортов долины и цоколей в уступах террас, сложенных обычно скальными



Рис. 116. Врезанная макроизлучина верхнего Алдана. Фото Р.С. Чалова.

породами. По той же причине макроизлучины часто полностью или почти лишены «нормальных» русловых форм, но нередко на макроизгибы наложены излучины, иногда свободные, чаще – адаптированные или врезанные (рис. 117А), либо современные русловые разветвления (рис. 117Б). Макроизлучины этого типа могут иметь очень древний возраст, и раз сформировавшись, сохраняются в форме русла в течение геологических эпох благодаря высокой устойчивости ограничивающих их берегов.

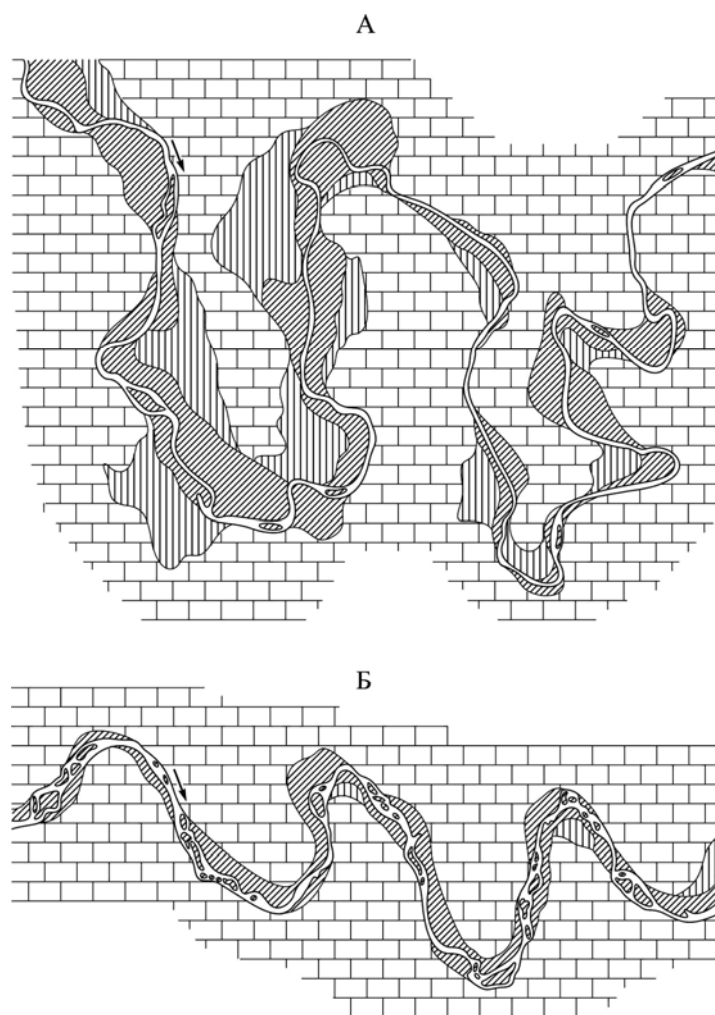


Рис. 117. Морфодинамические типы врезанных русел с макроизлучинами: *А* – извилистый (р. Нижняя Тунгуска); *Б* – разветвленный (р. Чара). Условные обозначения – на рис. 113.

2. *Врезанные макроизлучины широкопойменного русла* (рис. 118). Шпоры макроизлучин в этом случае чаще всего представлены низкими террасами, что позволяет датировать формирование макроизлучин концом последней ледниковой эпохи. Их формирование происходило перед или в процессе климатически обусловленного врезания рек в песчаные и песчано-галечные аллювиальные накопления середины – конца валдая. Сложенные аллювием террасовые уступы, хотя и препятствовали последующему спрямлению макроизгибов, но не представляли серьезного ограничения для боковой эрозии рек. Вдоль русел, повторяя очертания макроизгибов, тянутся широкие поймы, отчасти включающие в себя широкие изогнутые в плане ложбины – собой следы бывшего русла, сформировавшего макроизлучины. В подавляющем большинстве случаев такие макроизлучины осложнены современными излучинами русла; реже русло является относительно прямолинейным, проходящим вдоль высоких берегов (рис. 118). Макроизлучина, таким образом, перестает существовать как единая форма русла и не влияет в таком качестве на современные русловые деформации.

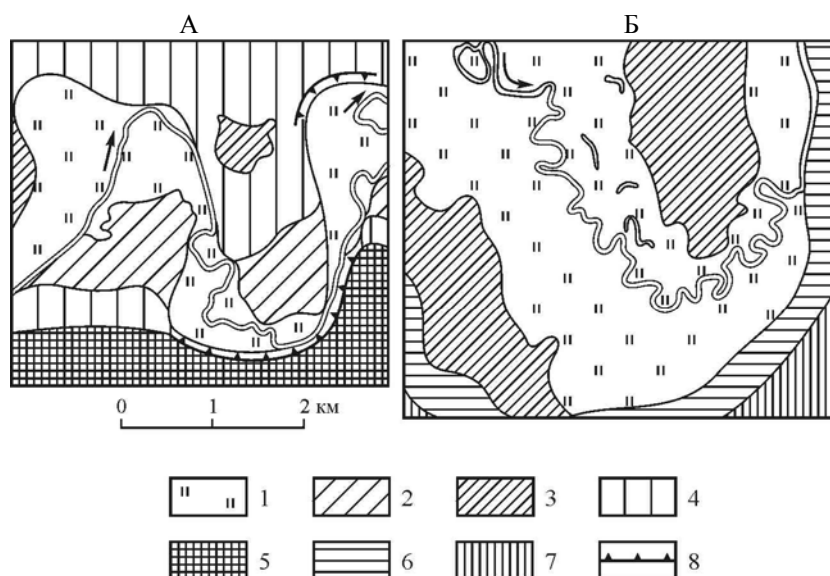


Рис. 118. Врезанные макроизлучины широкопойменного русла: А – р. Медведица (бассейн средней Волги); Б – р. Ворона (бассейн Дона). 1 – пойма; 2 – террасы высотой 10-12 м; 3 – террасы высотой 16-20 м; 4 – пологие долинные склоны; 5 – крутые подмываемые борта долины; 6 – междуречья; 7 – обрывистые склоны.

3. *Свободные макроизлучины широкопойменного русла* (рис. 119). Со времени их формирования не произошло существенного врезания реки, и шпора макроизгиба представляет регулярно или периодически затопляемую пойму. В таких условиях велика вероятность спрямления излучин, что обычно и происходит. В результате большинство макроизлучин этого

типа остаются в виде гигантских стариц на пойме, не выражаясь в форме современного русла (рис. 119А). Такие палеорусла-старицы представляют богатую информацию для изучения трансформации русел в геологических масштабах времени, происходившей в связи с изменениями объема стока и гидрологического режима реки. Сохранившиеся макроизлучины древнего русла осложняются современными излучинами, в результате чего образуются изгибы пояса меандрирования (рис. 119Б). Это, по-видимому, один из наиболее частых механизмов их образования, что служит дополнительным основанием для помещения изгибов пояса меандрирования и макроизлучин на одну ступень в иерархической организации форм русла [Чалов, 1997]. Не исключен и другой путь образования изгибов пояса меандрирования – формирование вторичных меандров на крыльях сильно удлинившихся крутых омеговидных (петлеобразных), синусоидальных или пальцеобразных излучин, а также в пределах единичных аномально крупных излучин, образование которых отражает стохастическую природу меандрирования. При спрямлении излучин в серии смежных иногда образуются П-образные излучины [Кондратьев, Ляпин и др., 1959]; при этом прямолинейная вставка между двумя вершинами может искривляться, и первичная излучина превращается в серию из трех. В отличие от осложненных вторичной извилистостью макроизлучин, эти варианты изгибов пояса меандрирования редко бывают регулярными и по размерам близки к обычным крупным излучинам. Однако далеко не всегда удастся уверенно идентифицировать происхождение таких изгибов, и их трактовка остается за субъективным взглядом исследователя.

По происхождению макроизлучины можно разделить на два типа.

1. Макроизлучины, предопределенные геологическими и структурно-тектоническими условиями. В большинстве случаев они характерны для врезанных русел, испытывающих максимальное влияние геолого-геоморфологической обстановки. По характеру участия водного потока и русловых деформаций в их формировании такие макроизлучины можно подразделить на две разновидности.

1А. Изгибы, предопределенные геолого-геоморфологической обстановкой; роль потока сводится к приданию им меандроподобных очертаний. Прежде всего, это крупные «первичные» изгибы долины, образовавшиеся на этапе заложения долинной сети в результате приспособления потока к неровностям существовавшего рельефа. Такой механизм заложения очертаний речных долин характерен, например, для территорий, освобождающихся от покровного оледенения и обладающих весьма сложной морфологией. Чаще всего речные долины закладывались по путям стока талых ледниковых вод [Эберхардс, 1985; Дварецкас, 1995]. В свою очередь, флювиогляциальные потоки обтекают неровности моренного рельефа (сквозь который часто «просвечивает» доледниковый рельеф), глыбы «мертвого» льда, на отдельных отрезках наследуют долины прорыва подпрудных озер и т.д.

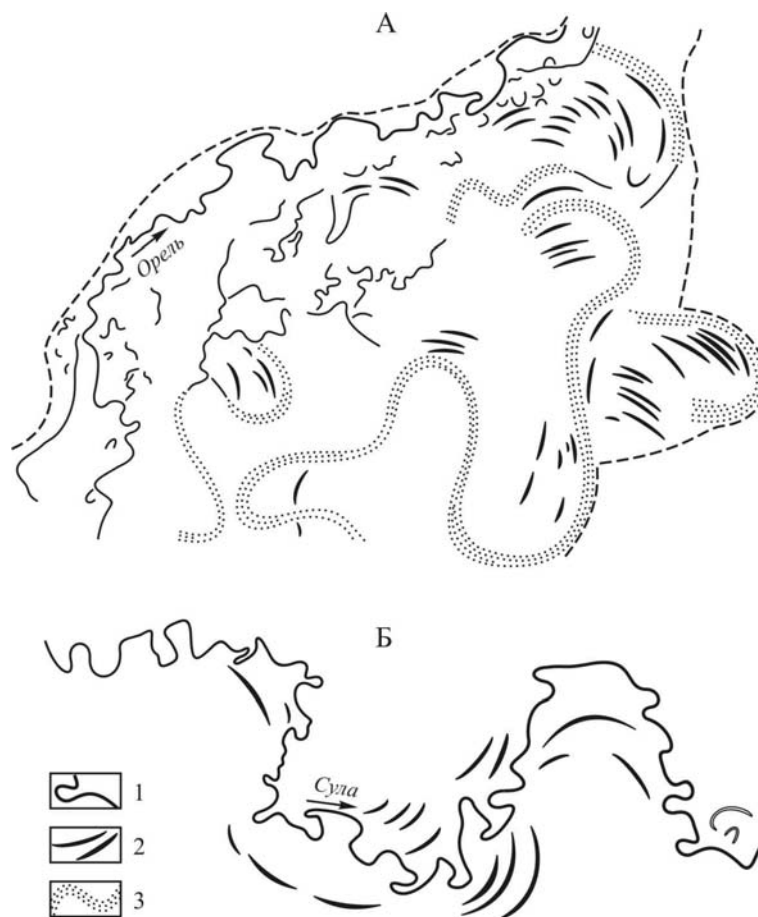


Рис. 119. Свободные макроизлучины широкопойменного русла:
А – гигантские старицы на пойме р. Орели (левый приток Днепра); Б – макроизлучины, осложненные современными меандрами (р. Сула, левый приток Днепра) – изгибы пояса меандрирования. 1 – русло реки; 2 – пойменные гривы; 3 – старицы-макроизлучины.

Вне областей покровных оледенений на территориях, имеющих длительную историю континентального развития, первичные очертания речных долин вряд ли сохраняются в первозданном виде. Так, слой денудационного среза в Забайкалье и на Алданском нагорье достигает нескольких километров, значительно превышая глубину вреза речных долин. В подобных случаях очертания долины складываются на протяжении длительных геологических эпох при врезании в неоднородные литологические комплексы и под воздействием дифференцированных тектонических движений. Для

последних этапов геологической истории очертания долин, обусловленные зачастую уже исчезнувшими формами рельефа и геологическими комплексами, можно условно считать первичными. К таковым можно отнести, например, изгибы долины и русла Алдана, обусловленные сеткой разрывных нарушений (рис. 113). При этом коленообразные изломы русла в областях распространения кристаллических пород нельзя назвать макроизлучинами, т.к. водный поток не принимал никакого участия в их создании. Напротив, в областях развития известняков изгибам русла, первоначально обусловленным сеткой разломов, водный поток придал очертания правильных излучин. Лестница террас в вершинах шпор свидетельствует о поперечном и продольном их смещении, характерном для обычных излучин. От последних эти макроизлучины отличаются своими крупными размерами.

Условия для усложнения очертаний долин складываются в эпохи перестройки долинной сети, которые часто венчают аккумулятивные этапы развития рельефа. В результате многие долины древних континентальных областей оказываются скомпонованными из разновозрастных отрезков и имеют поэтому сложные плановые очертания (Морфоструктурный ..., 1979).

1Б. Макроизлучины, созданные активной работой руслового потока из относительно прямолинейного русла под воздействием геолого-геоморфологических факторов. Таким фактором может служить активная тектоника. Наиболее типичный случай – образование крупных изгибов при огибании руслом растущих тектонических поднятий (такова Самарская Лука на р. Волге) или под воздействием дифференцированных блоковых движений. Другой случай – изменение очертаний русла в ходе его длительного направленного смещения под действием силы Кориолиса или тектонических перекосов в сторону междуречья, обладающего неоднородным строением. Так, темпы направленных горизонтальных деформаций русел крупных рек востока Русской равнины (Волга, Кама) составляют от 10 до 120 мм/год, средних рек (Вятка, Ветлуга, Сура и др.) – до 15 мм/год [Бутаков и др., 1988]. За четвертичное время общая величина смещения достигает десятков километров. На рис. 120 показаны такого рода макроизлучины (буквы А, Б на рисунке) в среднем течении Дона. Здесь же имеются крупные изломы русла, которые нельзя назвать макроизлучинами (буквы В, Г, Д на рисунке), т.к. они являются результатом пассивного следования русла вдоль структурных фестонов и сколов коренного берега (обычно они сопровождаются врезанными излучинами и участками прямолинейного русла ниже по течению).

Прочностные свойства субстрата часто не обладают закономерной пространственной периодичностью. Поэтому геологически обусловленные макроизлучины нередко бывают одиночными или парными, не образуя регулярных серий. Парные макроизлучины этого типа формируются при моделировке коленообразных изгибов русла. Например, на нижнем Витиме они образовались при пересечении поперечной линейной синклинали, в

ядре которой выходят породы с пониженной противозэрозийной устойчивостью. Серийное расположение встречается в случае структурно обусловленных макроизлучин, когда форма русла наследует, например, регулярные системы разрывных нарушений.

2. Унаследованные макроизлучины – излучины некогда многоводного русла, во время своего развития соответствовавшие водоносности реки, но сейчас значительно превышающие характерные размеры форм русла, созданных современным потоком. Эти макроизлучины могут быть как врезанными, так и свободными. Отличительной их чертой является преимущественно серийное расположение и зависимость параметров от размеров реки (водоносности времени их формирования).

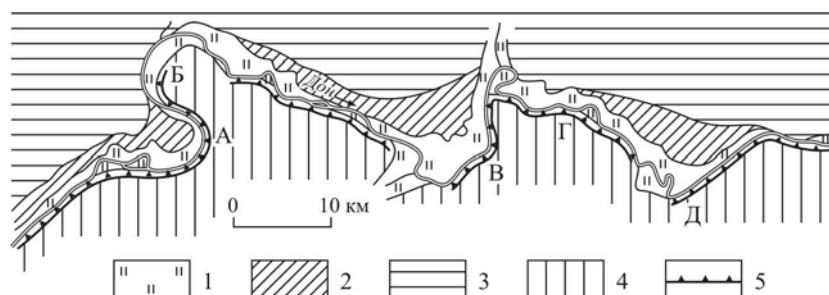


Рис. 120. Макроизлучины (А, Б) и изгибы русел, обусловленные пассивным приспособлением к неровностям коренных берегов (В, Г, Д) в долине Дона выше устья р. Хопра. 1 – поймы и низкие террасы; 2 – высокие террасы; 3 – пологие склоны долины; 4 – эрозионно-денудационная междуречная равнина; 5 – обрывы коренных берегов.

Хорошим примером распространения унаследованных излучин служат реки бассейна Дона. Для анализа выбраны участки крупных и средних рек (длиной более 200 км) с развитыми свободными и врезанными в низкие террасы макроизлучинами, сохранившимися как в очертаниях современного русла, так и в виде гигантских стариц на поймах рек. В позднеледниковое время в бассейн Дона не поступали талые ледниковые воды [Квасов, 1975], и колебания водоносности рек в конце валдая – голоцене определялись только изменениями климата. По участкам длиной 10-150 км (в зависимости от размера реки) осреднялись параметры современных излучин и макроизлучин, измеренные по крупномасштабным (1:25000) картам. При этом измерялись как макроизлучины описываемые современным руслом, так и реконструируемые по старичным понижениям на пойме. Часто в русле прослеживается две генерации макроизлучин или генетически связанных с ними изгибов пояса меандрирования (рис. 121). Размеры макроизлучин первой генерации в 8-12 раз превышают размеры современных излучин, второй – в 3-6 раз. Осреднение в таких случаях производилось раз-

дельно, и в дальнейшем использовалась максимальная из полученных величин. Как для излучин, так и для макроизлучин выявилась четкая связь их размеров (шага) с площадью водосбора, т.е. с водоносностью рек (рис. 122). Наличие этой связи служит очевидным доказательством унаследованного характера макроизлучин бассейна Дона, которые представляют собой излучины тех же рек, формировавшиеся в эпоху более высокого стока по сравнению с современным.

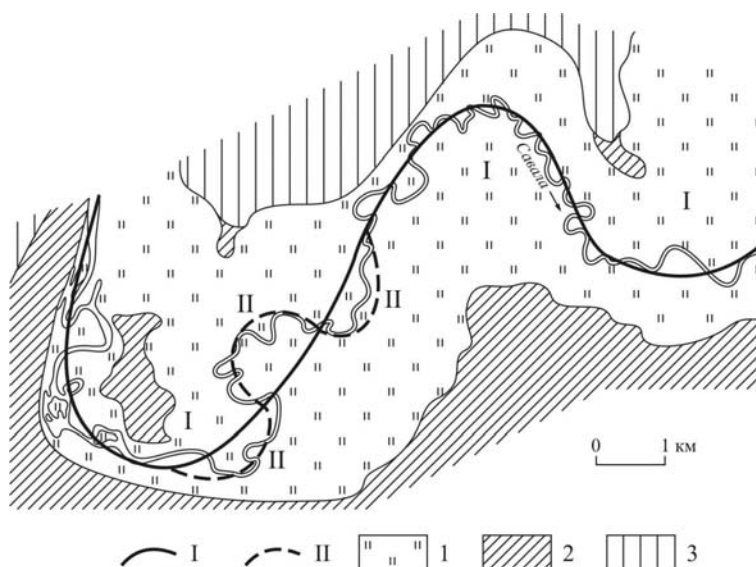


Рис. 121. Иерархия макроизлучин (р. Савала, бассейн среднего Дона). I, II – генерации макроизлучин; 1 – пойма; 2 – низкие террасы; 3 – пологие склоны долины.

Унаследованный характер врезанных макроизлучин можно установить, если в их шпорах присутствуют остатки единой аллювиальной поверхности, в пределах которой реконструируется положение свободно меандрировавшего русла. Потери информации, связанные с переработкой долинного рельефа склоновыми процессами и боковой эрозией реки, затрудняют подобные реконструкции. Однако для макроизлучин, врезанных в низкие террасы (рис. 118), вопрос унаследованности решается с достаточной достоверностью. Свободные макроизлучины, существующие в виде изгибов пояса современного меандрирования или оставшиеся на пойме в виде гигантских стариц, часто сопровождаются характерным веерообразным гривистым рельефом соответствующего масштаба. Это позволяет проследить последовательные стадии искривления палеорусла и с уверенностью говорить, что в прошлом макроизлучины образовывались более многоводной рекой, чем современная, и развивались как обычные речные излучины.

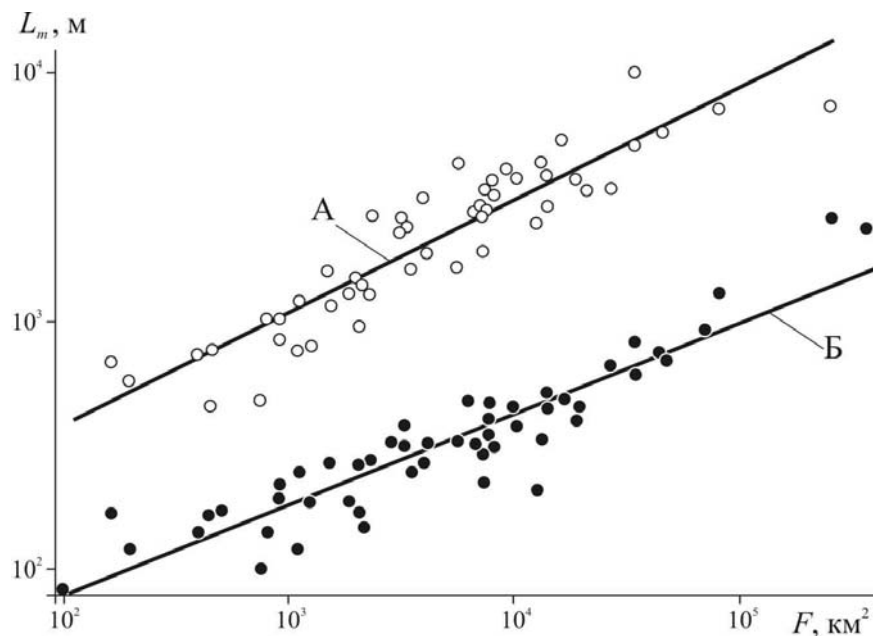


Рис. 122. Связь шага макроизлучин (А) и современных излучин (Б) широкопойменных русел с площадью водосбора рек бассейна Дона.

Важным вопросом является характер и степень влияния макроизлучин на современные русловые деформации и, в частности, на развитие излучин. В случаях, когда русло в пределах макроизлучин осложнено более мелкими формами русла, макроизгиб оказывает на русловые деформации минимальное влияние, за исключением формирования вынужденных излучин на подходе русла к коренному берегу при несовпадении его ориентировки направлению течения реки. Макроизлучины, не осложненные современными формами русла, встречаются преимущественно во врезанных условиях. В таких случаях макроизгибы, предположительно, могут оказывать заметное влияние на динамику потока и русловые деформации.

Эти положения наглядно иллюстрируются на примере русла нижнего течения р. Яны [Панин, 1990; Матвеев и др., 1992; Matveev et al., 1994]. Река Яна в нижнем течении (200 – 400 км от устья) пересекает сводовое поднятие Куларского хребта, зарождение которого относится к концу плиоцена – началу плейстоцена [Баранова и др., 1968]. В зоне пересечения долиной максимальные отметки вершинной поверхности хребта составляют 500–600 м. Современный продольный профиль реки вогнутый, что указывает на общую компенсацию поднятия врезанием реки. Главной особенностью планового рисунка Яны в пределах Куларского поднятия является наличие 11

врезанных макроизлучин с шагом от 5,4 до 15,2 км, что составляет от 12 до 28 ширин русла (рис. 123).

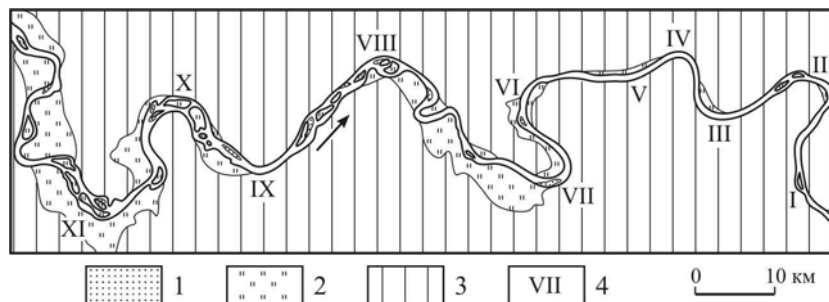


Рис. 123. Врезанные макроизлучины р. Яны на участке пересечения Куларского хребта: 1 – прирусловые отмели; 2 – пойма и низкая терраса; 3 – коренные террасовалы, склоны долины и поверхность междуречья; 4 – номера макроизлучин (снизу вверх).

Шаг излучин русла составляет 2-5 км. Самые малые макроизлучины по размерам близки к крупным излучинам, однако между ними существует отчетливое генетическое различие, выраженное в их принадлежности к разным уровням иерархии форм русла: излучины осложняют крылья макроизлучин, т.е. являются наложенными, более молодыми образованиями.

В образовании макроизлучин, как и во многих случаях врезанных форм русла, трудно разделить приоритеты между работой водного потока и влиянием геологической среды. С одной стороны, на нижней Яне удастся проследить связь заложения макроизлучин с элементами геолого-геоморфологического строения – выступами горных массивов, впадинами. Крылья некоторых макроизлучин совпадают с разломами. В пределах Куларско-Полоусненской тектонической области по рисунку гидросети низких порядков очерчиваются куполовидные неотектонические структуры с наиболее частыми (75%) величинами диаметров в интервале 6-15 км. В этот же интервал попадают величины шага 7 из 11 макроизлучин Яны. Обнаруживается также идентичное распределение макроизлучин и кольцевых структур по величинам радиуса кривизны (рис. 124). В среднем течении Яны ниже устья р. Бытантай и до начала Куларского участка (510-400 км от устья) река прижата к правому коренному берегу, имеющему фестончатые очертания. Вследствие этого разветвленное русло образует пологие изгибы. Характер фестончатости определяется структурными условиями: выпуклым отрезком берега соответствуют максимальные отметки высот на правобережном междуречье, вогнутым – придолинные понижения и долины притоков, текущие вдоль элементов субширотной системы разрывных нарушений. Таким образом, при длительном правостороннем смещении русла в его форме проявилось блоковое строение междуречья. Эти пологие изгибы по размерам

близки к макроизлучинам Куларского участка и могут служить их прообразом на начальной стадии развития.

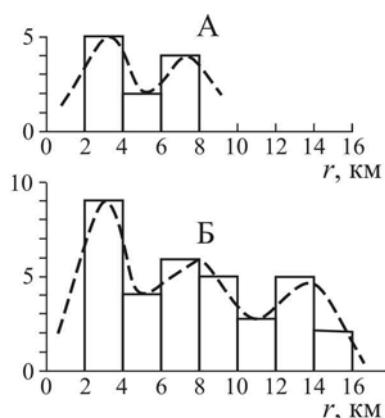


Рис. 124. Частота встречаемости радиусов кривизны макроизлучин нижней Яны (А) и кольцевых геологических структур в Куларско-Полоусненской области (Б), [Панин, 1990].

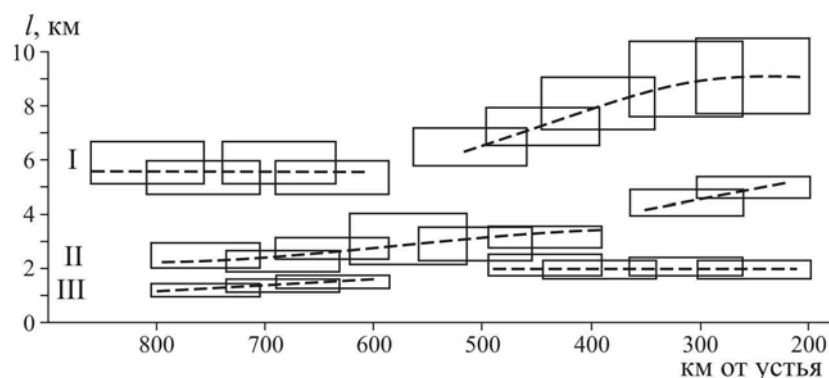


Рис. 125. Длина изгибов, образующих статистически значимые максимумы функции спектральной плотности азимутов линии наибольших глубин р. Яны [Панин, 1990].

С другой стороны, скользящий спектральный анализ рядов азимутов линии наибольших глубин, снятых с лоцманской карты с шагом 200 м, обнаруживает трехступенчатую иерархию изгибов практически по всей длине реки, в том числе и на широкопойменных отрезках верхнего и среднего течения (рис. 125).

Два нижних уровня этой иерархии соответствуют излучинам динамической оси потока и излучинам русла. Верхний уровень на извилистом участке верхнего течения не проявляется в морфологии русла явным образом и соответствует, по-видимому, сериям излучин. Аналогичный результат

получен и по другим рекам Восточной Сибири [Зайцев, 1979]. Ниже устья р. Бытантая этот уровень соответствует описанным выше пологим изгибам адаптированного разветвленного русла, а на Куларском участке – макроизлучинам. По-видимому, такая иерархия заложена в самой структуре потока, а ее морфологическое проявление зависит как от работы системы поток-русло, так и от влияния внешних, в том числе геолого-геоморфологических, факторов.

Об активной роли водного потока в формировании макроизлучин Куларского участка говорит также их меандроподобная форма и строение долины. Борт долины у выпуклого берега представляет собой лестницу террас, сглаженную склоновыми процессами (террасоувал). У выпуклых берегов расположены фрагменты неширокой поймы и низкой аккумулятивной террасы. Вогнутый берег представлен крутым подмываемым уступом коренного склона или цоколя высокой террасы. Такая асимметрия указывает на поперечное к оси долины направленное смещение русла, отражающее искривление макроизлучин в геологическом масштабе времени. Продольное смещение русла на макроизлучинах фиксируется по асимметрии продольных профилей через их шпоры. Судя по тому, что относительная высота фрагментов террас в шпорах достигает 150 м, заложение макроизлучин должно быть достаточно древним (не позднее начала позднего плейстоцена). Описанные черты морфологии долины свидетельствуют, что их развитие продолжалось и в голоцене.

Ниже оси Куларского поднятия, которая фиксируется отчетливым выпуклым перегибом продольного профиля на участке 270-280 км от устья, русло в пределах макроизлучин I-VII (рис. 123) лишено наложенных форм, за исключением единичных одиночных разветвлений. Выше по течению при меньших уклонах в русле формируются многочисленные сопряженные разветвления. Самая верхняя макроизлучина (XI) полностью преобразована вторичной извилистостью. Серия излучин имеется также в нижнем крыле макроизлучины VIII. Формирование излучин ограничено участками локальных расширений дна долины в пределах тектонических впадин – Куйгинской и Босхонгской. На остальном протяжении образованию современных излучин препятствует ограничение горизонтальных русловых деформаций скальными берегами.

Современная динамика макроизлучин не улавливается при совмещении разновременных карт из-за очень низких темпов боковой эрозии прочных скальных берегов. Косвенным образом о ней можно судить по характеру руслового рельефа. В пределах обычных излучин рельеф русла имеет закономерные изменения по длине: глубина минимальна на перегибах между излучинами и достигает максимума несколько ниже вершины излучины. При этом линия максимальных глубин в верхнем крыле проходит вдоль выпуклого берега излучины (коэффициент асимметрии русла $K_{ac} < 0,5$), а ниже вершины на протяжении нижнего крыла – вдоль вогнутого берега ($K_{ac} > 0,5$). Если макроизлучины не оказывают влияния на структуру

потока, в русле не должен формироваться рельеф, характерный для обычных излучин, и отмеченные закономерности не должны проявляться. Напротив, описанные тенденции должны иметь место, если макроизлучины продолжают развиваться под действием потока подобно излучинам современного русла.

Характеристики русла были измерены по крупномасштабным планам русла для уровня бровок поймы (8 м над уровнем межени), когда в галечно-валунном русле Яны происходят основные русловые деформации. На участках современного меандрирования русловой рельеф полностью определяется развитием излучин. Поэтому макроизлучина XI, целиком преобразованная собственно меандрированием, не обнаруживает никаких признаков современного развития. Остальные макроизлучины были разделены на две группы, для которых данные измерений осреднялись – осложненные разветвлениями (VIII-X) и без таковых (I-VII). Анализировалось изменение морфометрических показателей относительно вершины – по 6 км вверх и вниз по течению, что примерно соответствует длине крыльев самых малых макроизлучин. В обеих группах макроизлучин асимметрия русла изменяется подобно обычным излучинам: в верхнем крыле тальвег русла располагается ближе к выпуклому берегу, в нижнем – ближе к вогнутому (рис. 126). Эта тенденция может быть сопоставлена с явлением смещения динамической оси потока относительно его геометрической оси, что является причиной продольного смещения излучин [Маккавеев, 1955, 1971]. Максимальная асимметрия наблюдается в районе и несколько ниже вершины, как и на обычных излучинах. Здесь же отчетливо выделяется локальная область наибольших глубин, протяженность которой на макроизлучинах с разветвленным руслом составляет 4-5 км по руслу, на неразветвленных – 2-3 км.

Таким образом, макроизлучины I-X оказывают влияние на структуру потока и русловой рельеф, т.е. являются активными и в настоящее время. Это проявляется как в неразветвленном, так и в разветвленном русле, где направляющее воздействие на поток макроизгиба определяет развитие узлов разветвления: в верхнем крыле динамическая ось потока стремится в рукава у выпуклого берега, в нижнем крыле – в рукава у вогнутого берега. Напротив, при развитии излучин макроизлучины утрачивают свою целостность и из активных форм превращаются в реликтовые (макроизлучина XI).

Трансформация макроизлучин происходит, по-видимому, во время паводков редкой повторяемости. Действительно, анализ условий прохождения руслоформирующих расходов воды [Чалов, Белый, 1975; Чалов, 1979] показал, что во врезанном русле верхний интервал Q_{ϕ} всегда имеет меньшую вероятность превышения и большие абсолютные величины, по сравнению с участками широкопойменного русла. К аналогичному выводу пришел К. Тинклер [Tincler, 1971, 1972], исследовавший врезанные макроизлучины рек штата Техас: при одинаковых водоносности и гидрологическом режиме руслоформирующие расходы во врезанном русле выше, чем в широкопойменном. Поток, ограниченный высокими берегами, эродировать эти берега

при любом расходе воды. В широкопойменном русле после выхода воды на пойму приращение расхода не пропорционально увеличению его эрозионной способности.

К. Тинклер считает, что макроизлучины (долинные меандры) являются нормальной формой реализации стремления потока к меандрированию в условиях врезанного русла. Их активное развитие происходит во время экстремальных расходов редкой повторяемости (для условий Техаса – 10-50 лет), при прохождении которых поток способен эродировать скальные берега и перемещать грубообломочный русловой аллювий. Высокими эффективными (руслоформирующими) расходами объясняются и столь большие размеры этих форм. При появлении поймы (по длине реки или в процессе эволюции долины), независимо от изменений гидрологического режима, эффективные расходы понижаются, что соответствующим образом сказывается на морфологии русла. Это видно на примере р. Колорадо, где переход от ограниченных к свободным условиям развития русловых деформаций при выходе реки из гор на равнину ведет к резкому уменьшению размеров излучин (рис. 127): в горах распространены врезанные макроизлучины, на равнине река свободно меандрирует.

В пользу предложенного К. Тинклером объяснения активности врезанных макроизлучин говорят исследования структуры потока. При глубоком затоплении поймы лишь небольшая часть расхода воды проходит по излучинам русла, большая же его часть образует пойменный поток и участвует в водообмене между руслом и поймой. Поэтому максимальный расход, при котором происходит развитие свободных излучин, соответствует уровням руслонаполнения, предшествующим выходу потока на пойму. На врезанных излучинах при любых уровнях поток повторяет форму изгиба и способен эродировать вогнутый коренной берег.

Еще одно объяснение факту активности врезанных макроизлучин следует из теории гидродинамической неустойчивости. Из теоретического анализа, проведенного К.В. Гришаниным и В.И. Замышляевым [1985], следует, что любые возмущения береговой линии с длиной волны более трех величин ширины русла $\lambda > 3B_p$ имеют в потенциале положительную скорость роста. При длине волны $\lambda \sim 9B_p$ эта скорость максимальна, и возмущения именно такого или близкого размера «выигрывают» конкуренцию при заложении меандров. Однако, если рассматривать русло с уже заданными изгибами (макроизлучинами), длина волны которых значительно превышает указанную величину, эти изгибы также будут развиваться, если с течением времени их не осложнит вторичная извилистость. Такие условия складываются во врезанном русле, где развитию осложняющих макроизлучины обычных излучин препятствует ограничение горизонтальных русловых деформаций скальными берегами. Рассмотренный пример р. Яны показывает, что в любом расширении поймы русло формирует излучины «нормальных» размеров. В широкопойменном же русле наличие извилистости на фоне макроизлучин есть закономерное следствие развития меандрирования русла.

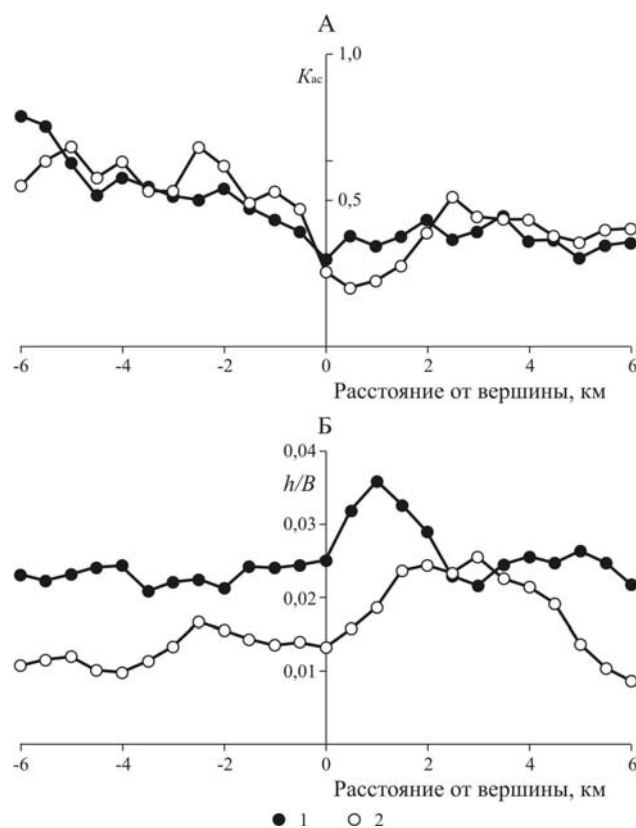


Рис. 126. Изменение морфометрических параметров русла по длине макроизлучин (Куларский участок р. Яны): *A* – коэффициент асимметрии поперечного сечения русла $K_{ас}$; *B* – относительная глубина русла h/B . 1 – осредненные данные по макроизлучинам, не осложненным наложенными формами (I-VII, рис. 123); 2 – то же для макроизлучин, осложненных русловыми разветвлениями VIII-X (рис. 123). Данные снимались для расхода воды в бровках поймы.



Рис. 127. Изменение размеров излучин при переходе от врезанного русла к широкопойменному (р. Колорадо, США) [Tinkler, 1971].

Таким образом, макроизлучины – это меандроподобные изгибы русла, по размерам заметно превышающие излучины, но созданные при активном участии потока либо в прошлом в условиях более высокого стока, либо под влиянием геолого-геоморфологических факторов, либо при комбинации двух этих причин. От излучин макроизлучины отличаются более высоким положением в иерархии форм русла: излучины часто развиваются на фоне макроизлучин. Во врезанных условиях макроизлучины могут не осложняться современной извилистостью. В этом случае макроизлучины могут активно развиваться до настоящего времени относятся к *активным макроизлучинам*. В широкопойменных условиях макроизлучины чаще всего осложняются современными излучинами и превращаются в изгибы пояса меандрирования, не влияющие на структуру потока и переформирования осложняющих их излучин и русла в целом. Такие формы можно назвать *реликтовыми макроизлучинами*. В результате спрямления русла свободные макроизлучины могут сохраняться в рельефе поймы в виде стариц больших размеров – макроизлучин палеорусла («больших палеомеандров»). Такие формы представляют большой интерес для реконструкции условий руслоформирования и стока воды в геологическом прошлом.



ГЛАВА 6



РЕЛЬЕФ РУСЛА НА ИЗЛУЧИНАХ



Структура скоростного поля потока, обуславливающая чередование зон ускорения и замедления течения на излучине русла, система циркуляционных течений и ее перестройка, вызывающая изменения направления донных струй в местах, где берег из вогнутого переходит в выпуклый и наоборот, приводит к тому, что по длине излучины глубина русла постоянно меняется. Неравномерность глубин связана с неодинаковыми условиями эрозии и аккумуляции в пределах разных морфологических элементов излучин, изменениями гидравлических характеристик потока по длине и ширине русла и, соответственно, условий транспортировки донных наносов, а также с формированием в определенных местах их скоплений в виде макроформы руслового рельефа – переката. Иными словами, развитие излучины русла как формы проявления горизонтальных русловых деформаций сопровождается местными вертикальными деформациями, приводящими к постоянным изменениям отметок дна.

В простейшем случае (пологая и развитая сегментные излучины) на участке, где происходит смена знака кривизны смежных излучин, выравниваются скорости по ширине русла и снижается транспортирующая способность потока, всегда находится перекат (рис. 128), частично захватывающий верхнее крыло нижней излучины.



Рис. 128. Расположение плесовых ложин, перекатов и прирусловых отмелей в пределах смежных излучин: 1 – прирусловые отмели; 2 – плесовые ложины; 3 – динамическая ось потока; 4 – подвалы переката.

Верхним его побочным служит прирусловая отмель, вытянутая от вершины выпуклого берега вышерасположенной смежной излучины до

привершинной части следующей; нижним побочнем является прирусловая отмель у выпуклого берега нижней излуины, начинающаяся у ее вершины. Подвалье переката соединяет нижнюю часть верхнего побочня с верхней частью нижнего, составляя острый угол с линией вогнутого берега в привершинной части излуины. Гребень переката с наименьшими в пределах излуины глубинами оказывается, таким образом, смещенным вниз относительно створа перегиба русла между смежными излуинами, располагаясь в непосредственной близости от привершинной части нижней излуины. Ниже переката в привершинной части излуины у ее вогнутого берега и затем вдоль нижнего крыла излуины располагается плесовая лощина, глубина которой растет и достигает максимума несколько ниже точки наибольшей кривизны излуины. При этом нередко нижняя плесовая лощина имеет затонскую часть, образовавшуюся в ухвостье верхнего побочня. В результате такого взаиморасположения переката, плесовых лощин и прирусловых отмелей (побочней) на излуинах линия максимальных глубин оказывается сдвинутой относительно геометрической оси русла: в верхнем крыле она проходит вдоль выпуклого берега излуины, выше вершины переваливает на перекате к вогнутому берегу, у которого сохраняет свое положение на протяжении практически всего нижнего крыла.

На закономерное изменение глубин по длине излуины русла впервые обратил внимание Л. Фарг [Fargue, 1908], который, исследовав меандрирующее русло р. Гаронны (Франция), получил ряд эмпирических соотношений между формой (элементами) излучин и распределением глубин русла и прирусловых отмелей, которые стали известны как «законы Фарга». Суть их сводится к следующему¹:

1. Линия наибольших глубин на излуине стремиться прижаться к вогнутому берегу, тогда как у противоположного выпуклого аккумулируются наносы, образуя широкие отмели.

2. Плесовая лощины и самая мелкая часть переката сдвинуты по отношению к створам с наибольшей и наименьшей кривизной, соответственно, вниз по течению приблизительно на $\frac{1}{4}$ длины системы «плес-перекат».

3. Плавное изменение кривизны русла сопровождается плавным изменением глубин; резкое изменение кривизны сопровождается резким изменением глубин.

4. Чем больше кривизна русла на излуине, тем больше глубина плесовой лощины.

5. При увеличении длины кривой русла (длины излуины) данной кривизны происходит сначала увеличение глубины, а затем ее уменьшение,

¹ В литературе обычно лишь говорится о существовании законов Фарга, но сами они не приводятся, за исключением одного-двух из пяти [Маккавеев, 1955; Кондратьев, Ляпин и др., 1959]. Только в «Гидрологическом словаре» А.И. Чеботарева [1964] приводится их краткая формулировка. Поэтому авторы сочли целесообразным привести их полностью и в дальнейшем показать их справедливость или определенную ограниченность.

причем для каждого участка реки существует некоторое среднее значение длины кривой, при котором глубина максимальна при данных характеристиках реки.

Однако еще Н.И. Маккавеев [1955], отмечая справедливость «законов Фарга» в целом, в то же время указывал на их неполноту, связанную, во-первых, с использованием данных только о правильных сегментных излучинах без учета эволюции, трансформации и усложнения их формы в процессе развития; во-вторых, с узко региональным исходным материалом, положенным в основу анализа. По существу они представляют собой детализацию описанных выше соотношений между элементами сегментных излучин и рельефом русла в их пределах. В то же время в них не учтены некоторые особенности рельефа русла, что в еще большей мере снижает уровень их универсальности и полноты охвата самого явления. В частности, неправомерно говорить о плавности изменения глубин по длине излучины в условиях формирования в ее пределах системы «плес-перекат-плес». Переход от верхней плесовой ложины к гребню переката действительно плавный, но при этом увеличение кривизны русла от створа перегиба между соседними излучинами к вершине излучины сопровождается уменьшением, а не увеличением глубины. Вместе с тем в подвалье переката происходит резкий рост глубины – от самой мелкой части по линии наибольших глубин к самой глубокой в начале нижней плесовой ложины.

Если сравнивать излучины с прямолинейным неразветвленным руслом, то, при прочих равных условиях, средняя и максимальная глубины по оси русла на излучинах обычно больше, чем на прямолинейных участках, причем относительное приращение глубины тем значительнее, чем меньше радиус кривизны русла. Ширина русла, наоборот, обычно уменьшается с увеличением кривизны излучины, т.е. в итоге растёт относительная глубина реки h_p/B_p . В качестве примера подобных изменений русла в таблице 33 приведены данные о глубине и ширине участка р. Вычегды, представленного тремя отчетливо выраженными излучинами с различными радиусами.

Таблица 33. Параметры русла на извилистом участке реки Вычегды

№ створа	Радиус кривизны r , м	Площадь живого сечения, m^2	Ширина русла B_p , м	Глубина h_p , м		h_p/B_p	
				макс.	сред.	макс.	сред.
I	1350	174,0	140	2,20	1,24	0,016	0,009
II	300	193,5	100	3,30	1,93	0,033	0,019
III	160	154,7	70	3,50	2,21	0,050	0,031

У пологих сегментных излучин, у которых $l < 1,4L$, наибольшая глубина наблюдается непосредственно ниже вершины, но уже в ее нижнем крыле, возле вогнутого берега, а наименьшая – в месте перегиба между

смежными излучинами, там, где русло пересекает пережат, соединяющий побочни, расположенные у выпуклых берегов (как это показано на рис. 128). У крутых сегментных излучин плесовая ложина распространяется частично на их верхние крылья. При их трансформации в омеговидные (петлеобразные) в пределах одной сложнопостроенной излучины возникают три самостоятельные плесовые ложины, соответствующие двум вторичным излучинам, которые формируются на крыльях крутой излучины русла, и в привершинной части излучины, наследующей таковую ранее единой сегментной излучины.

Таким образом, у пологих и развитых сегментных излучин рельеф русла по существу представляет собой систему «пережат-плес-пережат», состоящую из двух пережатов на перегибе между смежными излучинами, разделенных плесовой ложинкой в вершине излучины. При этом длина излучины примерно равен шагу этой системы, которой близок к шагу побочной при шахматном их расположении в прямолинейном русле. В процессе эволюции излучин происходит удлинение русла, вследствие чего длина излучины оказывается больше шага системы «пережат-плес-пережат». Это приводит к формированию плесовых ложин в пределах крыльев излучин и, таким образом, в пределах излучины возникает система их трех плесовых ложин и двух пережатов. Как было показано выше, такая трансформация рельефа русла при эволюции излучин приводит к изменению ее формы и превращению сегментной излучины в омеговидную (петлеобразную). Это способствует росту сопротивлений и потерь энергии потока при утрате излучинной гидравлической выгоды своей формы ($l/L > 2,0$), что, в свою очередь, приводит к снижению транспортирующей способности потока и аккумуляции наносов. Вместе с тем, удлинение русла обуславливает формирование дополнительных изгибов потока, что и приводит, в конечном счете, к образованию вторичных излучин на крыльях первичной, обеспечивающих повторную активизацию трансформации ее формы. Таков в итоге механизм автоматического регулирования системы «поток-русло» при утрате излучинной гидравлической выгоды, заключающийся в ее восстановлении для обеспечения транспорта наносов в избыточно удлиненном русле. Следствием этого является то, что на каждой стадии своего развития излучина характеризуется специфическими особенностями рельефа русла, распространения длины плесовых ложин и пережатов.

Наряду с такими изменениями в рельефе русла на излучинах происходит увеличение отметок прирусловых отмелей у выпуклых берегов ($H_{поб}$), их ширины ($B_{поб}$) и длины ($l_{поб}$) за счет распространения их на весь выпуклый берег в привершинной части, включая верхнее крыло излучины (табл. 34). На ранней стадии развития излучин, когда скоростное поле потока слабо дифференцировано, а циркуляционные течения не получили должного развития из-за больших радиусов кривизны русла и незначительности поперечных уклонов водной поверхности, формирующиеся ниже вершин излучин отмели – низкие, узкие, но длинные. По мере искривления излучи-

ны влияние обоих кинематических факторов повышается, отмели становятся все более массивными и высокими, приближаясь к средней высоте поймы. Естественно, что на разных реках размеры отмелей неодинаковы, т.к. они различаются по своей водоносности, величине стока руслообразующих наносов, его режиму и крупности.

Таблица 34. Осредненные морфометрические характеристики прирусловых отмелей у выпуклых берегов излучин на разных стадиях их развития (нижня Вычегда)

Стадия развития излучины	Характеристики прирусловых отмелей			
	$l_{поб}$, м	$B_{поб}$, м	$H_{поб}$, м над проектным уровнем	$l/l_{поб}$
Сегментная пологая	1983	613	2,0	1,48
Сегментная развитая	2180	854	3,4	1,71
Сегментная крутая и омеговидная	3483	958	3,8	1,84

Более сложная и менее закономерная картина в расположении плесовых лощин и перекатов возникает у синусоидальных и пальцеобразных излучин. Это связано с удлинением их крыльев, имеющих вид прямолинейных вставок, нарушением безотрывности обтекания потоком берегов ($r < 3B$), расположением стрежня потока и линии наибольших глубин вдоль выпуклого берега в вершине излучины. Если не считать мелководной области у вогнутого берега в вершине излучины и сдвига плесовой лощины к выпуклому, в остальном рельеф русла на таких излучинах довольно индивидуален.

Для количественной оценки влияния степени развитости излучин на морфометрические характеристики рельефа русла и выявления закономерностей изменения по длине излучин для нескольких излучин широкопойменных меандрирующих рек, находящихся на разных стадиях развития, были определены коэффициенты асимметрии поперечного сечения русла K_{ac} , степень развитости излучин l/L , максимальные h_p и относительные h_p/B_p глубины. K_{ac} , h_p и h_p/B_p определялись в пяти створах на каждом крыле излучины и отдельно в вершине излучин. При этом за коэффициент асимметрии принималось отношение расстояния от линии наибольших глубин (динамической оси потока) до вогнутого берега x , выраженное в долях от ширины русла B_p в данном створе:

$$K_{ac} = \frac{x}{B_p}. \quad (6.1)$$

В верхнем крыле сегментной излучины этот коэффициент имеет значение более 0,5, в нижнем – менее 0,5, уменьшаясь в обоих случаях по

длине излучины ($K_{ac} = 0,5$ на перевале динамической оси потока от выпуклого берега в верхнем крыле к вогнутому в нижнем) и уменьшаясь в вершине излучины по мере ее искривления и перехода от пологой к крутой сегментной излучине; последняя тенденция сохраняется и при трансформации излучины в омеговидную (петлеобразную). Эти закономерности четко прослеживаются, если в качестве морфометрического показателя принять относительную глубину русла h_p/B_p , где h_p – максимальная глубина на створе (рис. 129). Поскольку $B_p \sim Q_{cp}$, то в показателе h_p/B_p снимается эффект масштабного искажения за счет придания ему удельного значения, учитывающего размеры реки. Вместе с тем, величина h_p на излучинах для каждой реки в пределах бесприточных участков также обнаруживает достаточно отчетливый тренд к увеличению по мере роста l/L (рис. 130).

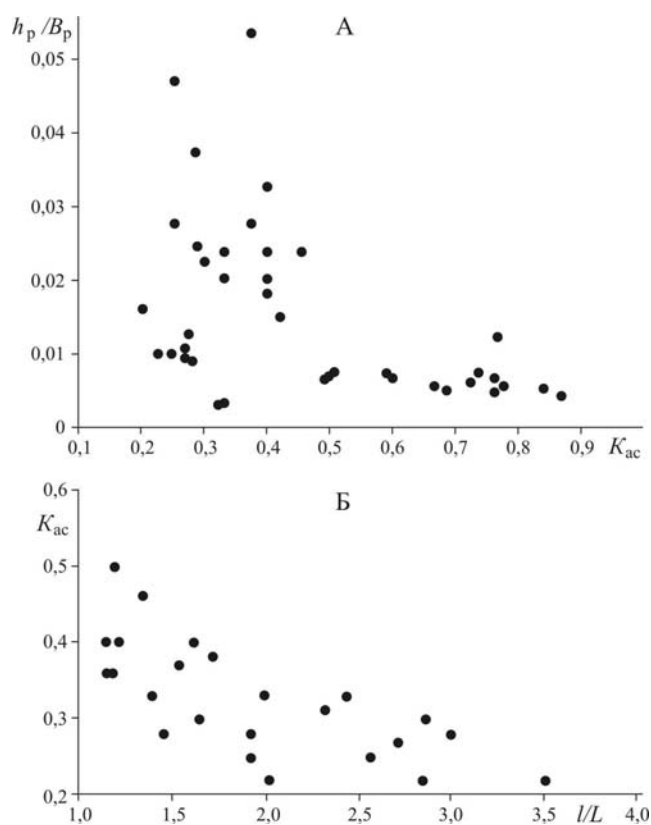


Рис. 129. Графики зависимости относительной глубины русла h_p/B_p от коэффициента асимметрии поперечного сечения по длине излучин (А) и коэффициента асимметрии поперечного сечения в вершине излучин от степени их развитости (Б) для среднего течения Оки.

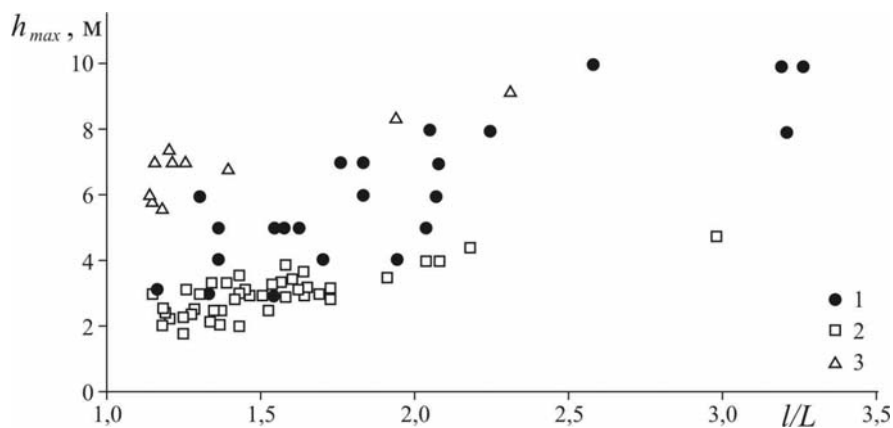


Рис. 130. Зависимость максимальной глубины русла на излучинах от степени их развитости: 1 – р. Ока (между устьями рек Москвы и Прони); 2 – р. Вычегда (между устьями рек Тимшер и Сев. Кельтмы); 3 – р. Амур (между устьями рек Зеи и Буреи).

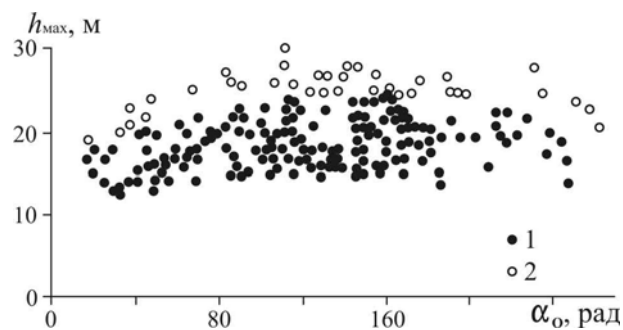


Рис. 131. Связь максимальных глубин с углами разворота излучин (р. Иртыш) [Гендельман, 1988]: 1 – свободные излучины; 2 – адаптированные и вынужденные излучины.

Особенностью рельефа русла на вынужденных излучинах является переуглубление плесовой лощины в нижних их крыльях, расположенных вдоль коренных берегов. Они превышают глубины «нормальных» плесовых лощин на сегментных излучинах иногда в 2-3 раза. Например, на верхней Оби, последние обычно равны 8-10 м (от проектного уровня), тогда как у вынужденных излучин достигают 20-25 м. Это подтверждает данные М.М. Гендельмана [1988], исследовавшего на протоке р. Иртыша связь максимальных глубин на свободных, вынужденных и адаптированных излучинах с углами их разворота (рис. 131): все точки, относящиеся к вынужденным и адаптированным излучинам на графике лежат выше точек, относя-

щихся к свободным излучинам. Характерно, что рост глубин русла на излучинах обоих типов наблюдается примерно до углов разворота $160-180^\circ$, после чего он прекращается, и максимальная глубина уже не зависит от степени развитости излучин. Некоторая тенденция к уменьшению глубин, очевидно, связана с малым количеством точек в области больших углов разворота. Вместе с тем выше вершин таких излучин нередко формируются более мелководные перекаты, малые глубины на которых связаны с подпорными явлениями в потоке при встрече с коренным берегом. На вписанных излучинах мелководные перекаты формируются в нижних крыльях как следствие избыточного поступления наносов при размыве песчаных уступов террас.



ГЛАВА 7



МЕАНДРИРОВАНИЕ РУСЕЛ И ФОРМИРОВАНИЕ ПОЙМ



7.1. Образование, морфометрия и распространение пойм меандрирующих рек

В ходе эволюции излучин любого типа, их смещения и трансформации формы происходит образование поймы. По существу само понятие «излучина» уже предполагает наличие в ее шпоре поймы, а термин «меандрирование», обозначающий процесс развития излучин рек, включает в себя образование поймы у их выпуклых берегов. Пойма возникает благодаря зарастанию и, соответственно, закреплению поверхности побочней; это, в свою очередь, приводит к росту гидравлических сопротивлений, снижению скорости потока над прирусловыми отмелями в многоводную фазу режима и аккумуляции на них наиболее тонких взвешенных наносов, из которых формируется пойменная фация аллювия. Если бы растительность не покрывала прирусловые отмели и на их основе не развивалась пойма, извилистость русла сохранялась бы на уровне излучин динамической оси потока или представляла бы собой изгибы русла, обусловленные рельефом или геологическим строением территории.

Поймы формируются и в процессе русловых деформаций на реках с другими морфодинамическими типами русел. Вместе с тем наиболее широкие поймы при равной водности рек, как правило, присущи меандрирующим рекам, самые узкие – рекам с разветвленным руслом (табл. 35) [Барышников, 1978; Чернов, 1983].

Таблица 35. Средние значения относительной ширины пойм $(B_n + B_p)/B_p^*$ на реках с различными видами русловых деформаций [Чернов, 1983]

Морфодинамический тип русла	Средние значения
Меандрирование до стадии образования петлеобразных излучин	24,0
Меандрирование до стадии образования сегментных излучин	20,3
Меандрирование отдельных рукавов разветвленного русла	12,1
Разветвление на рукава без их меандрирования	6,8

* Примечание: относительная ширина поймы (B_n – ширина поймы, B_p – ширина русла) позволяет исключить влияние на ширину поймы водности реки, так как $B_p = f(Q_{\phi})$ [Барышников, 1978].

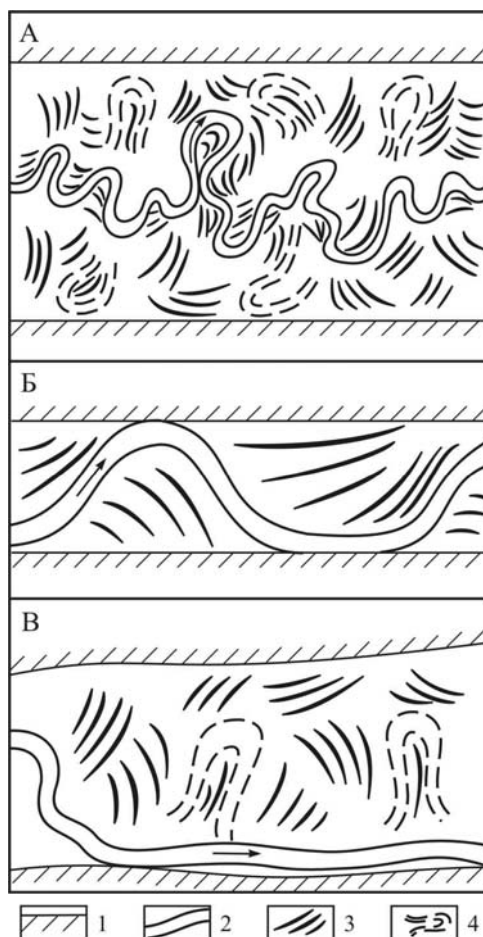


Рис. 132. Основные схемы распространения пойм меандрирующих рек: *А* – двусторонняя; *Б* – чередующаяся; *В* – односторонняя. 1 – борта долины; 2 – русло реки; 3 – гривы на пойме; 4 – старичные понижения.

По расположению поймы относительно русла реки она может быть односторонней, двусторонней или чередующейся.

Двусторонние поймы (рис. 132А) сопровождают обычно свободно-меандрирующие реки. Их ширина превышает ширину пояса меандрирования. В ходе горизонтальных деформаций русло реки может занимать самые разнообразные положения в пределах поймы, причем относится это к взаимной ориентировке не только долины реки и крыльев излучин, но и в целом пояса меандрирования. В последнем случае, а также у омеговидных

На этом фоне в областях со свободным развитием русловых деформаций относительная ширина дна долин (пойма и русло) врезающихся рек не превышает 7-10, а на аккумулярующих реках достигает иногда 30-35. На участках рек с интенсивным проявлением глубинной эрозии и развитием врезанных излучин ширина поймы не превышает ширины меженного русла.

Отчетливые изменения испытывает этот показатель при пересечении реками локальных тектонических структур. Например, на р. Иртыше при пересечении Прииртышского поднятия наблюдается уменьшение показателя $(B_n + B_p)/B_p$ с 35 до 7; на Оби в пределах Краснопольского свода – с 26 до 15. Наоборот, при пересечении погружающихся структур ширина поймы увеличивается. Так, ково расширение поймы Оби в пределах Нижнеобской впадины, где этот показатель увеличивается с 16 до 57 [Чернов, 1983].

излучин, русло на крыльях может быть ориентировано навстречу общему направлению течения реки. Иногда русло может подходить к одному из бортов дна долины, подмывая уступы террас или коренные берега.

Чередующиеся поймы обычно встречаются в пределах относительно суженных участков долины, соответствуя адаптированному типу русла (рис. 132Б). Русло подходит то к одному, то к другому из коренных берегов, формируя сегментные адаптированные, вынужденные и собственно адаптированные излучины. Пойма образует ряд массивов, последовательно при-мыкающих то к одному, то к другому борту долины. В случае сегментных излучин эти массивы перемещаются вниз по реке, вместе с продольным перемещением самих излучин.

В случае *односторонней поймы* главное русло реки проходит вдоль высокого (обычно коренного) берега (рис. 132В). Такая пойма характерна для рек с прямолинейным неразветвленным руслом, часто встречается на реках, разветвленных на рукава. На меандрирующих реках она – результат спрямления излучин русла вдоль коренного берега, где русло закрепляется благодаря возникающим здесь во время затопления поймы в многоводную фазу режима специфических гидравлических явлений в потоке [Чалов, 1979].

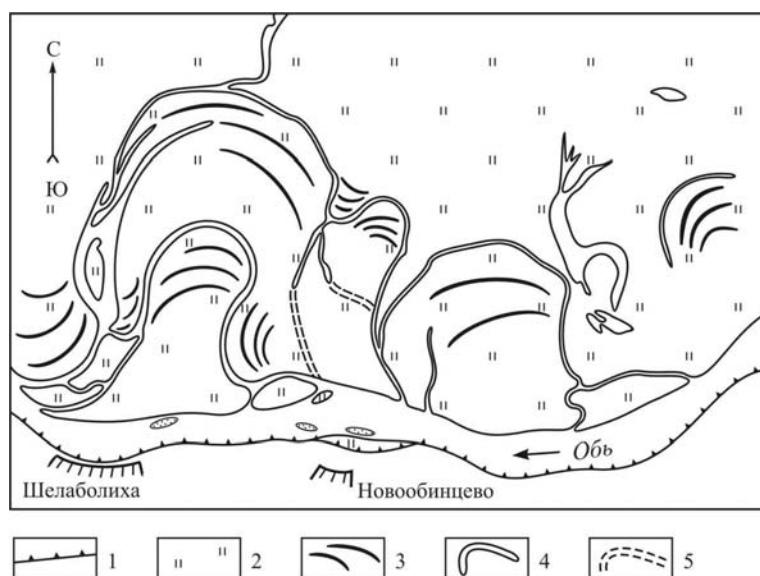


Рис. 133. Прямолинейное неразветвленное русло и сегментно-гвивистая пойма верхней Оби: 1 – коренной берег; 2 – пойма; 3 – пойменные гривы; 4 – старичные озера; 5 – ложбины, соответствующие бывшим положениям русла (староречьям).

Такова, например, широкая односторонняя правобережная пойма верхней Оби ниже г. Барнаула (рис. 133), рельеф которой образован меандрирующим руслом, но само русло сейчас – прямолинейное, неразветвленное

или с одиночными разветвлениями, проходящее вдоль уступа Приобского степного плато; выше и ниже по течению русло меандрирует, т.е. его морфодинамический тип соответствует рельефу развитой здесь двусторонней поймы. В.В. Иванов [1989] подобные прямолинейные русла отнес к трансформирующимся, считая, что при относительной ширине поймы более 10, несмотря на влияние коренного берега, вследствие случайных причин (оползень, обвал) или образования побочня оно сравнительно легко преобразуется в меандрирующее или разветвленное. Участки, где рельеф поймы не соответствует современному морфодинамическому типу русла, обычно начинаются с вынужденных излучин русла.

На реках, формирующихся в условиях ограниченного развития русловых деформаций, пойма встречается в виде отдельных небольших узких фрагментов, приуроченных к выпуклым берегам врезанных излучин. В зависимости от формы излучин (симметричные или асимметричные) эти фрагменты либо охватывают всю привершинную часть шпоры, либо встречаются только в нижнем крыле излучины.

Высота поймы зависит также от целого ряда факторов. При прочих равных условиях (размер реки, амплитуда колебаний уровней, направленность вертикальных русловых деформаций, сток наносов) поймы меандрирующих рек имеют меньшую высоту по сравнению с другими. Это положение отчетливо иллюстрируется рис. 134, который не только позволяет установить зависимость высоты поймы от уровня, соответствующего максимальному половодью, но и от вида русловых деформаций. Как видно, кривые, соответствующие поймам свободномеандрирующих рек отклоняются влево от кривых, полученных для пойм рек с другими типами русла. Повидимому, здесь проявляется влияние большей ширины поймы у меандрирующих рек.

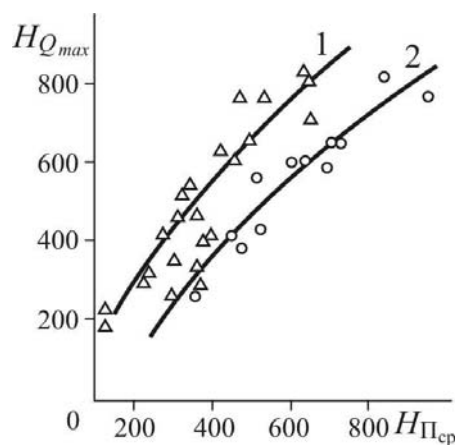


Рис. 134. Зависимость высоты поймы от максимального уровня воды в реке и морфодинамического типа русла [Барышников, 1984]: 1 – свободномеандрирование; 2 – немандрирующее.

7.2. Формирование рельефа пойм меандрирующих рек



В процессе меандрирования формирующаяся пойма приобретает рельеф, который в основном представлен чередованием узких грив и ложбин, создающих специфическую гофрированность поверхности наподобие «стиральной доски», но изогнутых в плане, что отражает смещение и искривление излучин, и серповидными или петлеобразными по своим очертаниям широкими ложбинами, частично занятыми старичными озерами и представляющими собой следы бывших положений спрямленных излучин. Пойменный рельеф, возникший непосредственно в процессе образования поверхности поймы, называют первичным пойменным рельефом [Чернов, 1983; Маккавеев, Чалов, 1986], поскольку он определяет облик поверхности поймы. Пойменный наилок (пойменная фация аллювия) покрывает первичный пойменный рельеф, частично его видоизменяя, но сохраняя в целом его основные черты. Р.А. Еленевский [1936], первым давший характеристику пойм в связи с изучением ее растительного покрова, первичный рельеф меандрирующих рек назвал гривистым. Механизм его формирования был рассмотрен Е.В. Шанцером [1951], который впервые связал его с русловыми процессами на излучинах русла. При этом, согласно его представлениям, пойменные гривы образуются на основе береговых (прирусловых) валов, возникающих у выпуклых берегов излучин благодаря циркуляционным течениям. Им же был предложен термин «веера блуждания» для обозначения систем грив, зафиксировавших в рельефе пойм различные положения русла в ходе развития излучин, их искривление, спрямление и вновь развития. При этом Е.В. Шанцер связал рельеф пойм и механизм его формирования с закономерностями строения аллювия. В.Н. Орлянкин [1963], используя его построения, получил формулу для определения мощности русловой фации аллювия по величине радиусов кривизны вееров блуждания (пойменных грив):

$$M = \frac{ar}{r^2 + b} + M_0 \quad (7.1)$$

где M – мощность руслового аллювия у выпуклого берега излучины, которая определяется как сумма глубины плесовой ложины и высоты прирусловой отмели в вершине излучины; r – радиус кривизны излучины, м; a и b – параметры, зависящие от размера реки; M_0 – минимальная мощность руслового аллювия на прямолинейном участке данной реки.

Процессы поймообразования и, в частности, формирования рельефа пойм меандрирующих рек с позиций теории русловых процессов впервые были исследованы И.В. Поповым [1961]. Существенные уточнения и дополнения на основе сложившихся к 60-м годам XX столетия представлений о пойменных процессах, как составной части русловых процессов, были предложены В.Е. Остапиным [1961], Р.С. Чаловым [1966, 1974, 1979],

Н.С. Знаменской [1973], Ю.И. Каменсковым [1987]. Наиболее полную сводку данных о морфологии и механизме формирования рельефа пойм выполнил А.В. Чернов [1983]. При этом Р.С. Чаловым [1966], а затем А.В. Черновым [1983] было показано, что на крупных равнинных реках с развитыми излучинами часто формируется не гривистая пойма, а ложбинно-островная, присущая обычно рекам с разветвленным руслом, но отличающаяся от пойм последних закономерным расположением в плане основных элементов рельефа, обусловленных развитием излучин. С другой стороны, на малых реках следы блуждания излучин сохраняются часто только в виде стариц или старичных понижений (ложбин), имеющих серповидную или петлеобразную форму в плане. Гривы внутри шпор бывших излучин при этом отсутствуют, и ее поверхность является относительно ровной.

Р.С. Чалов и А.В. Чернов [1984] на основе обобщения данных о морфологии пойм рек Северной Евразии предложили выделять следующие типы пойм меандрирующих рек по их первичному рельефу: сегментно-гривистые, гривистые, озерно-старичные, сегментно-островные и гривисто-островные. Первые две присущи рекам со свободными излучинами, сегментно-островные формируются разветвленно-извилистым руслом, гривисто-островные – при меандрировании рукавов разветвленных русел.

Рельеф пойм свободномеандрирующих рек характеризуется чаще всего чередованием изогнутых в плане, узких и длинных грив и ложбин, обуславливающих гофрированность ее поверхности и заключенных внутри пойменной шпоры излучины, ограниченной либо современным руслом реки, либо широкой ложбиной или старицей, представляющими собой отмершее русло реки. На соседних участках поймы ориентировка грив может быть очень различной (рис. 135). Наиболее крайние положения русла в пределах пояса меандрирования сохраняются в рельефе поймы в виде изогнутых широких плоскодонных, часто заболоченных ложбин или старичных озер, размеры которых соизмеримы с размерами самого русла. Такие поймы предложено называть сегментно-гривистыми, подчеркивая тем самым разнообразие одиночных систем грив в шпорах бывших излучин (сегментов).

Образование *сегментно-гривистой поймы* связано, главным образом, с образованием в извилистом русле прирусловых отмелей – побочней у выпуклых берегов излучин. Крутой низовой откос побочня (подвалье) на значительном протяжении, начиная от вершины излучины, тянется почти параллельно пойменному яру, отходя от него лишь вблизи следующего изгиба русла. В пределах побочня, ширина которого составляет до 0,5 ширины русла в бровках поймах, а иногда и более, между подвальем и яром образуется понижение, переходящее в нижней его части в затонскую часть переката. По мере зарастания побочня и превращения его в молодую пойму понижения постепенно заполняются тонкопесчаным или илистым материалом и становятся пойменными ложбинами, начинающимися в районе вершины излучины, тогда как заросшая пригребневая часть побочня составляет основу пойменной гривы (рис. 136).



Рис. 135. Сегментно-гривистый рельеф поймы свободномееандрирующей реки с различной ориентировкой грив в пределах отдельных сегментов (аэрофотоснимок долины р. Тюнга).

Последовательное продвижение ряда крупных гряд на приустьевую отмель у выпуклого берега излучины (рис. 137А) создает гофрированность ее поверхности, на которой прослеживается несколько обращенных в сторону поймы и вытянутых субпараллельно ей подвальных гряд (рис. 137Б). Прибрежные части гряд, закрепленные растительностью, превращаются в пойменные гривы с крутым склоном, обращенным вглубь поймы (бывшее подвалье на побочне), и пологим склоном в сторону реки (бывший верховой склон гряды). Поскольку приращение побочней происходит на фоне поперечного смещения излучины, каждая вновь сформировавшаяся грива оказывается все более изогнутой. В результате образующаяся при зарастании от-

мели пойма оказывается составленной из системы грив, образующих своеобразный «веер блуждания». Таким образом, система надвинувшихся на прирусловую отмель у выпуклого берега гряд по мере их зарастания образует серию пойменных грив, разделенных между собой ложбинами – бывшими понижениями в подвалье каждой гряды. Кустарник создает при затоплении в половодье дополнительное сопротивление потоку, вследствие чего на поверхности отмели начинают оседать взвешенные наносы, образуя пойменную фацию аллювия.



Рис. 136. Разновозрастные пойменные гривы, формирующиеся на излучине р. Компендййки (правый приток р. Вилюя в среднем течении). Фото Р.С. Чалова.

Если прирусловые отмели у выпуклых берегов излучины образуются периодически, то основу гривистого рельефа поймы составляют те части гряд, которые успевают закрепиться растительностью и поэтому не могут быть уничтожены полностью при смещении к выпуклому берегу стрежня потока (рис. 138). К тому же циркуляционные течения на изгибе русла не благоприятствуют интенсивному размыву выпуклых берегов, тогда как отмели, находящиеся у вогнутых берегов, не предохраняют последние от размыва. В принципе, механизм формирования пойменных грив при непрерывном наращивании отмели у выпуклого берега и при периодическом расположении ее здесь одинаков. Различие заключается лишь в том, что в первом случае каждая гряда оказывается наложенной на пологий верховой склон ранее подошедшей к выпуклому берегу гряды, а во втором случае пойменные гривы представляют собой сохранившиеся от размыва прибреб-

невые части прилегающих к выпуклому берегу побочней (гряд). Кроме того, по этой схеме формирование пойменных глив возможно только до стадии крутой сегментной излучины, после чего невозможно смещение побочней через вершину излучин, и дальнейшее развитие происходит так, как показано на рис. 137.

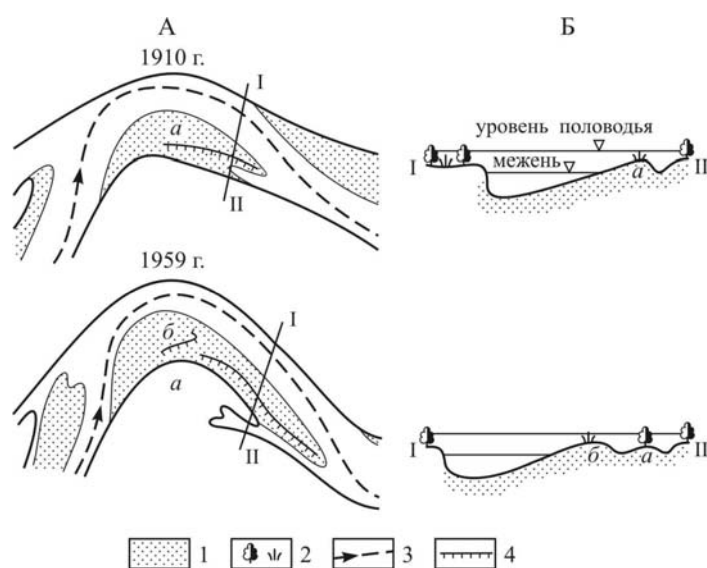


Рис. 137. Схема формирования приустьевой отмели и ее превращение в пойменные гряды у выпуклого берега излучины при приращении к нему побочней (р. Вычегда): А – планы русла за разные годы; Б – поперечные профили русла, отмели и привершинной части шпоры излучины на разных этапах ее развития. Буквами а и б обозначены последовательно приращивавшиеся побочни: 1 – приустьевые отмели; 2 – почвенно-растительный покров на пойме; 3 – динамическая ось потока; 4 – подвалья крупных гряд.

Расположение пойменных глив и ложбин, формирующихся при продвижении на выпуклый берег гряд, зависит от направленности процесса меандрирования и, соответственно, стадии развития излучин (рис. 139). По мере развития излучины и ее искривления глива становится ориентированной под все большим углом к оси пояса меандрирования, располагаясь на ранних стадиях субпараллельно нижнему крылу излучины. При этом последовательно, но незначительно увеличивается изогнутость самих глив. В стадии крутой сегментной излучины, вновь формирующиеся гливы уже частично оконтуривают выпуклый берег в его привершинной части. У петлеобразных излучин они оказываются уже круто изогнутыми. Таким образом, если преобладают поперечные перемещения излучин или продольные и поперечные деформации оказываются равноценными, то, соответственно

росту кривизны излучины, каждая новая пойменная грива оказывается изогнутой больше, чем сформировавшаяся ранее. В результате пойменные гривы и ложбины располагаются веерообразно. Поскольку такой гривистый рельеф пойм фиксирует последовательное смещение излучин, он был назван «веерами блуждания» русла.

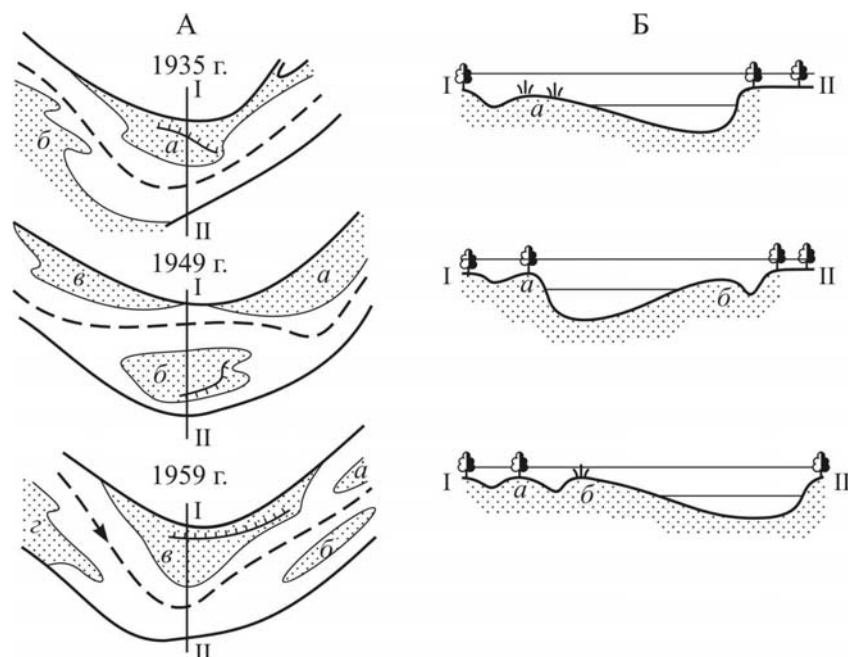


Рис. 138. Схема формирования гривистого рельефа поймы при периодическом расположении побочней у вершины излучины: А – планы русла за разные годы; Б – поперечные профили русла, отмели и привершинной части шпоры излучины на разных этапах ее развития. Буквами *a* - *г* обозначены перемещающиеся побочни. Условные знаки на рис. 137.

Если деформации русла на излучинах сводятся к преимущественному смещению их вниз по течению, пойменные гривы располагаются непосредственно ниже вершины излучины, создавая серию параллельных грив. На двух соседних сегментах поймы, составляющих выпуклые берега смежных излучин, гривы ориентированы под углом, зависящим от кривизны излучин. Эта схема характерна для пологих свободных излучин с абсолютно преобладающим продольным смещением и для сегментных адаптированных излучин. Для чередующихся пойм (рис. 140), где в пределах отдельных пойменных массивов, оконтуренных сегментной адаптированной излучиной, все гривы вытянуты субпараллельно нижнему крылу излучины, целесообразно сохранить исходное название рельефа – *гривистый*.

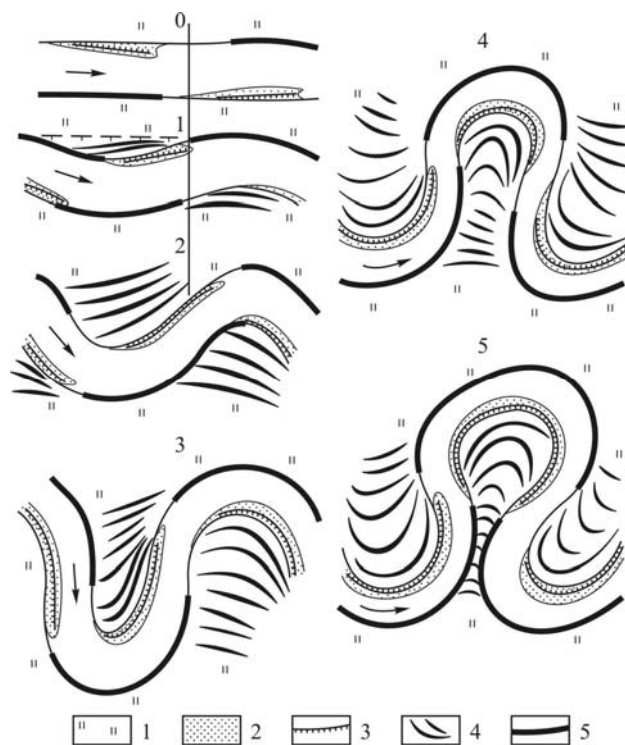


Рис. 139. Схема формирования и морфология участка сегментно-гривистой поймы в пределах отдельной шпоры излучины на разных стадиях ее развития: 1 – пойма; 2 – прирусловые отмели (побочни); 3 – подвалье гряды (побочня); 4 – пойменные гривы; 5 – размываемые берега поймы.

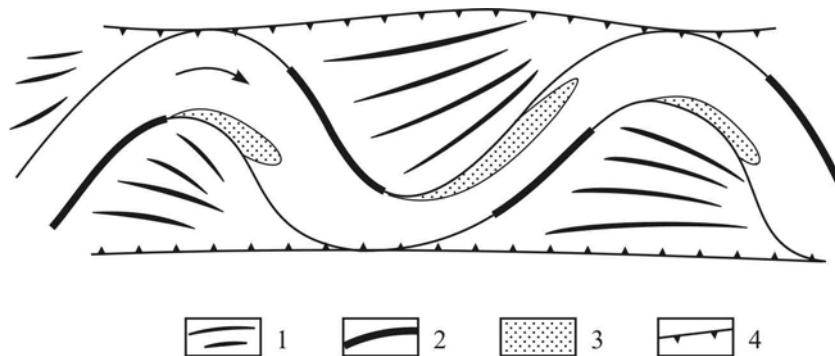


Рис. 140. Гривистый рельеф чередующейся поймы, образованной сегментными излучинами: 1 – гривы на пойме; 2 – подмываемые пойменные берега; 3 – прирусловые отмели; 4 – коренные берега.

По мере развития излучин в поперечном направлении размеры прирусловой отмели, формирующейся возле выпуклого берега и в нижнем ее крыле, растут. Это связано, во-первых, с увеличением продольного градиента скорости потока, вследствие чего в зоне замедления течения усиливается аккумуляция наносов и уменьшается подвижность песчаных гряд. Во-вторых, большая кривизна русла приводит к увеличению перекаса водной поверхности, и, следовательно, к повышению интенсивности циркуляционных течений, обуславливающей перемещение наносов в сторону выпуклого берега. В результате каждый пойменный сегмент имеет незначительную высоту возле своего основания; к вершине излучин отметки его увеличиваются иногда в 2-3 раза.

Между ухвостом зарастающего побочня и вогнутым берегом излучины формируется затонина (она хорошо видна на рис. 136), которая вниз по течению переходит в нижнюю плесовую ложину переката, располагающуюся в вершине излучины. По мере продольного смещения излучины, зарастания последовательно формирующихся побочней и соответствующего развития пойменного сегмента затонская часть переката превращается в заводь – залив в низовьях пойменного сегмента, который является прямым продолжением пониженной тыловой его части. Такие заводи особенно характерны для пойм, образующихся в результате преимущественно продольного перемещения излучин.

Очень высокие и узкие отмели (соответственно – несколько метров и в пределах первых 10 м), благодаря которым происходит развитие поймы у выпуклого берега, образуются на крутых синусоидальных и пальцеобразных излучинах, у которых $r < 2B$, в зоне отрыва потока от выпуклого берега в пределах водоворотной зоны, где интенсивно аккумулируются наносы. Подобные отмели встречаются даже на реках с относительно небольшим стоком руслообразующих наносов, для которых развитие побочни вообще не характерны. Однако, благодаря им, если такие излучины получают достаточно широкое распространение (нижний Днестр), гривистый рельеф поймы оказывается особенно контрастным.

Формирование гривистого рельефа поймы путем последовательного или периодического продвижения побочней на прирусловую отмель, что характерно для пологих или развитых сегментных излучин, возможно при большом стоке руслообразующих наносов, песчаном или песчано-галечном их составе. К пригребневым частям побочней – макроформ грядового движения наносов неприменимо понятие берегового (или прируслового) вала как основы для образования пойменной гривы, введенного Е.В. Шанцером [1951], использованного И.В. Поповым [1961, 1965] и вошедшего в учебную литературу, в первую очередь, по геоморфологии. По Е.В. Шанцеру, такие валы возникают у выпуклых берегов излучин как следствие, с одной стороны, торможения потока на контакте русла с поймой, а, с другой, благодаря поперечной циркуляции на излучине русла, обеспечивающей перенос наносов от выпуклого берега к выпуклому. Такая гипотеза возникла под влияни-

ем широко распространенных в 30-е годы представлений о ведущей роли поперечной циркуляции в формировании излучин [Лосиевский, 1934]. Несоостоятельность их неоднократно подчеркивалась многими исследователями [Маккавеев, 1955; Попов, 1961, 1965; Чалов, 1973; Маккавеев, Чалов, 1963] и была показана выше. При этом было подчеркнuto, что еще М.В. Потапов [1936], показал, что винтообразное течение может иметь место лишь в русле малой реки, у которой выдерживается соотношение $B_p < 20h_p$. С другой стороны, Е.В. Шанцер еще не мог опираться на исследования грядового движения наносов, которые в основном развернулись лишь в 60-е годы XX столетия; отсюда неучет этого фактора для объяснения механизма развития излучин и формирования поймы.

На реках со сравнительно небольшим стоком руслообразующих наносов, мелкопесчаным, часто илисто-песчаным их составом побочни не возникают, но образующиеся небольшие прибрежные отмели, имеющие вид кос, быстро зарастают. В этих условиях механизм формирования поймы и пойменных глив в общем виде оказывается таким же, как при продвижении на выпуклый берег побочней. Различие заключается в том, что в зоне замедления течения на излучине в этих условиях отмель формируется не за счет продвижения побочней, а вследствие аккумуляции транзитного взвешенного материала, образующего здесь узкие длинные косы как одну из разновидностей грядовых форм руслового рельефа. Так как этот процесс идет в зоне взаимодействия руслового и пойменного потоков, то, подобно побочням, субпараллельно пойме у косы прослеживается подвалье. При этом в поперечном профиле такие косы имеют вид крутых гряд, что придает им валообразный характер. Поскольку гребень косы зарастает, то на нем активизируются аккумулятивные процессы. Высота гребня косы растет, и коса у выпуклого берега еще больше начинает напоминать вал. Формирование таких аккумулятивных образований описано в работах Е.В. Шанцера [1951], Ю.А. Лаврушина [1963], А.А. Лазаренко [1964]. Очевидно, только в этом случае за первичной формой будущего гливистого рельефа пойм целесообразно сохранить название «прирусловой (береговой) вал».

Своеобразной разновидностью пойм меандрирующих рек являются *озерно-старичные поймы*, развивающиеся обычно на малых реках, отличающихся значительной устойчивостью русла, сравнительно небольшим стоком наносов с абсолютным преобладанием взвешенной его составляющей и илистым составом. Перекаты на таких реках образуются очень редко, и движение донных наносов осуществляется в виде грядовых микро- или даже ультрамикроформ, а также в гладкой (безгрядовой) форме. У выпуклых берегов излучин образуются заиленные, очень узкие прирусловые отмели со сравнительно ровной поверхностью, постепенно выходящей из-под воды в межень и полого поднимающейся до уровня поймы. Рельеф отмелей, связанный с грядовыми микроформами и ультрамикроформами обычно не сохраняется, нивелируясь илистыми наносами, оседающими на спаде уровней. В результате поверхность формирующейся поймы ровная, лишенная

присущих поймам меандрирующих рек грив; строение таких пойм, из-за преобладающего участия илистых наносов в составе прирусловых отмелей, суглинистое, что нередко ограничивает возможности спрямления излучин на стадии крутой сегментной излучины и может происходить, если поймы низкие, луговые, а Q_{ϕ} проходят при их затоплении. Если пойма высокая, а руслоформирующие расходы воды наблюдаются до ее затопления, развиваются петлеобразные излучины, у которых постепенно сужаются шейки и русло спрямляется с образованием петлеобразного староречья, превращающегося со временем в широкую изогнутую ложбину на пойме со старичными озерами. Если в первом случае старичные понижения и озера имеют серповидную форму, то во втором старицы образуют почти замкнутые петли, оба конца которых сходятся практически в одной точке (рис. 141). Поскольку старичные понижения и озера представляют собой основной элемент рельефа таких пойм, поверхность поймы между ними ровная, лишенная грив, им было дано название – *озерно-старичные поймы* [Чалов, 1979].

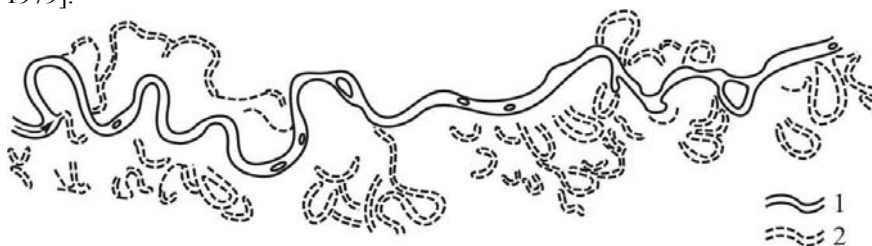


Рис. 141. Озерно-старичная пойма р. Ануя (приток верхней Оби):
1 – русло; 2 – старичные понижения на пойме.

Размывы берегов излучин в зонах ускорения течения приводят к тому, что здесь пойменный яр срезает верхние части грив, образовавшихся у выпуклого берега и имеющих наибольшую высоту. При затоплении поймы в потоке около таких берегов возникают восходящие течения, выбрасывающие на их бровку наносы, вследствие чего пойма здесь интенсивно растет в высоту [Маккавеев, 1955; Ярославцев, 1955]. Таким образом, в процессе развития излучины как благодаря увеличению ее кривизны, так и аккумуляции наносов вдоль подмываемых вогнутых берегов образуются наиболее повышенные участки поймы. В результате прорыва шпоры излучины происходит спрямление русла, которое сопровождается врезанием реки на участке прорыва. Это приводит к тому, что наиболее повышенные части формирующейся поймы могут выйти из-под уровня затопления. Такие незатопляемые участки поймы располагаются обычно вдоль крутого яра в верхнем крыле бывшей излучины (старицы). На этих «островках» обычно располагаются населенные пункты, посевные площади, огороды и хозяйственные строения, в то время как остальная территория поймы используется как луговые угодья и пастбища. Обычно они приурочены к «берегам» широких,

изогнутых в плане, иногда заболоченных ложбин или старичных озер, отмечающих крайние положения, которые в процессе меандрирования достигали излучины русла (рис. 142). Эти берега, судя по очертаниям ложбины, должны были интенсивно подмываться.

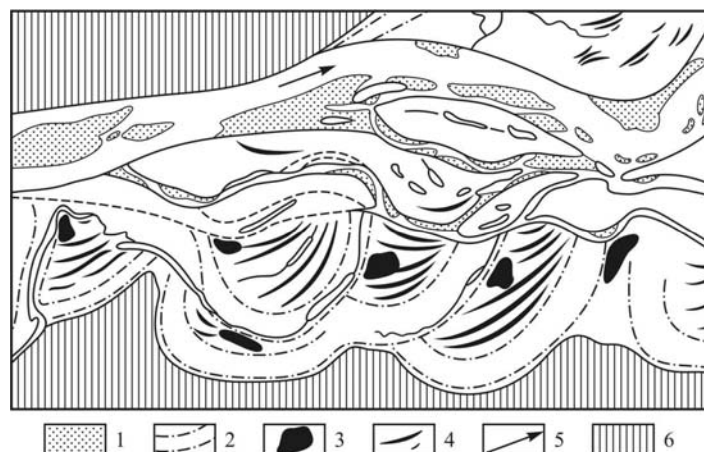


Рис. 142. Грядистый рельеф поймы р. Вычегды, положение старичных ложбин и редко затопляемых участков [Останин, 1961]: 1 – прирусловые отмели; 2 – древние положения русла (широкие ложбины на пойме); 3 – редко затопляемые (незатопляемые) участки поймы; 4 – пойменные гряды; 5 – направление течения реки; 6 – надпойменные террасы.

Образование *сегментно-островной поймы* происходит на больших меандрирующих реках, у которых развитие излучин осуществляется путем образования островов, составляющих шпоры излучин (разветленно-извилистое русло). Одной из причин образования таких русел, помимо большой водоносности реки, является прохождение руслоформирующего расхода воды верхнего интервала, затопляющего пойму и способствующего развитию спрямляющих русло протоков. Положительные элементы рельефа сегментно-островной поймы возникают на месте закрепившихся растительностью осередков – элементарных островов (рис. 83А). В отличие от сравнительно узких гряд они характеризуются довольно большой шириной и относительно ровной поверхностью. Ложбины между ними являются бывшими протоками, разделяющими осередки и острова. Поскольку протоки сами иногда меандрируют, то на сегментно-островной пойме встречаются иногда участки с грядистым рельефом, приуроченные к выпуклым частям бывших «островов».

Особенности формирования сегментно-островной поймы на меандрирующих реках различаются в зависимости от гидрологического режима реки. В тех случаях, когда половодье на реке невысокое, растянутое во вре-

мени и спокойное, а изменение гидравлических характеристик потока происходит медленно и не сопровождается резкими изменениями положения стрежня потока, на излучинах русла возникают острова, располагающиеся цепочками вдоль выпуклых берегов [Чалов, 1966]. При отмирании протоков и объединении между собой островов образующиеся пойменные гряды и ложбины оказываются расположенными по дугам, соответствующим кривизне излучин русла. Если половодье (паводок) на реке высокий и кратковременный, то стрежень потока пересекает шпоры излучин русла. У выпуклых берегов возникают крупные осередки и острова, ориентированные не вдоль выпуклых берегов, а поперек их. Формирующаяся при этом пойма по своему генезису является ложбинно-островной, свойственной разветвленным на рукава рекам. Но в отличие от них элементы ложбинно-островного рельефа (гряды – бывшие острова и ложбины – бывшие протоки между ними) составляют сегменты, располагающиеся в шахматном порядке; при спрямлении излучин разветленно-извилистого русла такие сегменты разделяются друг от друга изогнутыми в плане широкими ложбинами-староречьями.

На меандрирующих реках, на которых руслоформирующие расходы проходят в условиях затопленной поймы, формируются сегментно-гривистые поймы, осложненные пойменной многорукавностью. Пойменный поток разрабатывает в этом случае вдоль понижений и ложбин в основании пойменных сегментов новое русло, спрямляющее одну или несколько излучин (формируются прорванные излучины). Остров между обоими рукавами обычно характеризуется гривистым рельефом.

Гривисто-островные поймы разветвленных русел образуются в тех случаях, когда рукава, составляющие русловую многорукавность, а также отшнуровывающиеся от разветвленного русла пойменные протоки меандрируют. Элементарный остров или группа островов увеличивается в размерах со стороны меандрирующего рукава благодаря последовательному надвижению на его выпуклый берег побочной с образованием узких ложбин и грив. Если пойменная многорукавность сопровождает разветвленное русло, то гривистая или сегментно-гривистая пойма, сформировавшаяся меандрирующими пойменными протоками, оказывается вложенной в ложбинно-островную пойму реки (рис. 143). Возможны и другие комбинации в распространении различных типов пойм в условиях разветвленного русла и развития пойменной многорукавности.

Поскольку размеры излучин находятся в зависимости от водоносности рек, характеристики гривистого рельефа пойм изменяются по их длине. В общем случае вниз по течению сегментно-гривистые поймы сменяются сегментно-островными, а на больших и крупнейших реках – гривисто-островными или типичными для разветвленных русел – ложбинно-островными поймами.

За время формирования пойм (верхний плейстоцен – голоцен) природные условия, водоносность и гидрологический режим рек неоднократно

менялись. Поэтому параметры пойменного рельефа часто не соответствуют современному руслу [Экспериментальная геоморфология, 1969; Маккавеев, Чалов, 1970]. Это позволяет при реконструкции древних положений русла и определении их возраста приводить палеогидрологический анализ и восстанавливать историю русловых переформирований за геологические отрезки времени.

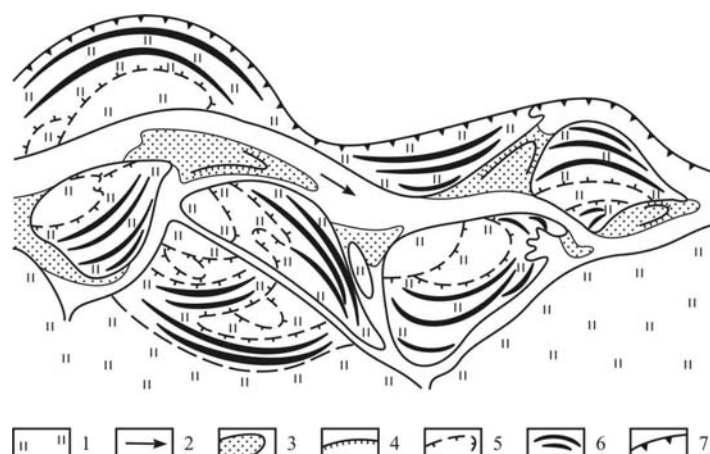


Рис. 143. Гривисто-островная пойма р. Виллюя, образованная при развитии излучин рукавов (по А.В. Чернову, 1983): 1 – пойма; 2 – русло и направление течения в нем; 3 – побочни перекатов; 4 – надводные в межень подвалья перекатов; 5 – уступы на пойме, ограничивающие гряды (бывшие яры); 6 – пойменные гривы; 7 – уступ надпойменной террасы.

Во врезанном русле вследствие чрезвычайной замедленности развития его форм аккумуляция на поверхности узкой поймы практически полностью нивелирует первичной пойменный рельеф. Если же он сохраняется, то является гривистым, причем гривы вытянуты субпараллельно руслу реки.



ГЛАВА 8



ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СВОБОДНОГО МЕАНДРИРОВАНИЯ



8.1. Методика палеоруслового анализа

Реконструкция морфологии речных русел и характера русловых деформаций в прошлом опирается на разные источники информации и набор методов в зависимости от глубины реконструкции. В связи с этим Р.С. Чалов [1996] предлагает различать историческое и палеорусловедение. Историческим периодом можно считать время, в течение которого состояние русел зафиксировано документально. Самые древние сведения о речных руслах можно почерпнуть в летописях и первых гидрографических описаниях. Наибольшую ценность представляют картографические материалы, позволяющие при сопоставлении с современными картами количественно оценить изменения очертаний русла (положения береговой линии, степени развитости и параметров излучин и т.д.). Созданные глазомерным способом или сильно генерализованные мелкомасштабные карты для этих целей не подходят. Наиболее надежны специальные карты речных русел, составляемые для навигационных целей – лоцманские карты. В России первая крупномасштабная карта русла реки (р. Дона) была создана адмиралом Крюйсом для обеспечения походов Петра I на Азов. Эта карта была издана в 1704 г. С середины XIX века началось систематическое составление лоцманских карт.

В 70-80-е годы XVIII века в рамках проводимого по указанию Екатерины II Генерального межевания земель (составления земельного кадастра, по современной терминологии) были созданы крупномасштабные планы центральных и южных губерний Европейской России. Несмотря на особое внимание к элементам гидрографии при проведении съемки, использовать эти материалы необходимо с большой осторожностью, т.к. инструментальным способом снимались только границы земельных владений. Более надежным картографическим документом является трехверстная (1:126000) карта Европейской России, составленная в 1860-1870-е годы Корпусом военных топографов. Однако масштаб этой карты слишком мелок для изучения очертаний малых и средних рек.

После Первой Мировой войны широкое внедрение аэрофотосъемки как в Европе, так и в России многократно ускорило процесс создания топографических карт, в том числе крупномасштабных. К концу 1930-х годов на европейской части, а к середине 1950-х – на всей территории СССР было завершено картографирование в масштабе 1:100000 (Салищев, 1982). С на-

чала 1960-х годов вся территория России и большей площади суши Земли обеспечена космической съемкой высокого разрешения. Во второй половине XX века в связи с ростом значения водного транспорта, особенно при освоении восточных регионов страны, значительно увеличилась протяженность водных путей за счет новых, ранее несудоходных рек и участков рек. Соответственно, возросла активность в создании новых лоцманских карт на ранее не изученные реки. Многократная повторность в составлении как топографических, так и лоцманских карт обеспечивает получение сведений об изменениях речных русел за различные отрезки времени.

Палеорусловедение решает задачу реконструкции истории русловых переформирований за период до появления документальных исторических источников. Информация, позволяющая проводить такие реконструкции, заключена в следах, оставляемых руслом при блуждании по дну речной долины. В процессе русловых деформаций формируется пойма, обладающая характерной морфологией и геологическим строением. Поэтому методы исследования, применяемые при палеорусловом анализе, в основном геологические и геоморфологические.

Наиболее информативный индикатор горизонтальных русловых деформаций в прошлом – рельеф поймы. Последовательность гряд внутри шпоры каждой излучины позволяет проследить последовательность ее искривления, выделить стадии развития и оценить соотношение продольного и поперечного перемещения. При спрямлении излучины на пойме остается дугообразное (серповидное или петлеобразное) старичное понижение (палеорусло), оконтуривающее участок поймы с грядистым рельефом – внутреннюю часть (шпору) бывшей излучины. Поймы меандрирующих рек, как лоскутное одеяло, состоят из таких участков-сегментов, ограниченных изогнутыми старицами-палеоизлучинами (рис. 144а). На древних участках поймы либо при высоких темпах аккумуляции наносов пойме первичный русловый рельеф нивелируется, и поверхность поймы становится относительно ровной и однообразной (выровненной, по А.В. Чернову [1983] – рис. 144в); реже такие поймы можно идентифицировать как озерно-старичные. Промежуточное положение занимают поймы (участки пойм), у которых в результате длительной аккумуляции наносов грядистый рельеф сnivelирован, но еще сохранились изогнутые в плане старичные понижения, местами занятые озерами (рис. 144б).

Анализ пойменного рельефа проводится по крупномасштабным топографическим картам. Для территории России наиболее подходят карты масштаба 1:25000, покрывающие всю территорию страны. Съемка более крупного масштаба проведена пока выборочно, а при более мелком масштабе карт теряются детали пойменного рельефа. Эти детали не всегда удовлетворительно отображаются даже при сечении рельефа 5 м, принятом на картах масштаба 1:25000. Кроме того, первичный русловый рельеф имеет на поймах разную, в том числе неудовлетворительную, сохранность. Поэтому в комплексе с картографическими материалами необходимо анализи-

ровать аэро- и космические снимки. Поскольку рельеф и геологическое строение поймы оказывает влияние на другие компоненты ландшафта (условия увлажнения, характер растительных ассоциаций, почвы), фототон на снимке часто отражает такие черты строения поймы, которые не проявляются на топографических картах.

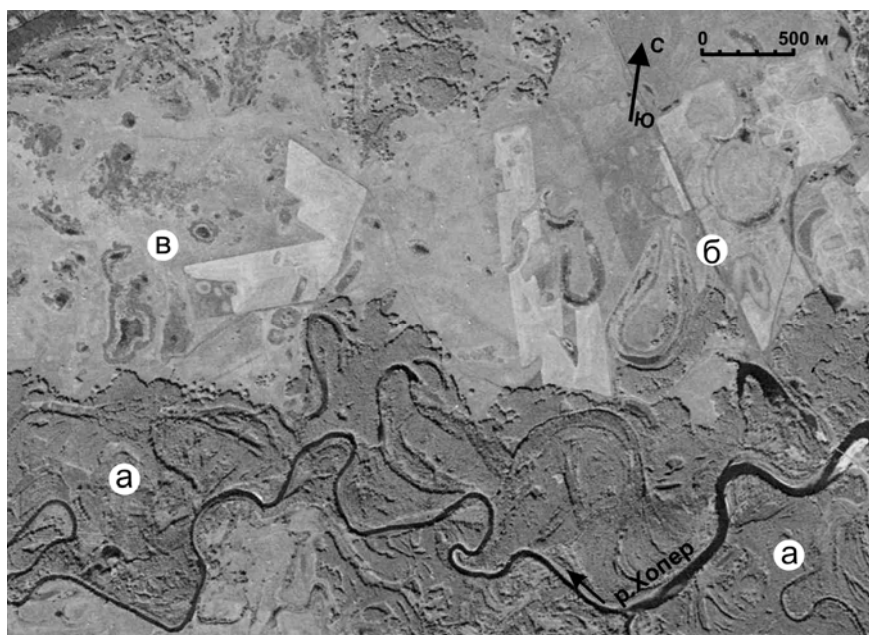


Рис.144. Пойма меандрирующей реки.

а – наиболее молодая (вторая половина голоцена) сегментно-гривистая пойма с отчетливо выраженным первичным рельефом – веерами грив, ограниченных дугами стариц; *б* – более древние (раннеголоценовые) участки поймы, изначально имевшие гривистый рельеф, сnivelированный в результате пойменной аккумуляции; сохранились серповидные старичные понижения, местами занятые озерами; *в* – наиболее древняя выровненная пойма (позднеледниковье – ранний голоцен), первичный рельеф полностью сглажен, на месте староречий – овальные или бесформенные замкнутые понижения.

При подборе снимков особое внимание следует обратить на их разрешение. Разрешение снимков должно соответствовать характерным пространственным масштабам дешифрируемого рельефа. Для иллюстрации на рис. 145 сопоставлены космические снимки разного разрешения на один и тот же участок долины реки среднего размера. Характерные размеры элементов рельефа таковы: ширина русла реки 60-80 м, ширина стариц-палеорусел 30-40 м, ширина пойменных грив и мелких ложбин 5-10 м. Возможности морфологического анализа по снимкам разного разрешения отра-

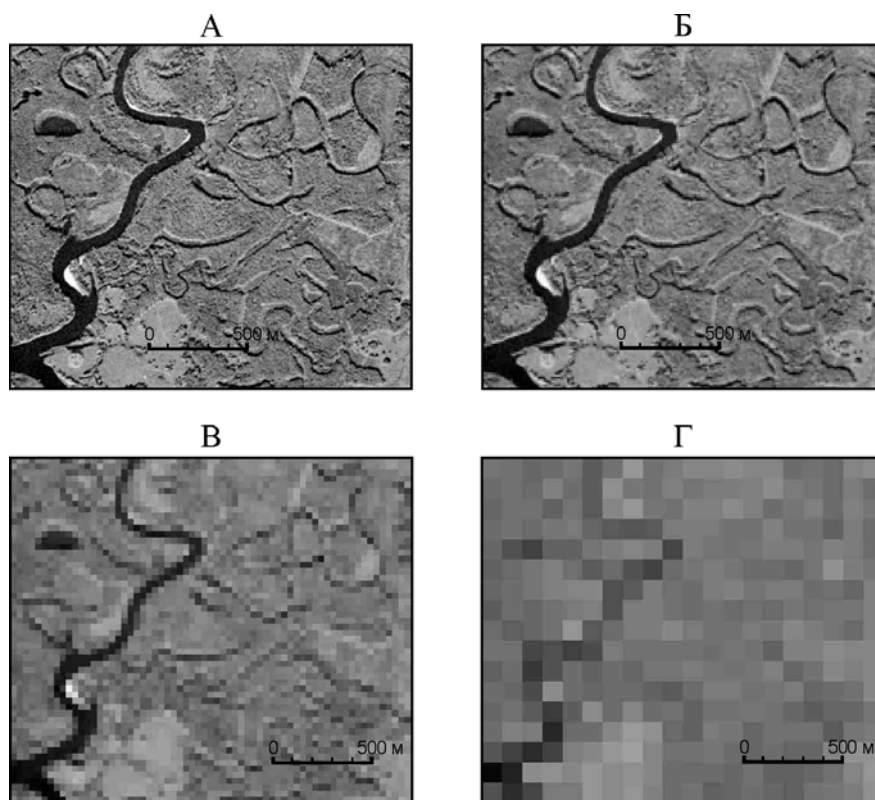


Рис.145. Информативность космических снимков разного разрешения при дешифрировании флювиального рельефа.

Размер 1 пиксела изображения: А – 3 м., Б – 10 м., В – 30 м., Г – 100 м.

жены в табл. 36. При разрешении 3 м вдоль выпуклых берегов излучин современного русла местами выявляются веера пойменных глив, причем можно не только констатировать их присутствие, но и определить конфигурацию, что позволяет отобразить их на геоморфологической схеме. При разрешении 10 м гряды на изображении пропадают, но старицы дешифрируются практически без потери информации по сравнению с 3-метровым разрешением. При разрешении 30 м можно лишь предположительно говорить о наличии стариц (идентифицировать их присутствие), но достоверно определить их конфигурацию и судить об их взаимных пространственных отношениях невозможно. Современное русло реки, более широкое по сравнению со старицами, при этом разрешении выявляется еще достаточно четко. Можно вполне удовлетворительно нанести его в виде линейного знака на геоморфологическую схему, измерить шаг излучин и другие их парамет-

ры. Ширину русла по этому изображению измерять бессмысленно, т.к. точность такого измерения не будет превышать 50%. Снимок 100-метрового разрешения в данном случае вообще не содержит морфологической информации, но для характеристики пойм крупных рек (например, с шириной русла 1 км) такие снимки достаточно информативны. Таким образом, для идентификации присутствия тех или иных линейных флювиальных форм разрешение снимков должно быть таково, чтобы по характерной ширине формы укладывалось не менее 2-3 пикселей изображения, для определения линейной конфигурации – 3-5 пикселей, для измерения ширины – 5-10 пикселей. Для измерения шага излучин пригодны снимки меньшего разрешения, чем для измерения ширины русла: шаг излучин уже можно измерить, если есть возможность определить форму русла в плане (рис. 145, табл. 36).

Таблица 36. Информативность космических снимков разного разрешения (рис.145)

Элементы мезорельефа поймы	Разрешение снимка, м/пиксел	Решаемые задачи			
		Идентификация присутствия	Определение линейной конфигурации	Измерение	
				Ширины форм	Шага излучин
Пойменные гривы и ложбины шириной 5-10 м.	3	+	±	—	—
	10	—	—	—	—
	30	—	—	—	—
	100	—	—	—	—
Старицы-палеорусла шириной 30-40 м.	3	+	+	+	+
	10	+	+	—	+
	30	±	—	—	—
	100	—	—	—	—
Современное русло реки шириной 60-80 м.	3	+	+	+	+
	10	+	+	+	+
	30	+	+	—	+
	100	—	—	—	—

Анализ топографических карт и снимков позволяет выявить фрагменты древних русел (палеорусел) реки и участки поймы, созданные при их развитии, определить морфодинамический тип палеорусла, измерить морфометрические параметры палеорусел: ширину, размеры островов, радиус кривизны и шаг палеоизлучин, а также оценить относительный возраст палеорусел. Многие из этих элементов используются при составлении геоморфологических карт речных пойм. Возраст палеорусел на отдельно взятом поперечном профиле через дно долины обычно (но далеко не всегда) соответствует их расстоянию от современного русла: чем дальше, тем древнее. Более надежное основание для суждений об относительном возрасте палеорусел дает их взаимное расположение: более молодые палеорусла подрезают более древние (рис. 146). В итоге все палеорусла можно разде-

лить на возрастные генерации. К одной генерации можно относить фрагменты древнего русла, которые формировались не одновременно, но в пределах достаточно узкого временного интервала, при сходных характеристиках стока воды и наносов и имеют поэтому одинаковый морфодинамический тип русла и близкие морфометрические параметры (ширину русла, шаг, радиус кривизны и возможно, степень развитости излучин).

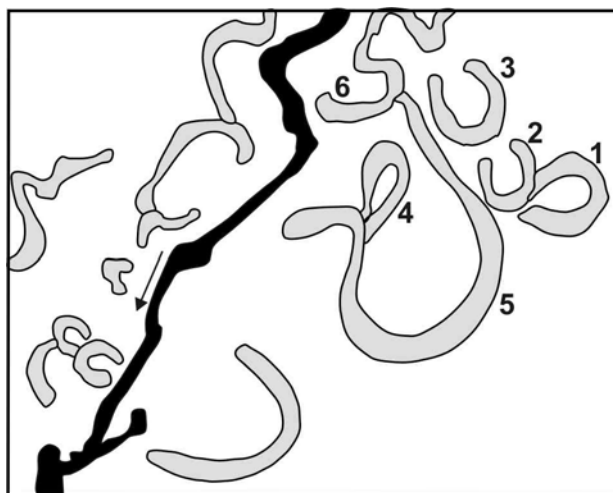


Рис.146. Определение относительного возраста палеорусел.
1 ... 6 – палеомеандры разного возраста (от древних к молодым).

Дополнительную информацию о палеоруслах можно получить изучая их геологическое строение по естественным обнажениям в уступах подмываемых пойменных берегов и с помощью бурения. Толща аллювия, заполняющая палеорусла (старичная фация), обычно заметно отличается более тяжелым (глинистым или тяжелосуглинистым) механическим составом от вмещающих ее русловых и пойменных отложений. Тем не менее, однозначно определить подошву толщи заполнения, а значит и поверхность дна палеорусла, зачастую бывает непросто. Это объясняется прежде всего тем, что отмирание русел и превращение их в старицы происходит не мгновенно. Старое русло после спрямления может, постепенно заполняясь наносами и заиливаясь, сохранять проточный режим в течение многих лет и десятилетий, оставаясь отмирающим рукавом основного русла. Окончательное отделение от основного русла происходит путем формирования своего рода «пробки» из наносов на заходе в старое русло (крупный побочень, его перекрывающий). Лишь после этого старое русло становится старицей со стоячей водой, в которой устанавливается характерный режим осадконакопления. Аллювий стадии полупроточного режима может быть принят за фациальную разновидность руслового аллювия времени активного функ-

ционирования русла. Поэтому подошва глинистой толщи заполнения палеорусла в одних случаях представляет дно русла на стадии активного развития, в других – уже в ходе его отмирания. Это вносит неоднозначность в определении морфометрических параметров палеорусла – глубины и площади живого сечения.

Определение абсолютного возраста базируется в основном на радиоуглеродном анализе органических остатков, заключенных в аллювии. За абсолютный возраст палеорусла обычно принимается время его отмирания, т.е. абсолютный возраст подошвы старичных осадков либо кровли русловых. Процесс отмирания русла может происходить в геологическом масштабе времени моментально, но может растянуться и на продолжительное время. Если это время не превышает первых столетий, то возможная неоднозначность трактовки компенсируется ошибкой ^{14}C -метода. Пример интерпретации радиоуглеродных дат и аллювиальных фаций при датировании палеорусел приведен на рис. 147. Если заиленные мелкозернистые пески трактовать как разновидность старичной фации – подфацию заиления русла на этапе его отмирания при слабо- или полупроточном режиме – то время отмирания палеорусла заключено между датами 8200 и 8300 л.н. Если же эти осадки трактуются как разновидность русловой фации, – между 7950 и 8200 л.н. Исключить неоднозначность трактовки можно путем уменьшения точности оценки возраста: между 7950 и 8300 л.н. Учитывая, что радиоуглеродная дата – не точка, а интервал, оценка возраста еще более расширяется. Кроме того, полученная оценка сделана в радиоуглеродной шкале времени, отличающейся от календарной. При калибровке дат (приведении к календарному времени) интервал каждой даты, а значит и общая оценка возраста палеорусла, расширяется еще более. Таким образом, оценка абсолютного возраста палеорусел в лучшем случае имеет точность первые столетия (300-500 лет).

Далеко не всегда удастся получить столь удачную серию дат, как на рис. 147. Чаще всего русловая фация бедна органическими остатками, и найти материал для датирования удастся лишь в старичной фации. Даты по старичной фации дают верхнюю («не позднее») оценку возраста палеорусла. Если датированный образец располагается высоко над контактом русловой и старичной фаций, оценка возраста может оказаться весьма грубой. При наличии нескольких дат в старичной толще можно оценить скорость накопления осадка и путем экстраполяции получить возраст отложений в подошве старичной фации. Эта оценка ближе к возрасту палеорусла, хотя процедура ее получения также таит потенциальные неточности вследствие возможных изменений темпов осадконакопления во времени. В любом случае надежные оценки возраста палеорусел подразумевают наличие достаточно представительной серии дат и контроль этих дат палинологическими данными, общестратиграфическими соображениями, оценками относительного возраста палеорусел при анализе морфологии поймы.

Среди всех морфологических элементов долины наибольшую информативность для реконструкции типа и параметров речного русла в прошлом представляет рельеф поймы. На низких террасах сохранность первичного руслового рельефа значительно хуже. Так, в центральных областях Русской равнины лишь наиболее низкие (высотой 7-10 м) поздневалдайские террасы еще несут морфологические следы палеорусел, на более высоких террасах, перекрытых лессовым покровом, следы руслового рельефа не читаются [Панин, Сидорчук и др., 2001]. Таким образом, возможности геоморфологических методов палеоруслового анализа ограничиваются в большинстве случаев последними 15-16 тыс. лет. Только для этого периода времени можно достаточно надежно проследить трансформацию речных русел. Палеорусла более древних эпох находятся в погребенном состоянии и не выражаются в современном рельефе. Для них приходится довольствоваться лишь весьма неполной геологической информацией, интерпретация которой не всегда однозначна.

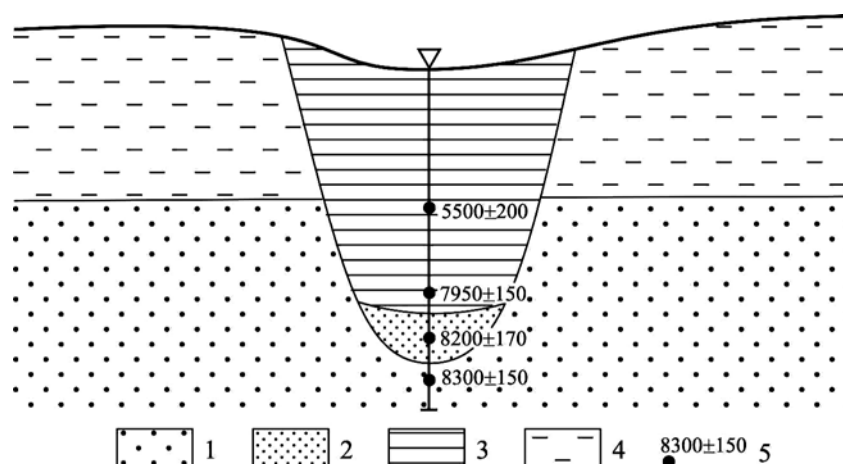


Рис. 147. Пример абсолютного датирования палеорусла: 1 – песок крупнозернистый (русовая фация аллювия); 2 – песок мелкозернистый, супесь (фациальная разновидность русловой или фация заиления времени отмирания палеорусла); 3 – суглинок тяжелый, глина (старичная фация); 4 – суглинок легкий (пойменная фация); 5 – радиационные даты.

Изучение плейстоценовых и более древних речных палеорусел интенсивно развивалось в рамках поисковой геологии, поскольку песчаные осадки, выполняющие погребенные речные долины, часто являются золотыми или платиносодержащими, выступают в качестве ловушек нефти и газа. Примером являются нефтяные месторождения штатов Техас, Канзас и Оклахома, относящиеся к «шнурковому» типу залежей, которые прослеживаются в виде изгибающихся полос на десятки километров при ширине от

нескольких десятков метров до километра [Успенская, 1950]. Такого рода месторождения имеются и на востоке Русской равнины (рис. 148). Общее строение аккумулятивных аллювиальных толщ позволяет приблизительно судить о типе речного русла, существовавшего в период накопления этих толщ. Для толщ, созданных меандрирующим руслом, характерно наличие многочисленных мелких линз глинистого материала – осадков бывших стариц. Изучение характера слоистости, ориентировки направлений падения косых слоев и длинных осей галек, анализ других седиментологических признаков позволяет отличить дельтовые осадки от русловых, определить общее направления течения палеопотоков, оценить скорости течения [Ботвинкина, 1962; Рухин, 1969; Рейнек, Сингх, 1981].

При решении поисковых задач, например, при планировании сети разведочных скважин, необходимо иметь представление о конфигурации палеодолины и палеорусла, их морфометрических параметрах (ширине русла, ширине пояса меандрирования). Геологические и геофизические методы в большинстве случаев дают картину лишь в одном измерении – поперечный профиль через палеорусло. Часто эти сведения ограничиваются неупорядоченными скважинами. Данные по единичной скважине в лучшем случае дают возможность определения лишь одного параметра палеорусла – глубины. По поперечному геологическому профилю можно оценить глубину, ширину, форму и площадь живого сечения палеорусла. Эти параметры позволяют лишь косвенно судить о морфодинамическом типе русла. При наличии серии профилей, пересекающих палеорусло по его длине, реконструкция типа русла становится более надежной, появляется возможность оценить извилистость русла, ширину пояса меандрирования, реконструировать положение русла в разные геологические эпохи (рис. 149). Наиболее детальную информацию для палеорусловых реконструкций можно получить из данных разведочного бурения на участках аллювиальных россыпных месторождений. Обогащенные полезным компонентом струи аллювия часто приурочены к эрозионным бороздам на поверхности коренного ложа – врезанным палеоруслам разных эрозионных циклов. Такие врезы прослеживаются наиболее тщательно путем сгущения буровых профилей и скважин до 1-2 м по ширине долин. Это позволяет детально реконструировать не только положение русла, но и его морфодинамический тип и элементы мезорельефа – древние рукава, острова, участки плесов и перекатов [Виноградова, 2001].

В зависимости от полноты геологической информации большее или меньшее количество параметров палеорусел остаются неизвестным. Их приходится оценивать из морфометрических соотношений, установленных путем измерений для современных меандрирующих русел. Например, в обнажениях террас по текстурам аллювия иногда можно восстановить поперечное сечение побочней. Тогда определение ширины палеорусла производится по так называемому «правилу двух третей» [Allen, 1966], которое основывается на допущении, что побочень в вершине излучины простирается

поперек русла примерно на две трети его общей ширины. Позднее, на основании более обширного натурного материала, коэффициент $2/3$ был заменен интервалом $0,70-0,95$ [Allen, 1970]. Е. Коттер [Cotter, 1971] пришел к несколько иному интервалу – $0,60-0,80$, который близок к «правилу двух третей». Учитывая высокую изменчивость морфологии грядовых форм, а также закономерное изменение указанного соотношения по длине излучины (положение разреза относительно вершины палеоизлучины неизвестно), ясно, что такого рода оценки ширины русла весьма приблизительны. Однако они могут быть единственной информацией, имеющейся у исследователя.

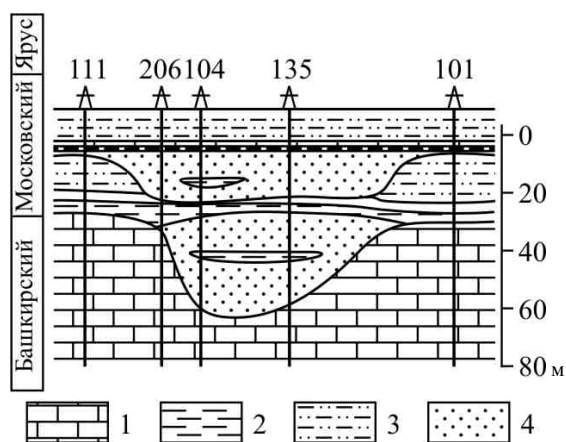


Рис. 148. Погребенные речные долины на севере Самарской области, заполненные нефтеносными песчаниками [Грачевский, Берлин, 1968]: 1 – карбонатные породы; 2 – глины; 3 – алевролиты; 4 – песчаники.

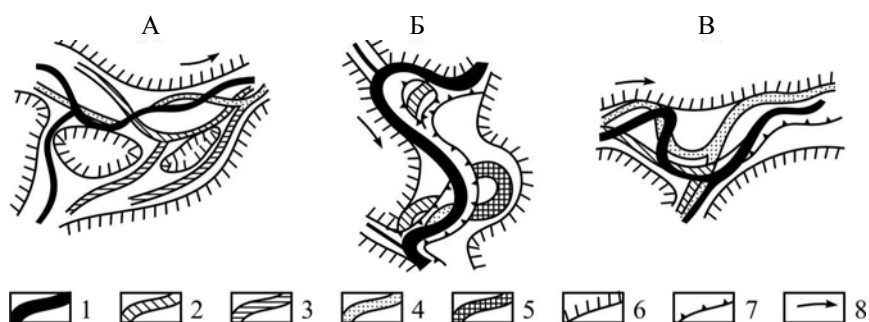


Рис. 149. Эволюция меандрирующих русел на реках Патомского нагорья в плейстоцене [по О.В. Виноградовой, Л.В. Маорс, 1998]: А – свободные излучины; Б – врезанные излучины; В – вынужденные излучины. Русла разного возраста: 1 – современное; 2 – позднелейстоценовое; 3 – среднелейстоценовое; 4 – раннелейстоценовое; 5 – голоценовое. Морфологические элементы долин: 6 – борта долин; 7 – бровки эрозионных уровней и русловых форм; 8 – направление течения.

Другой пример – данные бурения, допускающие оценку глубины палеорусел по мощности слоев с градационной слоистостью: мощность слоя с закономерным уменьшением крупности осадка от подошвы к кровле принимается за глубину палеорусла. Предполагая, что палеорусло было меандрирующим с коэффициентом извилистости не менее 1,7, М. Лидер [Leeder, 1973] предлагает оценивать ширину палеорусла по эмпирической зависимости: $B_p = 6,8 H_{\max}^{1,54}$, где $H_{\max}$ – максимальная глубина русла в данном поперечном сечении. Г. Уильямс [Williams, 1986, 1988] сделал критический обзор морфометрических зависимостей, используемых в подобных реконструкциях. Ряд таких зависимостей, полученных путем изучения морфометрии современных меандрирующих русел, приведен в табл. 37.

Таблица 37. Эмпирические зависимости для оценки морфометрических параметров извилистых русел [Williams, 1986, 1988]

Зависимость ¹⁾	Количество данных	Область применения	Стандартная ошибка (в логарифмических единицах)	R^2
$W_b = 0,17L_m^{0,89}$	191	$8 \leq L_m \leq 23,200 \text{ m}$	0,194	0,93
$W_b = 0,23L_a^{0,89}$	102	$5 \leq L_a \leq 13,300 \text{ m}$	0,189	0,94
$W_b = 0,27B^{0,89}$	153	$3 \leq B \leq 13,700 \text{ m}$	0,211	0,92
$W_b = 0,71R_c^{0,89}$	79	$2,6 \leq R_c \leq 3,600 \text{ m}$	0,170	0,94
$A_b = 0,0054L_m^{1,53}$	66	$10 \leq L_m \leq 23,200 \text{ m}$	0,300	0,92
$A_b = 0,0085L_a^{1,53}$	41	$6 \leq L_a \leq 13,300 \text{ m}$	0,382	0,91
$A_b = 0,012B^{1,53}$	63	$5 \leq B \leq 11,600 \text{ m}$	0,287	0,93
$A_b = 0,067R_c^{1,53}$	28	$2 \leq R_c \leq 3,600 \text{ m}$	0,379	0,93
$D_b = 0,12W_b^{0,69}$	67	$1,5 \leq W_b \leq 4,000 \text{ m}$	0,287	0,66
$D_b = 0,09 W_b^{0,59} Si^{1,46}$	66	$1,5 \leq W_b \leq 4,000 \text{ m}$ $1,20 \leq Si \leq 2,60$	0,239	0,73
$D_b = 0,027L_m^{0,66}$	66	$10 \leq L_m \leq 23,200 \text{ m}$	0,244	0,73
$D_b = 0,036L_a^{0,66}$	41	$7 \leq L_a \leq 13,300 \text{ m}$	0,238	0,81
$D_b = 0,037B^{0,66}$	63	$5 \leq B \leq 11,600 \text{ m}$	0,210	0,81
$D_b = 0,085r^{0,66}$	28	$2,6 \leq r \leq 3,600 \text{ m}$	0,285	0,81

Обозначения (в авторском варианте): W_b – ширина русла в бровках поймы; A_b – площадь живого сечения в бровках поймы; D_b – средняя глубина при уровнях, соответствующих бровкам поймы; L_m – длина волны (удвоенный шаг) излучин; L_a – стрела прогиба излучин; B – ширина пояса меандрирования; r – радиус кривизны излучин; Si – коэффициент извилистости русла; R – коэффициент корреляции

8.2. Трансформация меандрирующих русел на рубеже позднеледниковья и голоцена



В рельефе пойм, зафиксировавшем различные этапы эволюции речных русел, выделяются гигантские (по отношению к современному руслу) старицы – реликтовые макроизлучины, или "большие меандры", по западноевропейской терминологии, уже упоминавшиеся выше (см. раздел 5.4). Присутствие таких форм на дне речной долины означает, что некогда водоносность реки значительно превышала современную. Оказалось, что такие следы повышенного речного стока отнюдь не единичны. Г. Дьюри (Dury, 1954, 1964 и др.) установил, что на равнинах умеренного пояса макроизлучины имеют повсеместное распространение в речных долинах. При этом он практически не использовал данные по территории России. Между тем, в те же годы и, по-видимому, независимо от работ Г. Дьюри, гигантские палеоизлучины исследованы и интерпретированы с палеогидрологических позиций И.А. Волковым (1962, 1963) на юге Западной Сибири.

Широко распространены старицы-макроизлучины и в долинах рек Русской равнины [Панин и др., 1992; Сидорчук и др., 2000]. Они не встречаются только на территориях, перекрывавшихся последним оледенением и в современной зоне тундры. Южнее макроизлучины обнаруживаются в большинстве речных долин. На севере региона макроизлучины палеорусел имеют врезанный характер и расположены на уровне низких речных террас. В центральных и южных областях гигантские старицы распространены на поймах рек и во время половодий затапливаются либо целиком, либо частично – по понижению палеорусл, в то время как шпора макроизлучины представляет более высокий, незатапливаемый элемент рельефа. Южная граница массового распространения макроизлучин проходит в низовьях Дона, близко соответствуя границе поздневалдайского ареала многолетней мерзлоты [Panin, Sidorchuk et al., 1999; Сидорчук, Панин и др., 2000]. В последнее время при изучении космических снимков высокого разрешения обнаружены макроизлучины относительно небольших размеров в долинах рек Северного Кавказа, т.е. в поздневалдайской области глубокого сезонного промерзания (согласно Величко и др., 1982). На космическом снимке участка долины р. Калауса (рис. 150) у правого тылового шва поймы прослеживается палеорусл с двумя порядками изгибов. Изгибы пояса меандрирования (выделены пунктиром), имеющие шаг 400-600 м, представляют реликтовые макроизлучины – излучины Пра-Калауса, отличавшегося большой водоносностью. Имеются случаи спрямления этих макроизлучин (выделены точечным пунктиром). После уменьшения водного стока истощившийся поток стал образовывать более мелкие меандры, которые вписались в крупные излучины (макроизлучины) предшествующего этапа. Позднее, уже определенно в голоцене, в результате мощного паводка русло на значительном протяжении было брошено, а новое русло разработано у левого тылового шва поймы. Серповидная старица, отшнурованная от основного русла

еще на этапе высокой водоносности, позволяет судить о ширине русла, формировавшего макроизлучины. Она составляла 70-100 м, т.е. в 2-3 раза превышала ширину современного русла. Следует учесть, что современный русловый режим и параметры водного потока (снимок сделан в начале 1960-х гг) в значительной степени трансформированы переброской стока. С 1957 г в Калаус стала поступать кубанская вода по Лево́й ветви Правоегорлыкского канала, с 1967 г – по Калаусскому каналу. К 1990-м гг годовой сток увеличился на 54% по сравнению с естественным режимом, но на максимальные расходы переброска стока не повлияла [Лурье и др., 2001].

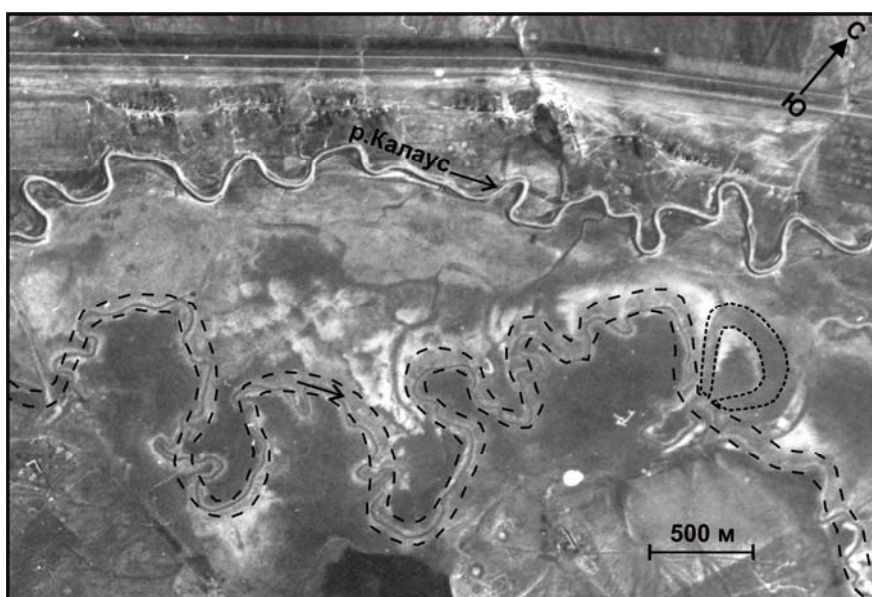


Рис.150. Макроизлучины в долине р. Калаус в районе Ипатово (космический снимок). *Объяснения в тексте.*

Наиболее ярко старицы-макроизлучины выражены в лесостепной и на севере степной зоны Русской равнины. Огромная, несоразмерная современным потокам ширина пойм южнорусских рек привела В.В. Докучаева [1878] к разработке озерно-ледниковой гипотезы для объяснения этого факта. Формирование русел путем объединения разрозненных отрезков при спуске ледниково-подпрудных и термокарстовых озер действительно типично для районов, прилегавших к краю поздневалдайского ледникового щита. Это подтверждается, например, детальными исследованиями ряда речных долин на территории Белоруссии [Kalicki, 1995; Kalicki, San'ko, 1997]. Однако в центральной и южной частях Русской равнины огромная ширина пойм обязана присутствию гигантских поздневалдайских стариц. Примером могут служить долины р. Сейма (левый приток Десны) в районе г. Льгова и притока Сейма – р. Свапы [Панин, Сидорчук и др., 2001]. На

космических снимках в рельефе поймы и низкой террасе читаются гривисто-ложбинные системы, отмечающие последовательное смещение и искривление гигантских палеорусел (рис. 151). Излучины достигали высокой степени развитости – петлеобразной, омеговидной, пальцевидной формы. Спрявление излучин происходило путем встречного размыва берегов на их шейке.

Случаев спрямления путем размыва поверхности поймы не отмечается. По-видимому, скованная вечной мерзлотой пойма обладала высокой противозрозионной устойчивостью. На месте спрямленных излучин начинали искривляться новые. На поверхности поймы по ландшафтно-геоморфологическим признакам читается 2-3 генерации макроизлучин близкого размера. Если принять темпы размыва берегов в вершине излучины 1-2 м/год, что типично для крупных рек в условиях вечной мерзлоты [Панин, Сидорчук и др., 2001], то для формирования излучины со стрелой прогиба 1,5-3 км требуется 1-3 тысячи лет. Следовательно, этап активного развития макроизлучин продолжался от 2-3 до 5-6 тысяч лет.

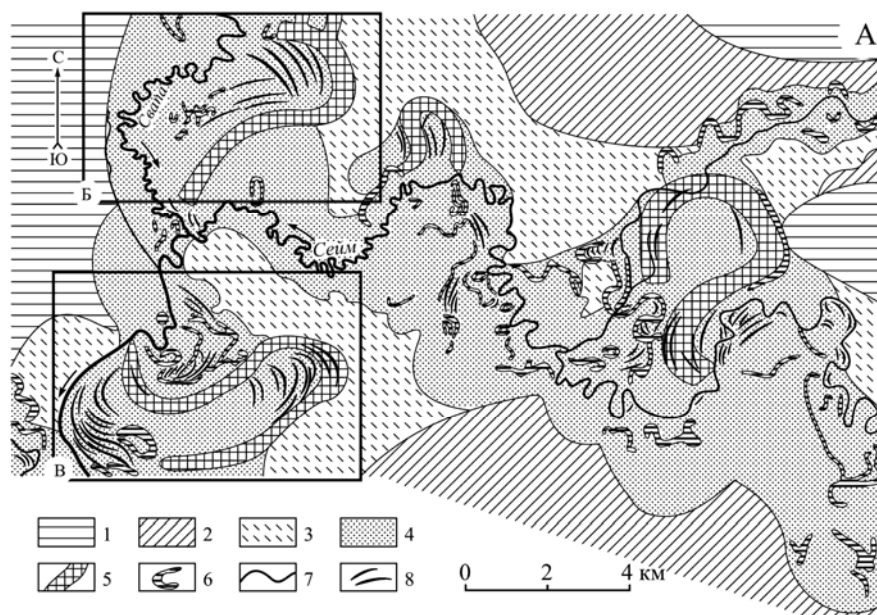
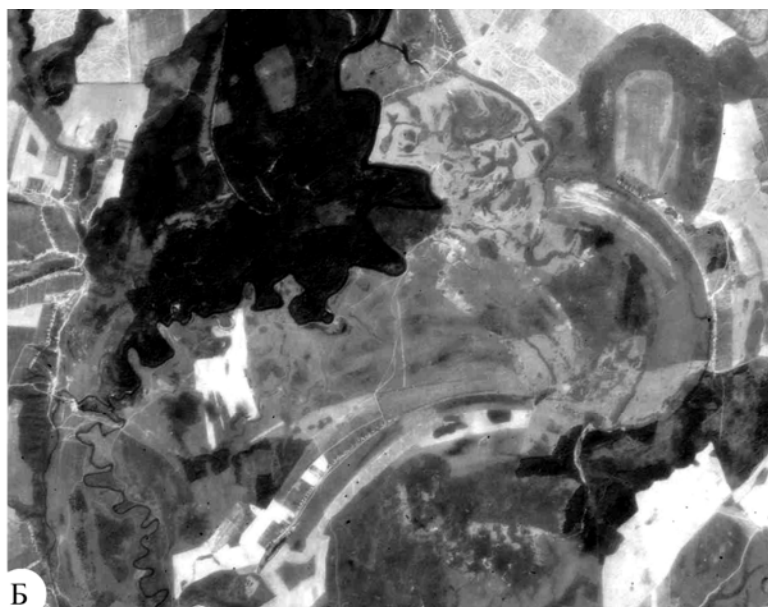


Рис. 151. Макроизлучины в долинах рек Сейма и Свапы (бассейн Десны). (Продолжение рисунка на с. 290)
А – геоморфологическая схема [Панин, Сидорчук, и др., 2001]: 1 – междуречья и коренные борта долины; 2 – 12-25 – метровые террасы, перекрытые лессами; 3 – 7-10 – метровая песчаная терраса; 4 – пойма; 5 – большие палеоизлучины позднего валдая; 6 – палеоизлучины конца позднеледниковья – голоцена; 7 – современное русло; 8 – пойменные гривы. *Б, В* – фрагменты космических снимков.



Продолжение рис. 151.

По данным бурения, большие палеоруслы заполнены глинами с линзами заиленных песков – типичным аллювием старичной фации, перекрывающим мелкозернистые русловые пески (рис. 152). Согласно радиоуглеродным датировкам по органическим включениям в аллювии, накопление старичных глин началось около 14 тысяч лет назад. К этому времени следует, по-видимому, относить отмирание изученных палеорусел. Образовавшиеся старицы постепенно заиливаются, и озерный режим сменяется заболачиванием (начало торфонакопления): в палеорусле Свапы – в начале голоцена (не позднее 9 тыс. л. н.), в палеорусле Сейма – в начале его второй половины (4 тыс. л. н.).

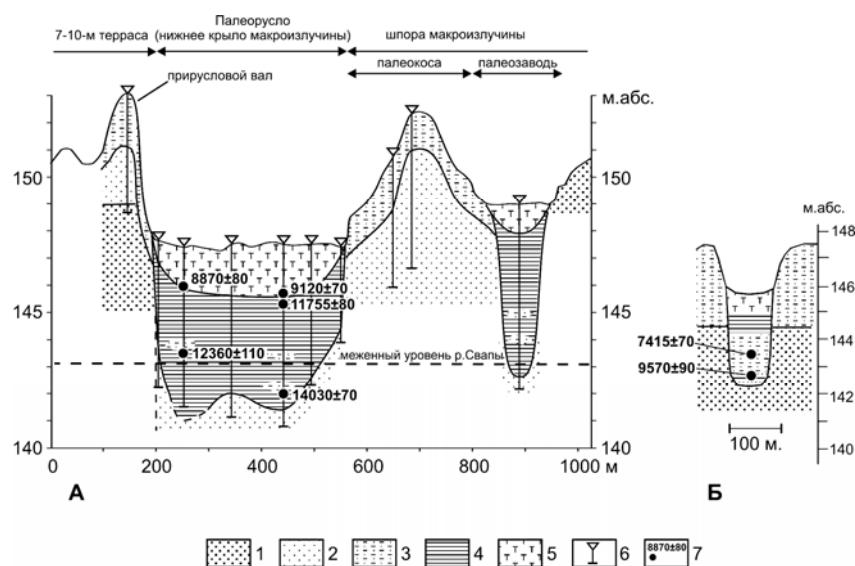


Рис.152. Геологический профиль через палеорусл макроизлучины (А) и голоценовую старицу (Б) р.Свапы [Панин, Сидорчук и др., 2001, с изменениями].

1 – крупный песок, 2 – мелкий и заиленный песок; 3 – супесь, алевроит, легкий суглинок; 4 – тяжелый суглинок, глина; 5 – торф; 6 – буровые скважины; 7 – C^{14} – даты.

По подошве старичной фации реконструируется живое сечение палеорусла. Глубина его относительно поверхности позднелвалдайской поймы достигала 10-12 м, ширина – 350 м, общая форма поперечного профиля в вершинах макроизлучин излучин – треугольная, на древних перекатах – ящикообразная, типичная для русел крупных рек (рис. 152). Оценки максимальных расходов воды, сделанные А.Ю. Сидорчуком с помощью формулы Шези по площади поперечных сечений, крупности донных отложений в палеоруслах и уклонам поверхности поймы (приняты за гидравлический уклон палеопотока), составили для Сейма 14500 м³/с, для Свапы 6200 м³/с

[Panin, Sidorchuk *et al.*, 2000]. Это близко к максимальному расходу современного Днепра у Киева (площадь водосбора 328000 км²) и у Речицы (58200 км²) соответственно. Для сравнения: современные максимальные измеренные расходы воды на Сейме у Льгова составляют 2400 м³/с, на Свапы в приустьевой части – 1700 м³/с, площади бассейнов – 10800 и 6310 км².

Другой путь получения количественных характеристик палеостока – использование гидролого-морфологических зависимостей. В данном случае можно применить эмпирические связи между шириной русла B , шагом L или радиусом кривизны r излучин с характерными расходами воды. Взятые по всему спектру размеров рек, такие связи имеют, как известно [Маккавеев, 1955; Leopold *et al.*, 1964], квадратичный характер: $L \sim Q^{0.5}$, или $Q \sim L^2$. При небольших различиях в размерах современных и древних излучин результаты, получаемые по таким зависимостям, не вызывают подозрений. Так, увеличение среднего шага излучин Дона на 20% с начала XVIII века интерпретируется как следствие роста руслоформирующего расхода в $(1,2)^2 = 1,44$ раза, что вполне правдоподобно объясняется увеличением неравномерности стока в связи со сведением естественной растительности на территории речного бассейна [Маккавеев, Хмелева, 1965; Экспериментальная ..., 1969]. На ряде притоков Оби старицы на пойме имеют средний шаг в 3 раза меньше по сравнению с излучинами современного русла. Оценка роста руслоформирующих расходов в этом случае – в 9 раз – уже кажется сомнительной и требует специальных пояснений [Экспериментальная ..., 1969]. В бассейне Вислы формировавшиеся в позднеледниковье "большие меандры" (макроизлучины) в 3-7 раз крупнее по сравнению с голоценовыми [Starkel, 1995]. Близкие к этому относительные размеры макроизлучин на Западной Березине [Kalicki, 1995]. В степных и лесостепных районах Русской равнины различия между размерами макроизлучин и излучин современного русла достигают 10-15 раз. Применение квадратичных зависимостей приводит к заключению, что в относительно недавнем геологическом прошлом руслоформирующие расходы рек умеренного пояса были больше современных в 100-200 раз [Dugu, 1964, 1965; Панин и др., 1992]. Этот результат абсолютно неправдоподобен в свете современных знаний о палеогеографии конца четвертичного периода.

Учитывая новые данные о различии соответствующих зависимостей для малых, средних и крупных рек [Завадский, Чалов, 1997, 2000; Завадский и др., 2002], в том числе изложенные выше (см. раздел 3.4), для палеореконов следует использовать связи, полученные по рекам близкого размерного класса. Средний шаг макроизлучин Сейма и Свапы более 1 км. Чтобы получить адекватную зависимость, отобраны крупные меандрирующие реки Русской равнины со средним шагом излучин более 500 м, обеспеченные данными гидрометрических наблюдений. По 50 участков таких рек получена зависимость для среднемаксимального расхода воды $Q_m = 2,8 L^{0.92}$. Связь почти линейная, что согласуется с вышеприведенными данными (раздел 3.4). Подставляя значения среднего шага макроизлу-

чин Сейма и Свапы (2400 и 1100 м), получаем оценки среднемаксимальных палеорасходов – 3600 и 1800 м³/с при современных среднемаксимальных расходах 745 и 480 м³/с, соответственно [Panin, Sidorchuk *et al.*, 2000]. Среднемаксимальные и максимальные палеорасходы при формировании макроизлучин различаются между собой в 3,5-4 раза. Такое соотношение представляется достоверным, т.к. среднемаксимальные и максимальные современные расходы, получаемые из гидрометрических данных, имеют близкие различия – в 3,2 раза на Сейме и 3,5 раз на Свапе. От современных среднемаксимальные и максимальные палеорасходы отличаются в 4-6 раз.

Столь высокие расходы воды, приводившие к формированию аномально больших, по сравнению с современными, излучин русла, существовали на Сейме и его притоках в период между 16-17 тыс. л. н. и началом голоцена [Панин, Сидорчук и др., 2001]. Старицы, отшнурованные уже в начале голоцена (9,5-9,8 тыс. л. н.) по своим параметрам не отличаются от излучин современного русла: шаг 70-300 м на Свапе и 100-500 м на Сейме, ширина русла в бровках поймы – 15-60 м и 20-100 м соответственно. По сравнению со временем формирования макроизлучин, произошло уменьшение параметров русел в 5-10 раз. При этом между макроизлучинами и обычными старицами, параметры которых соответствуют размерам современного русла, нет форм русла промежуточного размера. Из этого следует, что уменьшение стока было резким и быстрым. После снижения расходов крупные древние русла распались на цепочки проточных озер (бывшие плесовые ложины), которые соединялись между собой русловыми участками (на бывших перекатах). Процесс напоминает формирование единых речных русел на месте проточных ледниково-подпрудных водоемов, постепенно спускавшихся по мере углубления соединявших их отрезков рек [Докучаев, 1878; Kalicki, San'ko, 1997]. По мере заполнения наносами полупроточные акватории замещались новыми участками русла и достаточно быстро исчезли. Однако остались их следы в очертаниях русла: пояс голоценового меандрирования изгибается, повторяя изгибы позднеледникового русла (рис. 151А). Те макроизлучины (поздневалдайские излучины), которые к моменту падения стока были уже отшнурованы и существовали в виде стариц, заполнялись старичными глинами. Некоторые из них существовали в виде озер до середины голоцена. Плоские пониженные участки притеррасной поймы чаще всего представляют фрагменты таких заполненных палеорусел и аллювиальных комплексов в их шпорах.

Формирование макроизлучин в позднеледниковье и резкое изменение руслового режима – переход к меандрированию современного типа – на рубеже голоцена представляет типичный ход развития равнинных рек центра и юга Русской равнины [Сидорчук и др., 2000; Сидорчук, Панин и др., 2000; Sidorchuk, Panin *et al.*, 2001]. Хронология развития макроизлучин близка на разных реках: на Протве (бассейн средней Оки) отмирание исследованной врезанной макроизлучины произошло 13 тыс. л. н. [Panin, 2000], на Хопре (бассейн среднего Дона) – 11-11,5 тыс. л. н. [Панин, Сидорчук и

др., 2000]. Аналогичную картину формирования русел в позднеледниковье рисует для юга Западной Сибири И.А. Волков [1994]. Он выделяет в долинах рек две генерации больших палеоизлучин, соответствовавших этапам повышенного стока в 12-14 тыс. л.н. и в позднем дриасе (10-11 тыс. л.н.). Так, в долине р. Бурлы (рис. 153) в эти периоды формировались сегментные и петлеобразные излучины, причем в первый период обильного стока река имела ширину 70-100 м, во второй – 100-150 м при современной ширине всего 5-10 м.

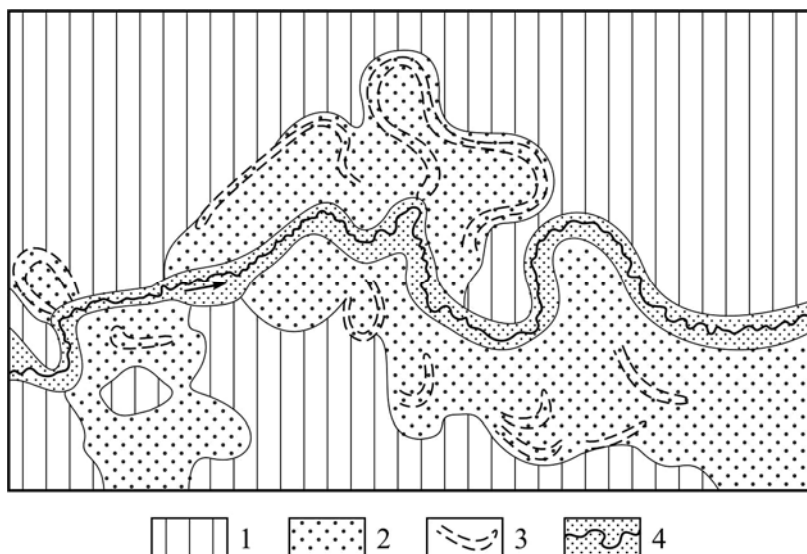


Рис. 153. Поздневалдайские макроизлучины в долине р. Бурлы (степной Алтай) [Волков, 1994]: 1 – междуречная равнина; 2 – поздневалдайская терраса; 3 – палеорусло; 4 – современное русло и голоценовая пойма.

Реки Западной и Центральной Европы после максимума оледенения (18-20 тыс. л. н.) формировали преимущественно разветвленные русла. В начале позднеледниковья на многих реках произошла трансформация русел в меандрирующие, и на бёллинг-аллерёд (13-11 тыс. л. н.) приходится массовое развитие макроизлучин – "больших меандров" [Vandenberghe, 1995]. Водоносность рек в этот период была значительно выше современной. Например, по оценке Д. Ванденберге [Vandenberghe, 1987], руслонаполняющие расходы воды (в бровках поймы) р. Марк (Нидерланды) при формировании макроизлучин превышали современные в 10-16 раз. Похолодание позднего дриаса (10,2-11,0 тыс. л. н.) привело к увеличению стока наносов. Результатом этого на некоторых реках была трансформация меандрирующего русла в разветвленное (рис. 154), хотя многие реки продолжали меандрировать, формируя макроизлучины вплоть до начала голоцена [Starkel, 1995].

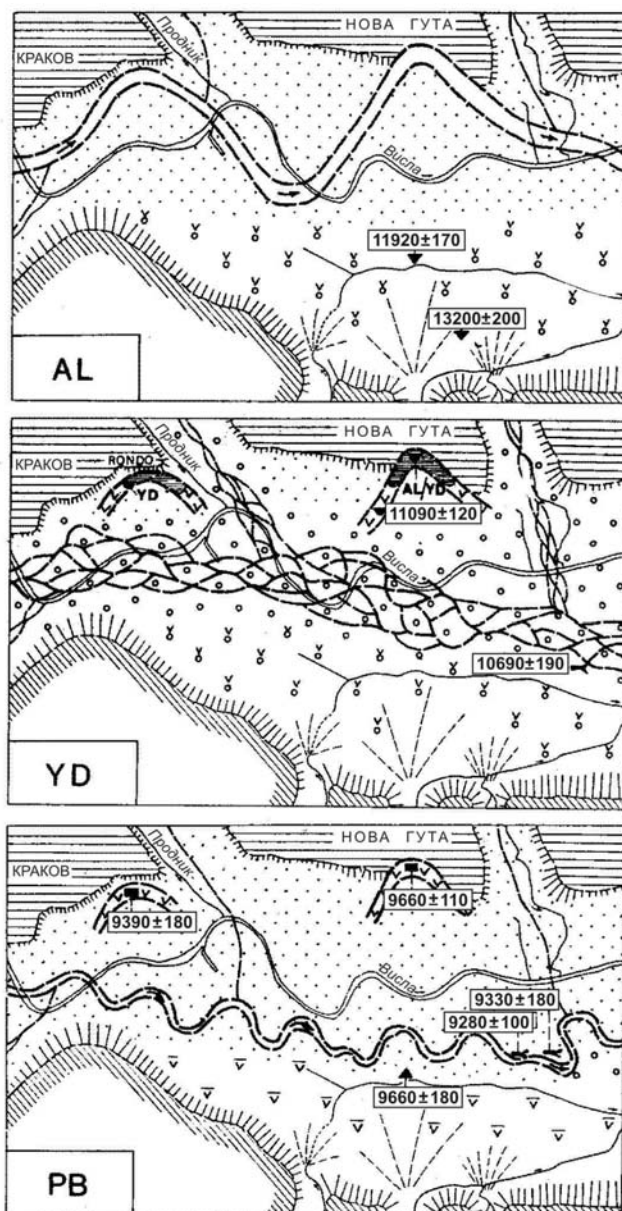


Рис.154. Трансформация русла верхней Вислы на переходе от позднеледникового к голоцену [Kalicki, Zernicka, 1995].
 AL – аллерёд (11-12 тыс.л.н.); YD – поздний дриас (10,2-11 тыс.л.н.); PB – пребореал (9,5-10,2 тыс.л.н.).

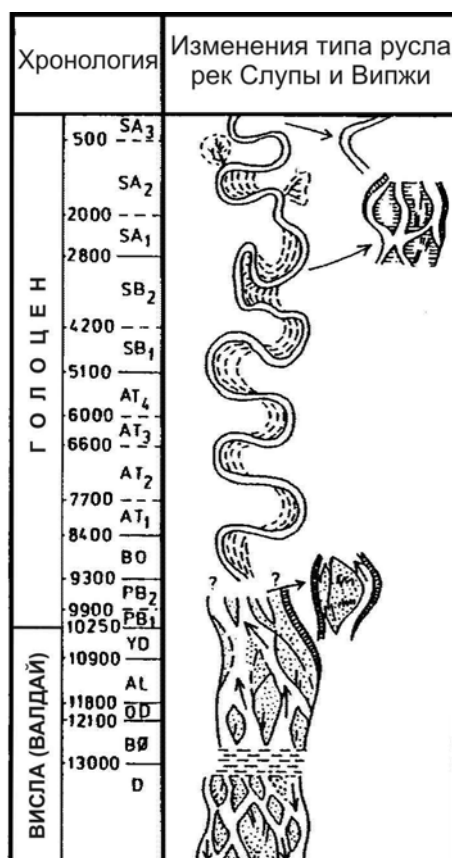


Рис.155. Изменения руслового режима рек Северной Польши в позднеледниковье и голоцене [Florek, 1996].

позднеледниковье расходы воды в этих реках были столь велики, что потоки не могли меандрировать, и русла были разветвленными.

Палеорусловый анализ помогает понять некоторые особенности климата позднеледниковья, дополняющие представления, полученные другими методами. По мнению Д. Ванденберге [Vandenberghe, 1995], столь высокие расходы воды, реконструируемые для позднеледниковья, говорят в пользу двух палеоклиматических выводов. Во-первых, это высокое годовое количество осадков при небольшом испарении, во-вторых, – периодические экстремально высокие осадки в форме интенсивных сезонных ливней или мощного снежного покрова. В любом случае, хорошо выраженная сезон-

Есть и примеры рек, которые разветвлялись в течение всей второй половины валдайской ледниковой эпохи. Таковы, например, реки балтийского побережья Польши [Florek, 1996]: после освобождения этой территории от ледникового покрова около 15 тыс. л.н. сток некоторое время направлялся от края ледника в южном направлении. При дальнейшей деградации ледника около 13 тыс. л.н. направление стока изменилось на южное. Реки имели разветвленные русла. С началом голоцена русло трансформировалось в меандрирующее, и в течение голоцена параметры излучин существенно не менялись (рис. 155).

Висла в среднем и нижнем течении имела разветвленное русло в течение всего позднеледниковья. С началом голоцена в среднем течении река стала образовывать излучины современных размеров (в европейской литературе – "малые меандры"), а в нижнем течении русло преобразовалось в относительно прямолинейное с пойменной многорукавностью [Starkel, 1995]. Нет следов макроизлучин и на поймах крупных рек Русской равнины – Волги, Оки, Дона. Очевидно, в

ность (континентальность) климата, устанавливаемая по геоморфологическим признакам, согласуется с палинологическими данными о холодных зимах и теплых летних сезонах этого времени [Vandenberghe, 1995].

Менее ясна ситуация с количеством осадков. Согласно палеоботаническим данным, в аллереде (11400±200 л.н.) годовое количество осадков в северной половине Русской равнины было меньше современного на 0-100 мм, в бассейне среднего Днепра, Дона, средней Волги – близко к современному, а на юго-востоке Русской равнины, возможно, несколько выше современного [Климанов, 1994]. В то же время, оценка годового стока рек по параметрам палеомеандров показывает, что в перигляциальных условиях позднеледниковья речной сток в зоне тундры был близок к современному, в таежной зоне превышал современный в 2-3 раза, а в степной и лесостепной – в 5-10 раз [Sidorchuk et al., 2003]. Если в северных районах "прибавка" стока может быть объяснена за счет увеличения коэффициентов стока в условиях вечной мерзлоты, то в центральных и южных даже приведения коэффициентов стока к единице не хватает для получения столь высоких расходов воды при тех количествах атмосферных осадков, которые реконструируются по палинологическим данным (Сидорчук и др., 2000). Из этого следует, что в центральных и южных районах Русской равнины в позднеледниковье выпадало значительно больше осадков, чем в настоящее время. К аналогичному выводу приводит палеогидрологический анализ палеоизлучин р. Просны в центральной Польше [Rotnicki, 1991]. В то же время, высокие оценки количества осадков в позднеледниковье противоречат криоксerotическому облику перигляциальной флоры, получаемому по палинологическим данным. Как часто бывает в таких ситуациях, дальнейшие исследования могут привести к принципиально новым представлениям, в данном случае – о ландшафтно-климатических условиях позднеледниковья либо о механизмах руслоформирования в перигляциальных обстановках, не имеющих современных аналогов.

8.3. Основные тенденции развития меандрирующих русел в голоцене



Ландшафтно-климатические изменения в течение голоцена (последние 10 тыс. лет) были не столь масштабными, как на переходе от позднеледниковья к голоцену, но все же оказывали ощутимое влияние на русловый режим рек. Меандрирующие в настоящее время реки по особенностям трансформации русел в голоцене можно разделить на две группы: 1) реки, испытывавшие смену типа русла от меандрирующего к разветвленному и обратно; 2) реки, сохранявшие извилистый тип русла на протяжении всего голоцена; при этом средние размеры и другие параметры излучин могли существенно изменяться.

Примером рек первой группы является р. Протва, – левый приток Оки в среднем течении. Современная форма русла Протвы представляет че-

редование относительно прямолинейных участков с редкими, преимущественно одиночными разветвлениями, и слабоизвилистых участков с пологими излучинами, находящимися на начальной стадии развития; лишь в одном месте имеется серия из двух хорошо развитых сегментных излучин (рис. 156). В процессах руслоформирования Протвы определяющая роль принадлежит весеннему половодью. Она еще более усиливается ввиду значительной крупности руслообразующих наносов (мелкий щебень и галька с песчано-гравийным заполнителем), транспорт которого происходит лишь на пике половодья. В остальную часть года русло практически не деформируется.

Палеорусловой анализ показал, что морфология русла Протвы на протяжении голоцена существенно менялась [Панин, Каревская, 2000; Панин, 2001]. На наиболее древних участках поймы по аэрофотоснимкам и детальной гипсометрической карте удается проследить контуры ложбин, местами прямолинейных, но местами образующих хорошо выраженные излучины. Эти палеорусла, по ширине близкие к современным, формировались в бореальном периоде голоцена (8-9 тыс. л.н.). Положение кровли русловой фации аллювия показывает, что в это время река врезалась при водоносности, близкой к современной. В первой половине атлантического периода (6,5-8 тыс. л.н.) сформировались участки поймы с пересеченным рельефом (перепады высот до 2-3 м), в котором отчетливо видны старичные ложбины, образующие разветвленную сеть; местами прослеживаются четкие контуры палеоостровов. Это свидетельствует о трансформации меандрирующего русла в разветвленное в начале бореального времени. Судя по параметрам стариц, водоносность реки достигла наибольших за голоцен значений. В это же время отмечается максимальная за голоцен величина врезания.

Начиная с 6 тыс. л.н. сток воды сильно уменьшился, в русле началась направленная аккумуляция. Тип русла остался разветвленным, однако сильно уменьшились как ширина пояса разветвления, так и размеры рукавов и островов. В период около 0,8-1,0 тыс. л.н. сток снова увеличился, и в русле началось направленное врезание, общая величина которого достигла к настоящему времени около 2 м. В ходе этого врезания в русле проявились тенденции к меандрированию, местами излучины получили полноценное развитие. Таким образом, развитие меандрирования наблюдалось в галечном русле Протвы в течение двух периодов голоцена, причем на протяжении обоих река находилась в состоянии врезания (рис. 157). В периоды стабильного состояния или аккумуляции как при высоком, так и при низком стоке река разветвлялась.

Близкую ситуацию описывает на реках Юго-Западного Забайкалья И.В. Антощенко-Оленев [1982]. Река Кижинга (бассейн р. Уды) с галечным руслом на протяжении голоцена дважды трансформировалась из разветвленной в меандрирующую и обратно. В начале голоцена река формировала свободные излучины со средним радиусом кривизны, почти в 2 раза большим современного, что говорит о более высоких руслоформирующих расходах воды (рис. 158а).

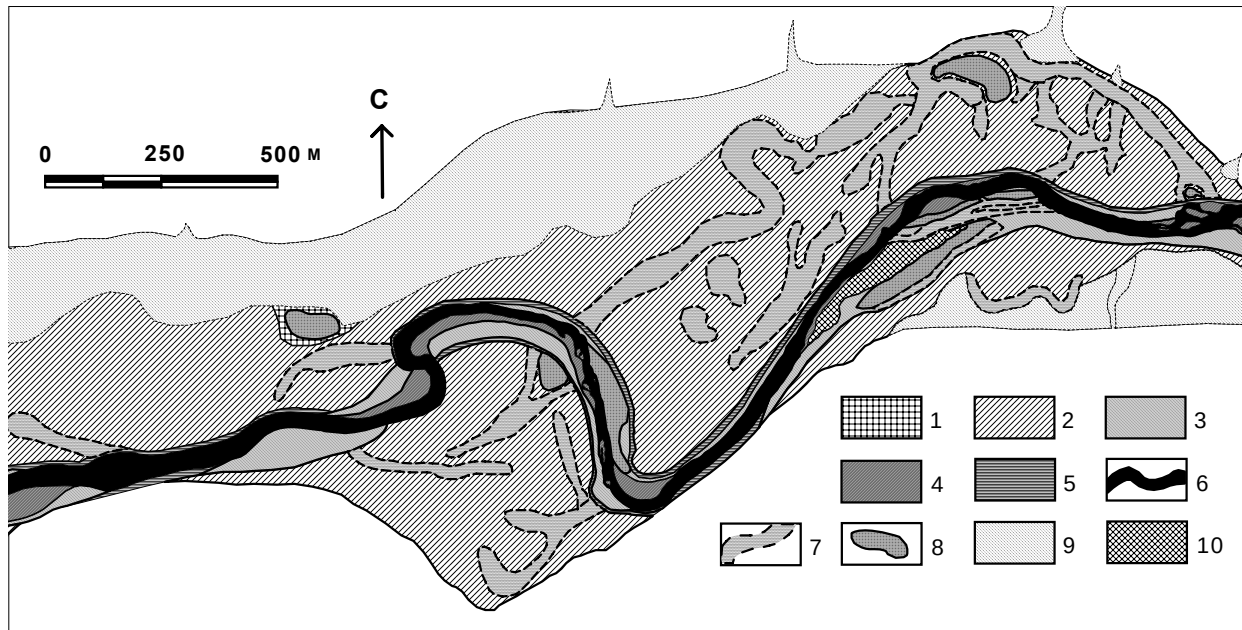


Рис. 156. Геоморфологическая схема поймы р. Протвы в районе с. Сатино: 1 – поздневалдайская терраса; 2 – 4 – разновозрастные участки поймы (время формирования: 2 – 10-6 тыс. л.н.; 3 – 6-1 тыс. л.н.; 4 – от 1 тыс. л.н. до наст. вр.); 5 – бичевники (эрозионная пойма) и пойменные уступы; 6 – русло р. Протвы; 7 – пойменные ложбины (палеорусла); 8 – древние побочни и осередки; 9 – склоновые шлейфы и конуса выноса оврагов, перекрывающие поздневалдайскую террасу; 10 – техногенный рельеф (песчано-гравийный карьер).

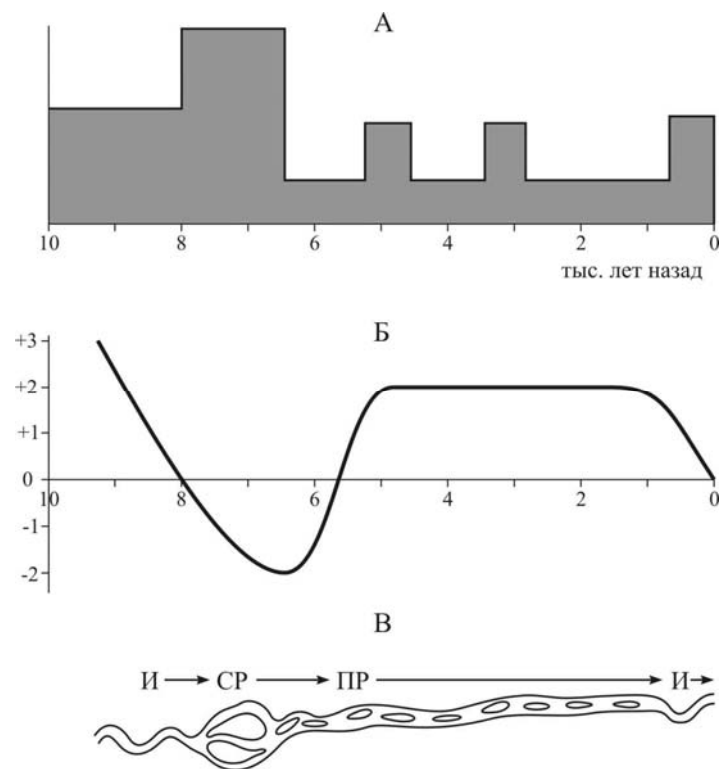


Рис. 157. Голоценовые русловые деформации в среднем течении р. Протвы [Панин, Каревская, 2000; Панин, 2001]: *А* – колебания водоносности реки (качественная схема); *Б* – вертикальные деформации (положение дна русла относительно современного); *В* – трансформация типа русла: *И* – излучины с прямолинейными вставками; *СР* – сложные разветвления; *ПР* – простые разветвления.

На следующем этапе русло трансформировалось в разветвленное, причем размеры рукавов говорят о руслоформирующих расходах воды меньших современных. Следующий этап характеризуется увеличением стока. Русло сначала трансформируется в разветленно-извилистое со средним радиусом кривизны излучин в 1,2 раза большим современного, а затем в своеобразное многорукавное с несколькими равновеликими и достаточно протяженными рукавами (рис. 158б). Сам автор публикации характеризует этот этап тем, что "река выходила на поверхности другого возраста и там фуркировала, разгружаясь от наносов и стекая далее по узким ложбинам" [Антощенко-Оленев, 1982, с. 95]. По-видимому, такое поведение реки было связано с направленной аккумуляцией в русле. Русло такой формы в плане, соответствующее в англоязычной литературе термину *anastomosing channel*, В.Г. Смирнова [2002] предложила называть раздвоенным, в отличие от пой-

менной многорукавности, при которой происходит ответвление от основного русла пойменных протоков (рукавов), а не разделение его на равноценные рукава. Условием формирования "раздвоенных русел" служит наличие верхнего (выше уровня поймы) интервала руслоформирующих расходов воды. Этот интервал проявляется при низких относительных высотах поймы, что (хотя и не обязательно) характерно для аккумулярующих рек (темпы нарастания поймы отстают от аккумуляции в русле).

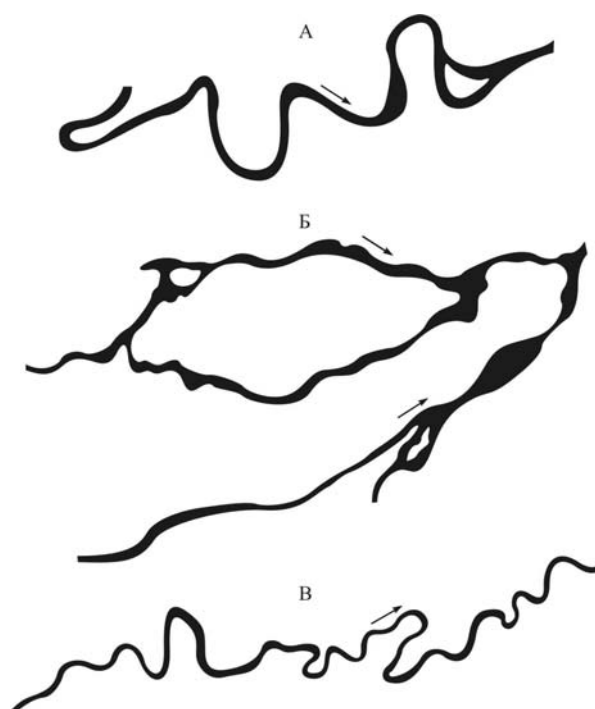


Рис.158. Изменения морфологии русла р. Кижинги (бассейн Селенги): *а* – ранний голоцен, *б* – средний голоцен, *в* – современное русло (по карте из работы [Антощенко-Оленев, 1982]).

В конце суббореального периода (3-3,5 тыс. л.н.) разветвленное русло снова трансформировалось в меандрирующее. Скорее всего, причиной этого послужило начавшееся врезание реки, в ходе которого поток сконцентрировался в едином русле. В настоящее время река продолжает формировать врезанные излучины (рис. 158в). Таким образом, на Кижинге, как и на Протве, большое значение для формирования того или иного морфодинамического типа русла имела направленность вертикальных русловых деформаций. Меандрированию благоприятствует врезание русла, хотя при крупнообломочном составе руслообразующих наносов более вероятным

должно было быть формирование разветвленного русла. Изменениями водного стока можно объяснить трансформацию типов русла при слабых темпах направленных вертикальных деформаций.

Взаимная смена меандрирования разветвлением русла в течение голоцена отмечается на некоторых крупных реках с песчаным руслом в связи с изменением их водоносности. Примером служит Обь от слияния Бии и Катунь до устья Томи. А.В. Чернов и Л.М. Гаррисон [1981] приводят результаты изучения пойменного рельефа, дополненные данными спорово-пыльцевого анализа пойменного аллювия. В течение голоцена ими выделено три эпохи – две относительно многоводные 7-10 тыс. л. н. и последние 3 тыс. лет и относительно маловодная 3-6,5 тыс. л. н. На разных отрезках русло реагировало на изменения стока неодинаково. На верхнем участке до Барнаула река в маловодную эпоху меандрировала, а на последнем этапе в связи с ростом водоносности стала разветвляться. Между Барнаулом и Новосибирским водохранилищем река меандрировала в течение всего голоцена, но средние радиусы кривизны излучин изменялись в соответствии с изменениями стока.

На участке ниже г. Новосибирска река в раннем голоцене меандрировала, в среднем голоцене тип русла неизвестен из-за позднейшего уничтожения следов его деятельности, а в позднем голоцене русло имело и имеет сейчас разветвленный характер. В маловодные периоды на верхней Оби (выше водохранилища) происходила аккумуляция наносов, на средней Оби (ниже Новосибирска) осветленный поток врезался; в многоводные годы все происходило наоборот [Маккавеев, Чалов, 1970]. Следовательно, верхняя Обь выше Барнаула в условиях аккумуляции меандрировала (средний голоцен), а в условиях врезания стала разветвляться на рукава (поздний голоцен). По-видимому, в данном случае вертикальные деформации не играют заметной роли в трансформации русла. Основное значение для руслового режима такой крупной реки как Обь имеет объем водного стока: маловодные эпохи более благоприятны для развития меандрирования, многоводные – для формирования разветвленного русла.

У менее крупных рек с песчаным аллювием реакция на изменения ландшафтно-климатических условий проще: извилистое русло сохранялось на протяжении всего голоцена, но изменялись размер и форма излучин. Например, на пойме Чулыма ниже г. Ачинска А.В. Чернов [1994] выделил девять поверхностей разных возрастных генераций, каждая из которых сформирована руслом меандрирующего типа (рис. 159). Средние радиусы кривизны палеорусел варьируются от 300 до 1300 м при современном $r = 930$ м. Эти изменения связаны с колебаниями водоносности реки. Самые маловодные периоды соответствовали времени формирования пойменных поверхностей 9-й и 4-й генераций, относимых к позднему дриасу (10-11 тыс. л. н.) и второй половине суббореала (2,5-4 тыс. л. н.). Средний радиус кривизны излучин составлял в эти эпохи соответственно 300 и 400 м. Напротив, в многоводные этапы голоцена он был больше современного. Таким образом,

на Чулыме изменения гидрологического режима и объема стока в голоцене приводили к изменению морфометрических параметров излучин, но не к изменению морфодинамического типа русла.

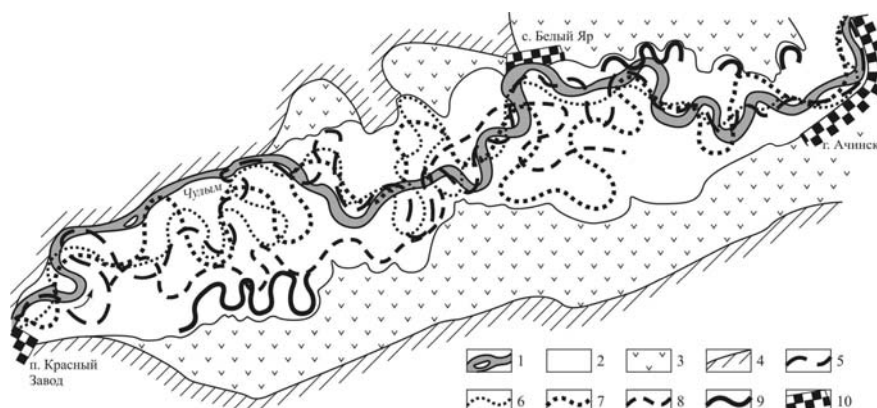


Рис. 159. Трансформация меандрирующего русла верхнего Чулыма [Чернов, 1994]: 1 – современное русло реки с пойменными островами; 2 – пойма; 3 – первая надпойменная терраса; 4 – уступы высоких надпойменных террас и коренных берегов. Положения русла верхнего Чулыма во время формирования пойменных массивов разных возрастных генераций: 5 – второй; 6 – третьей; 7 – пятой; 8 – восьмой; 9 – девятой; 10 – населенные пункты.

Из рассмотренного видно, что интерпретировать трансформацию типа русла с точки зрения изменения водного стока и гидрологического режима непросто даже на качественном уровне. Для количественных реконструкций палеорасходов разветвленные русла совсем непригодны, т.к. невозможно установить, какие из рукавов действовали одновременно в прошлом (разрешающая способность методов датирования оказывается более грубой, чем характерное время перераспределения расходов воды между рукавами разветвленной системы). Напротив, при анализе эволюции меандрирующего русла чаще всего вполне оправдывается простая логическая схема: чем больше водный сток (руслоформирующий расход), тем больше средний радиус кривизны (или шаг) излучин и меньше степень их развитости. Эта схема дает возможность и для количественной оценки расходов воды в прошлом. В свою очередь, данные о расходах воды позволяют охарактеризовать целый ряд климатических параметров. Изучение палеоизлучин становится, таким образом, инструментом палеогеографического анализа.

Пример количественной реконструкции палеоклиматических характеристик на основе изучения палеоизлучин приводит К. Ротницки [Rotnicki, 1991]. Им изучено 25 палеоизлучин на 60-километровом отрезке долины р. Просны в центральной Польше. Для каждого палеорусла по буровым данным получены средняя глубина (гидравлический радиус R_h) и

площадь живого сечения w , по крупномасштабным картам – уклон I , по крупности руслового аллювия оценены коэффициенты шероховатости n . Для расчета руслонаполняющих расходов воды Q_n применена формула Шези-Маннинга, ранее тарированная автором по современным гидрометрическим данным: $Q_n = \frac{0,9208}{n} R_h^{1/6} \cdot W \cdot \sqrt{R_h \cdot I}$ [Rotnicki, 1983]. Возраст палео-

излучин определен путем радиоуглеродного датирования основания старичного заполнения. В результате получена кривая изменения руслонаполняющих расходов (рис. 160). Исходя из их современного соотношения, руслонаполняющие расходы пересчитаны в среднегодовые путем введения соответствующего коэффициента, и далее, через площадь бассейна, – в слой годового стока. Из палеотемпературной кривой автор получил оценки коэффициента стока, что дало возможность из слоя стока рассчитать слой осадков. Разность между слоем осадков и слоем стока дала величину испарения. Итогом анализа явились графики изменения этих палеоклиматических показателей для территории центральной Польши за последние 12 тыс. лет (рис. 160).

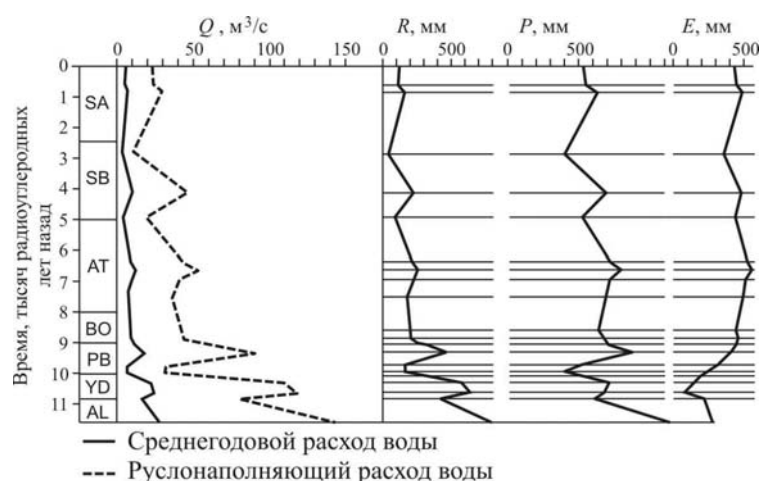


Рис. 160. Реконструкция элементов водного баланса на основе палеоруслового анализа р. Просны [по: Rotnicki, 1991]. Q – расход воды р. Просны; R – слой речного стока, P – годовая сумма осадков, E – годовое испарение на территории бассейна, AL ... SA – периоды позднеледникового и голоцена.

Несколько иной подход применен при исследовании голоценовых изменений морфодинамики нижней Вычегды [Сидорчук, Борисова и др., 1999; Sidorchuk, Panin et al., 2001]. По рельефу поймы и низкой 7-10-метровой террасы реконструирован рисунок русла на разных этапах голоценовой истории реки. Оказалось, что при сохранении извилистого типа

русла его морфометрия заметно изменялась (рис. 161), что связывается с климатически обусловленными изменениями стока воды. Для восстановления палеогидрологических характеристик использованы значения ширины палеорусел. Гидролого-морфологические связи были параметризованы по величине внутригодовой изменчивости стока воды y , которая охарактеризована отношением среднегодового и среднемаксимального расхода воды $y = 100(Q_{cp} / Q_{макс})$. Методом множественной регрессии по 185 участкам меандрирующих рек Русской равнины и Западной Сибири получена зависимость: $Q_{cp} = 0,012y^{0,73} B_p^{1,36}$ (коэффициент корреляции 0,90). Изменчивость стока зависит от ландшафтных условий и площади водосбора F .

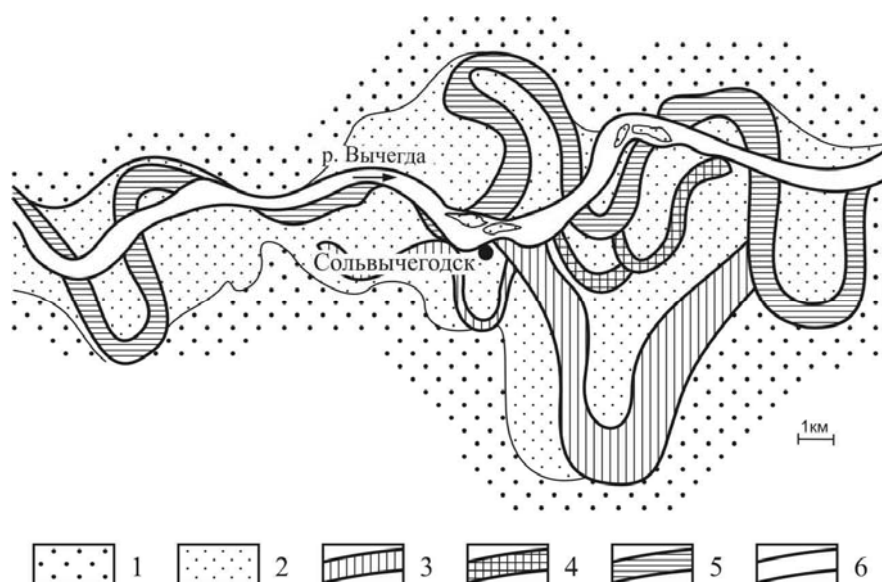


Рис. 161. Трансформация меандрирующего русла р. Выгедга в голоцене [Сидорчук, Борисова и др., 1999]: 1 – аллювиально-дельтовая поздневалдайская терраса; 2 – пойма и частично затопляемые раннеголоценовые террасы. Палеорусла разного возраста: 3 – 9-10 тыс. л.н.; 4 – 8-7,5 тыс. л.н.; 5 – 4,5-2,5 тыс. л.н.; 6 – современное русло.

Для рек северо-востока Русской равнины найдена эмпирическая зависимость $y = a F^{0,125}$, где a – коэффициент, зависящий от ландшафтных условий. Его можно определить для современных ландшафтных зон. Для оценки внутригодовой изменчивости стока (параметра y) в прошлом привлечены палинологические данные. С их помощью для интересующих отрезков времени подобраны современные регионы-аналоги и определено значение a . Подставляя значения a и средней ширины палеорусла в вышеприведенные зависимости, авторы получили среднегодовые расходы на

Вычегде в разные эпохи голоцена. Из этих данных рассчитаны годовой слой стока и осадки как годовые, так и отдельно холодного и теплого полугодий (рис. 162).

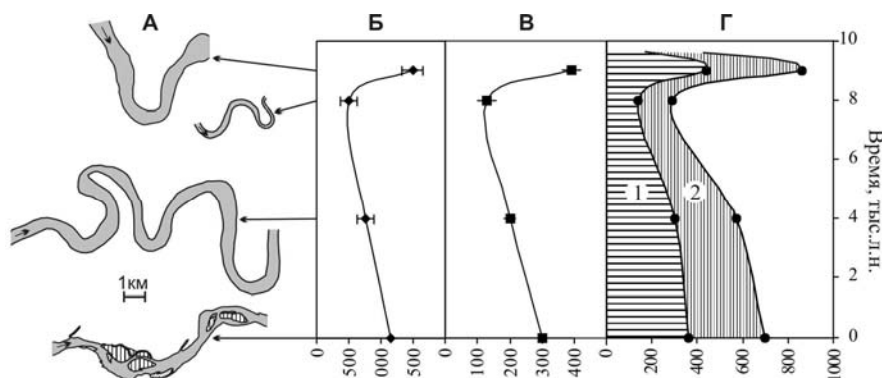


Рис. 162. Гидрологические и климатические параметры бассейна р.Вычегды, реконструированные по морфометрии палеоизлучин [по данным из работы: Сидорчук, Борисова и др.. 1999].

Реконструировать водный режим рек в прошлом помогает изучение разрезов аллювия, особенно погребенных почв. Теоретически возможны две упрощенные модели пойменного почвообразования. Первая – когда при неизменных скоростях осадконакопления существенно меняются темпы почвообразования вследствие изменяющейся климатической обстановки. Поступление органики в почву варьирует вследствие изменений продуктивности пойменных экосистем. В разрезе пойменного аллювия это должно выразиться в виде чередования более и менее гумусированных слоев. Более популярна, однако, модель изменяющихся скоростей осадконакопления. Подразумевается, что скорость почвообразования постоянна, либо ее изменения влияют лишь на морфологию образующегося почвенного профиля, но не на суть процесса. В периоды с низкими скоростями осадконакопления отлагающийся наилот вовлекается в почвообразовании и наращивает гумусово-аккумулятивный горизонт почвы. При возрастании скоростей осадконакопления почвообразующие процессы не успевают справляться с поступающим материалом, и происходит погребение почвенного профиля. В пользу такого механизма свидетельствуют текстуры пойменных осадков, ход накопления которых предполагает наличие слоистости. Однако обычно слоистость отчетливо прослеживается лишь в толщах, перекрывающих погребенные почвы. В горизонтах самих погребенных почв слоистость фрагментарна или совсем отсутствует. Это свидетельствует, что осадок поступал небольшими порциями, первичная слоистость в условиях покрытой растительностью поверхности уже была

плохо выражена, а почвенная фауна успевала хорошо перемешивать материал до поступления новых порций наилка.

Правильная интерпретация погребенных пойменных почв затруднительна без анализа деформаций речного русла. Еще Н.И. Маккавеев [1955] убедительно показал, что формирование погребенных почв может происходить вследствие миграции реки по дну долины, когда тыловой участок поймы с низкими скоростями седиментации превращается в прирусловую. Такого рода почвы помогают расшифровать историю русловых деформаций на конкретном участке долины, но палеогеографического интереса не представляют. Однако, если погребенные почвы близкого возраста встречаются в целом ряде речных долин, это служит свидетельством снижения частоты затопления пойм целого региона. Особенно ценную информацию несут погребенные почвы зонального типа: в те времена, когда на нынешней пойме почвенные процессы были автоморфными, пойма представляла собой незатапливаемую террасу. Причин этому может быть две: снижение высоты паводков и рост относительных отметок поймы за счет врезания реки. На платформенных равнинах одной из наиболее распространенных причин врезания рек служит увеличение стока воды. Напротив, при уменьшении стока начинается аккумуляция, дно русла повышается, и частота затопления поймы со временем увеличивается. Аналогичный эффект достигается при росте высоты паводков. Однако со временем этот рост приводит к врезанию реки, и степень поемности падает.

Совместный анализ изменений руслового режима рек и строения разрезов пойменного аллювия дает наиболее достоверную палеогидрологическую информацию. Так, в долинах центра Русской равнины старицы, образованные в I тысячелетии нашей эры, отличаются высокой степенью развитости при относительно небольшом шаге и ширине русла. На поймах рек за это время сформировались развитые почвенные профили, местами имеющие зональный характер [Александровский и др., 1987; Бутаков, Курбанова и др., 2000]. В совокупности эти факты свидетельствуют о снижении руслоформирующих расходов воды, редком затоплении пойм и превращении их местами в незатапливаемые террасы с автоморфными процессами почвообразования. Во II тысячелетии н.э. осадконакопление на поймах значительно ускоряется, пойменные почвы погребаются под слоистым наилком. Русла формируют относительно пологие излучины, заметно превосходящие размерами предшественников. Это хорошо видно на космическом снимке долины р. Хопра (рис. 163): достаточно сравнить излучины современного русла и примыкающие к нему молодые старицы (возраст 1-2 тыс. л. н.), чтобы сделать вывод о росте руслоформирующих расходов в прошедшем тысячелетии по сравнению с предшествующим. Наиболее водообильным был, по-видимому, малый ледниковый период (16-19 века). Активизация флювиальных процессов фиксируется в это время по всей территории умеренного пояса России от Русской равнины до Дальнего Востока [Sidorchuk et al., 2003].

В настоящее время на поймах рек центра Русской равнины идет активное почвообразование, сформированы достаточно мощные аллювиальные дерновые почвы. Строение разрезов пойм показывает, что на многих реках периоды быстрого накопления аллювия на высоких ступенях поймы были относительно кратковременны и в прошлом, разделяясь длительными эпохами затухания пойменной седиментации, когда на поверхности поймы формировались развитые аллювиальные или зональные почвы. Возможное объяснение этому – мощные, но короткие всплески паводочной активности на некотором среднем гидрологическом фоне. Однако реальная картина, по-видимому, сложнее. Водный режим рек быстро реагирует на изменения климата, в то время как русловой режим трансформируется с запозданием. Рост объемов паводочного стока стимулирует как более частое и длительное затопление пойм, так и врезание реки. По мере врезания затопляемость поймы снижается при неизменном гидрологическом режиме, темпы осадко-накопления на пойме падают, и постепенно начинается новый цикл пойменного почвообразования, хотя гидрологический режим остается неизменным. Описанный механизм хотя и подтверждается некоторыми фактическими данными, но в значительной степени дедуктивен. Для понимания природы погребенных пойменных почв необходимы специальные исследования на стыке почвоведения, русловедения и палеогеографии голоцена.

Обобщая изложенное, можно заключить, что трансформация речных русел в прошлом имеет три основных причины: изменения водного стока (объема и режима), изменения стока руслообразующих наносов и вертикальные русловые деформации направленного характера. Эти причины могут быть независимыми, но чаще – взаимосвязанными. Так, вызванному климатическими факторами увеличению водного стока будет сопутствовать усиление эрозии на водосборе и рост поступления обломочного материала в речную сеть. Примером причинно-следственных взаимоотношений служит врезание реки при увеличении водного стока. С другой стороны, врезание может происходить и по другим причинам – вследствие тектонических движений или опускания уровня водоприемного бассейна. Так или иначе, изменения условий руслоформирования вызывают трансформацию русла на уровне морфодинамического типа или его разновидностей (например, сегментные излуины – петлеобразные излуины). Зафиксировав эти изменения по характерным особенностям рельефа поймы и низких террас, исследователь встает перед выбором, в каком направлении двигаться дальше.

С одной стороны, обнаруженные изменения руслового режима нуждаются в объяснении. Предполагается, что изменения внешних условий руслоформирования (изменения климата, характера землепользования и т.д.) известны из независимых источников (например, по данным палинологического анализа). Задача сводится к сопоставлению смены внешних условий и реакции на это русловой системы. Так, если в рельефе поймы отражена трансформация русла с мелкими петлеобразными излуинами в русло с крупными сегментными излуинами, а из палеогеографических данных из-

вестно, что на этот период приходится увеличение количества атмосферных осадков, возможна следующая цепочка рассуждений: увеличение количества осадков ведет к росту руслоформирующих расходов воды, а это приводит к увеличению радиусов кривизны и уменьшению степени развитости излучин.



Рис.163. Участок поймы р. Хопра у с. Пёски (космический снимок).
Объяснения в тексте.

На этом пути можно ожидать совершенствования представлений о механизмах и причинах формирования разных типов русла, т.к. обычно эти проблемы рассматриваются лишь в пространственном аспекте – сопоставляются реки с разной морфологией русел и ищутся различия в современных условиях руслоформирования [Чалов и др., 1998]. При палеорусловом анализе изучаемое явление рассматривается во временном аспекте, что предоставляет дополнительные сюжеты для осмысления и открывает новые стороны проблемы (например, влияние унаследованных черт морфологии русел). Поэтому палеорусловый анализ имеет перспективы внести существенный вклад в общую теорию русловых процессов и в проблему меандрирования в частности.

Другая линия исследования – палеогидрологическая или, шире, палеогеографическая. Изменения руслового режима интерпретируются с точки зрения изменений объема и режима водного стока, а последние получают палеоклиматическую трактовку. Например, трансформация мелких петлеобразных излучин в крупные сегментные может быть *a priori* (исходя из имеющихся в теории русловых процессов представлений) объяснена ростом руслоформирующих расходов воды. Так и было сделано нами выше в случае с р. Хопром (рис. 163). Если руслоформирующий расход связан с прохождением половодья (например, на реках с восточно-европейским, по Б.Д. Зайкову, типом гидрологического режима), это с большой вероятностью говорит о росте суммы твердых осадков. С другой стороны, приведший к трансформации излучин рост руслоформирующих расходов мог быть связан с врезанием реки (увеличение относительной высоты поймы ведет к росту Q_{ϕ} среднего интервала, проходящего в бровках поймы) при тех же параметрах водного стока, но уменьшении поступления в реку наносов руслообразующих фракций (причина врезания). Последнее может быть связано с изменением характера растительного покрова на водосборе, и климатическая интерпретация будет уже иная.

Из приведенных рассуждений видно, что выбор верной причинно-следственной цепочки в условиях переплетения взаимозависимых природных характеристик представляет сложную задачу. В одних случаях он подкрепляется дополнительной информацией, в других случаях – определяется личным опытом и предпочтениями исследователя, господствующими в данное время представлениями и традициями конкретной научной школы. Поэтому окончательные выводы не лишены налета субъективности и даже некоторой произвольности. Однако подобные недостатки присущи любому другому методу палеогеографических реконструкций. Такова специфика этой области науки, в которой данные нельзя получить путем непосредственного наблюдения и измерения, а результат невозможно проверить экспериментальным путем. В этой ситуации остается одно – решать задачу разными способами. Если несколько методов приводят к близкому результату, такой результат может быть признан достоверным. Пополняя обойму независимых методов, палеорусловый анализ представляет ценное приобретение

для палеогеографии. Кроме того, изучение материальных следов деятельности текучих вод представляет наиболее короткий и прямой путь к реконструкции режима рек и объема речного стока – важной части водного баланса в прошлом. Пока эта задача решается по "остаточному принципу": из палинологических материалов получают палеоклиматические характеристики (температуры, суммы осадков), из температурного режима рассчитывают испарение, и за речной сток считают величину, оставшуюся от осадков после вычитания испарения. Данные палеоусловного анализа дают возможность как для верификации этих результатов, так и для получения новых, независимых оценок.



ГЛАВА 9



ГЕОГРАФИЯ МЕАНДРИРУЮЩИХ РУСЕЛ



9.1. Географические факторы меандрирования русел

Развитие излучин как следствие процессов взаимодействия русловых потоков, транспортирующих наносы, с грунтами, слагающими дно и берега рек, представляет собой гидромеханическое явление. Однако его специфика на разных реках, в разных природных условиях, в разных бассейнах, регионах и по длине рек определяется конкретными природными условиями, с которыми связаны водоносность рек, особенности многолетней и внутригодовой неравномерности стока, величина и режим стока наносов, их крупность, условия поступления в русло и изменения по длине рек, геолого-геоморфологическое строение бассейнов рек и их долин, устойчивость к размыву горных пород и аллювиальных отложений, слагающих дно и берега и т.д. В связи с этим Н.И. Маккавеев [1955, с.15] отмечал, 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». Отсюда, при общей схожести форм извилистого русла, их развитие по-разному происходит на реках, протекающих в неодинаковых природных условиях. Это проявляется не только в русловом режиме меандрирующих рек, т.е. изменениях их форм во времени в связи с особенностями режима стока воды и наносов, но и в размерах излучин, полном или неполном прохождении ими стадий развития, темпах переформирования, условиях спрямления и зарождения новых излучин, характере трансформации форм излучин при утрате ими гидравлической выгоды. Геолого-геоморфологическое строение речных бассейнов сказывается в свободных и ограниченных условиях развития русловых деформаций и, следовательно, в распространении широкопойменных русел со свободным меандрированием или врезанных излучин. При этом ландшафтно-климатические факторы русловых процессов в наиболее полной мере проявляются при свободном меандрировании, когда, следуя высказываниям М.А. Великанова, «поток управляет руслом». У врезанных излучин превалирует обратное соотношение – «русло управляет потоком», хотя и в этом случае величина и режим стока воды, степень реализации транспортирующей способности потока количеством и крупностью поступающих с бортов и с территории бассейна наносов и, наконец, свойства

горных пород, которые эродирует поток, определяют формы развивающихся излучин.

Опосредованно, особенно для свободного меандрирования, на развитие излучин оказывают влияние характер растительности, в первую очередь, на поймах рек, устойчивость русел рек и величина стока руслообразующих наносов. Водоносность рек и внутригодовая неравномерность стока как факторы формирования излучин, некоторые вопросы, связанные со стоком наносов и их крупностью, влияние геологического субстрата на развитие извилистого русла в той или иной мере освещались в предыдущих главах и разделах книги, поскольку без этого невозможно было рассмотрение механизмов формирования и эволюции излучин; там же выполнен гидролого-морфологический анализ, выявлены закономерности эволюции и спрямления излучин. Поэтому в этом разделе главное внимание будет уделено тем факторам и показателям природных условий, которые не получили должного освещения раньше, но без учета которых невозможна полноценная оценка географических особенностей развития речных излучин.

Наиболее объективными гидрологическими показателями руслоформирующей деятельности рек, в интегральном виде отражающими влияние на русловой режим рек природных условий на водосборе, являются руслоформирующие расходы воды Q_ϕ в понимании Н.И. Маккавеева [1955, 1971]. Особенно четко особенности прохождения Q_ϕ проявляются на равнинных реках в условиях свободного развития русловых деформаций, где влияние активных ведущих факторов (стока воды и наносов) в формировании русла того или иного морфодинамического типа и его дальнейшей перестройки проявляется в наибольшей мере.

Особенности прохождения Q_ϕ зависят от конкретных природных условий, что дало возможность выявить наиболее общие региональные закономерности руслоформирующей деятельности рек [Чалов, 1979]. В зависимости от особенностей гидрологического режима, ширины и характера поймы, состава руслового аллювия Q_ϕ наблюдаются в разных диапазонах уровней и имеют неодинаковую обеспеченность. Согласно данным таблицы 38¹, на реках, примеры которых наиболее часто приводятся в книге, Q_ϕ соответствуют одному, двум или трем интервалам расходов воды. В одних случаях один из интервалов (верхний) наблюдается при уровнях, соответствующих затопленной пойме. В этих условиях происходит образование на пойме транзитного потока и в полной мере проявляется взаимодействие пойменного и руслового потоков [Барышников, 1984]. В других – Q_ϕ проходят только в пределах бровок поймы, т.е. является руслонаполняющим (Алей, средний Иртыш, Неман, Чарыш, Чулым). При этом на реках с Q_ϕ , проходящими до выхода воды на пойму, может наблюдаться один или два

¹ Расчеты Q_ϕ были проведены на основе модифицированной методики Н.И. Маккавеева, предполагающей определение показателя степени m по зависимости $R = f(Q^m)$ и введения коэффициента δ с момента образования транзитного потока по пойме, а не превышения уровнем воды бровки поймы.

его интервала: средний (Амур, Вилуй, Десна, нижний Иртыш, Северский Донец, Хуанхэ, Яна), средний и нижний (Белая, Васюган, Вах, Вычегда, Кеть, Ока, Припять, Урал, Чулым) или один нижний (Днестр). Характер прохождения руслоформирующих расходов воды на реках, для которых расчеты Q_{ϕ} не проводились, можно оценить, используя схему районирования территории бывшего СССР по руслоформирующим расходам (карта-врезка к карте “Русловые процессы на реках СССР” [1990]). Например, правобережные и левобережные притоки средней Оби относятся по схеме районирования к Западно-Сибирской области Сургутско-Пурского (Нюролька, Чижалка) и Обь-Енисейского районов (Аган, Чакчар, Парабель, Тромъеган, Тым, Чая, Чузик). Для них характерно прохождение трех интервалов Q_{ϕ} , один из которых наблюдается при затопленной пойме. Различаются они и обеспеченностью этого интервала Q_{ϕ} : в первом районе он имеет обеспеченность более 1%, во втором – меньше 1%. Напротив, в бассейне верхней Оби реки располагаются в Алтайско-Кузнецкой области с двумя руслоформирующими расходами, проходящими до выхода на пойму (Песчаная, Чарыш). Но здесь особое место по условиям прохождения Q_{ϕ} занимает Алей, на котором лишь в верхнем течении (г.п. Староалейское) выделяется руслоформирующий расход воды среднего интервала, который проходит перед выходом воды на пойму. Все среднее и нижнее течение находится под регулирующим влиянием Гилевского гидроузла, который полностью видоизменяет характеристики естественного стока реки [Русловые процессы..., 1996]. Влияние условий прохождения Q_{ϕ} на процесс меандрирования в большинстве случаев достаточно четко прослеживается при анализе форм и степени развитости излучин. При прохождении руслоформирующего расхода воды выше бровок поймы в шпорах развитых сегментных излучин возможно образование спрямляющих рукавов. По мере развития каждого такого нового рукава в него начинает поступать все большая часть расхода воды, со временем он становится главным руслом, в то время как излучина (старое русло) постепенно отмирает, превращаясь в извилистое пойменное ответвление – формируется прорванная излучина. Характерным примером такой модели развития свободных излучин служат излучины среднего Амура, Вилуя, нижней Вычегды и Оки. Излучины на этих реках имеют, в большинстве случаев, сегментную пологую, сегментную развитую или реже сегментную крутую форму. Спрявление их происходит на стадии развитой или крутой сегментной излучины при степени развитости l/L в интервале 1,50-2,00. На среднем Амуре среднее значение степени развитости свободных излучин составляет 1,25. Пойма, благодаря глубокому (2-3 м) затоплению в паводочный период и луговой растительности, расчленяется пойменными протоками (ответвлениями, по Н.И. Маккавееву [1955]). В XX веке на среднем Амуре спрямилось таким образом две излучины, у которых соотношение l/L составляло 1,53 и 1,79. Формирующаяся благодаря прохождению Q_{ϕ} при затопленной пойме пойменная многорукавность распространена также и на других реках бассейна Амура.

Таблица 38. Руслоформирующие расходы воды (по Н.И. Маккавееву – Р.С. Чалову) и их обеспеченность на некоторых реках Евразии

Река –гидрологический пост	Руслоформирующий расход воды					
	Верхний		Средний		Нижний	
	м ³ /с	%	м ³ /с	%	м ³ /с	%
Амур - Гродеково	14000	5,1	9600	14,5	---	---
Амур - Хабаровск	23700	5,8	19500	14,3	---	---
Белая - Сыртланово	1330	0,1	715	1,1	510	2,1
Белая - Стерлитамак	1240	0,8	595	4,3	170	24,0
Белая - Уфа	7920	0,4	3640	3,6	795	27,4
Белая - Бирск	7700	0,1	4370	2,0	1140	18,4
Васюган - Ср.Васюган	610	5,5	530	9,0	170	28,0
Вах - Любчинское	2800	0,5	1120	11,0	520	34,0
Виллой - Сунтар	9850	1,0	4740	4,5	---	---
Виллой - Хатырык - Хомо	12050	3,5	7850	8,0	---	---
Вычегда - Мал. Кужба	1960	0,4	1300	0,9	375	7,5
Вычегда - Сыктывкар	3280	3,2	2610	5,4	1270	13,5
Десна - Разлеты	1890	0,5	630	5,7	---	---
Десна - Чернигов	4200	0,2	1000	10,6	---	---
Днестр - Бандеры	2780	0,1	---	---	375	37,1
Днестр - Олонешты	360	5,3	---	---	114	55,6
Иртыш - Омск	---	---	2800	6,0	2100	15,0
Иртыш - Тобольск	9000	2,0	4000	22,0	---	---
Кеть - Максимкин Яр	1430	0,5	800	9,0	170	45,0
Конда - Болчары	690	8,0	480	25,0	---	---
Неман ¹⁾ - Столбцы	---	---	---	---	12,5	55,0
Неман ¹⁾ - Белица	---	---	---	---	150	40,0
Неман ¹⁾ - Мосты	---	---	---	---	180	25,0
Неман ¹⁾ - Гродно	---	---	---	---	225	50,0
Неман ¹⁾ - Неманюкай	---	---	---	---	225	75,0
Неман ¹⁾ - Лямпеджай	---	---	---	---	400	60,0
Неман ¹⁾ - Смалнинкай	---	---	---	---	625	35,0
Ока - Калуга	3680	0,6	2140	2,4	350	21,5
Ока - Касимов	9280	0,1	4920	2,0	640	31,5
Ока - Муром	6700	1,0	3810	5,4	1780	55,0
Припять - Коробы	680	1,0	345	5,8	105	32,5
Припять - Туров	780	3,2	500	10,1	180	36,0
Припять - Мозырь	3600	0,2	750	8,7	---	---
Северский. Донец - Чугуев	430	0,5	---	8,1	---	---
Северский. Донец - Изюм	750	0,3	330	3,5	---	---
Северский. Донец - Бел. Калитва	805	2,9	560	6,5	190	23,0
Северский. Донец - Лисичанск	1360	0,3	585	3,6	---	---
Северский. Донец - Кружиловка	2410	0,3	810	3,4	---	---
Урал - Кушум	4600	0,5	2200	2,6	1000	8,9
Хуанхэ ²⁾ - Гаоцунь	9000	0,7	3750	15,4	---	---
Хуанхэ ²⁾ - Сунькоу	8000	0,2	3600	14,8	---	---
Хуанхэ ²⁾ - Лэкоу	6000	3,4	4200	10,6	---	---
Чулым - Балахта	---	---	500	4,0	140	27,0
Чулым - Зырянское	---	---	2600	4,5	450	37,0
Яна - Верхоянск	1600	1,0	1050	3,5	600	8,0
Яна - Джангы	6200	2,5	3600	10,0	---	---

Использованы данные: 1 – А.А. Дарбутаса [1992]; 2 – Лю Шугуана [Чалов и др., 2000].

В бассейнах Уссури и Буреи, например, она составляет, соответственно, 44% и 36% от общей протяженности рек.

Современные излучины Вилюя, в большинстве случаев (79%), имеют пологую сегментную форму при средней степени развитости $l/L=1,31$. Спрявление происходит на стадии сегментных развитых излучин. Поэтому максимальное значение l/L свободных излучин нижнего Вилюя составляет лишь 1,38. Лишь на участке 184-122 км, считая от устья, выше впадения р. Чороона, имеются три свободные излучины со значениями степени развитости 1,55; 1,79; 1,44 и отношением $r/h < 1,00$ (0,82; 0,90; 0,96, соответственно). Это отклонение имеет местный характер, связанный с особенностями прохождения потока в период половодья. По данным Б.В. Матвеева [1988], который основывался на параметрах стариц, величина l/L излучин нижнего Вилюя в процессе их развития никогда не превышала 2,00.

В нижнем течении Вычегды и Оки также подавляющее число излучин – сегментные. Среднее значение l/L на нижней Вычегде – 1,26, на Оке – 1,34. В 1931-1982 годы на нижней Вычегде спрямилось три излучины, у которых степень развитости составляла 1,85; 2,03; 2,08. На нижней Оке излучины спрямляются при степени развитости от 1,60 до 2,00.

На свободномеандрирующем участке Иртыша выше слияния с Тоболом Q_ϕ верхнего интервала отсутствует. Русло, меандрируя, образует излучины, отличающиеся иногда сложной формой и очень большой величиной соотношения l/L (до 5,00-6,00). Ниже устья Тобола Q_ϕ проходит при затопленной пойме (верхний интервал). Здесь начинает развиваться пойменная многорукавность. Это приводит к снижению числа излучин, достигших критического значения степени развитости ($l/L=1,58$, по Н.И. Маккавееву [1955]) почти в два раза (с 61% до 33%).

Однако образование прорванных излучин не всегда сопровождается развитием пойменной многорукавности. При малой обеспеченности Q_ϕ верхнего интервала прорванные излучины быстро отмирают, бывшее старое русло отшнуровывается от нового, относительно прямого, превращаясь в пойменное старичное озеро или курью (залив). То же происходит при большом стоке донных наносов, которыми заносится обычно заход, реже, выход из старого русла. Таковы многие участки нижней Вычегды, на которой пойменная многорукавность, как результат эволюции прорванных излучин, приурочена лишь к местам, где меандрирующее русло пересекает пойму от одного борта долины к другому, и во время половодья имеет место пересечение динамических осей пойменного и руслового потоков.

С другой стороны, развитие пойменной многорукавности в условиях прохождения руслоформирующего расхода воды выше пойменных бровок не всегда приводит к массовому спрявлению развитых и крутых сегментных излучин. В среднем течении Конды Q_ϕ верхнего интервала имеет высокую обеспеченность (8 %), пойма изрезана протоками (так называемые Слепые Конды). Но извилистость русла на этом участке тем не менее велика: $(l/L)_{cp}=1,72$; доля излучин, степень развитости которых превысила зна-

чение 2,00, составляет 27% против 12% на участках верхнего и нижнего течения. Здесь спрямлению развитых сегментных излучин препятствует сильная залесенность поймы; это же характерно для Вычегды в верхнем течении.

Влияние местных особенностей речной долины может существенно уменьшить или даже полностью сnivelировать влияние Q_{ϕ} верхнего интервала на форму и динамику свободных излучин. Характерным примером такого доминирующего влияния местных факторов является свободномеандрирующее русло нижнего Днестра. Глинистый состав и большая высота поймы обуславливают общую стабильность русла в плане. Размыты вогнутых берегов реки сосредотачиваются в вершинах излучин при относительной стабильности крыльев, что способствует формированию пальцеобразных излучин [Беркович, Злотина и др., 1992]. Из-за высокой эрозионной устойчивости глинистого пойменного аллювия спрямление излучин при прохождении Q_{ϕ} верхнего интервала не происходит, и они достигают больших значений степени развитости. Среднее значение l/L на нижнем Днестре равняется 1,93, а максимальные иногда превышают 4,00 и даже 5,00.

Но если на нижнем Днестре вышеперечисленные факторы практически устраняют влияние максимальных расходов воды на кривизну и форму излучин, то на верхнем участке (1177-1120 км от устья), где Днестр свободно меандрирует, их влияние весьма ощутимо. Излучины с большими значениями степени развитости на этом участке отсутствуют: максимальное значение $l/L = 1,62$, среднее – 1,30. Это связано с более «легким» – песчаным составом пойменного аллювия по сравнению с нижним Днестром, что способствует спрямлению излучин на стадии «сегментной».

Таким образом, сам факт прохождения руслоформирующего расхода воды при затопленной пойме еще не обеспечивает быстрого спрямления развитых свободных излучин. Для этого необходимы местные благоприятные особенности поймы: ее литологического строения, высоты, растительности. Не меньшее значение имеет продолжительность этапа прохождения Q_{ϕ} , что проявляется в характере кривой зависимости $Q_{\phi} = f(\delta Q^m PI)$. Максимум верхнего интервала данной зависимости может иметь либо пикообразную, либо трапециевидную форму, при которой одинаковые или близкие к максимуму значения имеют расходы воды большого диапазона. Подобные различия в форме кривых Q_{ϕ} называют «полнотой эпюры». «Полнота эпюры» определяет продолжительность активных русловых переформирований в течении года, т.е. диапазон расходов воды, составляющих максимум. Таким образом, степень воздействия каждого интервала Q_{ϕ} на переформирование русла зависит от его обеспеченности. Это подтверждается данными, приведенными в таблице 39. Если происходит увеличение обеспеченности Q_{ϕ} верхнего интервала вниз по течению реки, то в этом же направлении уменьшается доля развитых излучин (Вычегда, Ока). Если его обеспеченность остается по длине реки без изменения, то, при прочих равных условиях, показатели извилистости русла и форм излучин не изменяются, как это

происходит например, на Северском Донце. При малой обеспеченности Q_ϕ верхнего интервала и, соответственно, кратковременном затоплении поймы, условия для спрямления излучин не успевают реализоваться: на таких реках возможно широкое распространение омеговидных и синусоидальных излучин (Урал, реки бассейна средней Оби).

К свободномеандрирующим рекам, на которых Q_ϕ проходит до выхода на пойму, относятся Неман, Песчаная, Чарыш, Чулым, средний Иртыш. Прохождение Q_ϕ в пределах пойменных бровок способствует интенсивным деформациям излучин. На таких реках доля петлеобразных, синусоидальных и других сложных форм излучин существенно выше, чем на реках с Q_ϕ , проходящем при затопленной пойме. На Чулыме эта величина составляет 26%, на Чарыше – 24%, Немане – 27%, среднем Иртыше – 27%.

На Немане развитие свободных излучин соответствует прохождению Q_ϕ в бровках поймы только на верхних двух участках (табл. 40). На остальной части свободномеандрирующего русла преобладают пологие сегментные излучины, причем здесь распространено преимущественно русло другого морфодинамического типа – прямолинейное неразветвленное (около 60% длины участка) [Дарбутас, 1992]. При этом существенное влияние на размеры свободных излучин в среднем течении оказывают особенности строения речной долины. На участке устье Березины – устье Дитвы ширина поймы уменьшается в 2 раза, приобретая четковидный облик: отдельные расширения чередуются с сужениями, в которых пояс меандрирования охватывает все дно долины. Такое четковидное строение способствует формированию излучин, различающихся своими размерами. На рис. 164 представлена гистограмма распределения радиусов кривизны свободных излучин на участке Неман устье Березины – устье Дитвы. На ней четко выделяется два максимума значений – 220 и 400 м. Первый соответствует излучинам, формирующимся в расширениях речной долины, второй – в сужениях. Объясняется это увеличением удельных расходов воды в русле во время половодья при прохождении формирующих расходов воды. В сужениях речной долины водный поток более компактен, в то время как в расширениях он распластывается по пойме.

Наряду с оценкой влияния условий прохождения Q_ϕ на образование прорванных излучин и пойменной многорукавности на меандрирующих реках, важно определить, руслоформирующие расходы Q_ϕ какого интервала (если их два или три) являются основными в развитии самих излучин. Анализ зависимостей $r(L)=f(Q_\phi)$ для нижнего, среднего, верхнего интервалов, выполненный Б.В. Матвеевым [1985] и С.В. Некосом [Некос, Чалов, 1997] для рек разных бассейнов, показал, что все связи имеют значимые коэффициенты корреляции, и таким образом, можно считать, что каждый Q_ϕ вносит свой вклад в развитие излучин. Однако наименьшее значение коэффициента корреляции характерно для связей «параметр – Q_ϕ нижнего интервала» (его величина лишь немного больше 0,5); наибольшими коэффициентами корреляции отличаются связи с Q_ϕ среднего интервала; для Q_ϕ верхнего

Таблица 39. Обеспеченность руслоформирующих расходов воды и показатели развитости излучин на участках рек Вычегды, Оки и Северского Донца

Река – пост	Обеспеченность Q_{Φ} , (%)	Среднее значение l/L	Излучины с $l/L > 1,58$	Омеговидные и синусоидальные излучины, $l/L > 2,00$ (%)
Вычегда - Мал. Кужба	0,4	1,61	33	17
Вычегда - Сыктывкар	3,2	1,38	15	4
Ока – Касимов	0,1	1,82	44	24
Ока - Муром	1,0	1,35	5	0
Северский Донец - Изюм	0,3	1,71	43	19
Северский Донец - Лисичанск	0,3	1,66	50	16
Северский Донец - Кружиловка	0,3	1,63	45	20

Таблица 40. Характеристики свободных излучин на р. Немане

Участок, км от устья	Среднее значение l/L	Излучины с $l/L > 1,58$ (%)	Омеговидные и синусоидальные излучины с $l/L > 2,0$ (%)
915-808	1,78	57	33
808-751	1,74	51	30
751-535	1,35	11	3

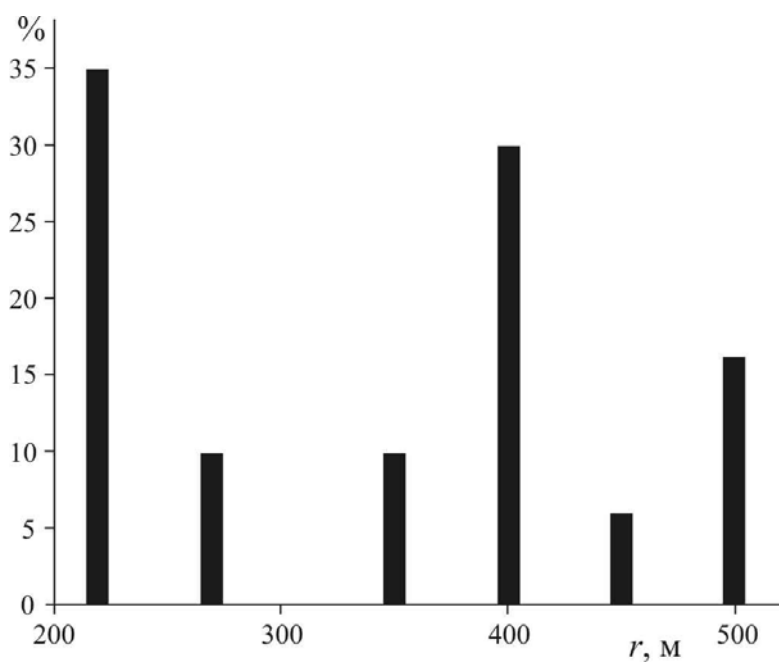


Рис. 164. Распределение радиусов кривизны r р. Немана на участке устье р. Березины – устье р. Дитвы.

интервала они занимают промежуточное положение. Таким образом, при руслоформирующем расходе воды, проходящем в бровках поймы (руслона-полняющем), осуществляются основные русловые деформации, обуславливающие развитие излучин. Обычно он близок к среднемуголетнему максимальному расходу воды или расходу воды 30-дневной продолжительности, значения которых были приняты выше при гидролого-морфологическом анализе свободных излучин русла.

Использование информации о руслоформирующих расходах воды дает возможность получить общие представления о характере развития и переформирования меандрирующего русла на конкретной реке. Однако многофакторность русловых процессов очень часто приводит к нарушению общих закономерностей в эволюции речных излучин, основанных на оценке условий прохождения Q_{ϕ} . Многообразие вариаций компонентов природной среды, оказывающих в той или иной мере влияние на процессы меандрирования, делает необходимым учитывать каждый из них.

Пойменная растительность. Кроме влияния залесенности поймы на условия спрямления излучин, растительность на подмываемых берегах определяет размеры самих свободных излучин. В случае, если пойма покрыта кустарниковой и древесной растительностью, происходит снижение их параметров по сравнению с соседними участками реки с луговыми поймами. Подобный вывод был получен при анализе свободных излучин на чередующихся участках с залесенной поймой и поймой, покрытой луговой растительностью, в среднем течении Урала от устья р. Сакмары до устья р. Илека (1280-1085 км) и от устья р. Илека до устья р. Чагана (1085-793 км) (табл. 41). Лесная и кустарниковая растительность, «армируя» корнями размываемые берега способствует снижению интенсивности русловых деформаций. При этом уменьшается поступление в русло руслообразующих наносов, что тоже способствует уменьшению параметров излучин при неизменности показателей водоносности. В среднем параметры излучин при прочих равных условиях уменьшаются в 1,5-2,2 раза, и лишь ширина русла уменьшается в 1,1 и 1,3 раза, на первом и втором участках Урала соответственно. Замедление темпов боковой эрозии и уменьшение ширины русла при постоянстве расходов воды способствуют активизации глубинной эрозии. Средняя глубина русла, а также глубины на перекатах и в плесовых ложинах больше, чем на соседних участках с луговой поймой. Снижение интенсивности размывов берегов способствует уменьшению общей извилистости русла. Если средние значения степени развитости свободных излучин на участках с луговой поймой превышают величину 2,00, то на участках с залесенной поймой эти значения меньше. На залесенных участках Урала снижается также доля омеговидных и синусоидальных излучин (в среднем с 40% до 20%).

Отмеченная закономерность позволяет говорить о берегоукрепительной функции леса. Однако, этот факт не однозначно проявляется на реках, протекающих среди залесенной поймы. Характер интенсивности

размыва берегов с лесной растительностью зависит от высоты берегов, глубины корневой системы, характеристик насаждений и других факторов. М.В. Рубцовым [1982], выполнившим исследования влияния лесной растительности на размываемость берегов рек Севера Европейской части России, было отмечено, что снижение скоростей отступления берегов происходит только на малых реках с низкой поймой над меженным руслом (до 1 м). В таких условиях основная масса корней деревьев проникает практически во всю толщу берегового уступа. На больших реках существенных различий в интенсивности размывов берегов с лесной и луговой растительностью М.В. Рубцовым выявлено не было. Таким образом, снижение параметров свободных излучин с большей вероятностью можно ожидать на реках с залесенной поймой при невысоких относительных отметках пойменных бровок над меженным уровнем. В большей степени это должно относиться к малым рекам с низкой поймой. Подобное изменение отдельных параметров свободных излучин было также отмечено при чередовании участков поймы с луговой и лесной растительностью на некоторых малых реках бассейна средней Оби (Чижалка, Чузик).

Таблица 41. Средние значения параметров свободных излучин на участках р. Урала с луговой и залесенной поймой

Участок, км от устья	Растительность	Параметры					
		L , м	h , м	l , м	r , м	B , м	l/L
1280-1085	Лесная	720	390	1250	380	90	1,79
	Луговая	1230	780	2370	620	100	2,02
1085-793	Лесная	610	310	990	310	110	1,66
	Луговая	1220	740	2280	620	150	2,01

Заболоченность поймы. Формирование меандрирующего русла в условиях заболоченной поймы имеет свои особенности. Н.И. Маккавеев [1955, с. 285] отмечал: «Процессы преобразования излучин особенно сложны и беспорядочны в реках с малым падением, имеющих сильно заросшую и заболоченную пойму». Незначительные уклоны, мелкопесчаные, илистые или илисто-органические руслообразующие наносы, низкие отметки поймы, специфическая болотно-мочажинная растительность накладывают отпечаток на развитие свободных излучин. Значительные по протяженности участки с заросшей и заболоченной поймой встречаются в верхнем течении Припяти, Северского Донца, Немана. Русла первых двух рек местами являются бочажинными, практически утрачивая нормальную русловую форму. Невысокие отметки поймы над меженным руслом способствуют длительному и глубокому затоплению поймы в период половодья. Это приводит к интенсивному развитию пойменной многорукавности. Формируются многочисленные протоки (ответвления) и озера, забирающие значительную

часть расхода воды при прохождении руслоформирующих расходов. Удельные расходы воды в главном русле вследствие этого ниже, чем на соседних незаболоченных участках. В результате формирования русла происходит при меньших расходах воды, что отражается на его параметрах. В таблице 42 приведены средние значения параметров свободных излучин русел рек среди заболоченной и незаболоченной поймы по двум участкам Немана – устье Лоши – устье Уши (915-808 км) и устье Уши – устье Березины (808-751 км) и одному участку Северского Донца (Печенежское водохранилище – устье р. Оскола, 874-575 км). Наименьшее превышение отметок поймы над урезом воды характерно для первого участка Немана – менее 1 м. Параметры излучин снижаются в его пределах в 1,5-2,0 раза там, где пойма заболочена. На нижерасположенном втором участке Немана разница составляет 1,3-1,6 раза; высота поймы здесь увеличивается, практически повсеместно превышая 1 м. На Северском Донце различия в средних значениях параметров излучин на соседних заболоченных и незаболоченных участках составляет 1,3-1,8 раза. На всех реках лишь ширина русла имеет незначительные различия. Возможно, это связано с тем, что ширина русла в основном определяется меженными расходами воды, в меньшей степени или вообще не рассредоточивающимися по пойменным ответвлениям.

Таблица 42. Средние значения параметров свободных излучин Немана и Северского Донца на участках с заболоченной и незаболоченной поймой

Река, участок, км от устья	Характер поймы	Параметры					
		L , м	h , м	l , м	r , м	B , м	l/L
Неман (915-808)	заболоченная	90	60	170	50	30	1,99
	незаболоченная	170	90	280	90	30	1,74
Неман (808-751)	заболоченная	190	100	340	100	40	1,87
	незаболоченная	300	130	470	160	40	1,68
Северский Донец (874-575)	заболоченная	170	110	320	80	30	1,82
	незаболоченная	310	140	480	150	50	1,62

Участки рек с заболоченной поймой имеют, в среднем, более высокую извилистость. Видимо, характер пойменных отложений и болотная растительность не способствует спрямлению излучин, достигших больших значений степени развитости.

Устойчивость русла и сток наносов. Достаточный сток наносов, являясь одним из основных факторов зарождения и развития меандрирующего русла, с другой стороны, лимитирует формирование излучин при избыточном насыщении потока наносами. Снижение устойчивости русла, происходящее при этом, приводит к формированию изгибов русла, превышающих по своим параметрам формы русла, соответствующие местным показателям водонос-

ности. Объясняется это увеличением количества наносов, образующих в русле различные крупные формы грядового рельефа (побочни, перекааты), возле которых возникают первичные излучины (излучины динамической оси потока). Меандрирование при этом замещается неустойчивым прямолинейным или разветвленным руслом. Первое характерно, например, для Хуанхэ, второе – для нижнего течения Вилюя, Тромъегана.

Изменения показателей устойчивости русла и объема стока наносов вниз по течению могут приводить к изменению параметров излучин при отнесительной неизменности показателей водоносности. Впервые такая оценка была сделана Н.И. Маккавеевым и Н.В. Хмелевой [Экспериментальная геоморфология, 1969], установившим следующее соотношение между шагом излучин L и коэффициентом стабильности русла Н.И. Маккавеева K_c

$$L = 6,0\sqrt{K_c} \cdot 10^{-3} \quad (9.1)$$

и объяснивших это тем, что при меньшей устойчивости русла интенсивное блуждание динамической оси потока способствует разрушению начинающих формироваться излучин. Например, на р. Песчаной (приток верхней Оби) на участке от с. Солоновки до устья коэффициент стабильности русла Н.И. Маккавеева K_c уменьшается с 2,5 до 2,0 [Русловые процессы ..., 1996]; при этом параметры свободных излучин увеличиваются на 20-30% вниз по течению. Если сравнивать параметры свободных излучин р. Песчаной с аналогичными по водоносности реками бассейна средней Оби, имеющими более устойчивое русло и меньший сток наносов, то они окажутся в 2,5-3,0 раза больше, чем у последних. При этом размеры свободных излучин р. Песчаной существенно отличаются от тех, которые река имела на протяжении голоцена (когда формировалась пойма реки). Основываясь на параметрах стариц на пойме, концы которых замыкаются возле реки, т.е. они являются сравнительно молодыми образованиями, возникшими при последнем спрямлении излучин, разными исследователями было получено, что они в 1,5-3,0 раза меньше, чем у современных излучин. Это объясняется ими изменением условий руслоформирования и связывается, кроме снижения устойчивости русла, с увеличением максимальных расходов воды и стока наносов в результате сильного антропогенного воздействия на водосбор (интенсивная распашка, вырубка леса).

9.2. Региональный анализ распространения меандрирующих рек (на примере Северной Евразии)



В 80-е годы в научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ была создана карта «Русловые процессы на реках СССР» [1990]. В 1994 г. вышла в свет монография «Русловой режим рек Северной Евразии» [1994], которая представляет

собой обобщение материалов, полученных при натурных исследованиях на реках бывшего СССР и содержащихся в обширной литературе. Использование этих источников позволяет установить географические закономерности распространения извилистых русел.

На реках России и республик бывшего СССР (Северная Евразия) доля горных, полугорных и равнинных рек составляет, соответственно, 3,9, 21,6 и 74,5% (для рек длиной более 500 км). Если учитывать реки длиной менее 500 км, то соотношение горных, полугорных и равнинных рек изменится. Возрастет доля полугорных и особенно горных русел и уменьшится доля равнинных. Связано это с тем, что подавляющее большинство горных и полугорных рек имеет протяженность менее 500 км. Это становится очевидным при рассмотрении соотношений площадей, занимаемых бассейнами горных, полугорных и равнинных рек: 25, 26 и 49%, соответственно. Горных рек со свободными условиями развития русловых деформаций практически нет, а для полугорных эта величина составляет всего 4% от их общей длины. Таким образом, свободные условия развития русловых деформаций присущи, в основном, равнинным рекам: доля широкопойменных участков на них составляет 64,8% от общей длины всех равнинных рек, врезанных – 30,6%, адаптированных – 4,6%. Однако адаптированные формы русла в виде вынужденных или адаптированных излучин нередко встречаются и в широкопойменном русле. Но здесь они не составляют морфологически однородные участки, представляя собой отдельные излучины. Для 92,3% широкопойменного типа русла характерно свободное развитие русловых деформаций. Остальные 7,7% приходятся на врезанные русла, приуроченные к локальным выходам трудноразмываемых пород и, в основном, на вынужденные и адаптированные излучины.

Доля различных морфодинамических типов русел, образующихся на широкопойменных участках рек, представлена в таблице 43. Ее анализ показывает, что меандрирование (образование сегментных, прорванных и петлеобразных излучин) в условиях свободного развития русловых деформаций составляет 74% от длины всех рек. Из этого следует, что для широкопойменных русел именно процесс свободного меандрирования является наиболее типичным.

Если рассматривать реки Северной Евразии длиной менее 500 км и особенно малые реки, которые являются основной составляющей русловой сети любого бассейна, то очевидно, что доля извилистого русла на широкопойменных участках будет еще более весомой. К сожалению, специальных исследований данного вопроса по такой обширной территории не проводились. Отчасти это объясняется отсутствием картографического материала соответствующего масштаба, т.к. даже на картах масштаба 1:25000 реки первых порядков показаны очень схематично и форма русла по ним зачастую «не читается». Однако анализ имеющихся данных по русловым процессам на малых реках показывает, что они, имея широкопойменное русло, как правило, меандрируют на всем своем протяжении, кроме участков рек,

имеющих 1-2 порядок. Например, доля меандрирующего русла у широкопойменных притоков Оби и Иртыша составляет, соответственно, 83% и 95%. Вследствие малой водоносности при сравнительно небольших уклонах мощность потоков малых равнинных рек недостаточна для формирования других морфодинамических типов русла. Таким образом, можно предположить, что благодаря подавляющему преобладанию в общей протяженности русловой сети малых рек, доля меандрирующих русел в условиях свободного развития русловых деформаций (широкопойменные реки) на территории Северной Евразии превышает 80%.

Таблица 43. Распространение морфодинамических типов русел на широкопойменных участках рек Северной Евразии (для рек длиной более 500 км) [Русловой режим рек....., 1994]

Морфодинамический тип русла	%
Прямолинейный	14,8
Вынужденные и адаптированные излучины	3,8
Прорванные излучины	17,0
Сегментные и петлеобразные излучины	57,0
Простые сопряженные разветвления	4,2
Другие виды разветвлений	3,2

Анализ пространственного распространения свободномеандрирующих русел Северной Евразии показал, что их развитие, в первую очередь, определяется геолого-геоморфологическим строением территории. Огромные равнинные участки Восточной Европы и Западной Сибири сложены рыхлыми, легкоразмываемыми породами (отложениями) и характеризуются, в большинстве случаев, свободными условиями развития русловых деформаций. В пределах Среднесибирского плоскогорья и горных районов Восточной Сибири преобладают врезанные и адаптированные русла, соответствующие ограниченным условиям развития русловых деформаций. Дополнительным фактором, снижающим долю свободно меандрирующих русел в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке, является практически повсеместное распространение многолетней мерзлоты. Она создает благоприятные условия для развития других морфодинамических типов русла, в первую очередь разветвленных. Поэтому доля широкопойменных рек со свободно меандрирующим руслом в восточной части России существенно ниже, чем в западной.

В таблице 44 приведены данные по распространению свободномеандрирующего русла в бассейнах некоторых больших и крупнейших рек Северной Евразии. Ее анализ показывает, что абсолютно доминируют меан-

дрирующие реки в бассейне Оби, занимающем большую часть Западно-Сибирской низменности. Также велика их доля в бассейнах рек южной половины Европейской части бывшего СССР, в рельефе которой преобладают песчаные низменности. Однако наличие структурных и моренных возвышенностей, сложенных коренными осадочными породами и валунными суглинками, снижает долю широкопойменных русел в целом и, соответственно, меандрирующих рек по сравнению с Западной Сибирью. Бассейн Волги, охватывающий в том числе центр Русской равнины, характеризуется долей свободномеандрирующих русел меньше 50%, а в бассейне Северной Двины – их всего 25%. Еще меньше процесс меандрирования развит на реках бассейнов Лены, где свободные условия формирования русла характерны только в пределах Центральноякутской низменности, занимающей менее четверти площади бассейна, и особенно Енисея, в бассейне которого абсолютно преобладают условия ограниченного развития русловых деформаций.

Некоторые особенности морфологии русел рек и их деформаций связаны с условиями прохождения руслоформирующих расходов воды. Не оказывая влияние на распространение равнинных или горных рек, широкопойменных и врезанных русел, они проявляется в областях свободного развития русловых деформаций в условиях спрямления излучин, формирования пойменной многоорукавности, большей или меньшей доли разветвлений. Действительно, в субширотных зонах (в пределах Европейской территории региона), где для рек характерно прохождение Q_{ϕ} верхнего интервала, доля русел рек с прорванными излучинами среди всех свободномеандрирующих русел составляет 13%; в зоне, где Q_{ϕ} проходит в бровках поймы (являются руслонаполняющими), их доля составляет менее 4%. Относительно меньшая доля прорванных излучин на северных реках связана с залесенностью пойм, что препятствует их спрямлению на стадиях развитой и крутой сегментных излучин. Для Западной Сибири аналогичный показатель в зоне, где Q_{ϕ} проходит при затопленной пойме, составляет 17%, вне ее – 10%. В пределах Северо-Сибирской и Центральноякутской низменностей он возрастает до 20%, а на юге Дальнего Востока достигает своего максимума – более 50% (в пределах последнего Q_{ϕ} верхнего интервала проходит в летний паводочный период). При прочих равных условиях в зонах, где у рек Q_{ϕ} проходит при затопленной пойме, несколько возрастает доля разветвленных русел за счет сокращения меандрирующих, однако эта тенденция не столь очевидна, т.к. разветвленные русла в основном характерны для больших и крупнейших рек, и соотношение с меандрирующим определяется наличием в регионе последних.

В областях ограниченного развития русловых деформаций в равнинных условиях на долю врезанных русел приходится около 23% длины рек. Среди них абсолютно преобладают врезанные излучины, доля которых в этих областях составляет около 60%; на вынужденные и адаптированные излучины приходится 17% длины рек. Характерно, что излучин больше в

тех областях, где ограниченность русловых деформаций определяется скальными породами, и меньше – пластичными (мореной, морскими глинами и т.д.).

Размах водохозяйственного и гидротехнического строительства в XX века существенно видоизменил природные условия, при которых формировались русла многих рек. Нередко это приводит к существенной перестройке морфологии русел в целом, смене их морфодинамического типа. «Осветление потока» в нижних бьефах гидроузлов повышает эрозионную способность потока, благодаря чему русло начинает интенсивно врезаться. При этом в условиях зарегулированного стока происходит снижение руслоформирующих, среднемаксимальных расходов воды и трансформация других характерных значений расходов, что сопровождается изменением размеров излучин. А.В. Серебряков [1970] на нижнем Дону после создания Цимлянского водохранилища описал процесс уменьшения радиусов кривизны и шагов излучин по сравнению с незарегулированным режимом. Если русло раньше было разветвленным, то при врезании рукавов в нижних бьефах ГЭС оно часто трансформируется в извилистое, поскольку возле островов образуются изгибы, а расход воды сосредотачивается постепенно в одном, более глубоком рукаве (Обь в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС). Защитные противозерозионные и противопаводковые сооружения могут занимать иногда огромные по протяженности участки, как это имеет место на некоторых крупнейших реках Китая (Янцзы, Хуанхэ) [Чалов и др., 2000]; при этом искусственно ограничивается возможность поперечных смещений излучин. На среднем Амуре берегоукрепительные сооружения на вогнутых берегах излучин, особенно со стороны Китая, на десятки километров прекратили размыв, «консервируя» излучины и прекращая их дальнейшее развитие.

Таблица 44. Доля свободномеандрирующего русла в бассейнах больших и крупнейших рек Северной Евразии

Бассейн реки	Доля свободномеандрирующего русла, %
Волга	48
Днепр	62
Дон	54
Индигоирка	35
Лена	12
Обь	80
Печера	42
Северная Двина	25
Урал	70
Яна	35

Анализ участков рек разных порядков со свободномеандрирующим руслом, расположенных в различных природных зонах Северной Евразии, позволяет дать общую оценку развития русел этого типа. В таблице 45, приведены данные о распространении свободных излучин различных видов на реках, данные по которым использованы в книге. Общей особенностью является повсеместное преобладание среди них сегментных излучин (со степенью развитости $l/L < 2,00$). Их доля на реках различных порядков изменяется от 68% до 100%. На отдельных участках рек доля сегментных излучин может быть меньше (верхнее течение Урала, участки с заболоченной поймой на Немане, нижнее течение Днестра), но не опускается ниже 50%. На больших и крупнейших реках, которые имеют меандрирующее русло в среднем и нижнем течении (Амур, Вилкой, Хуанхэ), доля сегментных излучин превышает 90%.

Среди других типов излучин на реках Северной Евразии преобладают омеговидные (12%) и синусоидальные (6%). Наибольшее распространение излучины этих видов получили на малых реках и в верхних течениях больших и средних рек. На некоторых участках рек доля омеговидных и синусоидальных излучин достигает 25-30 %, при этом в ряде случаев преобладают последние (Чузик, Нюролька).

Однако при определенных условиях они типичны и для больших рек. На Днестре в нижнем течении распространены крутые синусоидальные (пальцеобразные) излучины. Для среднего и нижнего Иртыша характерно широкое распространение омеговидных и синусоидальных излучин, где их доля на отдельных участках превышает 25%.

Среди сегментных излучин наиболее распространены пологие. Они составляют в среднем 41% среди всех типов излучин и около 50% среди всех сегментных. Далее следуют сегментные развитые (соответственно, 27% и 33%) и сегментные крутые (13% и 16%) излучины. На реках на которых в качестве разновидностей сегментных излучин выделялись треугольные излучины, их доля редко превышала 1-2%.

На рис. 165 представлена диаграмма распределения излучин разных типов на меандрирующих реках Евразии. Она основана на осреднении данных по всем относительно бесприточным участкам рек (142 участка), приведенным в таблице 45, и достаточно полно отражает реальную картину на свободномеандрирующих руслах. Действительно, лишь на 20% участков большее распространение получили сегментные развитые излучины (это характерно для верхнего и среднего Урала, Тромъегана, Песчаной и Инсара), на 6% – сегментные крутые. Ни на одном из участков не было отмечено преобладания омеговидных, синусоидальных или иных типов излучин, хотя в сумме эти излучины иногда превышают долю преобладающей разновидности сегментных излучин.

Таблица 45. Распространение свободных излучин различных видов на реках Северной Евразии

Река	Сегментные										Омеговид- ные		Синусои- дальные		Заваленные		Прочие	
	Всего		Пологие		Развитые		Крутые		Треу- гольные									
	%	l/L	%	l/L	%	l/L	%	l/L	%	l/L	%	l/L	%	l/L	%	l/L		
Аган	83	1,48	36	1,27	32	1,52	15	1,88	0	---	15	2,68	1	2,70	0	--	1	1,54
Алей	76	1,48	31	1,29	31	1,51	14	1,85	0	---	23	2,45	1	2,14	0	---	0	---
Амур	90	1,29	81	1,25	9	1,66	0	---	0	---	10	2,12	0	---	0	---	0	---
Бакчар	77	1,49	35	1,30	27	1,54	13	1,89	2	1,65	11	2,80	8	2,83	1	2,75	3	1,77
Белая	82	1,41	48	1,23	22	1,54	12	1,86	0	---	14	2,27	4	3,03	0	---	0	---
Васюган	78	1,47	37	1,26	25	1,54	15	1,87	1	1,55	13	2,74	6	2,39	1	2,78	2	2,18
Вах	80	1,47	36	1,28	33	1,53	11	1,90	0	---	13	2,71	4	2,95	3	2,19	0	--
Виллой	100	1,31	79	1,25	16	1,47	5	1,79	0	---	0	---	0	---	0	---	0	---
Вычегда	85	1,43	44	1,27	28	1,52	12	1,82	1	1,58	8	2,70	4	2,64	1	3,11	2	1,88
Десна	83	1,42	46	1,25	27	1,54	10	1,85	0	---	13	2,43	4	2,56	0	---	0	---
Днестр	73	1,47	34	1,26	21	1,51	18	1,83	0	---	15	2,73	12	3,07	0	---	0	---
Инсар	85	1,45	43	1,29	31	1,53	11	1,82	0	---	11	2,33	4	2,36	0	---	0	---
Иртыш (верхний)	74	1,44	37	1,24	23	1,54	14	1,81	0	---	13	2,40	13	3,03	0	---	0	---
Иртыш (нижний)	81	1,44	38	1,28	31	1,49	12	1,83	0	---	12	2,64	7	2,75	0	---	0	---
Кеть	82	1,48	40	1,27	28	1,56	14	1,91	0	---	15	2,78	1	2,42	2	2,59	0	---
Конда	83	1,47	40	1,27	26	1,53	17	1,83	0	---	8	2,36	9	2,70	0	---	0	---
Неман	73	1,43	38	1,28	29	1,56	6	1,79	0	---	15	2,36	12	2,45	0	---	0	---
Нюролька	81	1,45	39	1,27	26	1,53	11	1,85	5	1,60	8	2,94	9	2,63	1	2,88	1	1,79
Ока	81	1,42	44	1,21	22	1,52	15	1,81	0	---	11	2,87	8	2,78	0	---	0	---

Продолжение таблицы 45.

Парабель	80	1,51	37	1,28	20	1,55	21	1,89	2	1,51	9	2,94	6	2,61	2	3,90	3	1,83
Песчаная	95	1,49	34	1,31	49	1,53	12	1,83	0	---	5	2,17	0	---	0	---	0	---
Припять	83	1,42	48	1,27	24	1,53	11	1,81	0	---	14	2,29	3	2,45	0	---	0	---
Северский Донец	79	1,47	36	1,29	31	1,54	12	1,82	0	---	9	2,42	12	2,58	0	---	0	---
Сысола	80	1,50	32	1,29	33	1,55	15	1,82	0	---	11	2,35	9	2,52	0	---	0	---
Тромъеган	77	1,45	39	1,27	28	1,55	10	1,82	0	---	19	2,79	4	2,69	0	---	0	---
Тым	78	1,49	34	1,26	27	1,54	15	1,89	2	1,86	16	2,75	2	3,50	1	2,89	3	1,58
Урал	76	1,50	31	1,28	28	1,55	17	1,82	0	---	17	2,50	7	3,01	0	---	0	---
Хуанхэ	95	1,41	64	1,30	18	1,50	13	1,83	0	---	0	---	5	2,10	0	---	0	---
Чарыш	76	1,39	41	1,24	31	1,55	4	1,75	0	---	24	5,75	0	--	0	--	0	--
Чая	86	1,49	38	1,25	28	1,53	19	1,89	1	1,65	8	2,55	5	3,23	2	2,95	0	--
Чижапка	73	1,56	25	1,28	25	1,54	20	1,92	3	1,59	13	2,89	10	2,57	1	2,01	3	2,14
Чузик	68	1,49	29	1,26	23	1,53	14	1,90	2	1,64	12	2,75	13	2,48	3	3,29	4	2,14
Чулым	74	1,50	32	1,25	22	1,56	19	1,86	1	1,36	16	2,67	5	2,85	3	2,85	2	2,26
Яна	80	1,51	34	1,32	32	1,56	14	1,82	0	---	15	2,77	5	2,81	0	---	0	---
В среднем	81	1,46	41	1,27	27	1,54	13	1,84	---	---	12	2,68	6	2,69	---	---	---	---

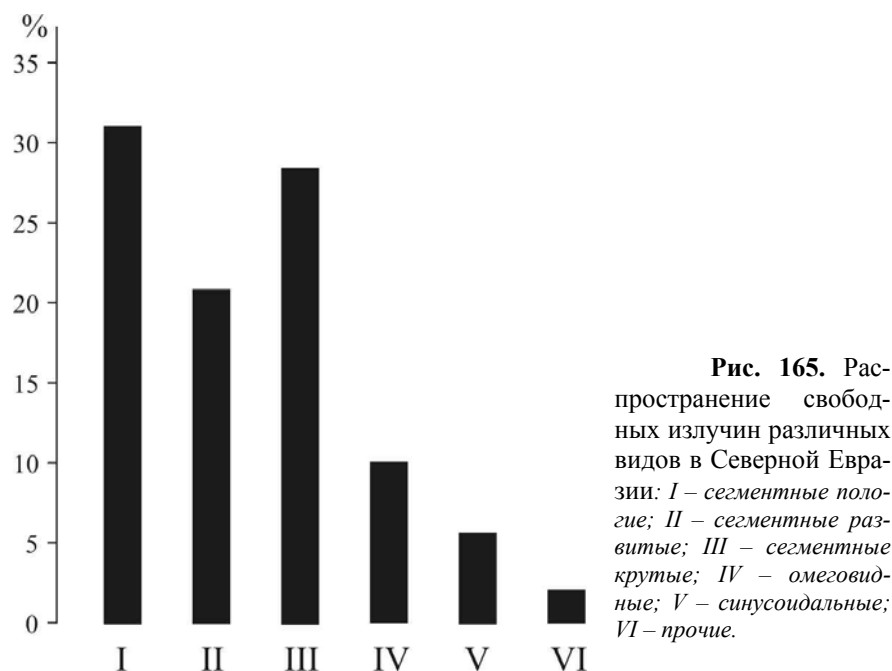


Рис. 165. Распространение свободных излучин различных видов в Северной Евразии: *I* – сегментные пологие; *II* – сегментные развитые; *III* – сегментные крутые; *IV* – омеговидные; *V* – синусоидальные; *VI* – прочие.

Подобный характер распределения излучин различных видов на реках – преобладание излучин, находящихся на первой стадии своего развития (пологой сегментной), не соответствует выводам И.В. Попова [1965]. По его мнению, большинство излучин должно находиться на более поздней стадии развития, начиная с сегментной крутой. Этот вывод был обоснован тем, что интенсивность развития излучин возрастает от начальной стадии к следующей, вследствие чего они быстро проходят стадию сегментной пологой излучины. Исходя из этого, если нет условий для спрямления (прохождение руслоформирующего расхода воды при затопленной пойме) и, соответственно, не формируются прорванные излучины (незавершенное меандрирование, по И.В. Попову), большинство излучин должно иметь омеговидную или синусоидальную форму, в ходе образования которой интенсивность русловых переформирований затухает и становится минимальной. На самом деле русло реки, представляя собой часть саморегулирующейся системы, стремится к минимизации затрат энергии на трение по длине русла и не может чрезмерно увеличивать свою длину. Поэтому трансформация одной сегментной излучины в петлеобразную компенсируется спрямлением других петлеобразных, что сопровождается активизацией русловых переформирований, т.к. в отличие от последовательной эволюции излучин от сегментной пологой в последующие стадии спрямление одной или нескольких наиболее развитых излучин носит импульсивный характер.

Отчасти это подтверждают исследования закономерностей изменения длин свободно меандрирующих рек, выполненные Э.А. Кондитеровой и И.В. Поповым [1970]. Ими было получено, что, несмотря на интенсивные русловые переформирования, характерные для свободномеандрирующего русла, его общая протяженность остается величиной постоянной, а удлинение излучин в ходе их деформаций сопровождается прорывами петель русла, вследствие чего общая длина русла остается неизменной. Поэтому, если на рис. 165 объединить все крутые излучины, то их доля оказывается близкой к доле сегментных пологих излучин. С другой стороны, пологие сегментные излучины характеризуются замедленными темпами поперечной трансформации; у них преобладает продольное смещение. Лишь на следующих стадиях темпы поперечных деформаций возрастают. Таким образом, исходя из закономерностей стадийного развития излучин на реках с широкопойменным руслом, должны преобладать пологие сегментные излучины.

В качестве показателя извилистости русла обычно применяют так называемый коэффициент извилистости – величину, равную отношению длины реки по руслу к длине прямой между верхней и нижней точками исследуемого участка. Этот метод определения кривизны русла дает неверную оценку извилистости, т.к. сам показатель не имеет физического смысла. Фактически он отражает извилистость речной долины, а не русла; последнее, в свою очередь, существенно различается по длине участка по характеру извилистости, может быть прямолинейными или разветвленными. На необъективность коэффициента извилистости указывал С.И. Пиньковский [1954], который предложил более достоверный метод оценки, используя кривые распределения элементарных участков русла по их относительной кривизне, считая, что в пределах участков кривизна русла является величиной постоянной. Этот метод, основанный на анализе всех излучин, отражает извилистость русла, но он достаточно субъективен в выборе участков.

Вполне правомерным представляется для оценки извилистости меандрирующего русла использовать осредненное значение степени развитости всех излучин, расположенных на участке. Этот способ применим в тех условиях, где свободное меандрирование является преобладающим морфодинамическим типом русла. В таблице 46 приведены средние значения степени развитости излучин $(l/L)_{cp}$ на всех исследуемых реках. Эта величина изменяется от 1,3 до 1,9, уменьшаясь в целом от малых рек к большим; на отдельных участках среднее значение $(l/L)_{cp}$ превышает 2,0. Это происходит, если на них достаточно широко распространены крутые омегавидные и пальцеобразные излучины со степенями развитости более 3,0-4,0. На таких участках показатель извилистости русла представляется завышенным, т.к. подобные излучины не являются преобладающими, но экстремально большие значения их степени развитости существенно влияют на величину показателя $(l/L)_{cp}$.

Таблица 46. Средние значения степени развитости $(l/L)_{cp}$ и показателя распространенности свободных излучин $(\Sigma l/l_{русла})$ на исследуемых реках

Река	$(l/L)_{cp}$	$\Sigma l/l_{русла}$	Река	$(l/L)_{cp}$	$\Sigma l/l_{русла}$
Аган	1,68	0,59	Ока	1,69	0,35
Алей	1,71	0,56	Парабель	1,76	0,55
Амур	1,37	0,33	Песчаная	1,52	0,61
Бакчар	1,76	0,66	Припять	1,57	0,54
Белая	1,59	0,27	Северский Донец	1,68	0,18
Васюган	1,71	0,52	Сысола	1,68	0,57
Вах	1,71	0,68	Тромъеган	1,74	0,48
Виллой	1,31	0,26	Тым	1,76	0,68
Вычегда	1,61	0,30	Урал	1,77	0,46
Десна	1,59	0,53	Хуанхэ	1,44	0,20
Днестр	1,85	0,48	Чарыш	1,72	0,37
Инсар	1,58	0,38	Чая	1,68	0,57
Иртыш (верхний)	1,77	0,42	Чижапка	1,86	0,58
Иртыш (нижний)	1,67	0,59	Чузик	1,85	0,64
Кеть	1,70	0,58	Чулым	1,80	0,64
Конда	1,65	0,38	Яна	1,79	0,29
Неман	1,70	0,51	Среднее:	1,68	0,47
Нюролька	1,69	0,46			

Более объективным показателем извилистости русла является среднее значение степени развитости излучин, преобладающих на меандрирующих реках, т.е. находящихся на стадии сегментных. Это значение $(l/L)_{cp, сегм}$ для разных рек имеет существенно меньшие различия, составляя в среднем 1,30-1,45 на крупных и крупнейших реках и 1,50-1,55 на малых реках. Влияние прямолинейных участков, которое должно проявляться в уменьшении показателя кривизны русла, в первом приближении компенсируется исключением из расчетов омегавидных, синусоидальных и других типов излучин. Отсюда показатель извилистости меандрирующих рек Северной

Евразии, равный среднему значению степени развитости сегментных излучин, $(l/L)_{\text{ср. сегм}}=1,46$.

Распространенность свободных излучин русла на реке в пределах соответствующих морфологически одиночных участков может быть охарактеризована долей длины русла, приходящейся непосредственно на излучины, т.е. суммарной длиной излучин по руслу, к общей протяженности участков рек $\Sigma l/l_{\text{русла}}$. Этот показатель характеризует распространенность свободных излучин как формы русла и позволяет классифицировать реки или их отдельные участки по степени развитости свободного меандрирования. Среднее значение $\Sigma l/l_{\text{русла}}$ для всех рек составляет 0,47, т.е. в среднем около 50% длины русел широкопойменных меандрирующих рек или их участков приходится на свободные излучины. Наиболее развито меандрирование на малых и ряде крупных рек (Вах, Чулым), где средняя величина этого показателя превышает 0,55 (табл. 46), а на отдельных участках достигает 0,70 и более. Показатель $\Sigma l/l_{\text{русла}}$ дает общую оценку развития меандрирования для реки в целом. Однако среднее значение его для реки в целом может существенно отличаться от частных показателей для отдельных участков. Например, на р. Белой для всей реки он равен 0,27, на р. Вычегде – 0,30, на р. Северском Донце – 0,18; в верхнем течении этих рек величина $\Sigma l/l_{\text{русла}}$ составляет, соответственно, 0,49; 0,47 и 0,28.

Основываясь на показателе $\Sigma l/l_{\text{русла}}$ возможно разделение русел рек или их участков по развитости свободного меандрирования. Предлагается выделять слабо-, умеренно-, сильно- и очень сильномеандрирующие русла, которым соответствует определенный диапазон значений этого показателя (табл. 47). Среди исследованных рек, данные о которых приведены в табл. 45, очень сильно меандрируют 18%, сильно меандрируют – 49%, умеренно меандрируют – 30% и только одну реку (Северский Донец) можно отнести к слабо меандрирующим.

Таблица 47. Классификация русел рек по развитости процесса меандрирования в пределах морфологически однородных участков

Характер развитости меандрирования	Значения показателя $\Sigma l/l_{\text{русла}}$	Исследованные реки
Слабое	<0,20	Северский Донец
Умеренное	0,20-0,40	Амур, Белая, Вилкой, Вычегда, Инсар, Конда, Ока, Хуанхэ, Чарыш, Яна
Сильное	0,40-0,60	Аган, Алей, Васюган, Десна, Днестр, Иртыш, Кеть, Неман, Нюролька, Парабель, Припять, Сысола, Тромъеган, Урал, Чая, Чижалка
Очень сильное	>0,60	Бакчар, Вах, Песчаная, Тым, Чузик, Чулым

Применение в качестве показателя извилистости предлагаемого среднего значения развитости сегментных излучин $(I/L)_{ср.сегм}$ возможно только при широком распространении свободных излучин на исследуемом участке, т.е. на сильно- и очень сильномеандрирующих реках. Для рек с умеренным и слабым меандрированием его значение статистически необоснованно и может быть завышено из-за широкого распространения на таких реках прямолинейных вставок или, наоборот, занижено, если излучины прерываются другими формами русла, извилистость которых (например излучины рукавов) не учитывается предлагаемым показателем.

9.3. Характеристика меандрирования рек в бассейне реки (на примере верхней и средней Оби)



Бассейны притоков верхней и средней Оби занимают юго-восточную часть (это почти четверть) Западной Сибири, а также охватывает горы и предгорья юга Сибири – Алтай, Салаирский кряж, Кузнецкий Алатау, Саяны, в пределах которых располагаются истоки Оби (Бии, Катунь), Томи, Чулыма и их притоков в верхнем течении. За исключением горных районов бассейн сложен легкоразмываемыми лессовидными и песчаными отложениями, обуславливающими в равнинной части абсолютное преобладание свободных условий развития русловых деформаций. Лишь в бассейне Томи, занимающим Кузнецкую котловину и оконтуренном до выхода в пределы Западно-Сибирской низменности горными сооружениями Салаира и Кузнецкого Алатау, велика доля территории с ограниченными условиями развития русловых деформаций. В предгорной зоне, особенно по юго-западной окраине Салаира и в Кузнецкой котловине, развиты сравнительно узкие долины, трудноразмываемые борта которых обуславливают формирование здесь адаптированного русла.

Реки бассейна многоводны, характеризуются алтайским и западно-сибирским типами гидрологического режима с высоким растянутым половодьем, связанным с общим направлением стока рек с юга на север регулирующей ролью заболоченных низменностей Западной Сибири или распространением снеготаяния в горах, на которое накладывается выпадение дождей.

Для всего бассейна среди равнинных рек характерно преобладание меандрирующих русел (табл. 48); исключением является главная река бассейна – Обь, на которой излучины встречаются лишь на отдельных участках, которые наиболее распространены в среднем течении ниже слияния с Томью, и Томь, на которой велика доля врезанного и адаптированного русла.

Для свободно меандрирующих судоходных рек Обского бассейна²

²Дальнейший анализ дается для бассейна в административном понимании, охватывающим только судоходные реки; для верхней и средней Оби он ограничен п. Соснино (ниже устья р. Кети).

характерно повсеместное преобладание среди них сегментных излучин (что является общей закономерностью не только для рек Западной Сибири, но и для всех свободных излучин Северной Евразии) (табл. 45). Их доля на всех реках изменяется от 73% до 95%, составляя в среднем 79%.

Среди других типов свободных излучин на реках Обского бассейна преобладают омеговидные (13%) и синусоидальные (5%). На остальные разновидности излучин приходится не более 4%. Наибольшее распространение излучины этих типов получили на малых реках с залесенной и заболоченной поймой (Чузик, Чижанка), что способствует развитию омеговидных и синусоидальных излучин, при этом на ряде рек преобладают последние (Чузик, Нюролька).

Таблица 48. Распространение морфодинамических типов русла в бассейне верхней и средней Оби, на Оби и Томи (% от длины рек >500 км)

Бассейны, река	Горные и полугорные	Врезанные		Адаптированные	Широкопойменные		
		Излучины	Прочие		Излучины	Разветвления	Прямолинейное
Притоки верхней и средней Оби без Томи	7	3	0,5	2	84	0,5	3
Обь	---	---	---	5	34	43	18
Томь	17	---	20	4	8	---	51

Некоторые различия отмечаются в распространении и степени развитости излучин алтайских рек (Песчаная, Алей, Чарыш) по сравнению с другими реками бассейна. Они характеризуются большей долей развитых сегментных излучин, меньшей долей крутых, причем последние характеризуются меньшими значениями I/L . На этих реках отсутствуют или встречаются в единичном количестве синусоидальные, заваленные и прочие разновидности излучин

Среди всех рек выделяется русло р. Песчаной. На ней сегментные излучины занимают доминирующее положение (95%), причем преобладают сегментные развитые (49%). Малая устойчивость русла приводит к формированию слабоустойчивых в плане изгибов русла, превышающих по своим параметрам формы, соответствующие показателям водоносности. При этом излучины на реках с неустойчивым руслом не могут существовать длитель-

ное время и «разрушаются» при прохождении мощных половодий, не успевая достичь омеговидной или синусоидальной формы.

В таблице 49 приведены параметры свободных излучин рек Обско-го бассейна, по большинству из них – по бесприточным участкам.

На реках бассейна средней Оби также развита пойменная многорукавность. Особенно она типична для рек Ваха, Васюгана, Кети, Тыма. Иногда русла этих рек разделяются на два равноценных рукава, которые самостоятельно развиваются, интенсивно меандрируя (пойменно-русловые разветвления). Однако со временем один из рукавов, наиболее длинный, постепенно отмирает, и весь расход воды концентрируется в более коротком. Происходит это, видимо, при достижении критической разницы между длинами двух рукавов, после чего продолжает развиваться только гидравлически выгодный (более короткий) рукав. В бассейне верхней Оби такие разветвления с меандрирующими рукавами встречаются только на Чарыше.

На реках бассейна средней Оби спрямление развитых сегментных излучин происходит, в большинстве случаев, не в результате формирования прорванных излучин, а путем отторжения побочной от выпуклых берегов в вершинах излучин. Наиболее характерно это для Васюгана, Ваха, Кети, Тромъегана, Тыма, нижнего течения Агана, чему способствует общее снижение устойчивости русла, уменьшение уклонов и увеличение стока влекомых наносов. Формирование прорванных излучин на этих реках происходит достаточно редко, что связано, в частности, с малой обеспеченностью Q_{ϕ} верхнего интервала (менее 1%) и залесенностью поймы. В некоторых случаях излучины могут достигать больших значений степени развитости, не формируя спрямляющей протоки и не имея тенденции к отторжению от выпуклых берегов побочной. Особенно это характерно для малых рек (Бакчар, Чижалпа, Чузик), у которых число излучин с $l/L > 2,00$ составляет около 30% (на остальных реках бассейна средней Оби эта величина составляет не более 19%). Излучины здесь достигают иногда степени развитости $l/L = 6,00-7,00$, причем эти реки отличаются наибольшим разнообразием форм свободных излучин. Достаточно часто на малых реках формируются крутые «макроизлучины» – излучины, параметры которых в несколько раз превышают характерные для данного участка реки. Так, на Бакчаре (39-41 км от устья) не происходит спрямления серии свободных излучин, несмотря на то, что ширина шпоры на общем изгибе русла не превышает 20-30 м (при длине по руслу около 2 км) (рис. 166).

В большой мере разнообразие условий развития меандрирующих русел в бассейне Оби обусловило различия в интенсивности их деформаций. На реках Алтайского края на излучинах размывы берегов составляют 9 м/год (Песчаная), 17 м/год (Ануй), достигая 60 м/год в низовьях Чумыша.

Реки, впадающие в Обь в центральной части Западно-Сибирской низменности по левобережью и дренирующие болота Васюганья (Чая, ПарABELь, Васюган), отличаются малыми уклонами и слабым транспортом руслообразующих наносов.

Таблица 49. Характеристика излучин рек Обского бассейна

Река	Участок		Расход воды			Кол-во излучин	Параметры излучин, м							Расстояние от устья, км	Границы (устья притоков)
	№	Площадь водосбора	$Q_{ср}$, м/с	$Q_{макс}$, м/с	Q_{30} , м/с		L	h	l	r	B_p	l/L	r/h		
Бакчар	I	6610	19	143	73	250	230	110	360	105	30	1,76	1,05	142-0	устье р. Галки – устье
Васюган	I	4000	17	162	62	71	200	100	340	90	30	1,90	0,86	873-832	с. Майск – р. Кын
	II	5500	24	223	87	205	290	140	450	140	35	1,68	1,11	832-661	р. Кын – р. Четрила
	III	12500	60	350	230	8	520	220	730	230	55	1,52	1,11	661-646	р. Четрила – р. Ягыльях
	IV	17000	81	477	315	12	700	310	1100	320	60	1,50	1,12	646-625	р. Ягыльях – р.Егольях
	V	23000	115	600	410	73	660	330	1030	300	100	1,69	1,18	625-481	р.Егольях – р. Катыльга
	VI	31700	164	682	586	156	660	290	970	330	125	1,75	1,14	481-190	р. Катыльга – р.Нюролька
	VII	40000	216	800	715	23	860	320	1280	400	150	1,64	1,19	190-115	р. Нюролька – р. Чижалка
	VIII	58300	325	1100	987	23	1240	570	1860	610	180	1,48	1,32	115-0	р. Чижалка – устье
Кеть	I	38400	248	1190	913	46	740	360	1140	340	100	1,82	1,07	491-399	с. Максимкин Яр – р. Орловка
	II	54000	360	1540	1200	53	880	490	1520	420	110	1,77	1,04	399-274	р. Орловка – р. Лисица
	III	71500	500	1780	1490	74	1280	620	1970	600	160	1,58	1,19	274-0	р. Лисица – устье
Нюролька	I	5000	32	150	120	56	230	110	340	100	40	1,80	0,94	208-162	208 км – устье
	II	8040	51	239	190	155	290	140	450	130	55	1,65	1,05	162-0	р. Тухсигат – устье
Парабель	I	17900	75	380	266	176	440	220	680	190	60	1,76	0,96	224-0	224 км – устье
Песчаная	I	4720	32	316	84	38	660	320	1020	330	250	1,51	1,17	146-79	146 км – р. Точилка
	II	5190	36	350	92	38	840	380	1270	410	320	1,54	1,16	79-0	р. Точилка – устье

Продолжение таблицы 49.

Тым	I	18000	142	720	450	191	620	280	930	290	80	1,81	1,04	560-267	с. Ванжилъ-Кынак - р. Польша
	II	28000	220	920	700	145	800	390	1250	360	120	1,70	1,06	267-0	р. Польша – устье
Чая	I	16500	53	338	175	46	330	150	470	130	50	1,54	1,22	171-131	р. Бакчар, р. Парбиг – р. Нюрса
	II	18800	60	384	200	17	380	170	560	150	60	1,69	1,05	131-113	р. Нюрса – р. Икса
	III	25000	80	508	266	78	420	200	640	180	70	1,76	1,01	113-10	р. Икса – 10 км
Чарыш	I	20700	194	1150	620	29	790	380	1230	350	110	1,55	0,91	97-0	с. Усть-Камышинка – устье
Чижалпа	I	5000	30	150	110	84	230	100	350	100	50	1,82	1,03	275-215	р. Колга – р. Еглиак
	II	9000	48	273	195	197	360	170	560	160	60	1,87	0,91	215-25	р. Еглиак – р. Салат
	III	13500	72	410	290	17	570	280	890	240	90	1,92	0,82	25-0	р. Салат – устье
Чузык	I	8000	30	200	105	368	210	100	320	90	30	1,85	0,91	209-0	с. Пузино – устье
Чулым	I	39000	228	1110	800	56	1100	530	1720	640	-	1,73	1,33	1146-938	с. Красный завод – р. Кемчуг
	II	54000	340	1620	1220	182	1200	650	2090	630	120	1,92	0,97	938-376	р. Кемчуг – р.Кия
	III	93000	580	2800	2100	9	1600	680	2500	700	160	1,83	0,90	376-339	р. Кия – р.Яя
	IV	109000	663	3160	2410	32	1800	880	2840	850	190	1,67	1,18	339-209	р. Яя – р. Чичка-Юл
	V	118000	710	3360	2590	5	1760	900	2800	800	200	1,42	1,26	209-172	р. Чичка-Юл – р. Улу-Юл
	VI	132000	770	3680	2810	34	2070	1150	3700	1000	190	1,45	1,32	172-0	р. Улу-Юл – устье

Притоки правобережья Оби (Чулым, Кеть, Тым) отличаются большими уклонами и большим стоком наносов. Это определяет относительно меньшие скорости деформации излучин левобережных притоков. Скорости размыва берегов на них обычно не превышают 1 м/год. Излучины правобережных притоков Оби характеризуются более высокими темпами размыва вогнутых берегов – до 5-10 м/год.

В условиях ограниченного развития русловых деформаций извилистые русла в бассейне Оби представлены врезанными излучинами. Они формируются в узких, беспойменных долинах. Направление течения и параметры излучин зависят от особенностей геологических структур. Это в основном реки, прорезающие выходы скальных горных пород (Бия, Катунь, верхняя Томь, верховья Чулыма). Врезанные излучины не имеют столь широкого распространения среди остальных морфодинамических типов русла с ограниченными условиями развития, как свободные излучины в широкопойменных условиях, и носят эпизодический характер. По своим формам врезанные излучины аналогичны свободным, за исключением сильно развитых модификаций, которые встречаются у первых гораздо реже. Характерно, что врезанное извилистое русло является типичным для средних и крупных рек (Чулым, Томь), тогда как для малых горных и полугорных рек более свойственны прямолинейные русла.

В местных расширениях долин в условиях ограниченного развития русловых деформаций и в предгорьях формируются адаптированные и вынужденные излучины. Они широко распространены при выходе рек на равнину (Бия, Катунь, Чулым, левобережные притоки верхней Оби). Они также встречаются в широкопойменных условиях при подходе русла к одному из коренных берегов, либо при локальных сужениях речной долины. Поэтому они достаточно часто встречаются на всех реках бассейна.

На верхней Оби свободные излучины встречаются ниже устья Чарыша и участками ниже г. Барнаула (начиная с 280 км от слияния Бии и Катуни), где они образуют комбинации с вынужденными и адаптированными излучинами. Лишь выше устья Чумыша и между с. Шелаболихой и г. Камнем-на-Оби они составляют преобладающий тип русла. Выше г. Камня-на-Оби, где русло проходит в правобережной части долины, свободные излучины чередуются с вписанными, которые формируются при размыве песчаных берегов, представленных террасами Оби. Скорость отступления последних превышает иногда 30 м/год (Тарадановская излучина).

В таблице 50 представлены параметры излучин Оби, являющиеся типичными для верхней (Ереснинская, Малышевская, Тарадановская), участков средней Оби – Новосибирск – устье Томи (Каштаковская) и участка – устье Томи-Соснино (Парабельская, Колмогорская). Для всех излучин Оби, вне зависимости от их положения по длине реки, характерно отсутствие устойчивой связи с показателями водоносности, что характерно для крупнейших рек.

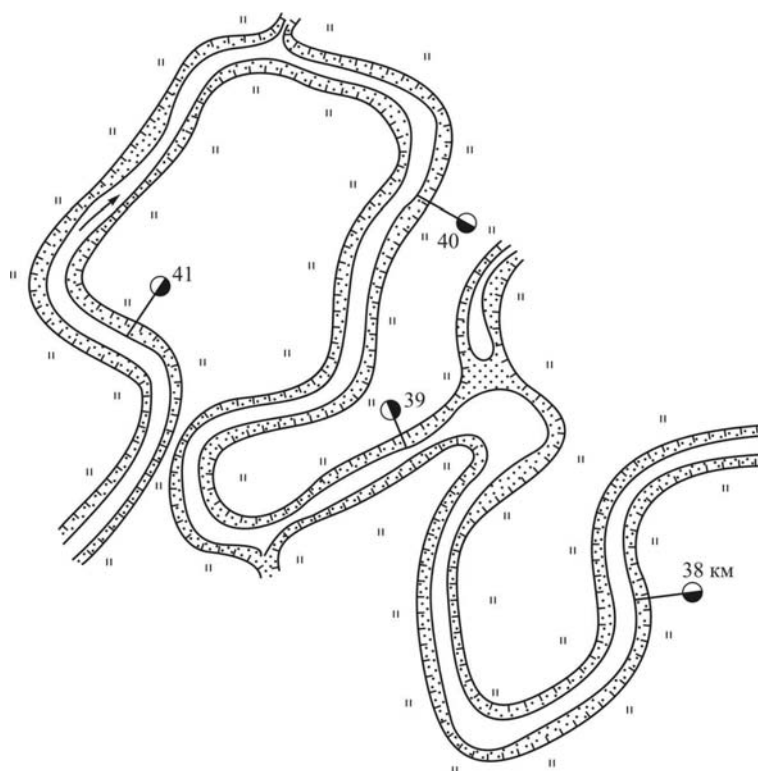


Рис. 166. Крутая макроизлучина в нижнем течении р. Бакчара (бассейн средней Оби).

Таблица 50. Параметры некоторых излучин Оби

Название излучины	L , м	h , м	l , м	r , м	l/L	r/h
Ереснинская	3250	1630	4750	1650	1,46	1,01
Малышевская	2380	1500	4380	1450	1,84	0,97
Тарадановская	2550	2830	6380	1400	2,50	0,50
Каштаковская	1750	650	2000	1350	1,14	2,08
Парабельская 1	3900	4800	9600	2100	2,46	0,44
Парабельская 2	8100	4500	13500	4500	1,67	1,00
Колмогорская	9000	4200	14400	4800	1,60	1,14

Ниже устья Томи, где меандрирующее русло является основным морфодинамическим типом, развитие излучин осложняется образованием

островов у выпуклых берегов, что определяет вероятность их спрямления еще на стадии сегментной развитой. На тех участках Оби, где развиты пойменно-русловые разветвления, меандрирование является характерным видом деформаций основных рукавов. Таковы рукава Рассказихинского разветвления верхней Оби, правая Каштаковская протока Вороновского разветвления и др.

9.4. Оценка русловых деформаций на больших реках с меандрирующим руслом (на примере Оки и Вычегды)



Развитие форм русла и их смещение в той или иной мере сопровождаются размывами берегов. Наиболее интенсивно они проявляются на реках с широкопойменным руслом. Коренные берега, сложенные более устойчивыми к размыву породами, отступают очень медленно или являются практически стабильными. Наибольшие скорости размыва берегов наблюдаются в процессе развития свободных и вписанных излучин. Поэтому, величина скорости отступления вогнутых берегов в вершинах излучин принимается обычно в качестве характеристики интенсивности горизонтальных русловых деформаций на конкретных участках рек [Попов, 1965; Маккавеев, Чалов, 1986]. На реках с прямолинейным и разветвленным типами русла размыв берегов происходит менее интенсивно, локализован в пространстве и часто носит периодический характер. Размер реки также влияет на скорости деформаций, увеличивающиеся от малых рек к большим. Однако эта зависимость имеет нелинейный характер и различается для разных рек. Скорости размыва берегов связаны с высотой поймы и, как показывают исследования, уменьшаются у низких пойм. Большую роль в этом процессе играет характер пойменной растительности, состав отложений размываемых берегов и многие другие факторы.

Для определения скоростей размыва берегов, наряду со специальными наблюдениями, часто применяют метод сопоставления картографических материалов за разные годы. Подобный анализ был проведен для Оки (устье р. Мокши – устье) и нижней Вычегды (от г. Сыктывкара до устья): сопоставлялись лоцманские карты 1928 и 1976 гг – для Оки, 1931, 1946, 1960 и 1985 гг – для Вычегды.

Ока в верхнем течении протекает по Среднерусской возвышенности, в нижнем – по Окско-Донской и Мещерской низменностям. В среднем течении русло Оки пересекает Окско-Цинский вал. В результате здесь между устьями рек Гуся и Мокши широкопойменное русло прерывается участком врезанного. Выше г. Муром на участке длиной 34 км и на 60-километровом участке перед слиянием с Волгой русло Оки прямолинейное, устойчивое, расположенное вдоль правого коренного берега. На остальных участках среднего и нижнего течения русло Оки свободно меандрирует.

По длине реки в связи с увеличением водоносности скорости размывов берегов на излучинах изменяются, причем наибольшие их средние значения зафиксированы на излучинах между устьями рек Мокши (точнее – ниже г. Муром) и Клязьмы (табл. 51). Характерно, что поперечные скорости всюду несколько больше продольных, а ниже устья Клязьмы (85-60 км) продольное смещение излучин вообще не было отмечено. Это – следствие широкого распространения на Оке крутых сегментных и петлеобразных излучин. Размывы берегов сосредотачиваются в основном у вогнутых берегов и на крыльях излучин, изменяясь для поперечной составляющей от 3,0 до 4,9 м/год и продольной – от 2,7 до 4,6 м/год.

Таблица 51. Средние значения скоростей размыва берегов на участках свободно меандрирующего русла р. Оки

Участок	Скорости размыва берегов, м/год	
	поперечные	продольные
Устье р. Москвы – устье р. Гуся (853 км – 425 км)	3,0	2,7
Участок ниже устья р. Мокши (355 км – 338 км)	4,9	4,6
г. Муром – устье р. Клязьмы (304 км – 85 км)	4,4	3,1
Устье р. Клязьмы – г. Дзержинск (85 км – 60 км)	4,0	0

Для свободных излучин было проведено сравнение средних значений степени развитости l/L и показателя формы излучин r/h на участках, где определялись размывы берегов за период 1928-1976 годы. Как видно из таблицы 52, средние значения l/L по всей реке несколько увеличились, что привело к увеличению их кривизны (значения показателя r/h уменьшились). Одновременно на разных участках произошло спрямление ряда излучин.

Таблица 52. Изменение средних значений l/L и r/h излучин Оки за период 1928-1976 гг

Участок	1928 г		1976 г	
	l/L	r/h	l/L	r/h
Устье р. Москвы – устье р. Гуся (853 км – 425 км)	1,92	0,98	1,96	0,83
Участок ниже устья р. Мокши (355 км – 338 км)	1,43	1,22	1,44	1,02
г. Муром – устье р. Клязьмы (304 км – 85 км)	1,31	1,60	1,32	1,40
Устье р. Клязьмы – г. Дзержинск (85 км – 60 км)	1,21	2,29	1,26	1,75

Также был проведен сравнительный анализ изменения других параметров свободных излучин Оки (шага L , стрелы прогиба h , длины l и радиуса кривизны r) за тот же период. Так как параметры излучин связаны с показателями водоносности, то анализ проводился для трех участков, на протяжении которых эти показатели практически постоянны: 1) устье р. Москвы – устье р. Прони; 2) устье р. Прони – устье р. Мокши; 3) устье р. Мокши – устье р. Клязьмы. Все излучины были разделены на три группы по величине степени развитости l/L : 1) от 1,15 до 1,58; 2) от 1,58 до 2,00; 3) более 2,00. Первые две группы объединяют все сегментные излучины, третья группа включает излучины остальных видов (табл. 53). Путем деления на временной интервал (48 лет) были определены средние скорости изменения параметра (в м/год). Знак минус (-) означает, что с 1928 по 1976 год произошло уменьшение средней величины параметра на этом участке.

Наиболее интенсивно изменяются параметры излучин первой группы. Это обусловлено максимумом эрозионной и транспортирующей способности потока в этом интервале значений l/L . Во второй группе излучины постепенно трансформируются в петлеобразные или синусоидальные, что сопровождается уменьшением интенсивности деформаций. Наименьшие изменения параметров отмечены для излучин третьей группы. Однако здесь в случаях, если излучина становится крутой омеговидной с $l/L = 3,00 - 3,50$, на ней могут вновь активизироваться русловые деформации за счет развития на крыльях пологих сегментных излучин.

Истоки *Вычегды* расположены в пределах Тиманского края, где река имеет врезанное русло. Выходя на равнину, Вычегда протекает среди широкой, местами сильно залесенной поймы, русло свободно меандрирует. Ниже слияния с р. Сысолой долина Вычегды приобретает четковидное строение. Сужения, где ширина поймы составляет 2-3 км, чередуются с расширениями до 9 км. На этом участке меандрирующее русло перестает быть преобладающим морфодинамическим типом, и его доля от общей длины реки в нижнем течении составляет всего 30 %; на вынужденные и адаптированные излучины приходится 10 %. Для сравнения: в целом в бассейне Вычегды доля свободных излучин составляет 64 %, вынужденных и адаптированных – 7 %. Если в верхнем течении русло можно характеризовать как сильно меандрирующее (соотношение $\Sigma l/l_{\text{русла}} = 0,47$), то в нижнем течении (от устья Сысолы) оно является умеренномеандрирующим ($\Sigma l/l_{\text{русла}} = 0,23$).

Увеличение водоносности реки в нижнем течении после слияния с такими крупными притоками, как Сысола и Вымь, отражается на увеличении параметров свободных излучин. Ширина пояса меандрирования становится соизмеримой с шириной долины в ее сужениях. Поэтому формирование свободноеандрирующего русла возможно только в расширениях дна долины. Это объясняет большее распространение вынужденных и адаптированных излучин на нижнем участке Вычегды.

Таблица 53. Изменение параметров свободных излучин р. Оки, находящихся на разных стадиях развития с 1928 по 1976 год (числитель, в метрах) и в среднем за год (знаменатель, м/год)

Степень развитости	$l/L = 1,15-1,58$					$l/L = 1,58-2,00$					$l/L > 2,00$				
Участок	%	L	h	l	r	%	L	h	l	r	%	L	h	l	r
Устье р. Москвы – устье р. Прони (853-615 км)	33	$\frac{120}{-2,5}$	$\frac{20}{0,4}$	$\frac{170}{3,5}$	$\frac{125}{-2,6}$	30	$\frac{50}{-1,0}$	$\frac{30}{0,6}$	$\frac{110}{2,3}$	$\frac{40}{-0,8}$	37	$\frac{0}{0}$	$\frac{40}{0,8}$	$\frac{60}{1,3}$	$\frac{60}{-1,3}$
Устье р. Прони – устье р. Мокши (615-351 км)	54	$\frac{100}{2,1}$	$\frac{95}{2,0}$	$\frac{190}{4,0}$	$\frac{30}{-0,6}$	38	$\frac{60}{1,3}$	$\frac{10}{0,2}$	$\frac{100}{2,1}$	$\frac{0}{0}$	8	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{40}{0,8}$	$\frac{10}{-0,2}$
Устье р. Мокши – устье р. Клязьмы (351-86 км)	100	$\frac{10}{0,2}$	$\frac{60}{1,3}$	$\frac{80}{1,7}$	$\frac{150}{-3,1}$	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-

Меандрирующее русло нижней Вычегды сопровождается пойменной многорукавностью (полоями, отшнуровавшимися от русла и проходящих в глубине пойменных массивов на большом расстоянии от него). Этому благоприятствует прохождение руслоформирующего расхода воды верхнего интервала достаточно большой обеспеченности (3,2%), а также слабая залесенность и преимущественно луговой характер поймы.

Результаты сопоставления лоцманских карт нижней Вычегды за 1946 и 1982 годы показали, что прямолинейные участки русла являются достаточно устойчивыми, хотя в них перемещаются расположенные в шахматном порядке побочни, вызывающие локальные размывы пойменных берегов со скоростью до 20 м/год. Фронт размыва смещается вслед за побочнями, поэтому трансформации излучин динамической оси потока в сегментную излучину не происходит. На участках со свободномеандрирующим руслом скорости размыва берегов примерно одинаковы для всей нижней Вычегды. В поперечном направлении бровки пойменных берегов смещаются в среднем на 12 м/год, в продольном – на 10 м/год. При надвигении подвижных побочней перекатов на побочни, расположенные у выпуклых берегов, размывы вогнутых берегов активизируется, достигая 25-30 м/год.

Анализ скоростей трансформации отдельных параметров свободных излучин нижней Вычегды (табл. 54) показал, что они выше, чем на Оке, хотя общие закономерности изменений такие же. Степень развитости свободных излучин за исследуемый период увеличилась с 1,28 до 1,37 (без учета спрямившихся излучин), что выше аналогичных показателей на Оке. При этом шаг излучин L уменьшился на 20 м (0,6 м/год), радиус кривизны r на 280 м (7,8 м/год), стрела прогиба h увеличилась на 130 м (3,6 м/год), а длина излучин l – на 260 м (7,2 м/год). При этом приведенные данные касаются только излучин со степенью развитости l/L менее 1,58, т.к. более развитые излучины на нижней Вычегде встречаются очень редко (в 1982 г только две излучины имели $l/L > 1,58$). В случае, если излучина достигает более крутой формы, то активизация русловых деформаций за счет развития вторичных излучин на их крыльях на нижней Вычегде наблюдается на более ранней стадии (при l/L около 2,00), чем на Оке.

Спрявление излучин на нижней Вычегде происходит преимущественно на стадии сегментной крутой в результате образования и развития через шпору пойменных протоков (полоев) (рис. 167А). В период с 1931 по 1982 годы на участке от г. Сыктывкара до устья таким образом спрямилось три излучины: перед устьем Сысолы и у с. Часово – между 1946 и 1960 гг, у с. Выемково – между 1960 и 1982 гг (табл. 54). Все излучины спрямляются при достижении ими степени развитости l/L около или несколько больше 2,00. В отдельных случаях при антропогенном вмешательстве может нарушаться естественный процесс развития излучины. В качестве примера можно привести развитие крутой омегавидной излучины у п. Эжва. К 1982 г степень развитости этой излучины составляла 2,83, что является максимально большим значением для свободных излучин не только в нижнем

течении, но и на всей Вычегде. Спрямяющий рукав – полый Серт – сформировался еще в начале XX века, средние глубины в нем соизмеримы с глубинами в основном русле, но переходу в него основного расхода воды препятствуют причальные стенки речного порта и берегоукрепительные сооружения, которые отклоняют поток в старое русло (рис. 167Б).

Таблица 54. Изменение параметров излучин нижней Вычегды с 1931 г до момента их спрямления

Годы	Параметры				
	L , м	h , м	l , м	r , м	l/L
Излучина выше устья р. Сысолы					
1931	1600	475	2700	750	1,69
1946	1450	950	2675	750	1,85
Излучина у с. Часово					
1931	2000	850	3150	1000	1,58
1946	1850	1375	3750	650	2,03
Излучина у с. Выемково					
1931	2700	1250	4400	1400	1,63
1946	2800	1600	4800	1250	1,71
1960	2650	1850	5500	1300	2,08
Излучина у п. Эжва					
1931	2250	1600	5100	1300	2,27
1946	2850	2200	6250	1400	2,19
1960	2775	2650	7050	1400	2,54
1982	2725	3000	7700	1300	2,83

В ряде случаев спрямлению излучин способствуют дноуглубительные работы, проводимые для улучшения судоходства. Разработка капитальных прорезей вдоль формирующихся протоков через шпору ускорила процесс спрямления излучин у с. Часово и у г. Сольвычегодска, причем в последнем случае необходимость спрямления была вызвана угрозой разрушения памятника архитектуры XV века – Благовещенского собора, расположенного на правом вогнутом берегу реки.

Если у выпуклого берега находится остров, то спрямление излучин нижней Вычегде может осуществляться благодаря развитию протоки между островом и выпуклым берегом (рис. 168). Благодаря такому спрямлению, степень развитости вынужденной излучины у с. Курчим в период 1931-1946 гг уменьшилась с 1,75 до 1,62.

На нижней Вычегде широко распространено спрямление излучин динамической оси потока, огибающей стабильные побочни в относительно прямолинейном русле. Такие побочни обычно располагаются возле коренных, реже высоких пойменных берегов. Поток, прижимаясь к высокому берегу, отторгает побочень переката, спрямляя тем самым изгиб потока.

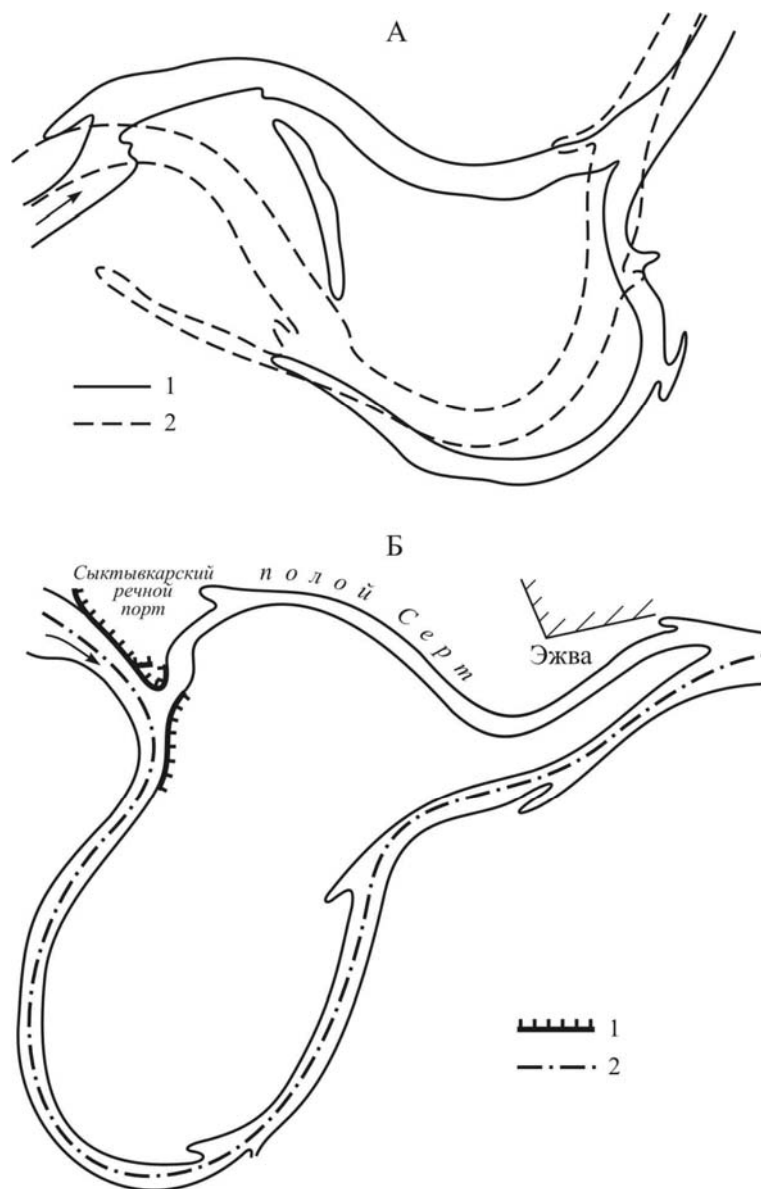


Рис. 167. Спрямление излучин на нижней Вычегде путем формирования в шпоре пойменной протоки (полая): А – осуществленное (у с. Выемково) положение русла в 1946 г (1) и в 1982 г (2); Б – предотвращенное гидротехническими мероприятиями (у пос. Эжва): 1 – причальные стенки порта и берегоукрепительные сооружения; 2 – положение главного течения реки.

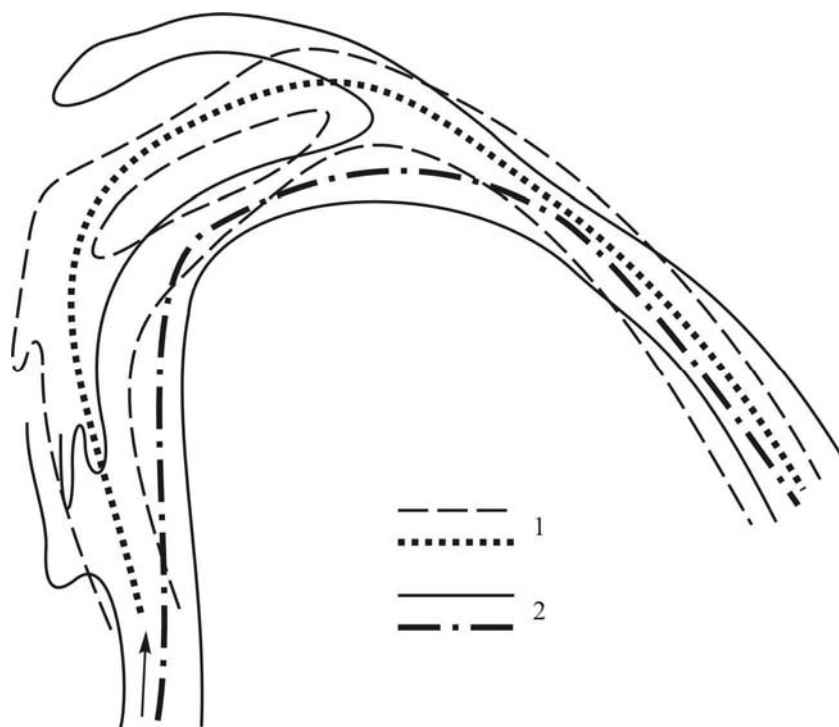


Рис. 168. Спряmlение излучины на нижней Выгегде путем развития протоки между островом и выпуклым берегом. Положение русла и судового хода: 1 – в 1931 г.; 2 – в 1946г.

Это происходит либо при надвижении вышележащего побочня (так произошли спрямления русла в районе сел Парчег, Римья, Сенгородок, Запань, Яренга), или вследствие искусственного приведения потока к коренному берегу. На Зеленецких перекатах в 60-70-е годы были построены выправительные сооружения, которые отклонили поток, в результате чего к началу 80-х годов он спрямил изгиб русла, разработав протоку между побочнем и коренным берегом. Аналогичные работы проводились на участке между с. Слободчиково и д. Фоминской. Часто такие выправительные работы проводятся в комплексе с землечерпанием (разработкой капитальных прорезей), что способствует закреплению главного течения реки у коренного берега и практически ликвидирует вероятность образования здесь излучин.

ЛИТЕРАТУРА



Алабян А.М. Типы русел равнинных рек и факторы их формирования // Геоморфология. 1992. № 4.

Алабян А.М. Руслообразующие наносы и их транспорт на равнинной реке // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 1992. № 5.

Александровский А.Л., Гласко М.П., Фоломеев Б.А. Исследования погребенных почв как геохронологических уровней второй половины голоцена // Бюлл. комис. по изуч. четвертич. периода. 1987. №56.

Алтуний С.Т. Регулирование русел. М.: Сельхозиздат. 1962.

Андреев О.В., Ярославцев И.А. Русловые деформации на участках рек с мостовыми переходами // Русловые процессы. М.: изд-во АН СССР. 1958.

Антощенко-Оленев И.В. История природных обстановок и тектонических движений в позднем кайнозое Западного Забайкалья. Новосибирск. Наука. 1982.

Антроповский В.И. Геоморфологические зависимости и их дальнейшее развитие // Труды ГГИ. 1969. Вып. 169.

Антроповский В.И. Связь типов руслового процесса с определяющими факторами // Труды ГГИ. 1970. Вып. 183.

Антроповский В.И. Критериальные зависимости типов руслового процесса // Труды ГГИ. 1972. Вып. 190.

Атлас русловых процессов в нижнем течении р. Хуанхэ. Чжэнчжоу: Комиссия водного хозяйства р. Хуанхэ. 1985. (на китайском языке).

Афремов Д.Н. Антропогенное влияние на формирование продольного профиля р. Днестра // Изв. АН СССР. Сер. географич. 1969. № 3.

Баранова Ю.П., Бискэ С.Ф. и др. Кайнозой Северо-Востока СССР // Труды ИГиГ СО АН СССР. 1968. Вып. 38.

Барышников Н.Б. Речные поймы. Л.: Гидрометеиздат. 1978.

Барышников Н.Б. Морфология, гидрология и гидравлика пойм. Л.: Гидрометеиздат. 1984.

Барышников Н.Б., Попов И.В. Динамика русловых потоков и русловые процессы. Л.: Гидрометеиздат. 1988.

Барышников Н.Б., Самусева Е.А. Антропогенное воздействие на саморегулирующуюся систему бассейн – речной поток – русло. СПб.: РГТМУ. 1999.

Белый Б.В., Борсук О.А., Иванов В.В., Лодина Р.В., Матвеев Б.В., Никитина Л.Н., Чалов Р.С., Чернов А.В. Условия формирования, морфология, динамика и регулирование русла среднего и нижнего Вилы // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 9. М.: МГУ. 1983.

Белый Б.В., Иванов В.В., Никитина Л.Н., Чалов Р.С., Чернов А.В. Морфология и динамика русла нижнего течения Вычегды в период активных дноуглубительных работ и после их прекращения // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 13. М.: МГУ. 2001.

Белый Б.В., Чалов Р.С. Руслоформирующие расходы воды и морфологические типы русел на реках Дальнего Востока // Геоморфология. 1997. №1.

Беркович К.М., Гаррисон Л.М., Рулева С.Н., Чалов Р.С. Морфология русла и русловые деформации верхней Оби // Земельные и водные ресурсы: противоэрозионная защита и регулирование русел. М.: изд-во МГУ. 1990.

Беркович К.М., Злотина Л.В. Чалов Р.С. Русловые процессы и градопромышленное заиление русла реки Инсар в Мордовии // География и природные ресурсы. 1998. №2.

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.

Беркович К.М., Чалов Р.С., Чернов А.В. Экологическое русловедение. М.: ГЕОС. 2000.

Букреев В.П. Искусственный аналог ограниченного меандрирования // Натурные и лабораторные исследования гидротехнических сооружений. М. 1987.

Борсук О.А., Чалов Р.С. О врезании русла р. Лены // Известия ВГО. 1973. Том 105. Вып. 5.

Ботвинкина Л.Н. Слоистость осадочных пород. Труды Геол. ин-та АН СССР. М.: АН СССР. 1962. Вып. 59.

Букатчук П.Д., Бурденко Б.В. О природе излучин Днестра в пределах среднего и нижнего течения // Доклады АН СССР. 1967. Том 172. №2.

Бутаков Г.П., Гаврилов Е.Г., Серебренникова И.А. Направленность и скорость плановых перемещений русел средних рек Закамья Татарстана // Двенадцатое межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Пермь. 1997.

Бутаков Г.П., Курбанова С.Г., Панин А.В., Перевощиков А.А., Серебренникова И.А. Формирование антропогенно обусловленного наилка на поймах рек Русской равнины // Эрозионные и русловые процессы. М.: МГУ. 2000. Вып. 3.

Бутаков Г.П., Куржанова А.А., Никонов А.Н. Интенсивность и геоморфологическое значение правостороннего смещения русел рек на востоке Русской равнины // Экзогенные процессы и окружающая среда: количественный анализ взаимодействия. Казань. 1988.

Великанов М.А. Динамика русловых потоков. Том 2. Наносы и русло. М.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит-ры. 1955.

Великанов М.А. Образование речных извилин // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1950. № 3.

Великанов М.А. Русловой процесс. М.: Госфизматиздат. 1958.

Великанова З.М. Лабораторные исследования речной излучины // Труды ГГИ. 1968. Вып. 147.

Величко А.А., Бердников В.В., Нечаев В.П. Реконструкция зоны многолетней мерзлоты и этапов ее развития // Палеогеография Европы за последние сто тысяч лет. М.: Наука, 1982.

Виноградов В.А. Некоторые особенности структуры потока и морфология излучин при свободном меандрировании // Труды ГГИ. 1973. Вып. 209.

Виноградов В.А. Натурные исследования морфологии и гидравлики излучин свободного меандрирования // Труды ГГИ. 1970. Вып. 183.

Виноградова О.В., Маорс Л.В. Морфодинамические типы и эволюция русел рек Патомского нагорья в плейстоцене // Геоморфология. 1998. №4.

Власов Б.Н., Чалов Р.С. Районирование Европейской территории по условиям прохождения руслоформирующих расходов воды на реках // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 1991. №6.

Водные пути бассейна Лены. М.: МИКИС. 1995.

Водные ресурсы рек зоны БАМ. Л.: Гидрометеиздат. 1977.

Волков И.А. К истории речных долин юга Западно-Сибирской низменности // Труды ИГиГ СО АН СССР. 1962. Вып.27.

Волков И.А. Следы мощного стока в долинах рек юга Западной Сибири // ДАН СССР. 1963. Том 151. №3.

Волков И.А. Колебания климата и эволюция ландшафтов в сартанское похолодание и в голоцене по геологическим и геоморфологическим данным (на примере Верхнего Приобья) // Геология и геофизика. 1994. Том 35. №10.

Воскресенский С.С. Неоднократная смена врезания заполнением – основная особенность развития речных долин // История развития речных долин и проблема мелиорации земель. Европейская часть СССР. Новосибирск: Наука. 1979.

Гендельман М.М., Попов И.В. О развитии спрямлений речных русел // Труды ГГИ. 1987. Вып. 307.

Геренчук К.П. Тектонические закономерности орографии и речной сети Русской равнины. Львов: изд-во ЛГУ. 1960.

Гласко М.П., Фоломеев Б.А. Методика определения скоростей накопления пойменного аллювия равнинных рек по археолого-геоморфологическим данным (на примере Средней Оки) // Геоморфология. 1981. №3.

Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеиздат. 1962.

Грачев Н.Р. Исследование плановых деформаций речных излучин // Труды ГГИ. 1985. Вып. 301.

Грачев Н.Р. Результаты исследования закономерностей распределения плановых деформаций в излучинах меандрирующих рек // Исследование русловых процессов для практики народного хозяйства. М.: МГУ. 1983.

Грачевский М.М., Берлин Ю.М. О погребенной речной сети на востоке Русской платформы // Нефтегазовая геология и геофизика. 1968. №6.

Гринберг З.И. О морфометрических характеристиках рек // Метеорология и гидрология. 1950. №4.

Гринько Р.И., Розовский И.Л. Теория и опыт капитальных выправительных работ на Днестре. Киев: изд-во АН УССР. 1962.

Гришанин К.В. Основы динамики русловых потоков. М.: Транспорт. 1990.

Гришанин К.В. Теория руслового процесса. М.: Транспорт. 1972.

Гришанин К.В. Устойчивость русел рек и каналов. Л.: Гидрометеоиздат. 1974.

Гришанин К.В., Замышляев В.И. Возникновение меандрирования рек как проблема гидродинамической неустойчивости // Труды ГГИ. 1985. Вып. 301.

Дарбутас А.А. Русловые процессы р. Неман (Нямунас) и влияние на них антропогенного фактора. Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук М.: МГУ. 1991.

Джуха И.Г. Морфология и динамика русел малых рек таежной зоны (Вологодская обл.) // Земельные и водные ресурсы: противозерозионная защита и регулирование русел. М.: изд-во МГУ. 1990.

Докучаев В.В. Способы образования речных долин Европейской России. СПб: типография В. Дермакова. 1878.

Еленевский Р.А. Вопросы изучения и освоения речных пойм. М.: ВАСХНИЛ. 1936.

Жила И.М. Натурные исследования побочного типа руслового процесса // Сб. работ по гидрологии. Л.: Гидрометеоиздат. 1978. №14.

Жуковский Н.Н. Обзор основных явлений естественного формирования речного русла (выдержки из труда «Об организации и системе землечерпания на транзите рек с подвижным ложем», опубликованного в сборнике «Волжское землечерпание и его достижения», 1925) // Вопросы гидротехники свободных рек. Речиздат. 1948.

Завадский А.С., Чалов Р.С. Гидролого-морфологические характеристики свободных излучин на реках в различных природных условиях // Современная география и окружающая среда. Казань. 1996.

Завадский А.С., Чалов Р.С. Региональный анализ свободного меандрирования // Вестник МГУ. Сер.5. География. 1997. №3.

Завадский А.С., Пахомова О.М., Чалов Р.С. Естественные и антропогенные проявления русловых процессов в различных звеньях речной сети // Проблемы гидрологии и гидроэкологии. М. 1999. Вып. 1.

Завадский А.С. Характеристики свободных излучин на реках бассейна верхней и средней Оби // Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей. М. 1999.

Завадский А.С., Махинов А.Н., Чалов Р.С. Формирование русла Среднего Амура и его морфологические типы // Водные ресурсы. 2000. Том 27. №2.

Завадский А.С., Чалов Р.С. Условия формирования и морфология свободных излучин на реках Северной Евразии // Геоморфология. 2000. №4.

Завадский А.С. Классификация свободных излучин по соотношению морфологических параметров с учетом гидролого-морфологических особенностей процесса их развития. // Динамика потока и эрозионно-аккумулятивные процессы. М.: МГУ. 2000.

Завадский А.С., Злотина Л.В. Формирование свободных излучин на реках первых порядков в условиях высокой антропогенной нагрузки (на примере реки Инсара) // Физические проблемы экологии (экологическая физика). М.: МГУ. 2001.

Завадский А.С. Асимметрия формы свободных излучин на примере Вычегды и Чулыма // Геоморфология. 2001. №3.

Завадский А.С., Каргаполова И.Н., Чалов Р.С. Стадии развития свободных излучин и их гидролого-морфологический анализ // Вестник МГУ. Сер.5. География. 2002. №2.

Зайцев А.А. Формирование свободных излучин на равнинных реках. Автореф. дисс.....канд. геогр. наук. М.: МГУ. 1979.

Замышляев В.И. Математическая модель плановых переформирования речных русел // Труды ГГИ. 1983. №288.

Замышляев В.И. О плановой устойчивости прямого русла // Труды ГГИ. 1982. Вып. 278.

Замышляев В.И. О причинах меандрирования рек (обзор работ зарубежных авторов) // Вопросы гидрологии суши. Л.: Гидрометеиздат. 1978.

Замышляев В.И., Майский А.А. Морфометрические зависимости для одноплесовых излучин // Вопросы гидрологии суши. Л.: Гидрометеиздат. 1988.

Земцов А.А. Особенности развития русловых процессов на таежных реках // Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях. М.: 1976.

Знаменская Н.С. Донные наносы и русловые процессы. Л.: Гидрометеиздат. 1976.

Знаменская Н.С. О формировании рельефа пойм меандрирующих рек // Труды ГГИ. 1973. Вып. 209.

Иванов В.В. Условия формирования, гидролого-морфологические зависимости и деформации относительно прямолинейных неразветвленных русел. Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ. 1989.

Иванов В.В., Матвеев Б.В., Чернов А.В. Особенности развития излучин при изменении условий руслоформирования // Геоморфология. 1983. № 3.

Иванов В.В., Чалов Р.С. Прямолинейные неразветвленные русла как морфодинамический тип // Геоморфология. 1991. № 2.

Ильвес Э.О., Салтупе Б.М., Эберхардс Г.Я. Скорости накопления голоценового аллювия и врезание некоторых рек Латвии // Изотопные и геохимические методы в биологии, геологии и археологии. Тарту. 1981.

Казанцев Б.П. Об одном случае определения возможных глубин размывов // Труды Центрального института прогнозов. Л. 1947. Вып. 5 (32).

Каменсков Ю.И. К определению понятия и значения руслоформирующего расхода воды // Метеорология и гидрология. 1986. №7.

Каменсков Ю.И. Русловые и пойменные процессы. Томск.: изд-во ТГУ. 1987.

Карасев И.Ф. Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеиздат. 1975.

Карасев И.Ф. Руслоформирующие расходы воды // Метеорология и гидрология. 1986. №8.

Караушев А.В. Речная гидравлика. Л.: Гидрометеиздат. 1975.

Карташов И.П. Основные закономерности геологической деятельности рек горных стран (на примере Северо-Востока СССР). М.: Наука. 1972.

Квасов Д.Д. Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы. Л.: Наука. 1975.

Клавен А.Б., Сنيщенко Б.Ф. Основные черты руслового процесса в нижнем течении р. Селенги // Труды ГГИ. 1978. Вып. 252.

Климанов В.А. Климат Северной Евразии в позднеледниковье (в последний климатический ритм) // Короткопериодные и резкие ландшафтно-климатические изменения за последние 15000 лет. М.: ИГ РАН. 1994.

Кожевников В.С. Прогноз деформаций русла р. Оби при сползании излучины // Труды ГГИ. 1982. Вып. 278.

Козловский Д.А. Русловые процессы и современные движения земной коры // Проблемы физической географии. М.: АН СССР. 1951. Вып. 16.

Кондитерова Э.А., Попов И.В. О закономерностях изменения длин свободно меандрирующих рек // Труды ГГИ. 1969. Вып. 169.

Кондратьев Н.Е. Гидроморфологические основы расчетов свободного меандрирования // Труды ГГИ. 1968. Вып. 155.

Кондратьев Н.Е. Использование принципа отражения при исследовании движения потока в речной излучине // Труды ГГИ. 1982. Вып. 278.

Кондратьев Н.Е. Русловые деформации в меандрирующих руслах // Труды ГГИ. 1954. Вып. 44 (98).

Кондратьев Н.Е. Русловые процессы рек и деформации берегов водохранилищ. СПб: Знак. 2000.

Кондратьев Н.Е. Форма русла и форма перемещения наносов // Труды ГГИ. 1953. Вып. 40 (94).

- Кондратьев Н.Е., Ляпин А.М., Попов И.В., Пиньковский С.И., Федоров Н.Н., Якунин И.И.** Руслевой процесс. Л.: Гидрометеиздат. 1959.
- Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Сنيщенко Б.Ф.** Основы гидро-морфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат. 1982.
- Коротаев В.Н., Лодина Р.В., Чалов Р.С., Шутов А.М.** Формирование устьев рек Таза и Пура и рельеф дна южной части Тазовской губы // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 5. М.: изд-во МГУ. 1976.
- Коротаев В.Н., Лодина Р.В., Милошевич В.А., Сидорчук А.Ю., Чалов Р.С.** Формирование долины р. Яны и развитие ее устьевых баров // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 6. М.: изд-во МГУ. 1978.
- Краснов А.Н.** Формы поверхности суши и деятели, их создающие // Основы землеведения. Харьков. 1897. Вып. III.
- Крашенинников М.В.** О меандрах равнинных рек // Проблемы геоморфологии Восточной Сибири. Иркутск. 1979.
- Кудряшов А.Ф.** Воспроизведение русла побочного типа в лабораторных условиях // Труды ГГИ. 1959. Вып. 69.
- Лаврушин Ю.А.** Аллювий равнинных рек субарктического пояса и перегляциальных областей материковых оледенений // Труды Геол. ин-та АН СССР. М.: АН СССР. 1963. Вып. 87.
- Лазаренко А.А.** Литология аллювия равнинных рек гумидной зоны // Труды геол. ин-та АН СССР. 1964. Вып. 120.
- Лапшенков В.С.** Прогнозирование русловых деформаций в бьефах речных узлов. Л.: Гидрометеиздат. 1979.
- Лежневский Н.С.** О речных течениях и формировании речного русла // Труды 2-го съезда инженеров-гидротехников в 1893 г. СПб. 1893. (Вопросы гидротехники свободных рек. М.: Речиздат. 1948).
- Лодина Р.В.** Формирование состава и распределения современного руслового аллювия равнинных и горных рек (на примере рек Кавказа, Средней Азии и Сибири). Автореф. дисс... канд. геогр. наук. М.: МГУ. 1975.
- Лосиевский А.И.** Лабораторные исследования процессов образования перекатов // Труды ЦНИИВТ. Вып. 36. 1934.
- Лохтин В.М.** О механизме речного русла. СПб. 1897. (Вопросы гидротехники свободных рек. М.: Речиздат. 1948).
- Лурье П.М., Панов В.Д., Саломатин А.М.** Река Маныч: гидрография и сток. СПб.: Гидрометеиздат. 2001.
- Лысенко В.В.** О естественном спрямлении излучин верхней Оби (на примере Тарадановской излучины) // Труды ЗапСибНИИ Госкомгидромета. 1977. Вып. 35.
- Львович М.И.** Опыт классификации рек СССР // Труды ГГИ. 1938. Вып. 6.
- Макареску В.С.** Роль плиоцен-четвертичных разломов в формировании врезанных меандр среднего и нижнего течения реки Днестр // Тектоника и сейсмичность Причерноморья и Черноморской впадины. Кишинев. 1974.

- Маккавеев В.М.** К динамике твердого и жидкого стока свободных потоков при прямолинейном и извилистом русле // Труды по гидрологии. Л.: Геогр.-экономич. НИИ. 1938.
- Маккавеев Н.И.** Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: АН СССР. 1955.
- Маккавеев Н.И.** Русловой режим рек и трассирование прорезей. М.: Речиздат. 1949.
- Маккавеев Н.И.** Сток и русловые процессы. М.: МГУ. 1971.
- Маккавеев Н.И., Чалов Р.С.** О морфометрических признаках современной аккумуляции в речной долине // Изв. АН СССР. Сер. географич. 1963. №3.
- Маккавеев Н.И., Хмелева Н.В.** Смещение речных излучин // Речной транспорт. 1965. №1.
- Маккавеев Н.И., Чалов Р.С.** Некоторые особенности дна долин больших рек, связанные с периодическими изменениями нормы стока // Вопросы географии. Сб. 79. М.: Географгиз 1970.
- Маккавеев Н.И., Чалов Р.С.** О развитии рельефа поверхности речных террас и признаки глубинной эрозии на примере верхней Оби // Изв. АН СССР. Сер. географич. 1964. № 4.
- Маккавеев Н.И., Чалов Р.С.** Русловые процессы. М.: изд-во МГУ. 1986.
- Макринова О.В.** Естественный размыв отводящего канала // Труды ГГИ. 1953. Вып. 40 (94).
- Малые реки волжского бассейна.** М.: изд-во МГУ. 1998.
- Мандыч А.Ф., Чалов Р.С.** Направленность современных эрозионно-аккумулятивных процессов в низовьях рек Западного Закавказья // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 1970. №1.
- Матвеев Б.В.** Влияние геолого-геоморфологических факторов на образование и морфологию речных излучин // Геоморфология. 1985. № 3.
- Матвеев Б.В.** Морфология и геолого-геоморфологические факторы развития врезанных и свободных излучин. Автореф. дисс.... канд. геогр. наук. М.: МГУ. 1985.
- Матвеев Б.В.** Процесс меандрирования и развитие речных долин // Геоморфология. 1988. № 1.
- Матвеев Б.В., Панин А.В., Сидорчук А.Ю.** Развитие антецедентной долины р. Яны на участке пересечения Куларского хребта // География и природные ресурсы. 1992. № 1.
- Матвеев Н.П.** Меандрирование рек Подмосковья // Ученые записки МОПИ им. Н.К. Крупской. 1970. Том 267. Вып. 13.
- Матвеев Н.П.** Морфометрия рек Подмосковья // Ученые записки МОПИ им. Н.К. Крупской. 1970. Том 267. Вып. 13.
- Махинов А.Н.** Русловые процессы и формирование поймы в условиях устойчивой аккумуляции наносов в долине реки // Геоморфология. 1990. №3.

Мельникова О.Н., Пыркин Ю.Г. Поперечная циркуляция в потоке: условия возникновения и механизм развития у береговых откосов прямолинейных русел // Работа водных потоков. М.: изд-во МГУ. 1987.

Милович А.Я. Нерабочий изгиб потока жидкости. Бюлл. Политехнического общества. 1914. № 10.

Морская геоморфология. Терминологический справочник. М.: Мысль. 1980.

Морфоструктурный анализ речной сети СССР. М.: Наука. 1979.

Некос С.В., Чалов Р.С. Сток наносов и русловые процессы на реках бассейна Дона // Геоморфология. 1997. №2.

Нижняя Яна: устьевые и русловые процессы. М.: ГЕОС. 1998.

Никитина Л.Н., Чалов Р.С. Эволюция свободных излучин и основные стадии их развития // Геоморфология. 1998. №4.

Никонов А.А. Определение скорости врезания рек // Геоморфология. 1973. №1.

Нуждин Б.В. Глубинная эрозия в верховьях Волги // Природа. 1968. №5.

Нуждин Б.В. Об интенсивности аккумуляции пойменного аллювия // Геоморфология. 1994. №1.

Ободовский А.Г., Цайтц Е.С., Чалов Р.С. Географическое обоснование методики определения руслоформирующего расхода воды (на примере рек Украины) // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 1987. № 5.

Орлянкин В.Н. Определение мощности руслового аллювия по аэроснимкам вееров блуждания рек // Вопросы географии. Сб. №66. М.: Географиз. 1963.

Остапин В.Е. Особенности строения и формирования пойм меандрирующих и разветвленных на рукава рек на примере Иртыша, Северной Двины и Вычегды // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 1961. №5.

Павлов И.Н. Морфология русел рек равнинной части Алтайского края // Геоморфология. 1994. №3.

Палиенко В.П. Новейшая геодинамика и ее отражение в рельефе Украины. Киев: Наукова думка. 1992.

Панин А.В. Влияние геолого-геоморфологических факторов на морфологию русел крупных рек Восточной Сибири (на примере р. Яны) // Геоморфология. 1990. №1.

Панин А.В. К истории русловых деформаций на реках центра ЕТР в голоцене: результаты исследований в среднем течении р. Протвы // Труды Академии проблем водохозяйственных наук. 2001. Вып. 7.

Панин А.В. Морфология и динамика врезанных галечно-валунных русел. Автореф. дисс.... канд. геогр. наук. М.: МГУ. 1991.

Панин А.В., Каревская И.А. История формирования поймы р. Протвы в пределах Сатинского полигона МГУ // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 2000. №4.

Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Баслеров С.В., Власов М.В., Шеремецкая Е.Д. Гигантские поздневалдайские палеорула в долине р. Хопер // XV Пленарное межвузовское совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Волгоград. 2000.

Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Баслеров С.В., Борисова О.К., Ковалюх Н.Н., Шеремецкая Е.Д. Основные этапы истории речных долин центра Русской равнины в позднем валдае и голоцене: результаты исследований в среднем течении р. Сейм // Геоморфология. 2001. №2.

Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Чалов Р.С. Катастрофические скорости формирования флювиального рельефа // Геоморфология. 1990. № 2.

Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Чернов А.В. Макроизлучины рек ЕТС и проблемы палеогидрологических реконструкций // Водные ресурсы. 1992. №4.

Пахомова О.М. Гидролого-морфодинамические характеристики русел рек и порядковая структура речной сети. Автореф. дисс.... канд. геогр. наук. М.: МГУ. 2001.

Пахомова О.М. Изменение морфометрических характеристик русла и параметров свободных излучин на реках различных порядков // Динамика потоков и эрозионно-аккумулятивные процессы. М.: МГУ. 2000.

Печкуров А.Ф. Устойчивость русла регулированных рек. Минск. АН БССР. 1950.

Пиньковский С.И. Изменчивость длины русла р. Куры // Труды ГГИ. 1954. Вып. 44 (98).

Пиньковский С.И. Карта основных типов русел рек СССР (Русская равнина, Западная Сибирь) // Труды III Всесоюзного съезда. Том V. Л.: Гидрометеиздат. 1960.

Попов И.В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство. Л.: Гидрометеиздат. 1965.

Попов И.В. Изменение морфометрических характеристик во времени как показатель направленности русловых процессов на меандрирующих реках // Труды ГГИ. 1954. Вып. 44 (98).

Попов И.В. Количественные показатели руслового процесса различного типа // Труды ГГИ. 1964. Вып. 116.

Попов И.В. Методические основы исследований руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат. 1961.

Попов И.В. О формах перемещения речных излучин // Труды ГГИ. 1956. Вып. 56 (110).

Попов И.В. Применение гидролого-морфологического анализа при проектировании водозаборов // Труды ГГИ. 1965. Вып. 120.

Попов И.В. Процесс меандрирования речных излучин и его изучение при помощи аэрофотосъемки // Труды ГГИ. 1955. Вып. 49 (103).

Попов И.В., Гаврин Ю.С. Применение аэрофотосъемки к оценке процессов затопления и опорожнения речных пойм и развития пойменных течений // Труды ГГИ. 1970. Вып. 138.

Попов И.В. Русловые переформирования р. Волги на участке Волгоград-Астрахань // Труды ГГИ. 1963. Вып. 108.

Потапов М.В. Конспект лекций по курсу «Регулирование русел» // Сочинения. Том 1. М.: Сельхозиздат. 1950.

Потапов М.В. Поперечная циркуляция в открытом потоке и ее гидротехническое применение. М.: Сельхозиздат. 1936.

Проектирование судовых ходов на свободных реках // Труды ЦНИИЭВТ. 1964. Вып. 34.

Рашутин Д.В., Чалов Р.С. Типология, морфометрия и деформации русла на бесприточном участке среднего Терека // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 1995. №5.

Рейнек Г.Э., Сингх И.Б. Обстановка терригенного осадконакопления (с рассмотрением терригенных пластических осадков). М.: Недра. 1981.

Ржаницын Н.А. Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. Л.: Гидрометеиздат. 1960.

Ржаницын Н.А. Руслоформирующие процессы рек. Л.: Гидрометеиздат. 1985.

Рождественский А.П. О связи некоторых излучин Волги с местной тектоникой // Доклады Академии наук СССР. Том XC. 1953. № 3.

Рождественский А.П. Типы меандрирования речных русел и связь их с проявлением новейших тектонических движений (на примере рек Южного Урала) // Землеведение. Новая серия. Том VI (XLVI). 1963.

Розовский И.Л. Движение воды на повороте открытого русла. Киев: изд-во АН УССР. 1957.

Ромашин В.В. Типы руслового процесса в связи с определяющими факторами // Труды ГГИ. 1968. Вып. 155.

Россинский К.И., Кузьмин И.А. Некоторые вопросы прикладной теории формирования речных русел // Проблемы регулирования речного стока. М.-Л.: АН СССР. 1947.

Рубцов М.В. Научные основы лесоводственных мероприятий в защитно-водоохранных лесах вдоль европейского севера. Автореф. дисс...докт. сель-хоз. наук. Л. 1982.

Русловой режим рек Северной Евразии. М.: МГУ. 1994.

Русловые процессы на реках Алтайского региона. М.: изд-во МГУ. 1996.

Русловые процессы на реках СССР. М-б 1:4 000 000. ГУГК СССР. 1990.

Рухин Л.Б. Основы литологии (Учение об осадочных породах). Л.: Недра. 1969.

Савицкий В.А. Об асимметрии речных излучин // Геоморфология. 1995. №3.

Садовский Г.Л. Пособие по трассированию землечерпательных прорезей. М.: Речной транспорт. 1961.

Салищев К.А. Картография. М. Высшая школа. 1982.

Серебряков А.В. Руслловые процессы на судоходных реках с зарегулированным стоком. М.: Транспорт. 1970.

Сидорчук А.Ю. Морфология, динамика и структура речного русла. Автореф. дисс.....докт. геогр. наук. М.: МГУ. 1992.

Сидорчук А.Ю. Структура рельефа речного русла. СПб: Гидрометеоиздат. 1992.

Сидорчук А.Ю., Борисова О.К., Ковалюх Н.Н., Панин А.В., Чернов А.В. Палеогидрология нижней Вычегды в поздневалдайское и голоцено // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 1999. №5.

Сидорчук А.Ю., Борисова О.К., Панин А.В. Поздневалдайские палеорусла рек Русской равнины // Изв. РАН. Сер. географич. 2000. №6

Сидорчук А.Ю., Михинов А.Е. Морфология и динамика руслового рельефа // Итоги науки и техники. Серия «Гидрология суши». Том 5. М.: ВИНТИ. 1985.

Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Чернов А.В., Борисова О.К., Ковалюх Н.Н. Сток воды и морфология русел рек Русской равнины в поздневалдайское время и в голоцено (по данным палеоруслового анализа) // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 12. М.: МГУ. 2000.

Смирнова В.Г. Гидролого-морфологический анализ разветвленных русел рек Алтайского региона. Автореф. дисс.... канд. геогр. наук. Иркутск: ИГ СО РАН. 2002.

Талмаза В.Ф., Крошкин А.Н. Гидроморфометрическая характеристика горных рек. Фрунзе: Кыргызстан. 1968.

Успенская Н.Ю. Нефтегазность палеозоя Северо-Американской платформы. М.-Л.: Гостоптехиздат. 1950.

Федоров Н.Н. Экспериментальные исследования процессов меандрирования // Труды ГГИ. 1954. Вып. 44 (98).

Хмелева Н.В. Изучение меандр реки Вятки в целях палеогеографического анализа // Геоморфологические и гидрологические исследования. М.: МГУ. 1968.

Чалов Р.С. Динамика перекатов и их количественная характеристика // Вопросы географии. М.: Географизд. 1963. Вып. 63.

Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: изд-во МГУ. 1979.

Чалов Р.С. О механизме формирования прирусловых отмелей // Изв. всесоюз. геогр. об-ва. 1964. Том 96. №5.

Чалов Р.С. Типология пойм равнинных рек // Известие ВГО. 1966. Том 98. Вып. 1.

Чалов Р.С. Формирование рельефа пойм меандрирующих рек // Геоморфология. 1973. №2.

Чалов Р.С. Влияние побочной перекатов на динамику речных берегов // Вестник МГУ. Сер.5. География. 1974. №4.

Чалов Р.С. Излучины р. Вычегды // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 4. М.: изд-во МГУ. 1974.

Чалов Р.С. Типы русловых процессов и принципы морфодинамической классификации речных русел // Геоморфология. 1996. № 1.

Чалов Р.С. Историческое и палеорусловедение: предмет, методы исследований и роль в изучении рельефа // Геоморфология. 1996. №4.

Чалов Р.С. Общее и географическое русловедение. М.: изд-во МГУ. 1997.

Чалов Р.С., Алабян А.М., Иванов В.В., Лодина Р.В., Панин А.В. Морфодинамика русел равнинных рек. М.: Геос. 1998.

Чалов Р.С., Белый Б.В. Районирование территории Сибири по характеру руслоформирующей деятельности рек // Метеорология и гидрология. 1975. №12.

Чалов Р.С., Белый Б.В. Региональные особенности руслоформирующих расходов воды на реках Средней Азии // Известия АН СССР. Сер. географич. 1984. № 12.

Чалов Р.С., Лю Шугуан, Алексеевский Н.И. Сток наносов и русловые процессы на больших реках России и Китая. М.: МГУ. 2000.

Чеботарев А.И. Гидрологический словарь. Л.: Гидрометеиздат. 1964.

Чернов А.В. Геоморфология пойм равнинных рек. М.: изд-во МГУ. 1983.

Чернов А.В. Развитие русла и поймы верхнего Чулыма в голоцене // География и природные ресурсы. 1994. №2.

Чернов А.В., Гаррисон Л.М. Палеогеографический анализ развития русловых деформаций широкопойменных рек в голоцене (на примере верхней и средней Оби) // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1981. Т.56. Вып.4.

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. геологич. Вып. 135. 1951. №55.

Шенберг Н.В. Анализ факторов и методика расчета руслоформирующих расходов воды // Водные ресурсы. 1989. № 4.

Шенберг Н.В. Использование многолетних характеристик режима стока для расчета руслоформирующих расходов воды // Земельные и водные ресурсы: противозерозионная защита и регулирование русел. М.: изд-во МГУ. 1990.

Шарашкина Н.С. Роль грядообразного движения наносов в формировании речных русел // Гидравлика сооружений и динамика речных русел. М.: изд-во АН СССР. 1959.

Шуравилин А.В. Данные о наилке на пойме нижнего течения р. Северной Двины // Сб. работ по гидрологии. Л.: Гидрометеиздат. 1965. №5.

Щукин И.С. Общая геоморфология. Том 1. М.: изд-во МГУ. 1960.

- Эберхардс Г.Я.** Морфогенез долин области последнего материкового оледенения и современные речные процессы (на примере Средней Прибалтики). Автореф. дисс.... докт. геогр. наук. М.: 1985.
- Эдельштейн Я.С.** Основы геоморфологии. М.-Л.: Госгеоллиздат. 1947.
- Экспериментальная геоморфология.** Вып. 2. М.: изд-во МГУ. 1969.
- Ющенко Ю.С.** Русловой процесс на верхней Сухоне // Труды ГГИ. 1987. Вып. 13.
- Ярных Н.А.** Деформации русла и берегов на крутой излучине // Труды ГГИ. 1978. Вып. 252.
- Ярославцев И.Я.** Особенности руслового процесса на излучине реки в паводок // Труды ГГИ. 1966. Вып. 136.
- Ackers P.** Experiments on small streams in alluvium // J. Hydraul. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng. V. 90. 1964. №4.
- Ackers P., Charlton F.G.** Meander geometry arising from varying flows // J. Hydr. Res. V.8. 1970. №3.
- Allen J.R.L.** A quantitative model of grain size and sedimentary structures in lateral deposits // Geological Journal. 7 (Part 1). 1970.
- Allen J.R.L.** On bed forms and paleocurrents // Sedimentology. 6(3). 1966.
- Bagnold R.A.** Some aspects of the shape of river meanders // US Geol. Surv. Prof. Pap. 282-E. 1960.
- Baker V.R.** Stream-channel response to floods, with examples from Central Texas // Geol. Soc. Am. Bull. V. 88. 1977. №8.
- Begin Z.B.** The relationship between flow-shear stress and stream pattern // J. Hydrol. V. 52. 1981.
- Blache J.** Le probleme des meandres encaisses et les rivieres lorraines // J. Geomorphol. 1939. V. 2.
- Blache J.** Le probleme des meandres encaisses et les rivieres lorraines // J. Geomorphol. 1940. V. 3.
- Blank H.R.** Incised meanders in Mason County, Texas // Geol. Soc. Am. Bull. V. 81. 1970. №10.
- Braun D.D.** Lithologic control of bedrock meander dimensions in the Appalachian Valley and Ridge province // Earth Surf. Proc. V. 8. 1983.
- Bray D.I.** Regime equations for gravel-bed rivers // Gravel-bed rivers. Chichester. Wiley&Sons. 1982.
- Brush L.M.** Drainage basins, channels and flow characteristics of selected streams in Central Pennsylvania // US Geol. Surv. Prof. Pap. 282-F. 1961.
- Callander R.A.** Instability and river channels // J. Fluid Mech.. V. 36. 1969.
- Callander R.A.** River meandering // Ann. Rev. Fluid Mech. V. 10. 1978.

- Campbell J.A.** Control of canyon and meander forms by jointing // *Area*. V. 5. 1973. №4.
- Carlston C.W.** The relation of free meander geometry to stream discharge and its geometric implications // *J. Amer. Science*. V. 263. 1965. №10.
- Carson M.A.** The meandering-braided river threshold: a reappraisal // *J. Hydrol.* V. 73 1984.
- Chalov R.S., Zavadskiy A.S.** Morphological characteristics of free bends // *International journal of sediment research*. V. 14. 1999. №3.
- Chitale S.V.** Shape and mobility of river meanders // *Proc. 19th Gahr Confr.*, New Delhi 1-7 Febr. 1981. V. 2.
- Cole W.S.** The interpretation of entrenched meanders // *J. Geol.*, V. 38. 1930. №5.
- Cotter E.** Paleoflow characteristics of a Late Cretaceous river in Utah from analysis of sedimentary structures in the Ferron Sandstone // *Journal of Sedimentary Petrology*. 1971. №41 (1).
- Davis W.M.** Meandering valleys and underfit rivers // *Ann. Assoc. Am. Geogr.* V. 3. 1913.
- Dury G.H.** Contribution to a general theory of meandering valleys // *Am. J. Sci.*, V. 252. 1954. №4.
- Dury G.H.** General theory of meandering valleys and underfit streams // *Rivers and River Terraces*. Baeger Publ. NY-Wash. 1970.
- Dury G.H.** Principles of underfit streams // *US Geol. Surv. Prof. Pap.* 452-A, 1964.
- Dury G.H.** Subsurface exploration and chronology of underfit streams // *US Geol. Surv. Prof. Pap.* 452-B. 1964.
- Dury G.H.** Theoretical implications of underfit streams // *US Geol. Surv. Prof. Pap.* 452-C. 1965.
- Dury G.H., Sinker, C.A., Pannett, D.J.** Climatic change and arrested meander development on the River Severn // *Area*. V. 4. 1972. №2.
- Einstein A.** Die ursache der mäanderbildung der flussläufe und des sogenannten Baerschen gesetzen // *Die Naturwissenschaften*. Heft 11. Band 14. 1926.
- Engelund F., Skovgaard O.** On the origin of meandering and braiding in alluvial streams // *J. Fluid. Mech.* V. 57. 1973. №2.
- Ferguson R.T.** Channel pattern and sediment type // *Area*, V. 5. 1973. №1.
- Ferguson R.T.** The threshold between meandering and braiding // *Proc. Intern. Conf. "Channels and channel control structures"*. Berlin e.a. 1984.
- Flohn H.** Beiträge zur problematic der talmäander // *Frankfurter geogr. Jg.* 9. Hft. 1. 1935.
- Florek W.** Late Vistulian and Holocene development of the North Pomeranian river valleys and the influence of South Baltic neotectonics // *Z. Geomorph. N.F. Supp I. Bd.* 102. 1996.

- Fredsoe I.** Meandering and braiding of rivers // *J. Fluid. Mech.* V. 84. 1978. №4.
- Friedkin J.F.** A laboratory study of the meandering of alluvial rivers. US Waterways Experimental Station. Vicksburg. Mississippi. 1945.
- Garbrecht G.** Wasserabfluss in gekrummten Gerinnen // *Die Waaserwirtschaft.* 1953. №2.
- Gorycki M.A.** Hydraulic drag: a meander-initiating mechanism // *Geol. Soc. Am. Bull.* V. 84. 1973. №1.
- Griffiths G.A.** Stable-channel design in gravel-bed rivers // *J. Hydrol.*, V. 52. 1981.
- Hack J.T.** Post-glacial drainage evolution and stream geometry in the Ontonagon area, Michigan // *US Geol. Surv. Prof. Pap.* 504-B. 1965.
- Hack J.T., Young, R.S.** Intrenched meanders of the North Fork of the Shenandoah River, Virginia // *US Geol. Surv. Prof. Pap.* 354-A. 1959.
- Hakanson L.** The meandering of alluvial rivers // *Nordic Hydrol.* 1973.
- Henderson, F.M.** Stability of alluvial channels // *J. Hydr. Div. ASCE.* V. 87. 1961. №6.
- Hickin E.J.** The analysis of river-platform responses to changes in discharge // *River Channel Changes.* 1977.
- Hickin E.J.** The development of river meanders in natural river channels // *Am. J. Sci.* V. 274. 1974. №4..
- Hjulström F.** Studien über das mäander-problem // *Geogr. Annaler.* Arg. XXIV. Hft. 3-4. 1942.
- Hol J.B.L.** Das problem der talmäander // *Z. Geomorph.* Bd.10. 1938.
- Hook R.L.** Distribution of sediment transport and clear stress in a meander bend // *J. Geology.* 1975. V. 83. №5.
- Kalicki T.** Lateglacial and Holocene evolution of some river valleys in Byelorussia // *European river activity and climatic change during the Lateglacial and early Holocene* (Ed. by B.Frenzel). *Paläoklimaforschung/Palaeoclimate Research.* Vol. 14. G. Fischer Verlag. Stuttgart-Jena-NY. 1995.
- Kalicki T., Zernickaya V.** Paleogeography of the Vistula valley near Cracow based on sediments and palynology of the Allerød paleochannel fill // *Geographical Studies IG PAN. Special Issue* №8. Evolution of the Vistula river valley during the last 15 000 years. Part V. Wroclaw. 1995.
- Kalicki T., San'ko A.F.** Ewolucja doliny Łuczoty w późnym glacie i holocenie // *Badania ewolucji dolin rzecznych na Białorusi – I* (T.Kalicki, red.). *Dokumentacja geograficzna* 6. 1997.
- Keller E.A.** Development of stream channels: a five-stage mode // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1972. №5.
- Keller E.A., Melhorn W.N.** Rhythmic spacing and origin of pools and riffles // *Geol. Soc. Am. Bull.* V. 89, 1978. №5.
- Kellerhals R.** Stable channels with gravel-paved beds // *J. Waterways and Harbours Div.* V. 93. 1967.

- Knighton A.D.** Fluvial forms and processes. London, Edward Arnold Publ. 1984.
- Knighton A.D.** The meander problem // Geography. Pt. 2. 1977. №275.
- Komar P.D.** Shaper of streamlined land on the Earth and the experiments and analyses of the minimum-drag form // Geology. 1983. №11.
- Lacey G.** Uniform flow in alluvial rivers and channels // Proc. Inst. Civ. Engrs. V. 237. 1935.
- Leeder M.R.** Fluvial fining-upwards cycles and the magnitude of paleochannels // Geological Magazine. 1973. №110 (3).
- Leopold, L.B., Wolman M.G.** River channel patterns – braided, meandering and straight // US Geol. Surv. Prof. Pap. 282-B. 1957.
- Leopold, L.B., Wolman M.G.** River meanders // Geol. Soc. Am. Bull. V. 71. 1960.
- Leopold L.B., Wolman M.G., Miller J.P.** Fluvial processes in geomorphology. San Francisco, Freeman. 1964.
- Levin J.** Channel Pattern changes // River channel changes. 1977.
- Levin J.** Initiating of bed forms and meanders in coarse grained sediment // Geol. Soc. Am. Bull. V. 87. 1976. №2.
- Li R.M., Simons D.B., Stevens M.A.** Morphology of cobble streams in small watersheds // J. Hydr. Div. V. 102. 1976. №8.
- Masuch K.** Zur Frage der talmäander // Berliner Geogr. Arb. Hft. 9. Berlin. 1935.
- Matthes G.H.** Basic aspects of stream meanders. Trans. Amer. Geophys. Union. 1941.
- Matveev B., Panin A., Sidorchuk A.** Rates of formation of forms in a river channel hierarchy: the case of the River Yana in northeast Russia // Variability in Stream Erosion and Sediment Transport (Proceedings of the Canberra Symposium, December 1994). IAHS Publ. 1994. №224.
- Miller A.A.** The entrenched meanders of the Herefordshire Wye // Geogr. Jour. V. 85. 1935. №2.
- Milne J. A.** Patterns of confinement in some stream channels of upland Britain // Geogr. Ann. V. A65. 1983. №1-2.
- Moore R.S.** Significance of inclosed meanders in the physiographic history of the Colorado Plateau County // J. Geol. V. 34. 1926. №2.
- Nanson D.C.** Regional trend to meander migration // J. Deology. 1980. №1.
- Onishi J., Jain S.C., Kennedy J.F.** Effects of meandering in alluvial streams // J. Hydraul. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng. V. 102. 1976. №7.
- Osterkamp W.P.** Gradient, discharge and particle-size relations of alluvial channels in Kansas, with observations on braiding // Am. J. Sci. V. 278. 1978.
- Panin A.V.** Lateglacial and Holocene development of a gravel-bed river (the Protva River, Central Russia) // Hydrological Consequence Of Global Cli-

mate Changes: Geologic And Historic Analogs Of Future Conditions. Moscow. IG RAS. 2000.

Panin A.Y., Sidorchuk A.Ju., Chernoy A.Y. Historical background to floodplain morphology: examples from the East European Plain // Marriott S., Alexander J. Hey, R.(eds) Floodplains: Interdisciplinary Approaches. Geological Society, London, Special Publications. 1999. №163.

Panin A., Sidorchuk A., Baslerov S., Borisova O., Kovalyukh N., Sheremetskaya E., Vlasov M. Abrupt river regime changes at the Pleistocene – Holocene transition in the South of the East-European Plain // Hydrological Consequence Of Global Climate Changes: Geologic And Historic Analogies Of Future Conditions. Moscow: IG RAS. 2000.

Parker G. Hydraulic geometry of active gravel rivers // J. Fluid Mech., 1979. №9.

Parker G. On the cause and characteristic scales of meandering and braiding in rivers // J. Fluid Mech. V. 76. 1976. №3.

Rich J.A. Certain types of stream valleys and their meaning // J. Geol. V. 22. 1914. №5.

Richards K.S. The formation of ripples and dunes on an erodible bed // J. Fluid Mech. V. 99. 1980. №3.

Richards K.S. Rivers: Form and process in alluvial channels. Methuen. London. 1982.

Rotnicki K. Modelling past discharges of meandering rivers // Background to Palaeohydrology. Ed. by K.J.Gregory. Wiley&Sons Ltd.. 1983.

Rotnicki K. Estimation of Holocene runoff, precipitation and evaporation based on the retrodiction of the palaeodischarges of meandering rivers // Bull. Pol. Acad. Sci. Earth Sci. 1991. Vol. 39, №2.

Schumm S.A. The fluvial system. 1977.

Schumm S.A. The shape of alluvial channels in relation to sediment type // US Geol. Surv. Prof. Pap. 352-B. 1960.

Schumm S.A., Khan H.R. Experimental study of channel patterns // Geol. Soc. Am. Bull. V. 83. 1972. №6.

Shen H.W., Schumm S.H., Doehring D.O. Stability of stream channel patterns // Transp. Res. Rec. 1979. №736.

Shepherd B.G. Incised river meanders: evolution in simulated bedrock // Science. V. 178. 1972. №4059.

Sidorchuk A., Borisova O., Panin A. Fluvial response to the late Valdai/Holocene environmental change on the East European Plain // Global and Planetary Change. Vol. 28. 2001.

Sidorchuk A., Panin A., Borisova O., Kovalyukh N. Lateglacial and Holocene palaeohydrology of the lower Vychegda river, western Russia // River Basin Sediment Systems: Archives of Environmental Change. D.Maddy, M.G.Macklin, J.C.Woodward (eds). A.A.Balkema Publishers. 2001.

Sidorchuk A., Panin A., Borisova O. The Lateglacial and Holocene Palaeohydrology of Northern Eurasia// Palaeohydrology: Understanding Global Change. Edited by K.J. Gregory and G. Benito. John Wiley & Sons, Ltd. 2003.

Strahler A.N. Elongated entrenched meanders of Conodoquinet Creek. PA // Am. J. Sci. V. 244. 1946. №1.

Starkel L. The place of the Vistula river valley in the late Vistulian – early Holocene evolution of the European valleys // European river activity and climatic change during the Lateglacial and early Holocene (Ed. by B.Frenzel). Paläoklimaforschung/Palaeoclimate Research. Vol. 14. G.Fischer Verlag, Stuttgart-Jena-NY. 1995.

Syunsuke I., Parker G., Yoshitaka K. Stable width and depth of straight gravel rivers with heterogeneous bed materials // Water Resour. Res. V. 24. 1988. №5.

Tarr W.A. Entrenched and incised meanders of some streams on the northern slope of the Ozark Plateau in Missouri // J.Geol. V. 32. 1924. №7.

Tincler K.J. Active valley meanders in South-Central Texas and their wider implications // Geol.Soc.Am.Bull., V. 82. 1971. №7.

Tincler K.J. Pools, riffles, and meanders // Geol.Soc.Am.Bull. V. 81. 1970. №2.

Tincler K.J. The superimposition hypothesis for incised meanders – a general rejection and specific test // Area. V. 4. 1972. №1.

Troll C. Über alter und bildung von talmäander // Erdkunde, V. 8. 1954. №4.

Vacher A. Rivières a meandres encaissés et terrains a meandres // Annales Geographie. V. 18. 1909.

Vandenberghe J. Changing fluvial processes in a small lowland valley at the end of the Weichselian Pleniglacial and during the Late Glacial // Proc. First Int. Conf. on Geomorphology. Wiley&Sons. Chichester. 1987.

Vandenberghe J. Postglacial river activity and climate: state of the art and future perspectives // European river activity and climatic change during the Lateglacial and early Holocene (Ed. by B. Frenzel). Paläoklimaforschung / Palaeoclimate Research. Vol. 14. G. Fischer Verlag, Stuttgart-Jena-NY. 1995.

Walling D.E., Bradley S.B. Rates and patterns of contemporary flood-plain sedimentation: A case study of the Rhyer Culm, Deyon, UK // Geojournal. V. 19. 1989. №1.

Williams G.P. Paleofluvial estimates from dimensions of former channels and meanders // Flood Geomorphology. Baker, V.R., Kochel, R.C. and Patton, P.C. (eds.). New York. Wiley. 1988.

Williams G.P. River meanders and channel size // J. Hydrology. 1986.

Yang C.T. On river meanders // J. Hidrology. V. 13. 1971. №3.

Yang C.T. Potential energy and stream morphology // Water Res. V. 7. 1971. №2.

Р.С. Чалов, А.С. Завадский, А.В. Панин
Речные излуины

Подготовка оригинал-макета – *С.Н. Ковалев*
Графические иллюстрации выполнены – *Н.В. Анисимовой*

ЛР №021098 от 28.02.97
Подписано в печать 5.01.2004 Формат 60х90/16
Офсетная печать. Усл. печ. л. – 23,2 Тираж 420 экз.
Заказ №

Типография ордена "Знак Почета" Издательства МГУ.
119899, Москва, Воробьевы горы