

Ю. У. Камеников

Условные
и понятийные
процессы

92

Томский ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового
Красного Знамени государственный университет им. В. В. Куйбышева

Ю. И. Камонсков

РУСЛОВЫЕ И ПОЙМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ
Учебное пособие

Под редакцией доктора географических наук Д. А. Буракова,
кандидата географических наук В. А. Земцова



Издательство Томского университета

Томск - 1987

1-650913

УДК 556.537+551.435.122 (075.8)

Каменсков Ю.И. Русловые и пойменные процессы. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 1987. - 171 с. - 40 к. 500 экз. 1903030200.

В учебном пособии рассматриваются современные гидролого-морфологические представления о русловых пойменных переформированиях. Эти представления являются в настоящее время наиболее результативными при проведении изысканий для проектирования различных сооружений и мероприятий на поймах, берегах и в руслах рек.

Для студентов и специалистов в области гидрологии суши, а также географов, геоморфологов, ботаников и почвоведов.

Рецензенты - доктор географических наук А.А.Земцов,
доктор географических наук Л.Н.Ивановский

К 1903030200 78-87
177(012)-87

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одной из сфер работы инженеров-гидрологов является область, связанная с динамикой речных русел, оценка которой приобрела в настоящее время огромное значение в связи с интенсивным строительством самых разнообразных сооружений на берегах и в руслах рек.

Примерно до середины 60-х годов для определения русловых деформаций применялись гидродинамические методы, достаточно широко освещенные в учебных пособиях и монографиях (М.А.Великанов, 1949; В.Н.Гончаров, 1962; К.В.Гришанин, 1979), но они во многих случаях оказались весьма сложными и малоэффективными. Это обстоятельство обусловило разработку других, более простых и результативных приемов изучения русловых деформаций, основанных на непосредственных полевых наблюдениях за руслами и сопоставлении их карт за различные годы. Подобные приемы объединяются под общим названием - морфологические или гидролого-морфологические. В настоящее время гидролого-морфологические аспекты русловых и пойменных процессов изложены в большом числе научных статей и в ряде монографий, изучение их студентами в такой форме практически невозможно.

Автор преследовал цель дать как можно более систематизированное, лаконичное и доступное изложение проблем, теоретических основ и методов морфологических исследований русловых и пойменных переформирований на основе имеющихся публикаций и с учетом результатов своей работы в этой области.

I. ВВЕДЕНИЕ

Русловые процессы — это изменения внешнего облика русла, его планового и высотного положения. Например, в русле реки могут периодически появляться и исчезать острова, отмели и пр., река может длительное время врезаться в подстилающие породы или наоборот подниматься вверх, выстилая дно тем материалом, который перемещается ею или ее притоками выше данного участка. Наконец, русла рек перемещаются в плане, при этом русловой поток размывает один берег и намывает противоположный. Все эти явления — результат действия цепочки причин и следствий, которая и составляет понятие "русловые процессы". В наиболее упрощенном виде можно связать эти явления с тем, что русловые потоки — это не просто потоки воды, как, например, в лабораторном стеклянном лотке, а потоки с подвижными стенками, сложенными размываемым материалом.

Понятия русловые процессы и русло-внепотоки были впервые введены в научную терминологию М.А.Великановым (1932, 1949).

Понятие руслового процесса М.А.Великанов раскрывает весьма кратко — это "взаимодействие потока и русла", а относительно понятия русловой поток он пишет следующее.

"Понятие руслового потока есть обобщение всем хорошо известного понятия реки.

Дело в том, что далеко не все поверхностные водотоки могут быть названы реками: мелкие ручьи, образующиеся после выпадения ливня или в процессе снеготаяния, никто не станет называть "реками"; в горных районах, в особых условиях строения поверхности, ливни или быстрое снеготаяние формируют иногда грязекаменные потоки (сели), которые также не подходят под понятие "реки". Таким образом, для объединения всякого рода поверхностных водотоков, протекающих по более или менее размываемому руслу, нами и вводится термин русловой поток.

Специфичным для руслового потока является взаимодействие потока и русла. Русло управляет потоком, формирует его скоростное поле. Поток распределе-

нием скоростей влияет на форму своего русла, производит тут или там размывы и намывы и путем переноса вниз по течению размытого материала - наносов - сам создает себе то русло, которое отвечает его скоростному полю".

Таким образом, русловые процессы - это процессы, обуславливающие движение (динамику) самого русла. Их можно рассматривать как следствие движения отдельных частиц, слагающих дно потока. Это обстоятельство определило развитие гидродинамического метода исследований русловых процессов, возможности которого рассматриваются в учебниках и монографиях по динамике русловых потоков (М.А. Великанов, 1949; В.Н. Гынчаров, 1962; К.В. Гришанин 1979). Этот метод, базирующийся на составлении и решении дифференциальных уравнений и на физическом моделировании русловых потоков, позволяет в настоящее время решать отдельные задачи в цепи задач о русловых процессах, но проследить все этапы и результат взаимодействия потока и русла с его помощью не удастся.

Дифференциальные уравнения движения воды (без учета движения наносов) решаются достаточно точно в случае одномерного и плоского движения, но русловые потоки трехмерны. Если при этом учесть то обстоятельство, что граничные условия естественного потока непрерывно меняются во времени и пространстве, т.е. по существу всегда являются неизвестными, то гидродинамический путь решения задачи о русловых процессах не позволяет получить удовлетворительных результатов. Кроме этого, русловые процессы достаточно осложняются тем, что частицы, транспортируемые потоком, имеют различные размеры и форму, их гранулометрический состав меняется по площади дна весьма пестро. При учете всех этих условий гидродинамический путь решения задачи о русловых процессах оказывается весьма сложным и малоэффективным.

Тем не менее задача о деформациях речных русел являлась и является практически важной, поскольку строительство любого сооружения на берегу реки или на ее дне без знаний о том, куда и с какой скоростью будет смещаться русло, чаще всего обречено на непредвиденные эксплуатационные затраты. К таким сооружениям относятся плотины, мосты, переходы трубопроводов через реки, опоры ЛЭП, порты, набережные, здания, водозаборы и т.д. Безусловно, что мириться с непредвиденными разрушениями таких сооружений (с теми огромными убытками, которые при этом

возникают) при их массовом строительстве невозможно. Поэтому требования практики обусловили развитие другого метода решения задач о деформациях речных русел. Этот метод, названный его авторами гидроморфологическим, получил свое теоретическое обоснование и был признан весьма эффективным в решении задач обеспечения гидротехнического строительства сравнительно недавно - в 1959 г., хотя история его становления в России начинается вместе с интенсивным развитием судоходства.

Деформации речных русел определяются путем сопоставления их разновременных планов (карт, аэрофотоснимков) - метод весьма простой и достаточно надежный для практики гидротехнического строительства. Но это не значит, что применение указанного метода не требует никаких знаний. Формальное сопоставление планов русла без знания морфологических закономерностей русловых процессов может привести к весьма грубым просчетам в оценке будущих русловых переформирований.

Динамика русловых потоков и деформации речных русел (или русловые процессы), безусловно, взаимосвязаны, но механизм этой связи в настоящее время изучен крайне слабо. Это обстоятельство и определило развитие морфологического или гидроморфологического метода, исследований русловых процессов в отрыве от гидродинамического, поэтому читаемый гидрологам курс лекций "Динамика русловых потоков и русловые процессы" - это, по существу, два различных курса, поскольку русловые процессы, протекающие в природе, пока не нашли своего объяснения средствами современной гидродинамики.

В качестве пояснения можно привести следующий пример.

Механизм взаимодействия частицы, лежащей на дне, и воды, обтекающей эту частицу, один и тот же на разных реках. Но в одних случаях реки приобретают извилистость и формируют одно русло, в других же происходит дробление потока и русло становится много рукавным без упорядоченного чередования извилин. Средствами гидродинамики решить этот вопрос не удастся, не удастся и предвидеть будущие изменения русла. В то же время простое сопоставление съемок русла за различные годы позволяет выявить направление и темп русловых переформирований, т.е. получить тот результат, который необходим для проектирования и строительства самых разнообразных сооружений.

В данной работе излагаются гидролого-морфологические приемы исследования русловых процессов как наиболее эффективные с точки зрения задач практического освоения и использования рек. Они получили свое теоретическое обоснование и разрабатываются в отделе русловых процессов Государственного гидрологического института с 1959 года.

Процессы формирования речных пойм и их морфологических особенностей (рельефа и строения) обусловлены как переотложением рекой наносов, так и плановыми деформациями речных русел, поэтому пойменные процессы неразрывно связаны с определенными видами русловых и являются их следствием.

Конечно, глубокое понимание этого утверждения станет возможным лишь после изучения данного предмета, но для первого приближения к этому пониманию можно привести следующий пример.

Представим себе, что у одного из берегов реки на определенном участке ее длины происходит осаждение наносов, т.е. образование так называемой прирусловой отмели, а противоположный берег размывается и размывтый материал переходит в категорию речных наносов и уносится с данного участка вниз по течению. Таким образом, русло реки будет смещаться в плане и на намываемом берегу будет формироваться (нарастая как вверх, так и в плане) толща отложений речных наносов (аллювиальные отложения), поверхность которых рано или поздно будет освобождаться от воды при низких ее уровнях в реке, а при высоких будет затопливаться. В вертикальном разрезе толщи аллювиальных отложений наблюдается уменьшение их крупности снизу вверх, что обусловлено уменьшением глубин и скоростей потока по мере нарастания отмели и отхода реки в сторону.

Вот так пока весьма упрощенно можно представить себе формирование речных пойм как следствие определенного хода русловых процессов.

Таким образом, наиболее целесообразно озаглавить излагаемый ниже материал "Русловые и пойменные процессы" и рассматривать его как самостоятельный без смешения с гидродинамическим методом исследования динамики русловых потоков.

1. ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ГИДРОМОРФОЛОГИЧЕСКОГО

МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЙ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

1.1. Представления о русловых формах и дискретности русловых процессов - теоретическая основа гидроморфологического метода

Непосредственные наблюдения на реках легко убеждают в том, что движение донных наносов во многих случаях происходит путем образования определенных по своей форме и размерам скоплений.

Наиболее распространенной русловой формой являются так называемые гряды - образования, подобные песчаным дюнам или барханам в пустынях.

Продольный разрез дна потока при наличии в нем гряд характеризуется чередованием понижений и повышений, причем повышение происходит менее круто, чем понижение (рис. 1).

У гряд принято различать следующие морфологические элементы (рис. 1): 1-верховой откос; 2-гребень гряды; 3-низовой откос; 4-подвалье гряды. Количественными характеристиками гряд являются длина гряды (расстояние между двумя соседними гребнями или подошвами), высота гряды (расстояние между гребнем и подвальем гряды) и скорость движения гряды.

Движение гряд происходит в результате переноса частиц с верхового откоса на низовой, перед которым поток отрывается от дна (явление срыва обтекания потоком стенок) и образует вихрь с горизонтальной осью вращения, что и обуславливает осаждение частиц на низовом откосе.

Характерной особенностью продольного разреза тела гряды является так называемая косая слоистость, выражающаяся в чередовании слоев различной крупности, залегающих параллельно низовому откосу. Ее происхождение, видимо, обусловлено тем, что по верховому откосу гряды движутся более мелкие гряды (т.е. опять же песок перемещается, образуя грядовые формы), таким образом, на низовой откос периодически поступает порция песка различной крупности. Вихрь, или, как принято говорить, вихревой валец воды, производит сортировку этой порции песка - сначала из него выпадают более крупные частицы, а затем более мелкие. После этого поступает новая порция песка и т.д. Расположение гребней гряд в плане довольно часто оказывается подобным, приведенному на рис. 2.

Многочисленные исследования грядового движения наносов в

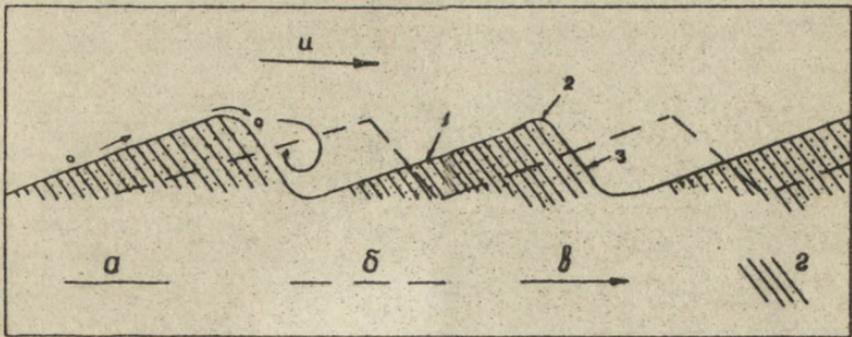


Рис. 1. Продольный профиль поверхности дна руслового потока при грядовом движении донных наносов:
а и б - соответственно предшествующее и последующее положения гряд; в - направление движения потока;
г - ориентация слоев песка различной крупности (косая слоистость)

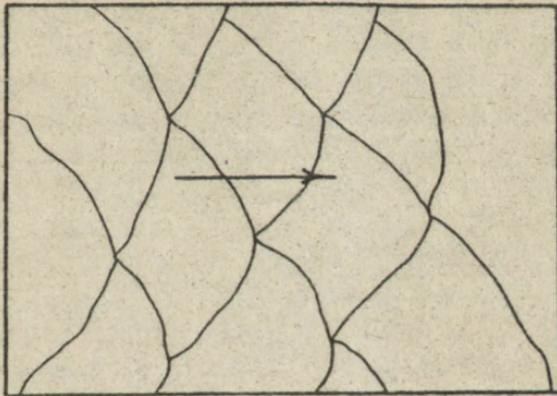


Рис. 2. Схема взаимного расположения гребней песчаных гряд на плане русла.
Стрелкой показано направление движения гряд и потока воды

лабораторных лотках и естественных руслах направлены, главным образом, на выявление связей между характеристиками гряд (крупность наносов, высота, длина и скорость движения гряд) и характеристиками потока воды над ними (скорость, глубина), а также на анализ условий возникновения и исчезновения гряд в потоке.

Обобщение и анализ результатов этих исследований как в нашей стране, так и за рубежом выполнены Н.С.Знаменской (1976) и Б.Ф.Снищенко (Н.Е.Кондратьев, И.В.Попов, Б.Ф.Снищенко, 1982).

На определенных участках речных русел происходит замедление или остановка движения донных наносов как в форме гряд, так и в виде отгольных частиц. В результате возникают более сложные русловые формы - отмели, осередки, острова, песчаные пляжи. Продольные размеры этих форм сопоставимы с шириной русла, а вертикальные - с глубиной, в отличие от гряд, длина и высота которых в несколько раз меньше ширины и глубины потока соответственно. Эти сложные русловые формы, как показывают натурные наблюдения и сопоставления разновременных планов русел, так же как и гряды, с течением времени меняют свое местоположение, форму и размеры. Переформирования русел рек протекают при определенных гидравлических условиях потока (главным образом, при определенных скоростях течения). Обычно эти переформирования происходят в периоды повышенной водности рек - половодья и наводки. Для меженистого потока русловые формы следует рассматривать как унаследованные от периода больших глубин и скоростей течения. Весьма важным и пока еще недостаточно исследованным вопросом является связь между водностью руслового потока и динамикой тех или иных русловых форм. Выявление таких связей является основой для составления средних многолетних и ежегодных прогнозов деформаций речных русел. В литературе по этому поводу можно встретить определения так называемых руслоформирующих расходов воды (Н.И.Маккавеев, 1955; Р.С.Чалов, 1979; В.С.Лапшенков, 1979), при которых в реке проходит основной сток донных наносов и, следовательно, наблюдаются интенсивные переформирования русла.

Н.И.Маккавеев (1955) предложил определять значение руслоформирующего расхода воды (Q_{ϕ}) по максимуму кривой

$Q_{\phi} = f(A \cdot Q^m \cdot P \cdot i)$, где Q - среднее значение расхода воды в

каждом интервале, на которые разбит весь диапазон расходов воды данной реки; P - вероятность попадания расходов воды в данный интервал; i - уклон водной поверхности, который может быть различным для разных интервалов; M - параметр, определяемый по графику связи (логарифмической анаморфозе) между расходами воды и донных наносов; A - коэффициент, зависящий от ширины размыва реки при данном Q , его значение равно 1 до выхода воды на пойму и 0,5 при затоплении поймы на ширину, в 10 раз больше ширины русла.

Основная трудность применения данной методики расчета руслоформирующих расходов воды состоит в определении значения показателя степени M . Дело в том, что существующие методы измерений и расчетов расходов донных наносов дают весьма неточные результаты, единичные рекомендации, достаточно опробованные, пока не выработаны. Н.И.Маккавеев рекомендует принимать значение M равным 2 для рек с песчаным руслом, 2,5 - с гравийно-галечным и 3 - с галечно-валунным; ввиду отмеченного выше обстоятельства эти значения следует считать приближенными и нуждающимися в проверке и уточнении.

В.С.Лашенков (1979), основываясь на результатах исследований рек Средней Азии, которые проводили УТКС и Среднеазиатское отделение гидропроекта, рекомендует определять Q_{ϕ} для песчаных русел как обеспеченный в течение 20-30 дней в средний по водности год, а для гравелисто-галечниковых русел - как обеспеченный в течение 3-7 дней. Такой расход по своему воздействию на русло эквивалентен действию всего гидрографа и тем самым "отражает количественно активный фактор руслообразования - водность потока" (В.С.Лашенков, 1979, с.8).

Таким образом, деформации речного русла происходят в результате перемещения потоком воды различных русловых образований путем переотложения наносов. Мы можем видеть движение отдельной частицы на дне, движение гряд различного размера (порядка) и движение сложных русловых форм (больших; по отношению к реке, скопления донных наносов). Нетрудно догадаться, что законы движения отдельных частиц будут иные, чем законы движения гряд, и, в свою очередь, деформации сложных форм будут протекать по своим законам. Точно так же, как атом или молекула вещества не напоминает своими свойствами само вещество, так и динамика

отдельных русловых форм не может быть подобной динамике отдельных частиц или более мелких форм, слагающих ту форму, которую мы изучаем.

Итак, мы вплотную подошли к определению понятия дискретности русловых процессов, которое было сформулировано Н.Е.Кондратьевым (1953). Дискретность, или структурность, — это свойство материи раздробляться на отдельные элементы и образовывать из них обособленные группы, которые могут в свою очередь объединяться в более крупные группы и соединения. При этом отдельные элемент, группа элементов или соединение групп имеют свои индивидуальные свойства и к ним должны применяться свои приемы и методы изучения.

Таким образом, как отмечает И.В.Попов (1965), понятие дискретности материи (в данном случае русловых процессов) сводится к философскому вопросу о соотношении формы и содержания. При гидравлических исследованиях взаимодействие грунтов русла с потоком является основным содержанием руслового процесса, а морфологические элементы русла выступают как формы. Гидроморфологический метод исследования предполагает содержанием процесса считать взаимодействие потока и русловых форм, динамику этих форм. Такой подход позволяет считать, что русловые процессы — это изменения морфологии русла под действием руслового потока. Хотя с этой формулировкой можно и не согласиться, так как в ней явно результат процесса выдается за сам процесс, т.е. выступает как содержание, а не форма. Но для практического использования рек требуется предвидеть именно конечный результат, т.е. динамику самих русловых форм, а не всей совокупности процессов, вызвавших изменение русла.

Итак, исходя из понятия дискретности русловых процессов, можно считать целесообразным применение различных методов их исследования, в частности применение гидроморфологического метода наряду с гидродинамическим.

Н.Е.Кондратьев (1959) предложил разделить все русловые формы на простые и сложные. К простым относятся те, образование которых возможно при равномерном, установившемся движении водного потока и определяется его гидравлическими характеристиками при имеющемся материале, слагающем русло. Сложные формы отображают не только гидравлику потока, но и весь набор физико-географических условий водосбора, то есть определенное сочетание стока воды и

наносов, а также крупность последних. К простым русловым формам Н.Е. Кондратьев относит гряды, осередки, побочни и пляжи, то есть все разнообразные скопления донных наносов в русле, а к сложным — само русло реки и пойму со всеми их морфологическими особенностями.

При всей справедливости исходной посылки такое разделение нам представляется не удачным ввиду следующих обстоятельств. Поскольку русловой формой в общем случае мы называем такие участки русла, на которых наблюдается баланс расхода и осадения наносов (в среднем за год или за многолетний период), то есть происходит процесс их переотложения, как, например, в пределах одной гряды, то пляжи, осередки и острова не могут быть русловыми формами, а представляют собой только их части, в пределах которых преимущественно происходит аккумуляция наносов. Так, например, одной русловой формой являются плесовая ложбина у вогнутого берега меандрирующей реки и нижележащая прирусловая отмель (пляж) у выпуклого берега, так как продукты размыва плеса в плане отлагаются на нижерасположенной отмели. Такая русловая форма сохраняет баланс наносов в среднем многолетнем разрезе, создает вполне определенный рисунок и рельеф русла и, следовательно, является сложной. Аналогично пляжу осередки и острова представляют собой, на наш взгляд, части сложных русловых форм.

В настоящее время вопрос о схеме переотложения реками наносов в ряде случаев остается открытым, для развития классификации русловых форм необходимы дальнейшие исследования. Пока же ограничимся тем, что гряды будем считать простыми формами, а все остальные, более крупные русловые образования — сложными или их частями.

Кроме транспорта донных наносов путем образования русловых форм в природе имеет место бесформенное или бесструктурное их движение, характерное для горных участков рек. В данном случае крупные валуны и галька перемещаются в период больших скоростей потока, потом останавливаются на спаде половодья или паводка, образуя беспорядочные временные скопления, и вновь вовлекаются в движение при следующем половодье или паводке.

1.2. ЗВЕНА ГИДРОГРАФИЧЕСКОЙ СЕТИ И ПОЯВЛЕНИЕ ОБ ОБРАТИМЫХ И НЕОБРАТИМЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ

Все звенья гидрографической сети представляют собой эрозионные формы рельефа и, следовательно, являются областью исследований геоморфологов, которые решают задачи: о формировании продольного профиля рек, образовании речных террас и т.д., то есть изучают длительные вековые процессы формирования речных долин.

В геоморфологической литературе существует большое число классификаций эрозионных форм, но нет общепринятой. По мнению И.В. Попова, для морфологических исследований руслового процесса наиболее удобной является классификация, предложенная А.С. Козыменко (1954).

В этой классификации выделяются четыре звена гидрографической сети: ложбины, лощины, суходолы и речные долины.

Л о ж б и н ы с т о к а — реликтовые эрозионные образования, которые выработаны в периоды большей водности, а в настоящее время не имеют следов сосредоточенного размыва. Их склоны и дно задернованы, при современной водоподаче (жидкие осадки, снеготаяние) на склонах ложбин наблюдается только так называемый плоскостной или мелкоструйчатый размыв, поэтому в поперечном сечении ложбины отсутствует зона сосредоточенной эрозии — над коренными породами залегает практически равномерный слой осадочных пород (рис.3,а).

Величина плоскостного смыва оценивается десятими долями миллиметра в год.

Л о щ и н ы с т о к а характеризуются тем, что на их дне периодически при снеготаянии и дождях появляются сосредоточенные потоки воды, мощность которых оказывается достаточной для размыва тальвега лощины, т.е. в отличие от ложбин мощность покровного чехла осадочных пород на дне лощины оказывается меньше, чем на склонах. Дерновый слой размывает в результате действия временного руслового потока (рис.3,б).

Лощины, как правило, образуются при соединении двух или более ложбин стока.

С у х о д о л ы образуются при слиянии потоков лощин и в отличие от них характеризуются не только презанием руслового потока в дно, но и смещением русла в сторону, т.е. плановыми деформациями. Русловой поток на дне суходола приобретает извилистые очертания и в русле возникают устойчивые участки раз-

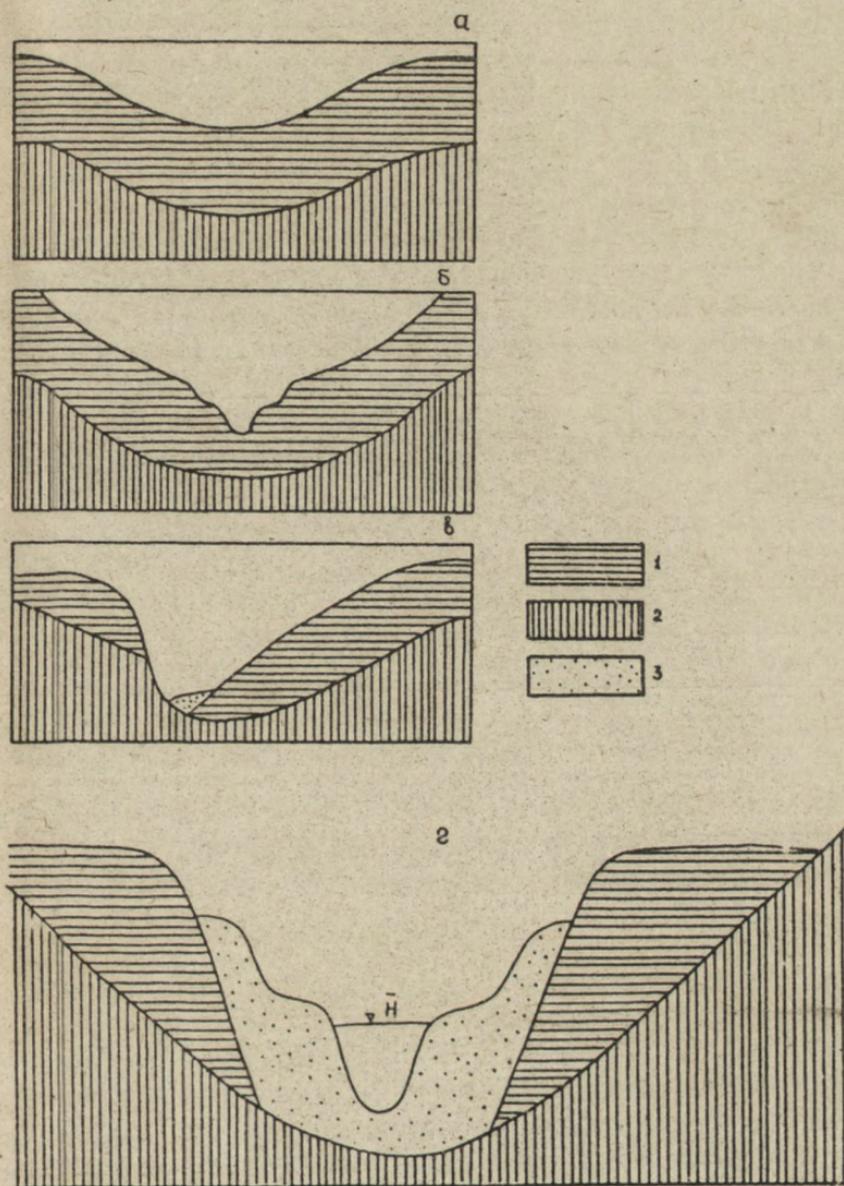


Рис. 3. Схематические поперечные профили звеньев гидрографической сети:
а - ложбина стока; б - лощина стока; в - суходол;
г - речные долины.
1 - покровные породы; 2 - коренные породы; 3 - аллювиальные (речные) отложения

мыва и намыва рыхлого материала, транспортируемого потоком, — наносов. На выпуклых берегах извилин наблюдается накопление наносов, а вогнутые берега размываются. Это приводит к тому, что мощность осадочного чехла на разных склонах суходола оказывается различной (рис. 3, в).

При слиянии временных водных потоков образуются речные долины — выработанные постоянным потоком воды, вытянутые полные формы рельефа с общим наклоном от одного конца к другому, имеющие на дне русло потока и характеризующиеся тем, что никогда не пересекают друг друга, а сливаются, образуя ниже места слияния более крупную речную долину. В отличие от ложбин, лощин и суходолов дно речных долин, как правило, сложено речными или водными наносами, т.е. тем материалом, который выносится с поверхности водосбора потоками воды.

В руслах рек, протекающих на дне речных долин, наблюдается чередование зон размыва и отложения наносов или обратимые деформации русла, которые представляют собой способ транспортировки рекой наносов.

Если в верхних звеньях гидрографической сети преобладает вынос материала, или так называемая эрозия, то в речных руслах наблюдается процесс переотложения наносов, или обратимые деформации.

Разумеется, что в каждом конкретном случае не обязательно имеются все указанные звенья гидрографической сети: например, река может вытекать из озера или с болота. Выше изложена наиболее общая схема, которая, однако, позволяет всегда выявить зоны питания реки наносами, и зоны, где наблюдается их переотложение.

Утверждение об обратимости деформаций речных русел может вызвать возражение с позиций неотектоники. Например, на участках поднятий земной коры реки врезают свои русла, т.е. производят эрозию, а на участках опусканий — аккумуляцию наносов. Да, действительно, такие процессы имеют место, но их интенсивность в большинстве случаев измеряется миллиметрами в год, в то время как деформации русла, вызванные транспортом рекой наносов, выражаются метрами в год и, таким образом, являются основными при проектировании, строительстве и эксплуатации сооружений на реках.

1630913

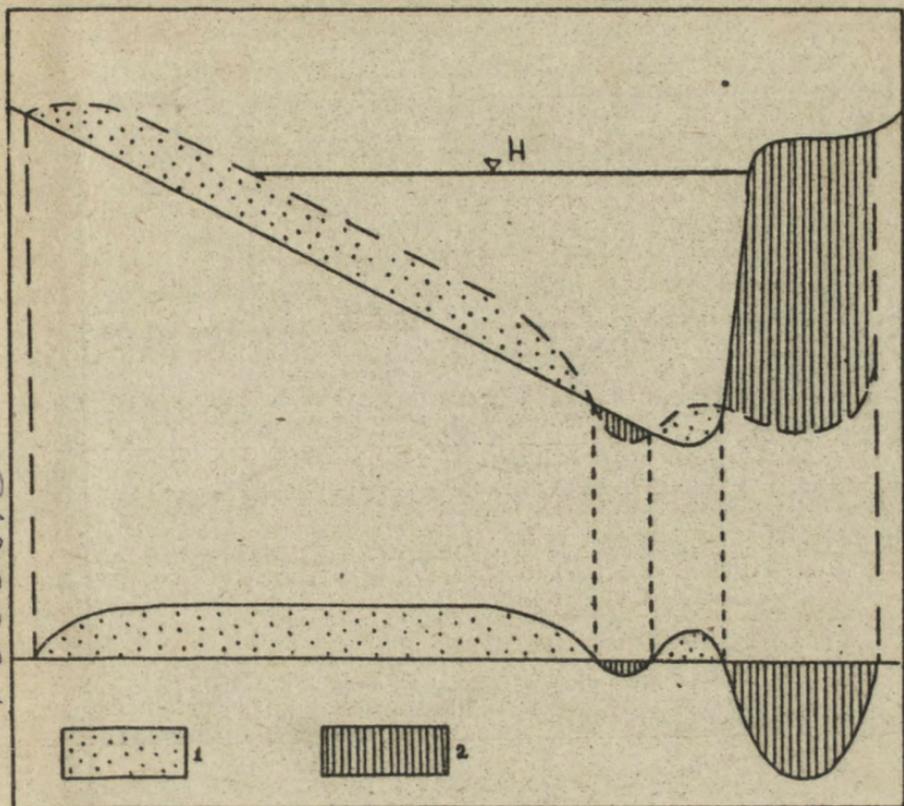


Рис. 4. Определение площадей намыва (1) и размыва (2) в створе реки при совмещении двух одновременных профилей поперечного сечения русла



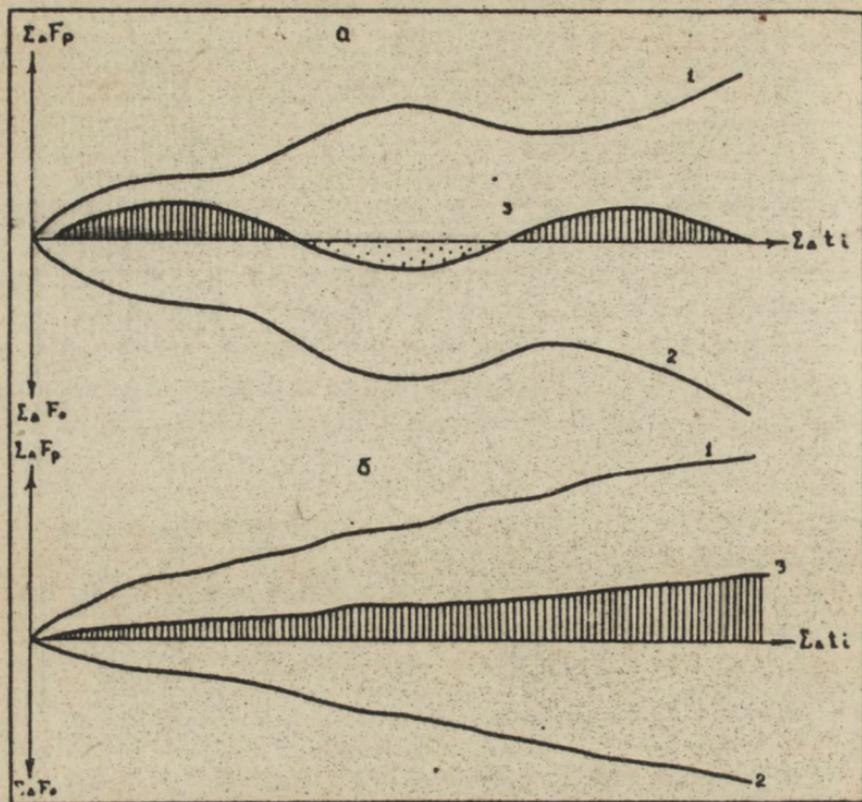


Рис. 5. Интегральные кривые хода во времени размыва ($\Sigma \Delta F_p$), намыва ($\Sigma \Delta F_o$) и результирующих деформаций ($\Sigma \Delta F_p - \Sigma \Delta F_o$) в данном створе реки

Объемы эрозии или аккумуляции (однонаправленных деформаций) в современных речных руслах в тысячи раз меньше объемов обратимых деформаций при перераспределении наносов.

Кроме зон эрозии и перераспределения наносов в бассейнах рек выделяется зона относительно устойчивой или преобладающей аккумуляции — это устьевые или дельтовые зоны при впадении реки в море или озеро. Здесь происходит резкое снижение скоростей руслового потока, большая часть транспортируемых им наносов оседает на дно. Аккумулятивные образования нарастают в высоту и в плане, обуславливая дробление русла и блуждание потока в собственных отложениях. Процессы динамики таких устьев, так же как и эрозионные процессы в верхних звеньях гидрографической сети, являются отдельной областью исследований и далее рассматриваться не будут. С целью количественной оценки обратимых и необратимых деформаций Н.Е. Кондратьев (1959) предложил следующий способ.

Допустим, что для какого-то створа реки мы получили серию следующих друг за другом профилей поперечного сечения дна с интервалом времени между каждыми двумя последовательными промерами Δt_i .

При совмещении каждого последующего и предыдущего профилей мы можем определить площадь размыва ΔF_p и площадь намыва ΔF_o в данном створе за время Δt_i (рис. 4) и в результате построить интегральные кривые хода размыва $\sum \Delta F_p = f(t)$ и намыва $\sum \Delta F_o = g(t)$ во времени (рис. 4), а также кривую результирующих деформаций, ординаты которой определяются как разность ординат интегральных кривых размыва и намыва $(\sum \Delta F_p - \sum \Delta F_o)$.

Если кривая результирующих деформаций не будет устойчиво отклоняться в ту или другую сторону, то это означает, что в данном створе нет однонаправленных деформаций и проходят только обратимые, или знакопеременные (рис. 5, а), в противном случае (рис. 5, б) обратимые деформации сочетаются с одновременно идущими необратимыми, темпы которых можно определить как среднюю или мгновенную скорость изменения ординат кривой результирующих деформаций.

1.3. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

С позиций динамики речных русел реки — это не просто потоки воды или, как говорил А.И. Воейков, — продукт климата, но и массы сносимых водой твердых частиц, т.е. продукт взаимодействия

стекающей воды и подстилающей поверхности.

Основными естественными факторами, определяющими характер русловых потоков (т.е. потоков воды и наносов), являются: величина и режим водоподдачи на поверхность водосбора, геологическое строение и рельеф бассейна, состояние его поверхности (степень задернованности, растительный покров, степень промерзания почвы и пр.). При определенном сочетании этих факторов будут наблюдаться определенные величины стока воды и наносов (можно говорить о ежегодном и среднем многолетнем сочетании этих факторов) и соответствующие русловые процессы. Такие представления

о русловых процессах как продукте комплекса естественных условий бассейна реки были сформулированы в 1959 г. Н.Е. Кондратьевым. Из этих представлений ясно видно, что каждая река вынуждена транспортировать то количество наносов, которое определяется климатом, рельефом, геологическим строением и другими условиями поверхности водосбора. В соответствии с этим реки строят свой продольный профиль, образуя простые и сложные русловые формы, причем указанный процесс является саморегулирующимся. Действительно, представим себе, что на какой-то участок реки поступает наносов меньше, чем может транспортироваться при данных скоростях течения. В этом случае будет происходить размыв дна, увеличение поперечного сечения потока, снижение скоростей течения и транспортирующей способности потока до тех пор, пока количество транспортируемого материала не станет равным количеству поступающих на данный участок реки наносов. Нетрудно провести подобные рассуждения для обратного случая, когда поступление наносов на участок реки превышает ее транспортирующую способность.

Таким образом, если рассматривать не всю реку, по длине которой происходят сложные изменения естественных факторов русловых процессов (поскольку нарастает площадь водосбора и тем самым меняются средние условия бассейна, т.е. включаются новые области питания реки водой и наносами), то для отдельного бесприточного участка реки основными факторами русловых процессов будут являться расход воды и наносов, интегрально отражающие взаимодействие климатических, геологических, геоморфологических и почвенно-ботанических условий бассейна.

Поскольку транспорт (переотложение) рекой наносов осуществляется путем размыва одних участков русла и намыва других, то на характер и интенсивность переформирования речного русла кроме стока воды и наносов существенное влияние оказывают механические свойства грунтов его ложа (дна и берегов). Например, размыв какого-либо участка русла, который должен бы иметь место из-за превышения транспортирующей способности потока над действительным расходом наносов, может прекратиться, если река вскрыет трудноразмываемые породы.

В случае, когда река протекает по трудноразмываемым породам и не в состоянии деформировать их в соответствии с имеющимся соотношением стока воды и наносов, происходит как бы ограничение в развитии руслового процесса, т.е. появляются ограничивающие факторы. На таких участках обычно наблюдаются подпory и резкие спады водной поверхности, относительно беспорядочные сужения и расширения потока и русловые процессы - в их морфологическом понимании - могут вообще не иметь места: наносы проходят такой участок без переотложения. Но в большинстве случаев ограничивающие факторы не исключают полностью русловые процессы, а изменяют их характер и интенсивность, увеличивая долю транзитных наносов по отношению к участвующим в переотложении.

Таким образом, если исключить из рассмотрения ограничивающие факторы, то морфология речного русла окажется зависящей от средней многолетней насыщенности потока наносами, а ежегодно происходящие на реках переформирования русел будут зависеть как от многолетнего стока воды и наносов (т.е. от морфологии русла), так и от реального их соотношения в конкретный год.

1.4. ДЕЛЕНИЕ РЕЧНЫХ НАНОСОВ НА РАЗЛИЧНЫЕ КАТЕГОРИИ ПО СПОСОБУ ИХ ТРАНСПОРТА ПОТОКОМ

Как уже отмечалось, все русловые потоки воды транспортируют твердые минеральные и органические частицы - речные наносы, которые можно наблюдать в любой части потока. Наиболее часто наносы делят на две категории - взвешенные и донные. Взвешенные наносы перемещаются в самом потоке, т.е. как бы подвешены в воде за счет того, что их гидравлическая крупность оказывается меньше вертикальной пульсационной составляющей скорости течения, своим присутствием определяют мутность воды.

Донные наносы перемещаются потоком путем их перекатывания, волочения по дну или сальтации. Последний способ перемещения выражается в том, что частица отрывается от дна, проходит в потоке некоторый путь, сравнимый с ее размерами, и затем снова падает на дно. Такое перемещение донной частицы обусловлено наличием в потоке завихрений, или турбулизирующих возмущений, по В.И. Гончарову, перемещающихся от дна к поверхности. Турбулизирующие возмущения обуславливают взвешивание мелких наносов и сальтацию у дна более крупных. Мелкие наносы из придонной области вносятся такими возмущениями до поверхности потока. В половодье на любой реке с достаточной мутностью воды можно видеть бурление поверхности и образование в месте бурления мутных пятен, которые постепенно после рассасывания турбулизирующего возмущения растекаются в стороны и постепенно исчезают.

Как отмечает К.В. Гришанин (1979), кроме этих двух категорий наносов в русловых потоках с песчаным руслом есть еще одна - промежуточная, характеризующаяся тем, что частицы, поднятые со дна турбулизирующими возмущениями, проходят в толще потока путь, в тысячи раз больший их размеров, а затем вновь выпадают на дно. Такие наносы К.В. Гришанин называет полувзвешенными. Подобный способ перемещения песчаных частиц можно наблюдать в пустынях, где при относительно слабом ветре частицы песка не отрываются от поверхности дюны или бархана, а перекатываются с верхового откоса на низовой. Но при усилении ветра отдельные частицы отрываются от поверхности и переносятся не в подвалье данного бархана, а значительно дальше. При этом говорят, что пески дуют. Очевидно, что подобным образом может "дуть" и песчаное русло при определенных скоростях течения и, таким образом, может возникать категория полувзвешенных наносов.

Для целей изучения русловых процессов важно отметить, что русловые формы и само русло реки строятся главным образом из донных и полувзвешенных наносов, которые перемещаются потоком путем переотложения их на дне, поэтому в дальнейшем эти две категории наносов мы будем называть донными, или русловыми, в отличие от взвешенных, которые участвуют, главным образом, в строении верхней части русловых образований, затопляемой лишь при высоких уровнях воды (при разливах реки).

Для определения граничного диаметра между донными и взвешенными наносами В. Крессером в 1964 г. было предложено совмещать кривые

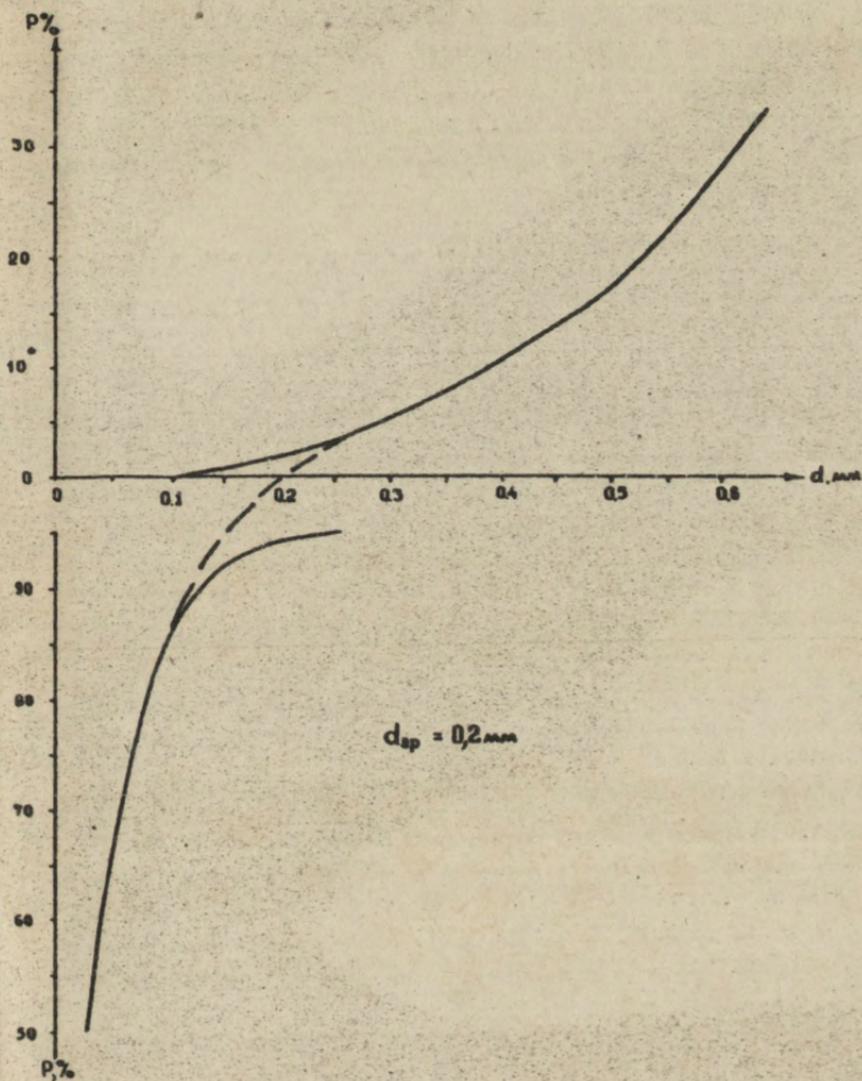


Рис.6 Способ определения граничного диаметра между донными и взвешенными наносами

гранулометрического состава донных и взвешенных наносов по оси крупности частиц. При этом оказывается, что в составе донных и взвешенных наносов какая-то доля частиц имеет одни и те же размеры, т.е. граница перехода от одной категории наносов к другой заключена в некотором интервале значений крупности. Примерно середина этого интервала и является, по предложению Крессера, граничным диаметром. Его значение можно определить графически путем плавного сопряжения кривых гранулометрического состава донных и взвешенных наносов (рис. 6).

I.5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАРТ И МАТЕРИАЛОВ АЭРОФОТОСЪЕМКИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ РУСЛОВЫХ И ПОЙМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Без преувеличения можно сказать, что развитие аэрофотосъемки обусловило значительный прогресс в изучении всех природных объектов и явлений, в частности, процессов русловых и пойменных преформирований.

Карты и аэрофотоснимки дна речных долин позволяют одновременно рассмотреть значительные участки русла и поймы, определить особенности плановых очертаний и размеры русловых и пойменных образований, зоны размывов и намывов на берегах и, таким образом, являются основными материалами при исследовании русловых процессов. При этом всегда следует стремиться получить разновременные съемки реки, поскольку их сопоставление позволяет наиболее наглядно и объективно определить направление и величину плановых изменений русловых форм.

Аэрофотосъемочные материалы могут быть в виде репродукций накидного монтажа, фотосхем, фотопланов, контактных отпечатков.

Контактные отпечатки - это отдельные кадры или снимки местности, называются так потому, что при печати фотобумага непосредственно плотно прикладывается к негативу. Контактные отпечатки нумеруются и укладываются в той последовательности, в которой производилось фотографирование, и таким образом получается накидной монтаж отдельных кадров.

На накидном монтаже отдельные контактные отпечатки перекрывают друг друга. Для получения только контурного плана местности перекрытие аэроснимков составляет около 30%, а для получения объемного изображения - 60%.

С помощью фотографирования накидного монтажа составляют его репродукцию (снимок в уменьшенном масштабе), которая служит для последующего сбора накидного монтажа при работе.

Для получения фотографического плана местности контактные отпечатки, составляющие накидной монтаж, обрезают по линиям контуров отдельных участков местности, по которым производится состыковка изображений одних и тех же участков на соседних контактных отпечатках, и таким образом получается упрощенная фотосхема.

Г.6. ВЫВОДЫ

1. Деформации земной поверхности водными потоками целесообразно разделять на необратимые и обратимые.

Необратимые деформации - эрозия и аккумуляция - столетиями протекают в одном направлении и соответственно приурочены к верхним и нижним звеньям гидрографической сети.

Обратимые, или знакопеременные, деформации протекают в руслах рек и представляют собой переотложение главным образом донных наносов.

Обратимые деформации протекают в сотни и тысячи раз быстрее необратимых и поэтому их изучение имеет гораздо большее практическое значение.

2. Речные наносы делятся на донные и взвешенные как по механизму их транспорта водными потоками, так и по участию их в строении различных частей русловых форм.

3. Транспорт донных наносов наряду с движением отдельных частиц происходит путем их переотложения в образованных потоком русловых формах, различных по своим размерам по отношению к размерам самого потока и по своим законам перемещения.

Различают простые и сложные русловые формы.

Простые - это гряды различного масштаба (микро, мезо и макро), сложные - это характерные участки реки, образование которых обусловлено определенным сочетанием среднего многолетнего стока воды и наносов, то есть физико-географическими условиями бассейна. Динамика сложных форм обусловлена перемещением по ним простых форм. Поверхность аккумулятивных участков сложных русловых форм, в отличие от простых, рано или поздно становится лишь периодически затопляемой, транспорт и накопление здесь донных наносов прекращаются и начинается осаднение взве-

шенных. Так формируются участки поймы с типичным двухслойным строением.

4. Каждому структурному уровню перемещения донных наносов должны быть поставлены в соответствие свои методы исследований: в частности, понимая под русловым процессом динамику сложных русловых форм, целесообразно применить морфологический, или гидро-морфологический, метод исследования, который позволяет найти морфологические законы изменений русла без применения математического аппарата гидродинамики.

2. ТИПЫ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ РАВНИННЫХ РЕК

(по разработкам ГТИ)

2.1. 0 классификациях речных русел и русловых процессов

Очевидно, что речные русла, как и любые природные объекты, можно типизировать и классифицировать по самым различным признакам: по форме поперечных сечений, по крупности донных наносов и отложений, по степени устойчивости, по плановым очертаниям, по степени кинетичности руслового потока и т.д.

Типизации такого рода создавались прежде и создаются в настоящее время. Из относительно ранних работ, касающихся этого вопроса, на наш взгляд, наиболее удачной следует признать типизацию М.А.Великанова (1948), который предложил выделять пять типов русел по степени их устойчивости.

1. Слаборазмываемые русла, сложенные скальными породами или крупной галькой.

2. Русла с закономерным чередованием во времени размывов и намывов каждого их участка.

3. Русла, изменяющие свои формы (местоположение изобат), без строгой периодичности, т.е. более беспорядочно, но с устойчивыми очертаниями в плане.

4. Русла с относительно неупорядоченными изменениями во времени глубин и плановых очертаний. Русловой поток имеет значительные скорости, но протекает в легко размываемых грунтах или, иными словами, транспортирует слишком легкие для него наносы, как, например, Агударья.

5. Русла, изменяющиеся со скоростью того же порядка, что и скорость самого потока; в этом случае разграничить поток и русло практически невозможно - это селевые потоки.

Мысль охарактеризовать степень устойчивости русел числом принадлежит В.М.Лохтину (1897). Коэффициент устойчивости Лохтина представляет собой отношение среднего размера частиц, слагающих русло, к величине уклона водной поверхности (d_{cp}/i). М.А.Великанов предложил иной коэффициент устойчивости, "исходя из того, что воздействие потока на подвижные частицы дна связано непосредственно со скоростью, а не с уклоном..." (М.А.Великанов, 1955, с. 261) и с учетом того, что данный коэффициент должен быть безразмерным, в то время как у Лохтина он имеет размерность. Коэффициент устойчивости русла (η) по Великанову записывается в следующем виде:

$$\eta = g \frac{d_{cp}}{U^2}, \quad (2.1)$$

где g - ускорение свободного падения; d_{cp} - средний диаметр донных наносов; U - средняя скорость потока.

Этот коэффициент представляет собой число Фруда в отношении размера русловых наносов.

Прогрессивность типизации М.А.Великанова состоит в попытке увязать типы речных русел с темпами и характером русловых переформирований, чего нельзя сказать о многих последующих типизациях.

Опуская подробный разбор недавних предложений по этому вопросу, следует отметить, что во всех работах "типы речных русел" и "типы русловых процессов" рассматриваются как одно и то же понятие (Р.С.Чалов, 1979; В.С.Лапшенков, 1979 и др.). Если допустить правомерность такого подхода, то понятия "речное русло" и "русловой процесс" следовало бы отождествлять, но этого сделать нельзя, а поэтому не следует смешивать и их типы.

Классификации речных русел совершенно оторваны от конкретных схем русловых переформирований, хотя такая увязка, на наш взгляд, необходима. Поэтому все они в отличие от типизаций русловых процессов не могут оказаться достаточно действенными при решении задач проектирования и строительства сооружений на реках.

В основу рассматриваемой далее типизации русловых процессов ГГИ положены идеи М.А.Великанова (1955) и Н.Е.Кондратьева (1959), а также более ранняя типизация русловых процессов И.А.Кузьмина и К.И.Россинского (1958). Эта типизация, завершенная И.В.Поповым (1965, 1969), включает семь типов руслового процесса: 1) ленточно-грядовый; 2) побочневый; 3) ограниченное меандрирование; 4) свободное меандрирование; 5) незавершенное меандрирование; 6) русловая многорукавность; 7) пойменная многорукавность.

2.2. ЛЕНТОЧНО-ГРЯДОВЫЙ И ПОБОЧНЕВЫЙ ТИПЫ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

2.2.1. Ленточно-грядовый тип руслового процесса

При ленточно-грядовом типе русловых процессов происходят только вертикальные, периодически меняющие знак, деформации русла, обусловленные динамикой простых макроформ, называемых ленточными грядами. План русла и его продольный профиль при данном типе раз-

вития можно схематически представить так, как показано на рис. 7.

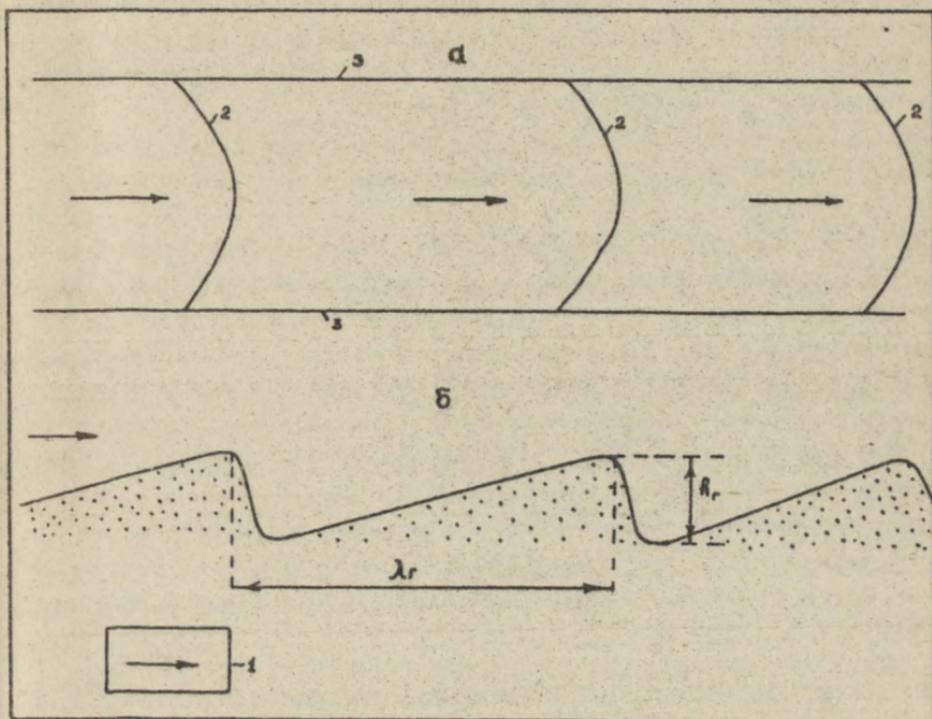


Рис. 7. План (а) и продольный профиль русла (б) при ленточно-грядовом типе руслового процесса:

- 1 - направление течения и движения гряд;
- 2 - положение гребней гряд в плане;
- 3 - линия уреза воды

Ширина ленточных гряд равна ширине русла, высота 1,5-2 м, длина в 6-8 раз больше ширины. Скорость их сползания достигает 200-300 м/год. Плановые деформации русла практически не проявляются.

Движение гряд происходит в периоды повышенной водности руслового потока (половодье, паводки) и тогда же они достигают наибольшей высоты. В межень гряды останавливаются или сползают очень медленно, гребень их частично срабатывается, материал размыва гребня сносится в подвалье. Тем не менее грядовый рельеф дна сохраняется.

Берега реки при данном типе русловых процессов не размываются, поэтому русло имеет либо прямолинейные очертания в плане, либо его

извилины являются вынужденными (орографическими), совпадающими с извилинами дна и склонов долины. Гребень каждой гряды представляет собой перекаат, а подвалье - плес. В результате движения гряд в каждом створе с течением времени наблюдается медленное увеличение площади поперечного сечения (глубин при заданном уровне воды) и относительно быстрое их уменьшение, что обусловлено формой продольного профиля гряд и направлением их движения.

Количественными, или морфометрическими, измерителями этого типа являются шаг гряды (λ_r), высота гряды (h_r); скорость сползания гряды (C_r).

Основные задачи при изучении данного типа русловых процессов сводятся к определению размеров гряд и скорости их движения в зависимости от водности и скоростей течения потока и глубин. Эти данные необходимы при проектировании, строительстве и эксплуатации водозаборных оголовков и трубопроводов на средних и малых реках, где рассматриваемый процесс имеет наибольшее развитие. Движение ленточных гряд может вызвать занесение водозаборного оголовка при надвигании на него гребня гряды или размыв шна под трубопроводом при прохождении подвалья гряды. Но, зная схему развития данного типа руслового процесса и его количественные показатели, нетрудно выбрать такие конструкции подводных сооружений, которые обеспечат их безаварийную работу.

2.2.2. Побочный тип руслового процесса

При этом типе руслового процесса, так же, как и при ленточно-грядовом, плановые деформации русла не имеют заметного проявления, и русловые переформирования обусловлены движением побочных гряд. Гребень этих гряд в отличие от ленточных перекошен в плане относительно берегов русла, и поверхность побочной гряды имеет наклон от одного берега к другому. Наиболее высокие участки побочных гряд прирленены к берегам и располагаются попеременно то у одного, то у другого берега в шахматном порядке (рис. 8). В межень гряды приостанавливают свое движение, наиболее высокие их участки освобождаются от воды и образуют так называемые побочни, хорошо различимые не только на аэрофотоснимках, но и на лубых картах с изобатами. Скорость движения побочных гряд (побочней) составляет десятки и сотни метров в год.

В отличие от ленточно-грядового типа русловых процессов в данном случае наблюдается более выраженная перестройка скоростного

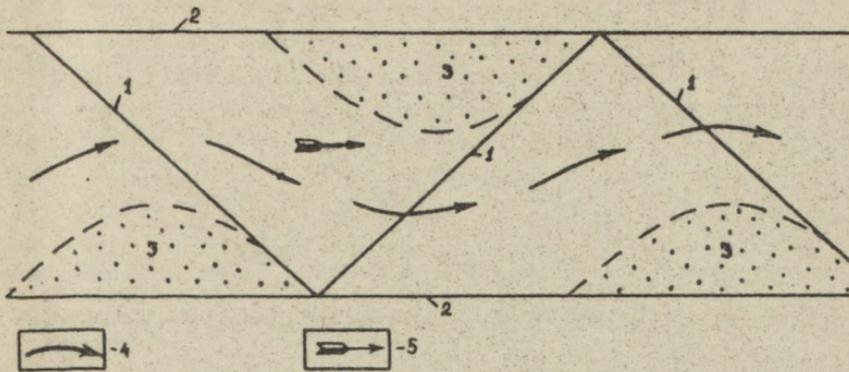


Рис. 8. Схематический план русла при побочневом типе руслового процесса: 1 - гребни побочневых гряд; 2 - линии урезов воды; 3 - наиболее высокие участки побочневых гряд (побочни); 4, 5 - направление течения потока в межень и в половодье соответственно

поля потока от половодья к межени. В половодье направление течения потока практически не отличается от направлений линий берегов, а в межень поток становится извилистым, протекая между обсохшими участками побочневых гряд. Вода как бы переливается из одного плеса в другой через перекаат - гребень побочневой гряды, и подходит к берегу в плесе под некоторым углом. При отражении струй потока от берега возникает винтовое движение воды - поверхностные струи устремляются в придонную область и двигаются в плесе параллельно линии перекаата или гребню вышележащей гряды, а на гребне нижерасположенной гряды снова выходят на поверхность (рис. 9). Поток, переливающийся через гребни гряд в межень, размывает их и откладывает материал размыва в подвальях (плесах), снижая тем самым высоту гряд, которая вновь восстанавливается в следующее половодье.

Количественные измерители и основные задачи исследований при данном типе руслового процесса такие же, как и при ленточно-грядовом. Для их определения необходимы разновременные съемки рельефа дна или разновременные аэрофотоснимки с видимыми на них побочнями.

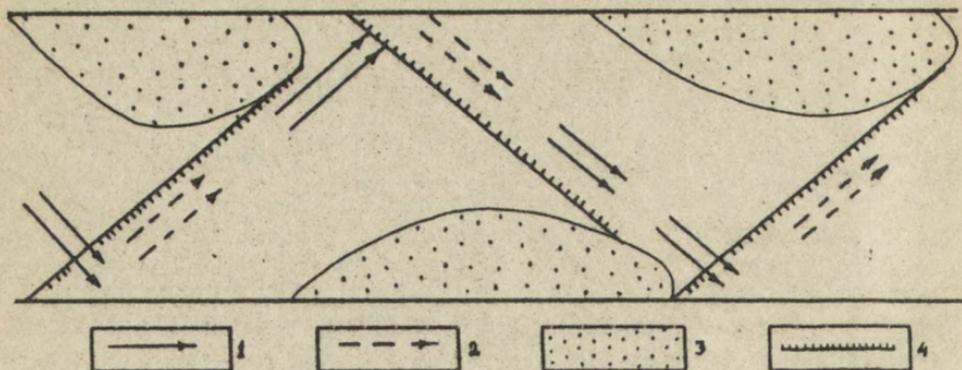


Рис. 9. Схема циркуляционного движения воды при отражении поверхностных струй от берега при побочном типе руслового процесса:
 1 - поверхностные струи; 2 - донные струи;
 3 - побочки; 4 - перекаты

2.2.3. Определение расходов донных наносов по данным о русловых переформированиях

Если допустить, что донные наносы при ленточно-грядовом и побочном типах русловых процессов перемещаются только с верхового откоса каждой гряды на низовой, и для удобства рассуждений временно не учитывать процесс сработки гребней гряд межнным потоком, то объем стока донных наносов за год определится как произведение средней площади поперечного сечения гряды на скорость ее движения C_r в м/год

$$W_{gn} = \bar{F}_r \cdot C_r. \quad (2.2)$$

Среднюю площадь поперечного сечения тела гряды можно определить следующим образом.

Допустим, мы получили план побочного или ленточно-грядового русла в изобатах (рис. 10) или ряд поперечников русла последовательно расположенных в различных частях гряд. Поперечные сечения поверхности различных частей гряд совмещают по осевой линии потока (глубины на всех поперечниках предварительно приводят к одному уровню воды) и проводят нижнюю огибающую, которая разделяет область перемещения донных наносов от области неподвижных отложе-

ний, т.е. является нижней поверхностью тела гряд в их поперечном сечении, и верхнюю огибающую этих профилей. Площадь, заключенная между верхней и нижней огибающими поперечных профилей русла, — это максимальная площадь поперечного сечения гряды. Примерно половина этой площади и будет средней площадью сечения гряды (рис. II). Скорость перемещения гряд при ленточно-грядовом типе руслового процесса определяют путем совмещения разновременных продольных профилей линии дна, снятых по осевой линии потока. Существенным моментом здесь является точность определения координат промерных точек или точек контрольных засечек при производстве работ эхолотом. При побочном типе руслового процесса скорость движения гряд можно определить по смещению побочной, путем повторных съемок (засечек) очертаний побочной относительно постоянного базиса.

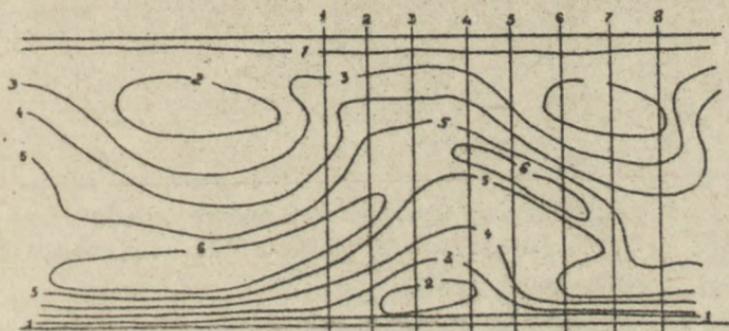


Рис. 10. Схематический план русла с побочными в изобатах

Средний годовой расход донных наносов в объемных единицах можно получить делением объема стока донных наносов на время, в течение которого происходило движение гряд, или в первом приближении на среднюю длительность половодья. Более точно время движения гряд можно установить путем непосредственных наблюдений (промеров по продольным галсам) или расчетом по данным о режиме скоростей течения потока и гранулометрическом составе донных наносов, используя понятия непередвигающих и срывающих скоростей для донных наносов, а также понятие групповой скорости влечения (В.Н.Гончаров, 1962).

При таком определении среднего за год расхода донных наносов предполагается, что их движение происходит только в какую-то часть

года. Если же объем стока донных наносов разделить на число секунд в году, то тем самым мы получим значение расхода донных наносов на много меньше среднего из имевших место в действительности.

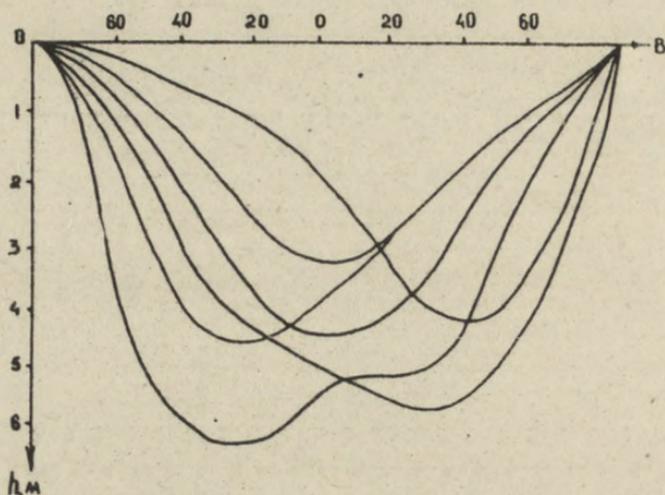


Рис. II. Совмещенные профили поперечных сечений русла в различных частях гряд (ленточных ил: побочных)

Более точное значение объема переотложений донных наносов можно получить, если к его значению, полученному вышеописанным способом, добавить объем сработки гребня гряды или объем занесения ее подваля в межень. Для определения этих дополнительных объемов необходимо путем многократных промеров установить среднее значение вертикальных деформаций гребня и подваля гряды летом и площади дна, на которых они происходят. Подобные уточнения целесообразны только в том случае, если величина деформаций дна существенно больше точности измерения глубин.

2.3. Русловые процессы меандрирующих рек

2.3.1. Ограниченное меандрирование

При данном типе русловых переформирований характерными признаками являются: I) слабая извилистость русла (во все фазы вод-

ного режима, не совпадающая с извилистостью склонов долины); 2) плановые деформации русла, выражающиеся в смещении излучин вниз по течению с сохранением своих очертаний и размеров (рис. 12); 3) наличие поймы, созданной и постоянно переформирующейся в ходе плановых деформаций русла. Вместе с этими отличительными признаками при ограниченном меандрировании обнаруживаются и общие с побочным типом руслового процесса: в русле имеются перекошенные гряды, сползающие вниз по течению, и протекают сезонные деформации плесов и перекатов. В межень перекаты частично размываются, а плесы заносятся. Макроструктура скоростного поля такая же, как и при побочном типе руслового процесса - двух-слойное винтовое движение в плесе (так называемая поперечная циркуляция) и однослойное - на перекате.

Как можно было видеть из рассмотрения ленточно-грядового и побочного типов руслового процесса, схема русловых деформаций становится ясной, если известна схема переотложения потоком донных наносов.

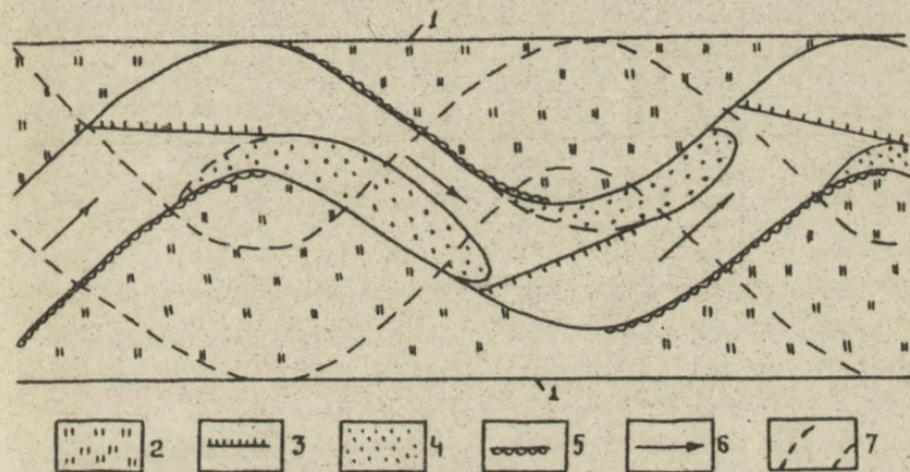


Рис. 12. Схематический план русла и его деформаций при ограниченном меандрировании:

- 1 - границы дна долины (подшва склонов долины);
- 2 - участки поймы;
- 3 - постоянно затопленные части гребней песчаных гряд (перекаты);
- 4 - наиболее высокие участки песчаных гряд, освобождающиеся от воды в летнюю межень (пляжи);
- 5 - размываемые берега;
- 6 - направление течения в русле;
- 7 - одно из последующих положений русла

В случае меандрирующего русла широкое распространение получили представления о переносе наносов от размываемого вогнутого берега к противоположному намываемому вследствие развития винтообразного движения воды, или поперечной циркуляции водных масс (рис. 13). Такое перемещение донных струй и наносов наблюдалось многими исследователями (подробный обзор и анализ этих работ выполнен Н.Н.Федоровым, "Русловой процесс", 1959) в лабораторных лотках. В большинстве случаев ширина этих лотков не более чем в 3 раза превосходила глубину потока, в то время как в естественных руслах ширина в 50-100 раз больше глубины. И хотя в отдельных экспериментах отношение ширины русла к глубине было практически таким же, как и в реках, по другим параметрам (таким, как отношение радиуса закругления к длине излучины, шероховатость дна и структура турбулентных образований) эти лотки нельзя считать подобными естественным речным излучинам.

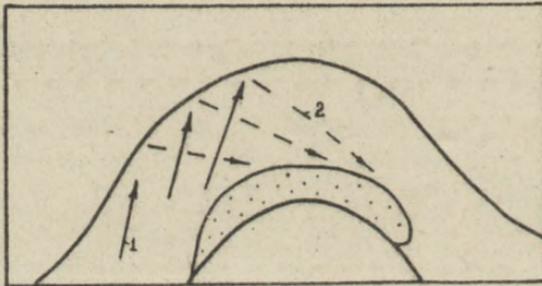


Рис. 13. Ошибочная схема поперечной циркуляции водных масс и переноса донных наносов на излучине от вогнутого к выпуклому берегу;
1 и 2 - соответственно траектории поверхностных и донных струй потока

Измерения направления донных струй на речных излучинах, выполненные рядом исследователей (Г.М.Мэтзис, 1941; Х.Фогель и П.Томпсон, 1934; Р.Блю и др. 1943; И.В.Воголюбова и О.В.Макринова, 1947; И.Л.Розовский, 1957 и др.), показывают, что практически весь материал размыва данного вогнутого берега переносится на нижерасположенный выпуклый.

В качестве подтверждения этого вывода рассмотрим относительно недавние лабораторные эксперименты З.М.Великановой (1968, 1969) и

И.А.Ярославцева (1966).

В опытах З.М.Великановой (1968) на вход в закругление лотка (створ I-I на рис. I4) с недеформируемыми стенками подавалась вода с наносами и здесь наблюдалось образование гряды, которая по мере движения вниз по течению увеличивалась в размере, причем различные ее части перемещались с различными скоростями и она изменяла свою ориентацию по отношению к линиям берегов (перекашивалась). Между вторым и третьим створами гряда останавливалась, но для различных участков гряды причины остановки были разными.

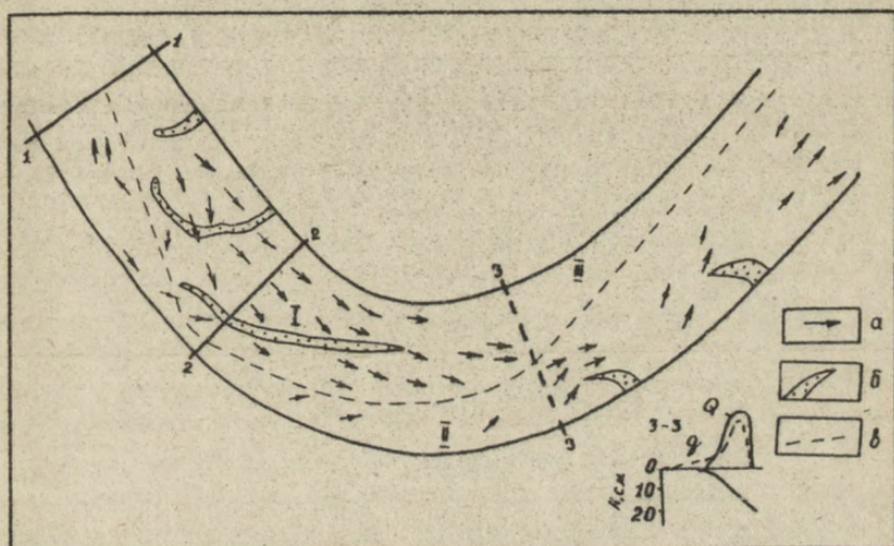


Рис. I4. Деление участка поворота на зоны по характеру движения донных наносов по З.М.Великановой (1969); а - направление донных траекторий; б - контуры гряд; в - границы выделенных зон. I - зона I, ограниченная створами I-I и 3-3 и пунктирной линией - область грядового движения наносов; II - плес между створами 2-2 и 3-3, пунктирной линией - зона безгрядового транспорта наносов; III - зона минимальных скоростей течения и расхода донных наносов (в зоне I между створами 2-2 и 3-3 происходит накопление наносов с образованием прирусловой отмели)

Половина гряды, примыкающая к выпуклому берегу, останавливалась вследствие уменьшения скоростей течения вдоль выпуклого берега или, другими словами, из-за образования относительно застойной зоны - зоны срыва обтекания потоком стенок. Другая половина гряды, расположенная у вогнутого берега, останавливалась из-за того, что песок, поступающий сверху, не оседал в ее подвалье, а проносился дальше без образования каких-либо форм вследствие больших скоростей течения. Гребень остановившейся таким образом гряды образовывал перекат, а ее подвалье - плес. После выхода из закрутления (за створом 3-3) донные наносы вновь образовывали гряду и, следовательно, на следующем повороте весь процесс стал повторяться.

Эти опыты доказали, что на речной излучине практически весь расход донных наносов проходит у вогнутого (размываемого) берега и продукты его размыва отлагаются потоком на нижеследующем выпуклом берегу, а не переносятся к противоположному. К аналогичному выводу можно прийти и из рассмотрения поля донных скоростей на повороте потока, полученного в опытах И.Я.Ярославцева (рис. 15). В опытах И.Я.Ярославцева и З.М.Великанова в отличие от опытов А.И.Лосиевского отношение ширины русла к глубине было ближе к таковому для рек, хотя все равно оставалось в несколько раз меньше, чем на реках.

Таким образом, можно сделать вывод, что на поворотах речных русел поперечная циркуляция водных масс охватывает лишь часть ширины русла (плес), прилегающую к размываемому вогнутому берегу и имеет незамкнутый вид (рис. 16).

Прежде чем закончить рассмотрение русловых и пойменных деформаций при ограниченном меандрировании, поясним значение необходимых в дальнейшем терминов, таких как пояс меандрирования и сегмент поймы. Под поясом меандрирования понимается часть дна речной долины, заключенная между линиями, соединяющими вершины излучин по обоим берегам реки. В случае ограниченного меандрирования вершины излучин упираются в склоны речной долины и пояс меандрирования занимает всю ширину дна (рис. 12). Сегментом поймы называют ее участок, сформированный в ходе плановых деформаций одной излучины. В данном случае (рис. 12) сегменты поймы имеют полулунную форму и ограничены с одной стороны бровкой берега руслового потока, а с другой - линией склона долины.

Русловые и пойменные переформирования при ограниченном меандрировании обусловлены размывом берега в верховой по течению части

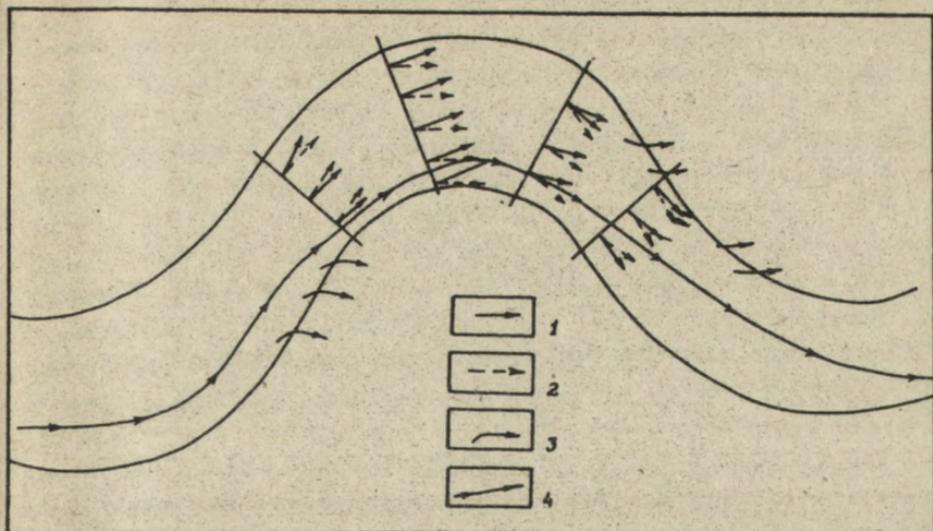


Рис.15. Поле донных скоростей на модели русла с поймой по данным И.И. Ярославцева:

- 1 и 2 - направление донной скорости в русле соответственно при затопленной и незатопленной пойме;
- 3 - направление переливающегося на пойму потока воды;
- 4 - траектория движения донных поплавков

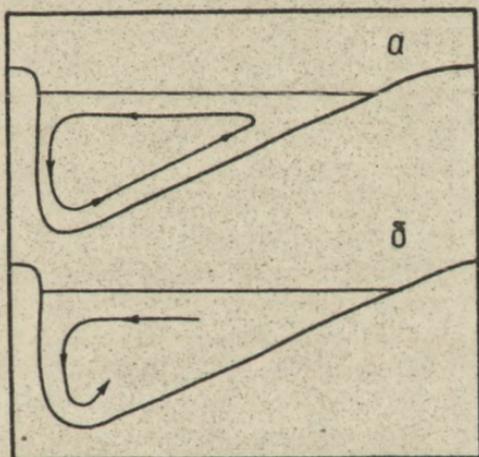


Рис. 16. Схемы поперечной циркуляции на повороте руслового потока в его поперечном сечении:

- а - по А.И. Лосиевскому (1934);
- б - по Э.М. Великановой (1968)

сегмента поймы и отложением продуктов размыва у его низовой границы, где происходит наращивание песчаного пляжа (обсыхающего в межень участка причленившейся к выпуклому берегу перекошенной в плане макрогряды). В результате роста пляжа вверх и по площади (размываемый берег отступает, а противоположный намываемый смещается в его сторону) транспорт и осаждение донных наносов на его поверхности прекращаются и наблюдается аккумуляция только взвешенных в воде частиц. Так постепенно нарастает новая долина поймы у данного сегмента, а с верховой стороны этот сегмент стачивается (размывается) потоком. В результате происходит одновременное сползание вниз по течению сегмента поймы и самого русла реки.

Поперечное сечение русла в центральной области плеса будет характеризоваться крутым размываемым берегом и пологим намываемым (рис. I7).

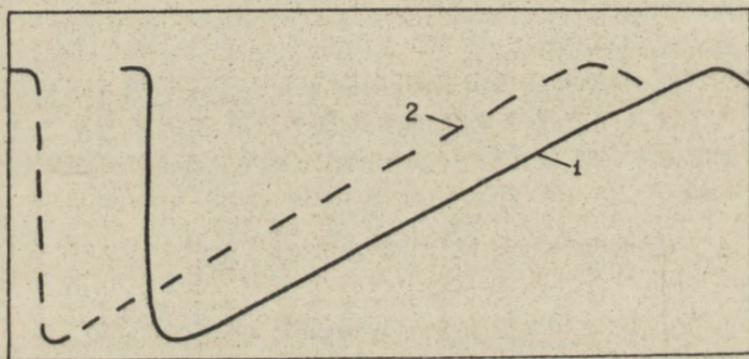


Рис. I7. Поперечное сечение русла на участке плеса при ограниченном меандрировании:
I и 2 - соответственно исходное и последующее положение русла

В данном типе руслового процесса скопления наносов у выпуклого берега излучины являются (прирусловая отмель) аккумулярующей частью сложной русловой формы - сегмента поймы. Русловой поток размывает один его участок (область плеса) и откладывает продукты размыва (русловую фракцию наносов) на другом участке. Транспорт наносов осуществляется как в форме гряд, так и без их образования.

2.3.2. Свободное и незавершенное меандрирование

Эти два типа русловых процессов характеризуются в первую очередь хорошо выраженной извилистостью русла и широкой поймой, а пояс меандрирования современного русла занимает только часть ширины поймы. Поверхность поймы изрезана извилистыми дугообразными или петлеобразными ложбинами, заполненными водой - старицами, курьями и протоками (рис. 18). Вогнутые берега размываются потоком, поэтому склоны их обрывистые (в практике судоходства их принято называть ярами), а выпуклые, намываемые берега, - пологие, и в межень вдоль них всегда можно видеть так называемые песчаные пляжи.

Название "свободное меандрирование" обусловлено тем, что процессу развития излучин не препятствуют склоны долины, как при ограниченном меандрировании. Если при ограниченном меандрировании излучины потока имеют неизменную синусоидальную форму, то при свободном меандрировании происходит изменение их формы от прямолинейной до петлеобразной.

При любой разновидности меандрирования все дно долины реки выстлано аллювием (отложениями речных наносов).

Границы поймы в плане при свободном и незавершенном меандрировании имеют весьма характерный волнообразный вид, явно указывающий на подмыл склонов долины искривленным в плане русловым потоком.

Кроме этого, на аэрофотоснимках пойм меандрирующих рек хорошо просматривается волнистый или гривистый рельеф поверхности - чередование узких вытянутых повышений (грив) и понижений между ними (межгривных ложбин). Эти формы микрорельефа поймы располагаются параллельно намываемому берегу излучины (рис. 19).

Все перечисленные морфологические признаки свободного и незавершенного меандрирования можно легко обнаружить на аэрофотоснимке или на крупномасштабной карте дна речной долины.

Русловые переформирования в плане выражаются в изменении формы и размеров излучин при плановых деформациях русла. При свободном меандрировании первоначально прямолинейное или слабоизвилистое русло постепенно увеличивает степень выраженности или развитости излучин в результате размыва вогнутого и намыва выпуклого берега. В начальной стадии этого процесса (при углах разворота излучин примерно до 100°) излучина смещается поперек долины и вдоль нее, т.е. сползает вниз по течению, как и при ограниченном

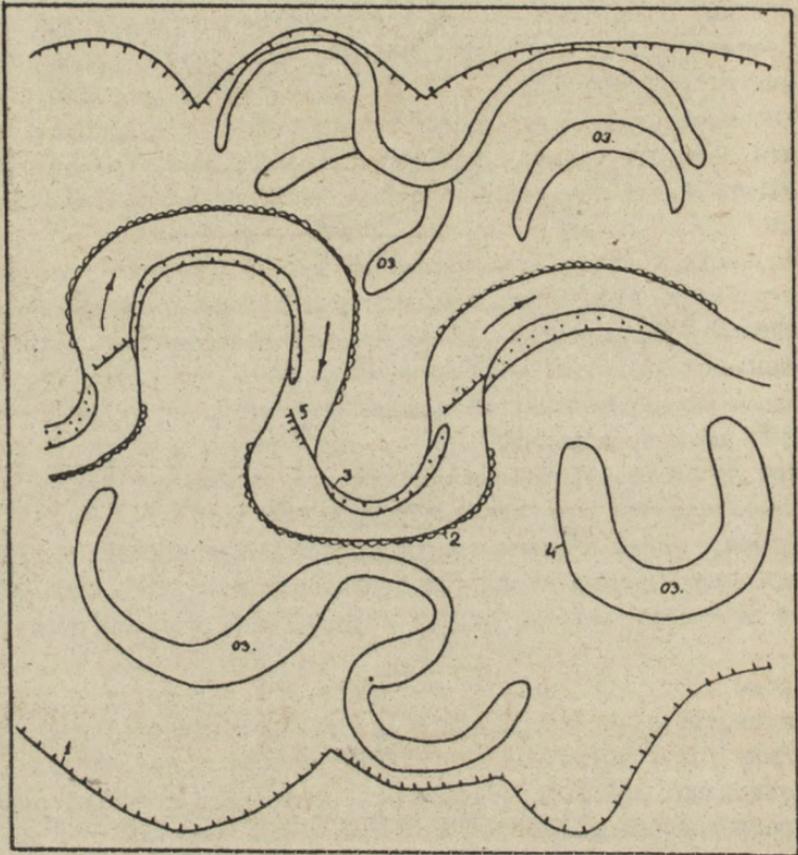


Рис. 18. Схематический план дна долины свободномеандрирующей реки: 1 - склоны надпойменной террасы (внешняя граница поймы); 2 - размываемые (вогнутые) берега реки; 3 - намываемые (выпуклые) берега с песчаными пляжами; 4 - контуры пойменных озер и проток (ложбин старого русла); 5 - перекаты в русле реки

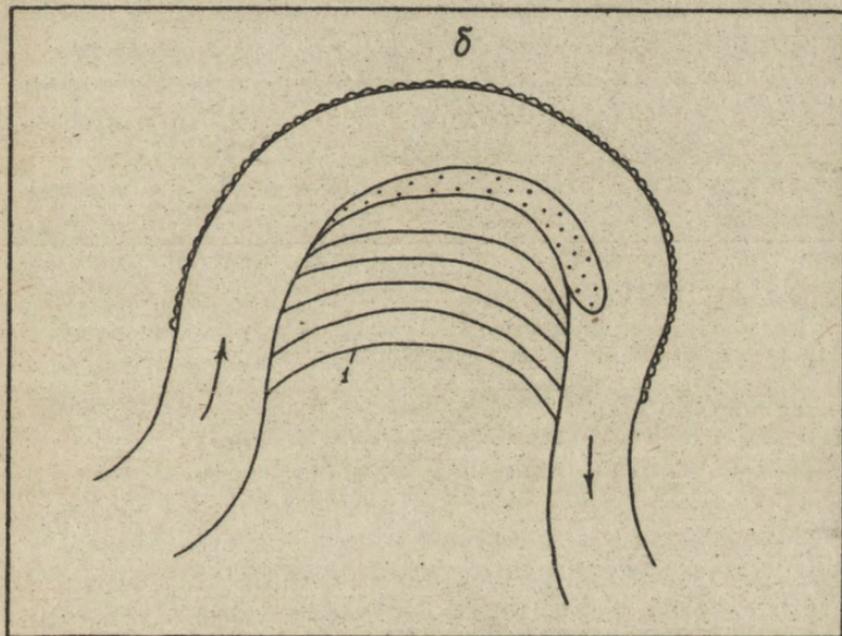
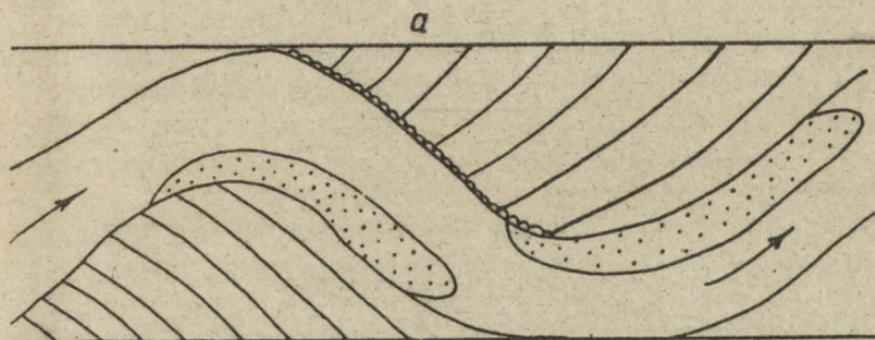


Рис. 19. Иллюстрация планового расположения грив на пойме:
а - при ограниченном меандрировании;
б - при свободном и незавершенном меандрировании;
I - линии грив на сегменте поймы

меандрировании. Однако в дальнейшем процесс ее сползания затухает и происходит изменение формы излучины от слабоизвилистой, синусоидальной, до петлеобразной. При этом точки перегиба русла (точки изменения знака кривизны) практически не меняют своего местоположения (рис. 20). Развитие излучины завершается сближением подмываемых берегов выше и ниже расположенных смежных излучин и промывом перешейка, например между точками А и В (рис. 20) при достаточном затоплении поймы.

На образовавшемся таким образом новом участке русла наблюдается значительный уклон водной поверхности и большие скорости течения, поскольку падение водной поверхности от точки А к точке В, распределенное до прорыва по всей длине излучины, теперь сосредоточено на небольшом прямом отрезке. После образования нового русла начинается развитие новой излучины, а вход в старую в течение нескольких лет перекрывается отложениями сначала донных, а затем взвешенных наносов. Таким образом, процесс развития и отмирания излучин постоянно повторяется. Русло реки мигрирует по дну долины и при подходе к ее склонам размывает их, расширяя пойму и придавая дугообразные очертания ее границе.

На поворотах речной долины могут образовываться новые участки русла, спрямляющие не одну, а несколько излучин (рис. 21). В этом случае происходит скачкообразное смещение пояса меандрирования на пойме. В случаях спрямления одной излучины новый участок русла чаще всего смещается в ту же сторону, в которую двигалась отшнурованная меандра, однако при определенном расположении спрямления в плане по отношению к исходному очертанию русла, по-видимому, возможно развитие изгиба в противоположную сторону.

Скачкообразные смещения русла происходят не только за счет промыва поймы, но и вследствие перехода руслового потока из современного русла в старое. Такая миграция осуществляется в том случае, когда существующее русло подходит к ложбине старого с двух его концов, причем длина старицы оказывается меньше длины главного русла между точками деления руслового потока (рис. 23).

Рассмотрим схему переотложения донных наносов при данном типе руслового процесса. В период половодья или паводка происходит размыв вогнутого берега излучины, материал размыва выносится русловым потоком (точнее, его частью, проходящей у вогнутого берега) к нижерасположенному выпуклому. Незамкнутая циркуляция водных масс на изгибе потока обуславливает перенос продуктов размыва бе-

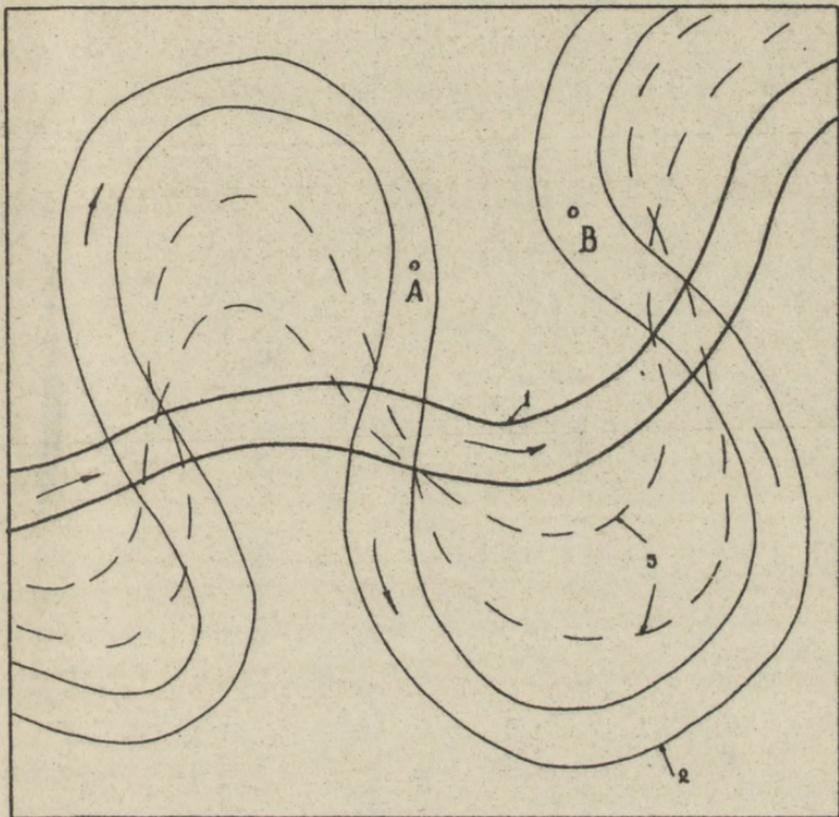


Рис. 20. Схема развития излучин при свободном меандрировании:
1 и 2 - положение русла в плане соответственно в начальную и конечную стадии развития излучин;
3 - некоторые промежуточные положения оси руслового потока

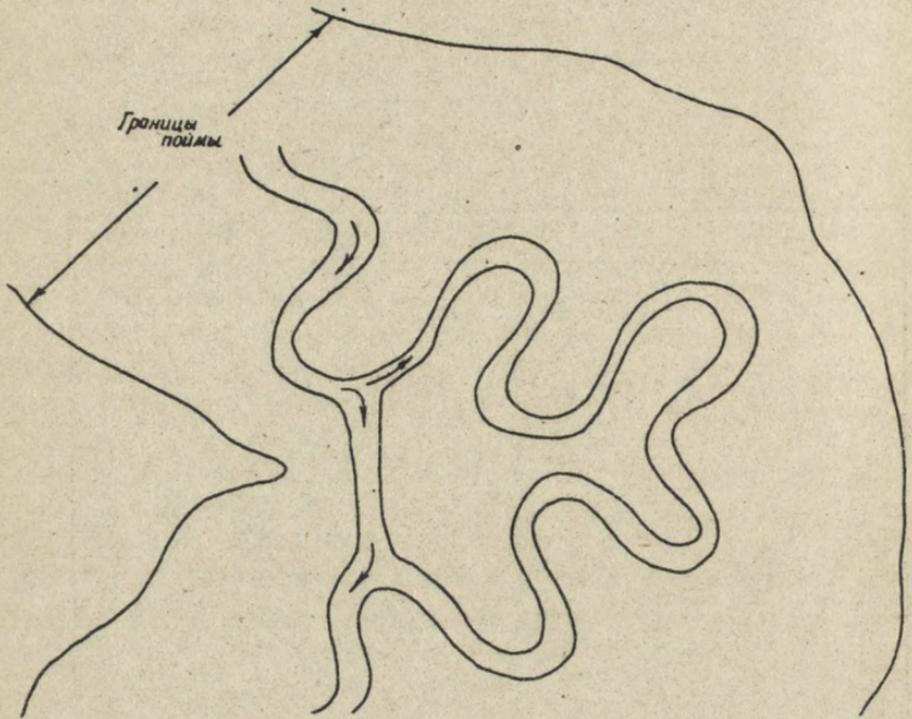


Рис. 21. Схема спрямления новым руслом нескольких излучин

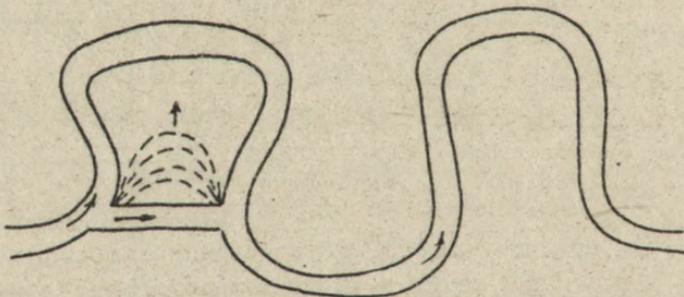


Рис. 22. Наиболее вероятное направление развития (меандрирования) нового участка русла при спрямлении одной излучины

рега в зону наибольших глубин и скоростей течения, но не на противоположный выпуклый берег. При выходе из данной излучины в зону нижерасположенного выпуклого берега происходит уменьшение скоростей течения струй потока, насыщенных продуктами размыва вышележащего вогнутого берега, и осаждение наносов. Причем важно отметить, что поток, оставляя наносы вдоль выпуклого берега, производит их сортировку по крупности частиц как по длине наращиваемой русловой отмели, так и по ширине. При движении струй потока у выпуклого берега вдоль каждой изобаты наблюдается выпадение сначала крупных, а затем мелких частиц донных наносов. Поперечное сечение русла на излучине асимметричное - со стороны выпуклого берега протягивается пологая русловая отмель, а вогнутый берег крутой (рис. 24). В зоне больших глубин (у вогнутого берега) наблюдаются и большие скорости потока и, следовательно, транспортируются и оседают более крупные частицы. Поэтому при движении поперек течения по склону прирусловой отмели от выпуклого берега к вогнутому мы можем видеть увеличение крупности частиц донных наносов и отложений.

Незавершенное меандрирование характеризуется теми же процессами, что и свободное, отличаясь от него образованием спрямляющих протоков на более ранних стадиях развития излучин. При свободном меандрировании излучина обычно спрямляется, когда ее длина превосходит длину прямой, соединяющей точки перегиба русла в 2-4 раза, а при незавершенном - всего в 1,6 раза. Русло делится на два рукава (рис. 25), которые могут функционировать одновременно в течение десятков лет. Отторженный от поймы участок превращается в остров, который с одной стороны наращивается, следуя за размываемым берегом исходной излучины, а с другой стороны стачивается потоком спрямляющей протоки, т.е. движется поперек направления течения. Деформации главного русла по мере развития спрямляющей протоки ослабевают, а затем прекращаются и оно заносится наносами или превращается в старицу.

В развивающемся участке русла, по мере увеличения площади его поперечного сечения и расходов воды, могут изменяться схемы русловых переформирований. Например, сначала поток образует несколько мелких излучин по схеме свободного меандрирования, затем может установиться ленточно-грядовый и побочный типы руслового процесса, и лишь с поступлением в спрямляющую протоку почти всего расхода воды и наносов начинает повторяться цикл развития русла по схеме незавершенного меандрирования.

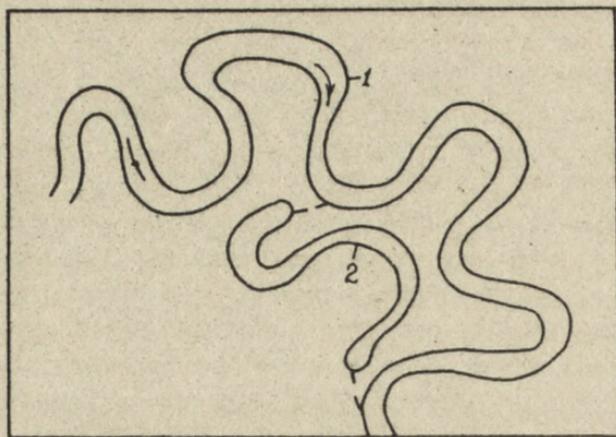


Рис. 23. Схематический план взаимного расположения главного русла (1) и старицы или протоки (2), при котором возможен переход руслового потока из существующего русла в ложбину старого

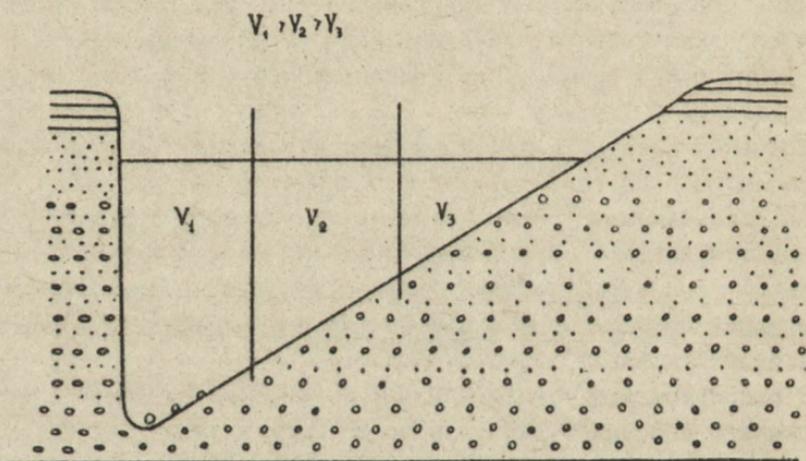


Рис. 24. Поперечное сечение русла на излучине и распределение в нем различных динамических зон потока

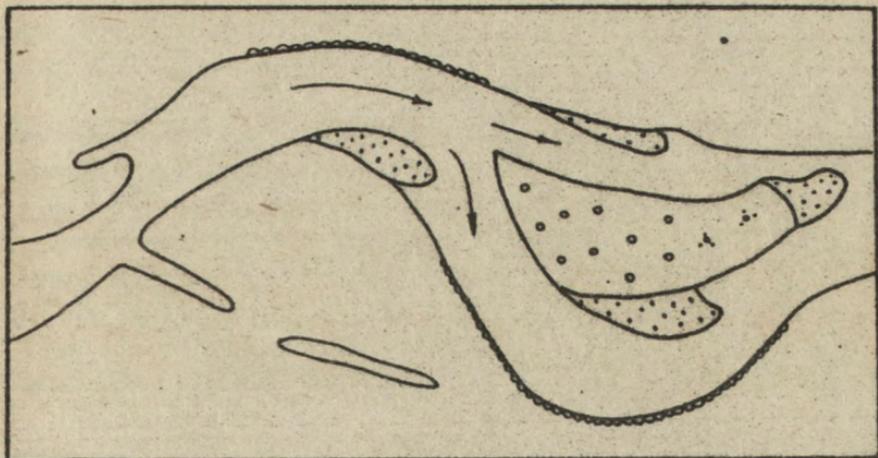


Рис. 25. Характерный рисунок русла в плане при незавершенном меандрировании

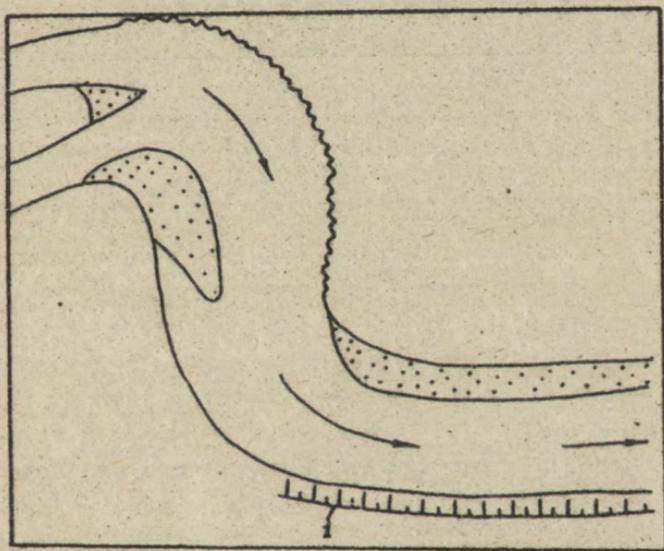


Рис. 26. Образование прямолинейного недеформируемого участка русла при подходе руслового потока к трудноразмываемому прямолинейному склону речной долины (I)

При незавершенном меандрировании, так же, как и при свободном, возможно спрямление нескольких излучин и смещение пояса меандрирования на дне речной долины.

Отдельные участки русла при свободном и незавершенном меандрировании могут в течение десятков и сотен лет сохранять прямолинейные очертания и практически не смещаться в плане. Такие участки образуются в случае, когда после очередного поворота (излучины) русловой поток подходит к трудноразмываемому склону речной долины (рис. 26). Прямолинейность и неразмываемость этого склона, который принято называть "ведущим", определяет соответственно прямолинейность и недеформируемость русла в плане. На противоположном берегу образуется относительно устойчивая (не нарастающая в плане) прирусловая отмель, таким образом, среднее многолетнее количество донных наносов, которое поток приносит сюда с вышележащей излучины, компенсируется величиной их выноса с отмели. Чередование различных по водности лет (с учетом наличия в потоке донных наносов различной крупности) обуславливает периодическое чередование нарастания и сработки такой отмели и, как следствие, отложение в ее пределах хорошо отсортированных крупных частиц.

Такие условия, например, имеют место на р. Оби у с. Победа (в 40 км выше устья р. Томи).

При свободном и незавершенном меандрировании перекаты располагаются на участках перегиба русла, иными словами, на участке смены знака кривизны русла, а плесы протягиваются вдоль вогнутого размываемого берега (рис. 27).

В половодье с ростом уровня воды происходит увеличение отметок дна переката, а плес размывается. В межень прекращается или значительно уменьшается вынос материала из плеса на перекат, и перекат размывается. Материал размыва переката оседает в нижерасположенном плесе и на русловой отмели. Попутно отметим, что в практике судоходства перекаты делят на "хорошие" и "дурные", а также типа "россыпей". "Хороший" перекат характеризуется тем, что верхний и нижний плесы, которые он разделяет, не заходят один за другой по длине русла, и линия судового хода плавно переходит из одного плеса в другой. "Дурной" перекат образуется, когда продольные оси соседних плесов не имеют плавного сопряжения, судовый ход характеризуется резкими поворотами (рис. 27). Перекаты типа "россыпей" не свойственны меандрирующим рекам и представляют собой случайные нагромождения наносов в русле, без закономерного распределения по его длине и ширине.

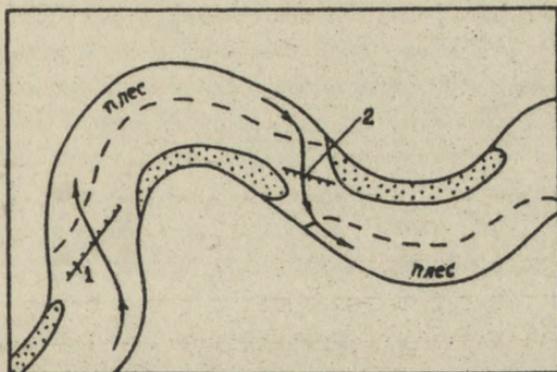


Рис. 27. Схема расположения плесов и перекатов в русле свободно и незавершено меандрирующих рек;
1 - "хороший" перекат; 2 - "дурной" перекат

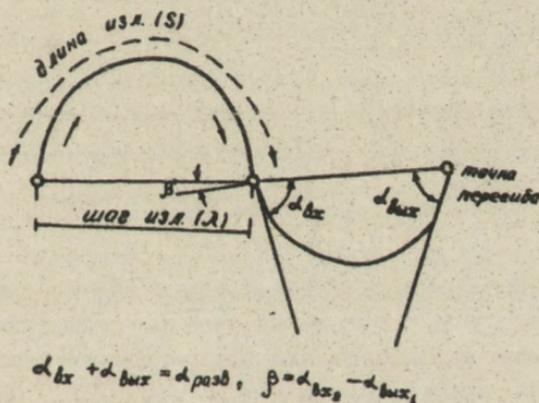


Рис. 28. Схема, поясняющая определение количественных характеристик русла

2.3.3. Количественные характеристики меандрирования

К ним относятся: длина излучины, ее шаг, степень развитости, угол входа потока на излучину, угол выхода и угол разворота излучины, угол сопряжения смежных излучин и радиус поворота. Определение части этих характеристик иллюстрируется рис. 28.

Длина излучины (S) - это расстояние по осевой линии русла между соседними точками перегиба (изменения знака кривизны). Шаг излучины (λ) - расстояние по прямой между смежными точками перегиба. Отношение S/λ показывает степень развитости излучины. Угол входа ($\alpha_{вх}$) измеряется между линией шага излучины и направлением потока на входе в нее. Угол выхода ($\alpha_{вых}$) определяется аналогично на выходе потока из излучины. Сумма углов входа и выхода представляет собой угол разворота потока ($\alpha_{разв}$). Угол сопряжения смежных излучин (β) определяется как разность угла входа последующей излучины и угла выхода предыдущей ($\alpha_{вх2} - \alpha_{вых1}$). Радиус поворота потока на излучину, ввиду неправильности ее формы, изменяется по длине излучины и обычно определяют его среднее значение

$$R = \frac{S}{\alpha_{разв}}, \quad (2.3)$$

где S - длина излучины, м или км; $\alpha_{разв}$ - угол разворота, рад.

Перечисленные показатели характеризуют форму и размеры излучин в плане. К ним можно добавить ширину русла (B), пояса меандрирования ($B_{п.м.}$) и поймы ($B_{п.}$), глубины на плесах и перекатах, высоту поймы, крупность русловых наносов в различных частях дна и т.д.

В случае свободного и незавершенного меандрирования показатели формы и размеров излучин меняются с течением времени. Поэтому при наличии разновременных планов русла можно оценить скорость этих изменений. Если все переменные во времени показатели обозначить через Y , то общим выражением для группы показателей, отражающих скорость развития меандр, будет $\frac{dY}{dt}$ или $\frac{\Delta Y}{\Delta t}$. При незавершенном меандрировании добавляется еще один измеритель - степень незавершенности процесса, определяемая как отношение длины главного русла по средней его линии (S_p) на участке от начала до конца спрямляющего протока к длине этого протока по его средней линии, т.е. S_p/S_{np} .

Наиболее важным в практическом отношении показателем меандрирования является скорость плановых деформаций русла (C , м/год). Способы оценки этого показателя рассматриваются ниже.

2.3.4. Размыв берегов, способы определения его интенсивности, оценка стока донных наносов по данным о деформациях русла

Наиболее характерной чертой процесса меандрирования, как уже отмечалось, являются деформации русла, обусловленные размывом одних участков берега и намывом противоположных. При исследованиях плановых деформаций обычно измеряют величину размыва, поскольку размываемый берег крутой, что обуславливает определенность его местоположения, а намываемый пологий и не имеет определенной бровки.

Для определения величины размыва сопоставляют разновременные карты или аэрофотоснимки русла. Существенную роль при этом играет точность карты, зависящая от вида съемки и масштаба, промежутков времени между съемками и скорость плановых деформаций русла.

Например, пусть скорость плановых деформаций русла составляет 1 м/год, промежуток времени между съемками 10 лет, а масштаб карт $1:10000$ (допустим, карты точные), тогда погрешность измерений будет около 100% (считаем, что смещение русла на картах определяется с точностью до 1 мм). Если при тех же условиях деформации будут протекать в 10 раз интенсивнее, то погрешность их определения составит 10% , а при уменьшении масштаба карты в какое-то число раз погрешность измерений по ней увеличится в такое же число раз.

Таким образом, проводя определения величины плановых деформаций русла по картам или аэрофотоснимкам, всегда следует оценивать точность получаемых результатов.

Величину размыва берегов можно определять путем проведения натуральных измерений, т.е. измерений на местности. Для этого вдоль русла реки закрепляют отдельные точки - репера плановых деформаций русла - и измеряют расстояние между ними и от реперов до бровки размываемого берега. При этом удобно использовать имеющиеся на берегу деревья, здания и пр. Плановые деформации русла обычно протекают в периоды половодья и паводков, поэтому для определения суммарных значений деформации за один год достаточно провести две последовательные серии измерений - в период межени при установке реперов и в летнюю межень следующего года. При таких измерениях

возникают два методических вопроса:

1) сколько реперов плановых деформаций следует установить и как их разместить по длине фронта размыва?

2) как оценить среднюю многолетнюю скорость плановых деформаций данной излучины по материалам натурных наблюдений за один год?

В случае ограниченного меандрирования средний многолетний размыв берега одинаков по его длине. При свободном и незавершенном меандрировании величина размыва имеет максимум в средней части излучины и убывает в направлении к точкам перегиба. Если исходить из такого среднего многолетнего изменения положения бровки размываемого берега, то при ограниченном меандрировании достаточно одного репера, а при свободном и незавершенном — около 10. Но на самом деле ежегодно наблюдающиеся величины размыва берега весьма резко изменяются по его длине. Это обусловлено тем, что размыв берега, как правило, происходит путем обрушения отдельных его блоков, так что в плане бровка размываемого берега представляет собой волнистую линию — углубления (полуцирки) чередуются с разделяющими их выступами (фестонами). На рис. 29 представлена схема плана и профиля отдельного обрушающегося блока. А.Н.Ляпин (1973) объясняет такой механизм обрушения подмываемого берега тем, что при любом заданном объеме блока наименьшая поверхность сцепления частиц грунта имеет шарообразную форму.

Обычно по длине размываемого берега располагается несколько десятков таких полуцирков. Например, на Средней Оби полуцирки имеют длину 30–50 м и глубину (в плане) 2–15 м при длине размываемого берега 3–5 км.

К этому вполне убедительному объяснению следует добавить, что оно справедливо в случае двухслойного строения берегового склона — на нижнем слое песка залегает слой суглинка. Такая особенность характерна для большей части пойменных берегов. Но на отдельных излучинах береговой склон может быть или полностью песчаным, или же полностью суглинистым. В первом случае бровка берега в плане не получает волнистых очертаний — размыв идет путем равномерного (не в виде блоков) вымывания и оползания песка. Во втором случае берег размывается также постепенно в результате вымывания (взмучивания) слоя грунта, соприкасающегося с потоком. В данном случае значительные силы сцепления суглинистых частиц препятствуют обрушению в форме отдельных блоков, но в плановых очертаниях бровки берега можно видеть значительные по своим размерам углубления и

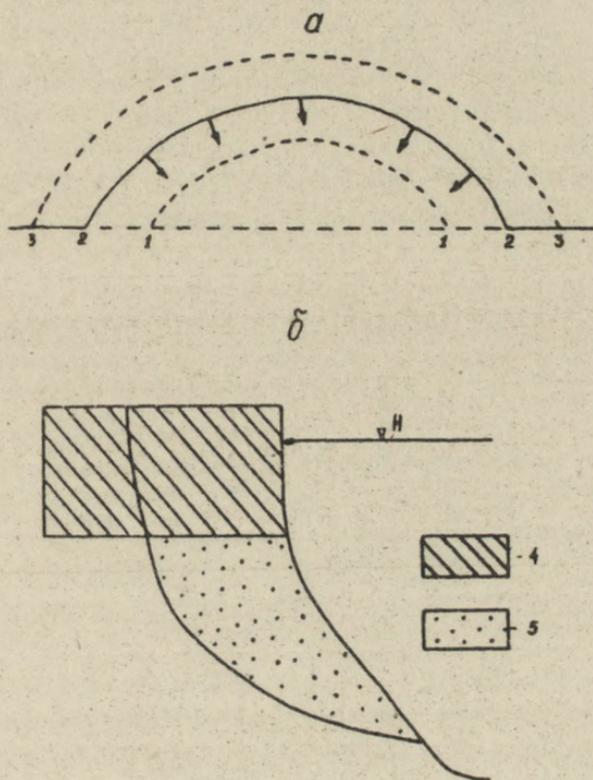


Рис. 29. План (а) и профиль (б) поверхности скольжения блока размываемого берега;
1, 2, 3 - последовательные линии бровки вогнутого берега при его обрушении отдельными блоками;
4 - суглинки; 5 - пески

выступы. Причина их образования — различная прочность суглинистых масс, слагающих береговой откос. Однако как сплошь песчаное, так и сплошь суглинистое строение берегового откоса встречается очень редко, поэтому в дальнейшем мы будем исходить из типичного двух-слояного строения и неизбежного при этом волнообразного очертания берега в плане.

Таким образом, при размещении реперов плановых деформаций в случае свободного или незавершенного меандрирования следует разделить весь фронт размыва на три части (верховую, среднюю и низовую) и на отдельных участках каждой части установить по 10-15 реперов плановых деформаций с расстоянием между ними, в 3-4 раза меньшим длины полуцирков.

В таком случае средние значения величин деформаций по каждой группе реперов дадут достаточно точное представление о распределении величины размыва берега по его длине. Для определения средней величины размыва необходимо построить график распределения деформаций берега по его длине (рис. 30). Отношение площади этого графика (F), представляющей собой площадь размыва в определенном масштабе, к длине размываемого берега (L) даст среднюю по фронту размыва скорость плановых деформаций русла.

Для получения среднего многолетнего значения плановых деформаций по данным наблюдений за один год необходимо, в общем случае, иметь связь величин деформаций с каким-либо ежегодно измеряемым фактором. Таким активным фактором русловых деформаций является водность потока в период русловых переформирований или, в более упрощенном выражении, водность половодья. В первом приближении можно считать, что плановые деформации русла изменяются пропорционально изменениям объема стока половодья. Тогда во сколько раз объем стока половодья данного года отличается от среднего многолетнего, во столько же раз следует изменить величину размыва берега в данный год, чтобы получить среднюю многолетнюю величину.

Процессы обрушения блоков размываемых берегов на р.Оби протекают следующим образом. Сначала обрушается сравнительно небольшой блок длиной 3-5 м и глубиной 1,5-2 м. В образовавшемся в плане углублении бровки берега возникает водоворот с вертикальной осью вращения. На водной поверхности водоворота образуются пенообразные скопления белого цвета. Через несколько часов после обрушения первого блока происходит повторение процесса. Вновь обрушившийся блок имеет в плане форму неправильного эллиптического полукольца. Этот

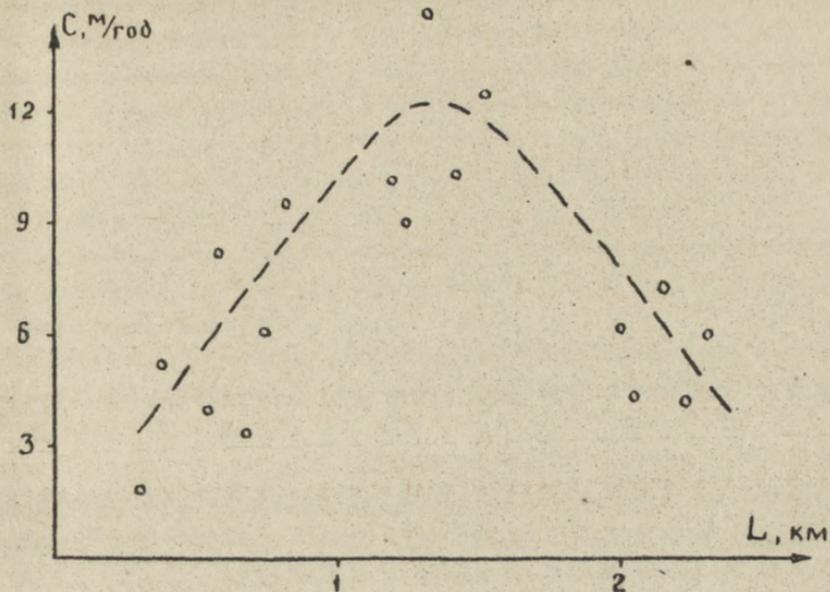


Рис. 30. График распределения плановых деформаций русла по длине размываемого берега

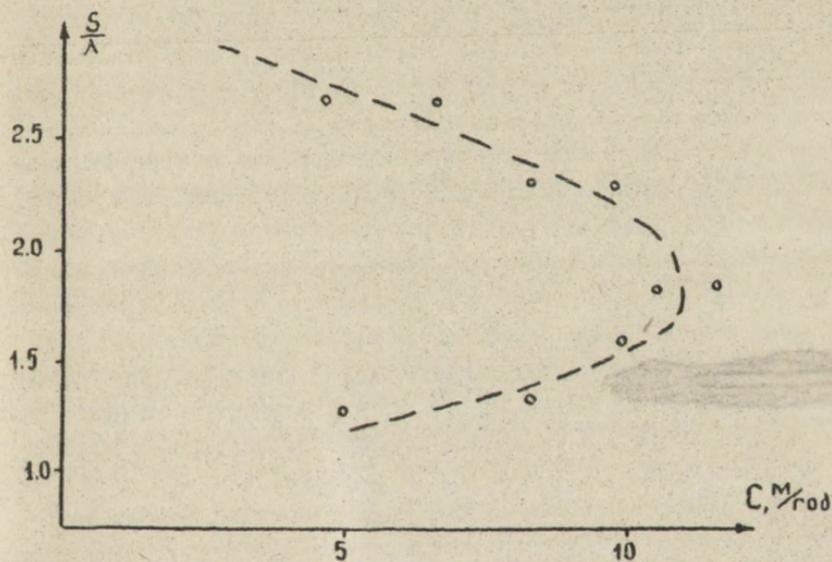


Рис. 31. График связи степени развитости излучин ($\frac{S}{\lambda}$) и скорости плановых деформаций (C)

процесс продолжается в одном месте с 3-4 повторениями обрушения блоков. Затем, по достижению полуцирком определенных размеров, начинается размыв берега блоками в местах образовавшихся выступов - фестонов, и волнистый характер линии размываемого берега в плане начинает сглаживаться.

Однако процесс образования полуцирков и последующей сработки фестонов в конкретном году может прекратиться на любой стадии развития при спаде уровня воды и уменьшении скоростей течения. После маловодного половодья формирование отдельных полуцирков может продолжаться и в следующее половодье, а в многоводные годы может наблюдаться более одного цикла этого процесса.

Рассмотренный способ полевых измерений темпов плановых деформаций является, с одной стороны, весьма трудоемким, а с другой - недостаточно оперативным и информативным.

Более простой и эффективный способ получения такой информации состоит в измерении средних многолетних темпов нарастания намываемых берегов путем определения возраста деревьев (А.М. Комлев, П.П. Блукке, 1965). Поскольку древесная растительность поселяется на намываемом берегу при определенной стадии его развития в плане и в высоту, то разность в возрасте между ярусами древесной растительности, которые простираются вдоль линии намываемого берега, дает время формирования определенной полосы прирусловой поймы. Определив это время путем подсчета годовых колец на срезах деревьев и измерив расстояние между разновозрастными полосами растительности, мы получаем достаточно точное представление о средней многолетней скорости плановых деформаций русла в той или иной части длины излучины.

На большинстве меандрирующих рек вдоль выпуклых берегов излучин формируются прирусловые валы или гривы, что делает более определенным выбор полос одновозрастных деревьев. В данном случае определяется возраст деревьев на вершинах 2-3 соседних грив и измеряется расстояние между ними. Здесь только следует учитывать то, что по мере старения каждой гривы или просто дугообразной полосы намываемого берега происходит изменение экологических условий: река удаляется от данного участка, снижаются уровни грунтовых вод, темпы отложения свежего наилка, формируется определенный почвенный профиль. Эти изменения обычно приводят к смене одних видов древесной растительности другими. Так, например, на прирусловых гривах на реке Чулым первичные тальник, ива и осина через 50-100 лет за-

мещаются березами и соснами. Поэтому при оценке скорости плановых деформаций речных русел по возрасту деревьев в различных точках намываемого берега, взятых на линии, перпендикулярной течению потока, следует использовать деревья одного и того же вида. Измерения достаточно проводить в вершинах излучин, когда они одноплесовые, или против средней части каждого плеса на более сложных излучинах.

Описанным способом наиболее просто получить точные данные о величине максимума средних многолетних деформаций по длине фронта размыва любой излучины. Средняя по длине излучины скорость плановых деформаций составляет 65-70% от максимальной.

Опыт применения данной методики на реках Томской области (Кии, Яе, Чулыме и Оби) показал, что за 20-30 дней полевой отряд из 2-3 человек на одной лодке может получить достоверные сведения о средней многолетней скорости плановых деформаций на 100-150 излучинах, что свидетельствует о ее высокой эффективности и целесообразности внедрения в практику проектно-изыскательских и научно-исследовательских работ.

Кроме оценки скорости развития речных излучин описанная методика может быть использована для определения скорости и направления движения речных островов, на которых также хорошо выражена ярусность древесной растительности, как и на выпуклых берегах излучин.

Как правило, на различных излучинах относительно бесприточного участка свободно или незавершенно меандрирующей реки скорость плановых деформаций оказывается различной. И.В. Попов (1965) отметил связь между скоростью размыва берега и степенью развитости излучин ($\frac{S}{\lambda}$). Вид этой связи представлен на рис. 31. По мере развития излучины до степени развитости около 1,6 скорость плановых деформаций возрастает, а затем при дальнейшем увеличении степени развитости начинает уменьшаться. Такая особенность развития излучин определяется сочетанием следующих двух факторов.

По мере увеличения длины излучины (степени ее развитости) происходит уменьшение уклона водной поверхности, что ведет к снижению средней скорости потока. Но в первую половину развития изгиба русла наблюдается рост русловой отмели у выпуклого берега, за счет этого увеличивается асимметричность поперечного сечения и поле скоростей перестраивается таким образом, что

максимум скоростей течения, или стрежень потока, приближается к вогнутому (размываемому) берегу. Кроме этого, как известно из курса гидравлики, живая сила потока (скоростной напор) $\propto v^2/2g$ возрастает с увеличением коэффициента Кориолиса α . Действие этих факторов при достаточном развитии излучины прекращается, форма поперечного сечения русла в дальнейшем не изменяется, а уклон водной поверхности продолжает убывать, что приводит к смене роста живой силы потока ее уменьшением и, как следствие, начинают снижаться темпы плановых деформаций.

Можно найти и иное объяснение такому изменению темпов размыва берега. Для этого следует отметить, что при средней степени развитости серии последовательно расположенных излучин объем размыва русловой фации аллювия или объем ее намыва на каждой меандре зависят от стока донных наносов, средняя многолетняя величина которого остается неизменной. В начальной стадии развития, когда длина фронта размыва мала, поток на данной излучине из года в год увеличивает объем переотложения наносов до наступления баланса между намывом выпуклого и размывом вогнутого берега. После этого дальнейший рост длины фронта размыва приводит к тому, что для поддержания равенства между объемами размыва вогнутого и намыва выпуклого берегов темпы размыва вогнутого берега уменьшаются.

Оба приведенных объяснения не противоречат друг другу, а иллюстрируют наличие связи между гидравликой потока и факторами, определяющими заданный реке объем стока наносов.

Как можно видеть из приведенных попыток качественного объяснения связи между степенью развитости излучин и скоростью их плановых деформаций, мы упустили из рассмотрения ограничивающий фактор. Он может проявляться, например, при подмыве склонов речных террас, ограничивающих пойму, или в более общем случае при различном строении, а следовательно, и прочности размываемых береговых откосов. Именно с действием этого фактора связан разброс точек на графике $C = f\left(\frac{S}{\lambda}\right)$. Так, например, по данным наблюдений, на р. р. Чулым и Обь размыв высоких террас происходит в 5 - 10 раз медленнее размыва пойменных берегов при одной и той же степени развитости излучин. Таким образом, связь $C = f\left(\frac{S}{\lambda}\right)$ может быть однозначной только в случае однотипного строения размываемых берегов излучин и при одинаковых водности потока и стоке донных наносов на всех излучинах. В самом общем случае величина C

должна быть функцией степени развитости излучин, прочности размываемых берегов, водности потока и объема стока донных наносов.

В процессе развития излучины происходят изменения глубин плеса (h_i) и разности отметок точек дна в плесе и на перекате ($z_i - z_0$). Такая закономерность выявляется при анализе графиков связи $h_i = f(\frac{z}{\lambda})$ и $(z_i - z_0) = f(\frac{z}{\lambda})$, которые строятся по данным измерений указанных величин на различных излучинах морфологически однородного участка реки с неизменными по его длине факторами русловых процессов. Подобные зависимости, очевидно, имеют значение при оценке будущих изменений русла при развитии излучин.

Данные о плановых деформациях русла при известных высоте размываемого берегового откоса и мощности русловой фации аллювия позволяют оценить объем стока донных наносов (W) по выражению

$$W = \bar{C} \cdot \bar{h} \cdot L, \quad (2.4)$$

где \bar{C} - средняя по длине размываемого берега интенсивность его размыва (м/год);

\bar{h} - средняя мощность русловой фации аллювия в разрезе размываемого берега (или в разрезе поймы);

L - длина размываемого берега (фронта размыва).

2.4. Качественная и количественная характеристика русловой и пойменной многорукавности

2.4.1. Русловая многорукавность.

Прежде всего следует оговориться, что данные типы русловых процессов являются наименее изученными ввиду их сложности и поэтому те представления о них, которые будут изложены ниже, не претендуют на завершенность даже в форме качественных описаний.

Характерными признаками русловой многорукавности являются наличие одного широкого русла в период половодья и дробление его на отдельные рукава в летнюю межень (рис. 32). В таком русле по ширине располагается сразу несколько крупных гряд, перемещение которых осуществляется неравномерно по длине реки. В местах замедления движения гряд происходит их наложение и образование русловых отмелей - осередков и побочней. В межень эти отмели освобождаются от воды и русловой поток дробится на рукава. Подвижность осередков зависит от крупности слагающих его частиц и от величины и режима скоростей течения реки. Чем больше скорости потока при данной крупности донных частиц, тем, очевидно, замет-

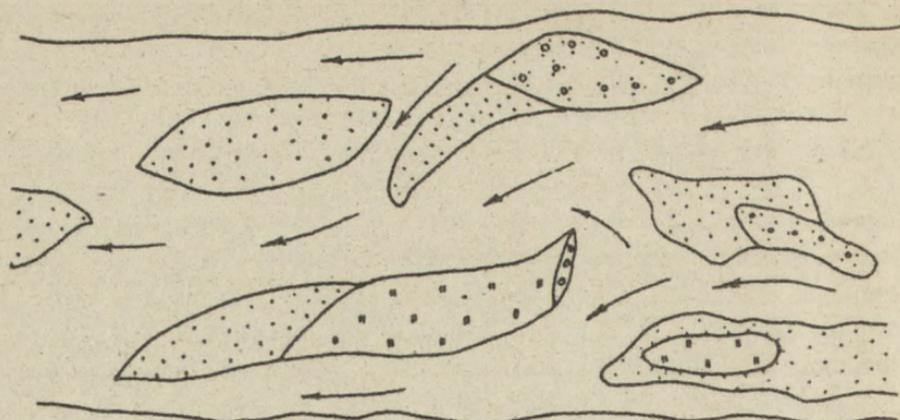


Рис. 32. Схематический план русла в межень при развитии русловой многорукавности

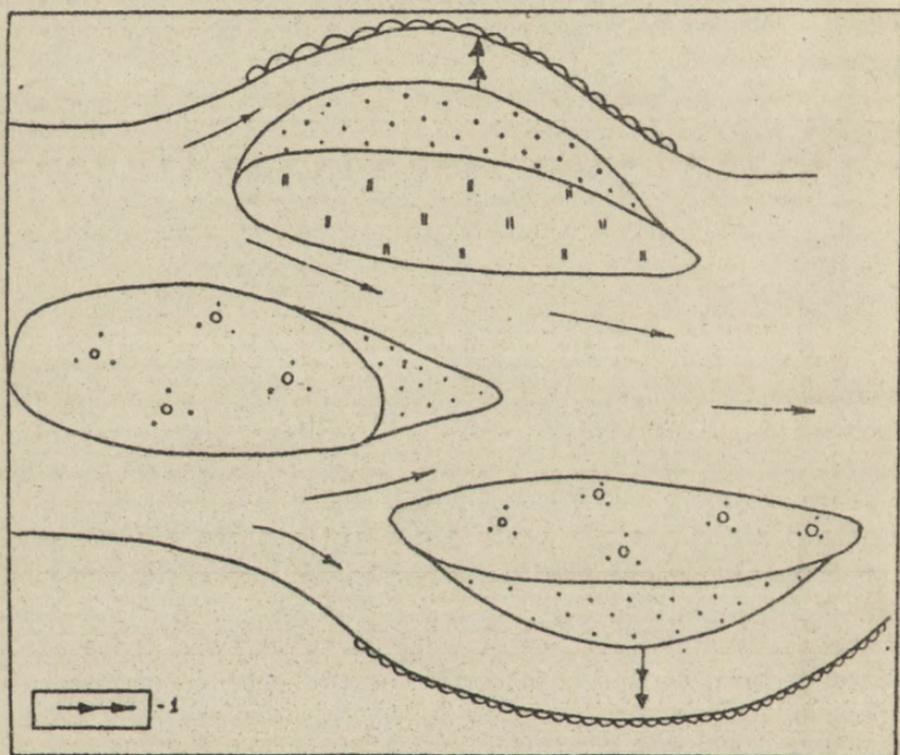


Рис. 33. Схематический план русла со смещающимися в сторону берега островами-осередками:
I - направление смещения меандрирующей протоки и нарастания острова

нее проявляется динамика русловых отмелей. Но скорость потока меняется во времени, характер этих изменений (особенности водного режима реки) также влияет на подвижность русловых форм. Например, в высокое, но кратковременное половодье русловые деформации могут оказаться такими же или меньшими, чем при низком растянутом половодье.

При определенных условиях поверх обсыхающей в межень русловой отмели (донных отложений) происходит осаждение взвешенных в потоке частиц и нарастание слоя этих отложений от года к году. Такими условиями являются наличие в потоке достаточного количества взвешенных частиц и растянутый спад половодья, при котором наблюдается застой воды над поверхностью отмели. В результате поверх более крупных донных отложений нарастают отложения мелких взвешенных частиц, поверхность которых с течением времени покрывается растительностью, что усиливает процесс их осаждения из руслового потока. Таким путем осередок превращается в остров.

Если отмеченные условия не выполняются, то осередки в острова не превращаются. Например, при небольшом годовом слое отложения взвешенных частиц они вымываются с поверхности осередка на подъеме следующего половодья, таким образом, систематического их накопления не происходит. Если же годовой слой отложения взвешенных наносов будет значительным, то до наступления следующего половодья он уплотняется и образует трудноразмываемую толщу связанных суглинистых частиц. Взвешенные частицы не успевают образовать достаточного слоя отложений и при резком спаде половодья.

Таким образом, русловая многорукавность имеет две разновидности: 1) русловая многорукавность осередкового типа и 2) русловая многорукавность островного типа.

Структура скоростного поля потока при данном типе руслового процесса весьма сложная. В потоке наблюдается чередование подпоров и спадов водной поверхности, образование свальных течений, расходящихся и сходящихся потоков и циркуляция водных масс. Та или иная комбинация течений над осередками или островами может вызывать их смещение как вниз, так и вверх по течению или их нарастание в поперечном направлении.

Например, если осередок или остров не создает заметного

подпора, то транспортируемые наносы в форме гряд или в виде отдельных частиц отлагаются в низовой его части, формируя так называемое ухвостье. При заметном подпоре потока осередком островам наносы отлагаются у его приверха и вызывают смещение острова в верх по реке. В случае меандрирования протоки с какой-либо стороны острова может возникнуть типичная прирусловая отмель, причлененная к острову. Противоположный берег протоки размывается, а отмель у острова нарастает, и остров как бы смещается поперек потока в сторону размываемого углубления в коренном берегу (рис. 33). При определенной степени развитости изгиба протоки начинается отложение поступающих в нее наносов, и остров причленяется к берегу.

При изучении данного типа руслового процесса следует выявлять схему русловых переформирований в каждом рукаве потока, что значительно увеличивает трудоемкость полевых работ.

При очень высокой подвижности донных наносов, когда скорости течения потока значительно превышают размывающие, и при большой загрузке потока наносами наблюдаются быстрые и беспорядочные перемещения русловых отмелей и соответственно быстрые перемещения рукавов реки по дну долины. Такой ход осередкового типа русловых процессов принято называть русловым блужданием. В этом случае отдельные потоки, а иногда и все русло реки смещаются в плане за одно половодье на сотни метров (примером может служить р. Амударья).

2.4.2. Пойменная многорукавность

Если при незавершенном меандрировании скорость образования новых проток превышает скорость отмирания спрямленных ими излучин, то русло становится многорукавным и пойма оказывается расчлененной множеством проток (рис. 34).

Существенным условием образования данного типа руслового процесса является наличие достаточно широкой поймы с разновысотными участками. Пойменные протоки развиваются в вытянутых понижениях поймы.

В каждой протоке может разливаться свой тип русловых переформирований. Поэтому при исследовании пойменной многорукавности приходится отдельно рассматривать русло каждой протоки, а также все места разделения и слияния проток.

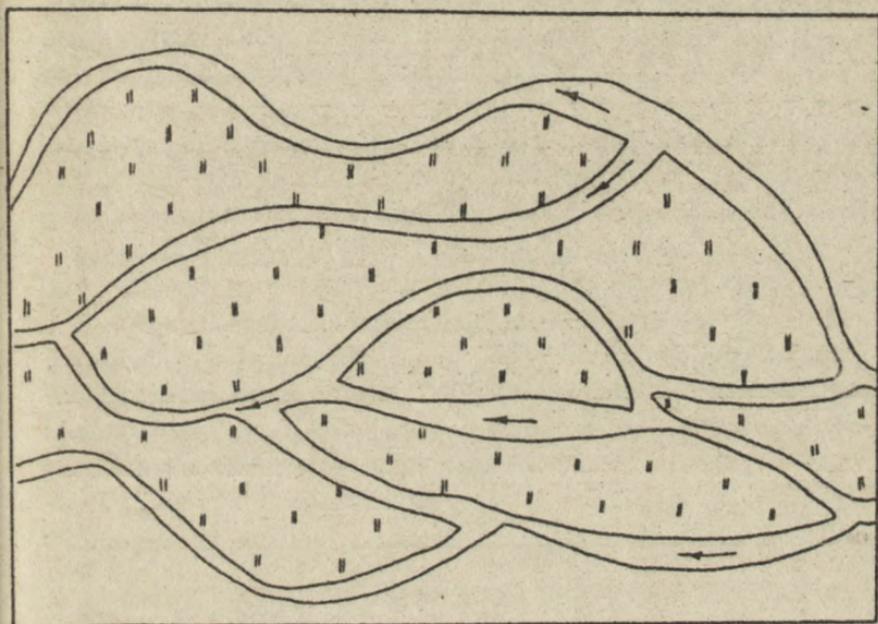


Рис. 34. Схематический план дна речной долины при развитии пойменной многоруканности

Места деления и слияния потоков довольно часто перекрываются русловыми образованиями одной из протоков и вновь открываются при смещении русловых форм. В результате наблюдается перераспределение стока воды и наносов между отдельными протоками, происходит отмирание одних и образование других рукавов русла. Результатом исследования данного типа русловых процессов должен быть прогноз русловых переформирований в каждом рукаве. Обоснованная методика таких оценок ввиду сложности взаимодействия протоков в настоящее время не разработана.

Разнообразные вопросы, которые возникают в данном случае при строительстве водозаборов, причалов, переходов ЛЭП и трубопроводов, сводятся к одному: что будет с данной протокой через столько-то лет? Надо сказать, что сейчас вряд-ли можно дать верный и определенный ответ на данный вопрос без длительных и детальных натурных измерений. В этом случае трудности возникают даже в разработке методики таких измерений, которые бы при минимуме затрат на их производство позволили получить достоверный ответ на поставленный вопрос.

Если при разновидностях меандрирования, ленточно-рядовом и побочном типах русловых процессов мы имеем вполне определенную схему перетолжения наносов и поэтому легко можем дать качественную и даже количественную характеристику русловых переформирований, то в случаях русловой и пойменной многоруканности перетолжение наносов происходит по различным схемам и, кроме того, усложнено взаимодействием отдельных протоков в местах их слияния и деления.

На пути выявления гидроморфологических закономерностей этих процессов предстоит еще решить очень много вопросов. Однако следует заметить, что и в изучении остальных типов русловых процессов еще достаточно "белых пятен".

Поскольку в каждом рукаве при русловой и пойменной многоруканности формируется свой тип руслового процесса, для количественной их характеристики применяются соответствующие показатели, речь о которых шла выше.

Для характеристики распространенности осередков или островов можно использовать отношение площади островов к площади всего русла вместе с островами на заданном участке реки. Кроме этого, целесообразно оценить скорость и направление движения островов

и осередков, отношение их ширины к длине (коэффициент формы), высоту над меженным уровнем воды, глубину затопления при половодьях и т.д.

В случае пойменной многорукавности можно определить количество рукавов в различных поперечных сечениях дна речной долины или суммарную длину русел на единице длины долины.

2.5. Типы речных островов

В случае многорукавных русел часто возникает вопрос о характере и темпах деформаций островов, на которых планируется размещение опор ЛЭП, мостов, насосных станций, переходов трубопроводов и т.п. Решение данного вопроса возможно при наличии представлений о генезисе данного острова и о типе русловых процессов, которые наблюдаются в обтекающих его рукавах.

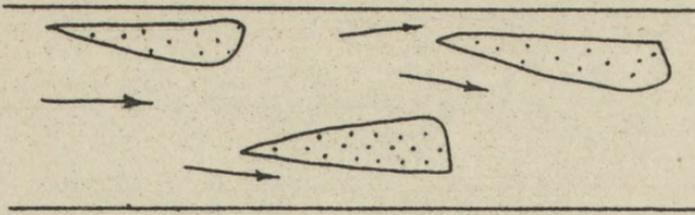
И.В. Попов (1965) выделяет две группы типов речных островов: русловые и пойменные острова.

К группе русловых островов относятся: 1) отторженные от берега побочни; 2) острова-осередки и 3) отторженные пляжи.

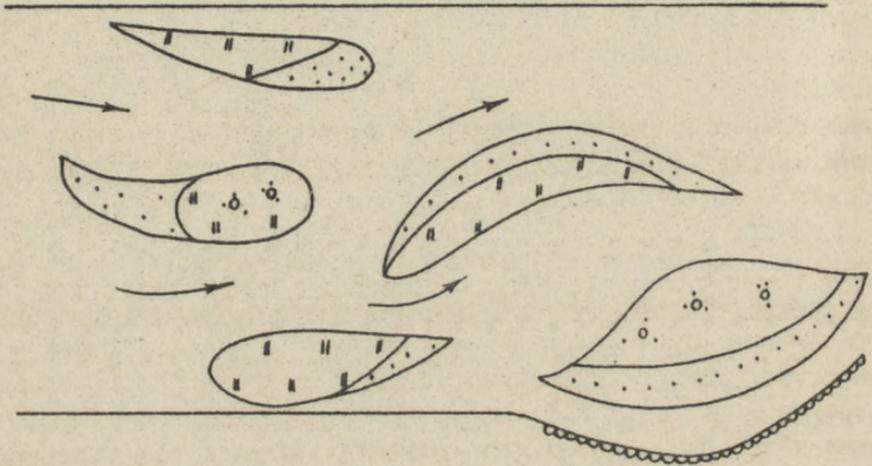
Отторженные побочни возникают при побочном типе руслового процесса. В плане они имеют форму, близкую к треугольной (рис. 35а). Поверхность их сложена мелкими фракциями русловой фации аллювия и плохо закреплена. В отдельных случаях возможна остановка побочня на длительное время и образование на его поверхности пойменной фации аллювия. Высотные отметки поверхности побочня увеличиваются по направлению течения и от берега в сторону потока. Высота этих островов меньше высоты берега.

Острова-осередки (рис. 35б) образуются при осередковом типе руслового процесса, часто имеют каплевидную в плане форму, смещение их может происходить в верх или вниз по течению, а также в сторону. Та сторона острова, где располагается его пологое подводное продолжение, намывается, а области обрывистых границ острова размываются. Для определения скорости сползания острова применяют способ совмещения (сравнения) разновременных планов русла или устанавливают репера плановых деформаций в области размыва острова.

a



б



в

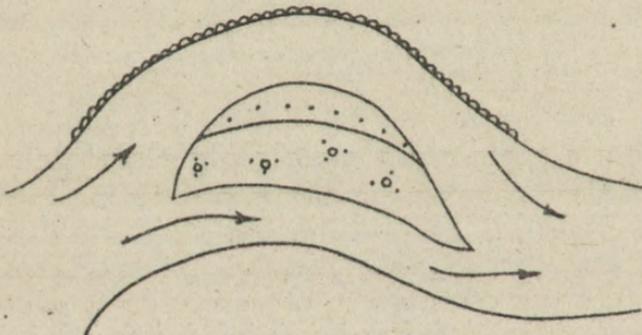


Рис.35. Типы русловых островов;
а - отторженные побочни; б - острова-осередки; в - отторжен-
ные пляжи

Отторженные пляжи возникают при незавершенном меандрировании и в отдельных случаях при свободном. В плане такие острова имеют серповидную форму (рис. 35в). В процессе развития спрямляющей протоки (размыва вогнутого берега, представленного островом) и отмирания исходного главного русла происходит смещение острова поперек оси долины, приращение к берегу и затем полная или частичная его сработка.

Пойменные острова делятся на промывные, которые возникают при образовании протоков на пойме при незавершенном и свободном меандрировании и при развитии пойменной многорукавности, и на острова вытаивания, которые возникают при любом типе русловых процессов на реках, протекающих в зоне многолетней мерзлоты. Острова вытаивания образуются в результате просадки поверхности поймы при оттаивании мерзлого грунта. В образовавшихся таким образом понижениях возникают протоки, расчленяющие поверхность сформированной поймы.

2.6. Изучение причин образования различных схем русловых переформирований

В данном разделе описываются попытки дать логические и обоснованные опытным путем объяснения причин образования различных типов русловых процессов. Эти соображения нельзя считать окончательно завершенными. Они приводятся здесь главным образом для иллюстрации сложности проблемы русловых деформаций и для стимулирования дальнейших исследований.

Наиболее распространенной русловой формой является гряда. Относительно причин происхождения гряд существуют различные соображения. Их краткое описание без критического анализа можно найти в работе Н.С.Знаменской (1976). Весьма убедительным, но, как будет видно в дальнейшем, не бесспорным представляется объяснение, данное К.И.Росинским и И.А.Кузьминым (1950), которое приводится ниже.

"Повсеместное распространение гряд в водотоках указывает на то, что они являются устойчивой формой сопряжения движущейся водной среды с подстилающей ее сыпучей грунтовой массой. На первый взгляд это сопряжение в равномерном потоке казалось бы возможным представить себе в виде более простой, плоской поверхнос-

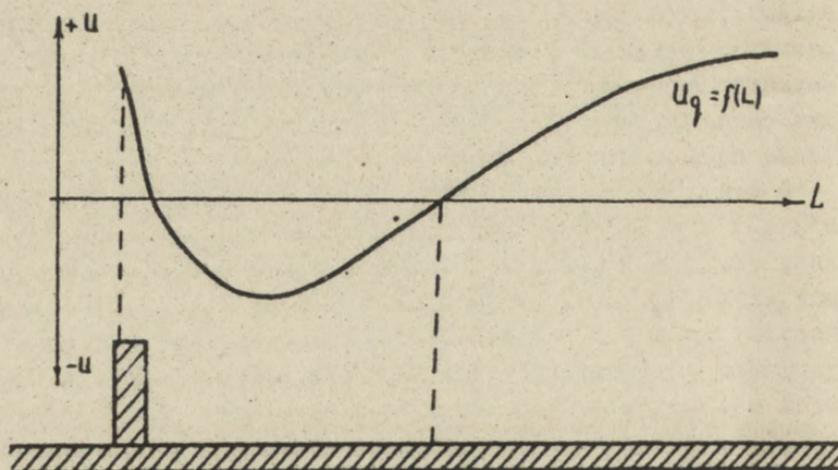


Рис. 36. Изменение продольных скоростей течения у дна за донным порогом

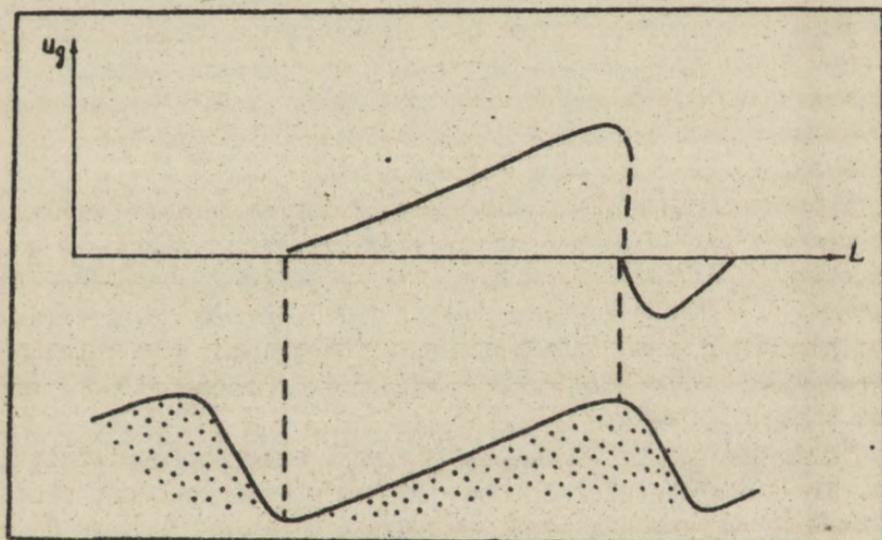


Рис. 37. Продольная эюра придонной скорости течения над телом гряды.

ти. Нетрудно, однако, убедиться в неустойчивости такой формы и в неизбежности перехода от нее к образованию гряд.

Подвижное дно потока способно сохраняться плоским только при условии равномерного движения наносов. Всякое нарушение равномерности неизбежно влечет деформирование дна. Турбулентный же поток из-за пульсации скоростей не движется равномерно даже в том случае, если средние его гидравлические характеристики остаются неизменными во времени и вдоль по течению. Интенсивность движения наносов, связанная с величинами скорости течения воды, также пульсирует, увеличиваясь на одних участках и затухая на других. В результате пульсации расхода наносов дно потока неизбежно покрывается неровностями. Неровности приводят к образованию брызгов течений, сопровождающихся появлением за теневой стороной выступов дна - водяных вальцов с горизонтальной осью вращения. Ниже вихревых зон, в придонных слоях жидкости, возникают устойчивые области ускоряющихся по длине потока течений. О движении воды за донным выступом можно судить по рис. 36.

Места возникновения в потоке водяных вальцов и связанных с ними областей ускоренных течений и служат очагами образования гряд. Валец вымывает на дне потока "подвалье" гряды. Продукты размыва подвалья, откладываясь по его границе, образуют зачатки тела гряды, которые затем разрастаются в полную ее форму. Срыв течения за гребнем гряды с первого же момента ее формирования создает условия для зарождения ниже по течению следующей гряды и т.д.

Формируясь под воздействием ускоренных течений, гряда приобретает устойчивую форму, приспособленную к неизбежному в этих скоростных условиях неравномерному движению наносов. В свою очередь, тело гряды поддерживает необходимое для ее существования ускоренное течение воды вдоль лобового откоса и вызывает срыв скоростей воды за ее гребнем. Такая взаимная увязанность режима донных течений с грядообразной формой подвижного рельефа дна и является причиной ее устойчивости" (К.И. Россинский, И.А. Кузьмин, 1950, с.68).

В основу данного объяснения положена теория М.А.Великанова (1949), основанная на рассмотрении воздействия на песчаное дно пульсирующих скоростей потока. Свой аналитический вывод М.А.Великанов строит на уравнении баланса деформаций дна

$$\frac{dP}{dx} + \frac{dz}{dt} = 0, \quad (2.5)$$

где P - удельный расход донных наносов; X - горизонтальная координата, отсчитываемая по длине потока; Z - высота дна над некоторой условной плоскостью; t - время.

Далее М.А. Великанов принимает нормальный закон распределения пульсирующих значений скорости и выведенное им выражение для удельного расхода донных наносов

$$P = \frac{D}{\sqrt{2\pi}} \int_{M_0}^{\infty} e^{-\frac{\mu}{2}(dM - \beta)^2} dM \quad (2.6)$$

где D - средний диаметр частиц дна; μ и β - параметры, зависящие от скорости потока, начальной скорости влечения частиц и расстояния l , на котором коэффициент корреляции между пульсирующими скоростями потока в двух точках убывает до нуля.

В результате М.А. Великанов получает зависимость для скорости изменения высоты дна

$$\frac{dZ}{dt} = -\frac{dP}{dX} = \frac{kD}{l} \cdot f(\xi, \varepsilon, \gamma), \quad (2.7)$$

где ξ, ε, γ - параметры или, точнее, сложные функции скорости течения, крупности частиц, пульсаций скорости и ряда других характеристик потока.

Численное решение этого уравнения позволило М.А. Великанову показать, что для образования волнистой поверхности первоначально гладкого дна достаточно пульсаций скоростей течения.

Однако данные представления рядом авторов считаются спорными (Б.А. Шуляк, 1971; С.М. Анциферов, 1969). Например, С.М. Анциферов опровергает объяснение М.А. Великанова, а затем К.И. Россинского и И.А. Кузьмина следующим экспериментом.

В сосуде со стоячей водой медленно перемещалась пластина с насыпанным на нее песком. В результате первоначально ровная поверхность песка становилась волнистой при отсутствии в воде макромасштабных пульсаций.

Таким образом, можно видеть, что вопрос о причинах образования грядового рельефа дна является спорным и в настоящее время.

Относительно образования побочневых гряд К.И. Россинский и И.А. Кузьмин (1950) пишут следующее (с. 69):

"К устойчивым явлениям относится и переход гряд от параллельного к шахматному рельефу при уменьшении отношения глубин к

ширине потока. При достаточной ширине потока малейший перекося гребня гряды приводит к перемещению наносов по подвалю гряды вдоль ее гребня, т.е. наискось к общему направлению потока. Такое движение наносов должно неизбежно вызывать образование в пределах подвала новой гряды, ориентированной нормально к направлению старой гряды. В результате этого явления гребни двух соседних гряд оказываются перпендикулярными друг другу. В свою очередь, нормально к гребню нижней гряды направляется гребень следующей по течению гряды и т.д. Такое построение гряд приводит к тому, что на всем протяжении участка реки гребни перекашиваются и, размещаясь нормально друг к другу, образуют в плане зигзагообразную линию" (рис. 38).

В своей работе К.И.Россинский и И.А.Кузьмин выделили три типа русловых переформирований (периодическое расширение, меандрирование и блуждающие русла) и привели следующие соображения о причинах, обуславливающих их образование (с. 78):

"Тип процесса, по которому протекают деформации русла на той или иной реке, зависит от относительной подвижности ее ложа и берегов. На прямых участках русла образуется цепь перекосов с побочными-рядами, расположенными в шахматном порядке. Циркуляционное течение, возникающее в плесовых ложинах вследствие изгиба глубинных слоев потока при обтекании побочной, действует на прижимной берег, размывая его и откладывая в то же время наносы на побочие. Так как плесовые ложины, как и гряды-побочни, размещаются у берегов в шахматном порядке, размыву подвергается местами правый, а местами же левый берег. Одновременный размыв противоположных берегов в пунктах, сдвинутых на расстояние между смежными плесами, дает толчок к искривлению русла. Однако искривление не всегда осуществляется. Если по геологическим причинам или по условиям растительного покрова берег разрушается сравнительно медленно, побочни, нацеливаясь на места плесовых ложин, прикрывают участок берега и приостанавливают размыв. Тогда разрушение берегов переходит на участки, до того прикрытые лежащими ниже побочными, куда сползли теперь плесовые ложины. Однако и здесь берег, не успевая искривиться, вновь закрывается побочными.

Таким образом, в процессе деформации линия берега, постепенно размываясь на всем протяжении речного участка, перемещается

параллельно своему первоначальному положению. Так как оба берега перемещаются одновременно и в противоположных направлениях, то русло реки начинает расширяться. С расширением русла побочни вытягиваются в длину и ширину. Фарватер на перекате постепенно принимает направление, перпендикулярное к берегам, а седловина переката получает ту характерную форму в плане, которая наблюдается на так называемых "дурных перекатах".

Однако процесс расширения русла не длится до бесконечности. При излишней ширине русла реки гипертрофированный рельеф дна начинает создавать значительное сопротивление движению воды, побочни оказываются подготовленными к приобретению полной формы барханов и поток отторгает побочни от берегов. Отторгнутые побочни обращаются в осередки и острова. Старые плесовые ложины заносятся наносами, образовавшиеся острова, соединяясь с противоположным берегом, образуют с течением времени новую линию берега, как бы выдвинутую в сторону реки. В сужившемся русле, сохраняющем прямолинейное очертание в плане, снова формируется на дне цепочка перкатов, и процесс расширения русла повторяется сначала.

В противоположность процессу периодического расширения развитие излучин - меандрирование возникает на речных участках, берега которых деформируются относительно быстро, а смещение песчаных масс (гряд) вниз по течению происходит медленно. В этом случае берега, ограничивающие плесовые ложины, сильно подмываются еще до подхода к ним лежащих выше побочней. Так как в двух смежных плесовых ложинах берега размываются в противоположных друг другу направлениях, то русло реки искривляется, принимая очертание, напоминающее синусоиду. С развитием меандр русло постепенно удлиняется. Плесовые ложины вытягиваются и, занимая всю длину излучины, обращаются в плесовые участки значительного протяжения. Побочни перекатов также разрастаются в длину и обращаются в отмели, тянущиеся вдоль выпуклых берегов меандрирующего русла. Расстояние между перекатами увеличивается, а положение их валов оказывается привязанным к местам перегиба русла. Перекаты прекращают перемещение относительно берегов и приобретают стабильное положение.

Излучины развиваются, спрямляются и т.д. Таким образом, так же как и процесс периодического расширения русла, процесс меандрирования носит повторяющийся характер.

Блуждающие русла наблюдаются у рек с очень подвижными берегами. В таких реках процессы образования гряд и их переформирования не успевают следовать за деформированием берегов. Русло реки, не будучи в состоянии удерживать правильную форму, сильно развивается в ширину. При этом гряды образуют осередки, которые обращаются в острова и разбивают реку на протоки, непрерывно меняющие свои очертания. Деформирование русла сводится к непрерывному возникновению и развитию новых рукавов и к столь же непрерывному отмиранию ранее развившихся, причем процесс этот протекает неравномерно и нерегулярно".

Рассмотрим результаты экспериментов, которые были выполнены в США Аккерсом и Чарльтоном (1964, 1970) с целью исследования процесса меандрирования.

Исходное русло в этих опытах было прямолинейным в плане с трапециевидальным поперечным сечением и размываемыми дном и берегами. На вход пионерного русла подавалась вода с наносами, и здесь в первые часы опыта возникали ленточные гряды, которые затем перестраивались и образовывали побочни. Следующей стадией развития русловых форм было образование участков размыва берега напротив каждого побочня и возникновение извилистости русла в плане. При малой величине расхода донных наносов русло не становилось извилистым: процесс меандрирования возникал только после подачи на модель некоторого (критического) расхода донных наносов.

После формирования меандрирующего русла был уменьшен уклон дна при сохранении тех же расходов воды и наносов. В результате этого в начале модели возникли скопления наносов, которые обусловили увеличение (компенсационное) уклона водной поверхности, но в русле стали образовываться отмели (осередки) и возникла русловая многоруканность.

В результате проведенных экспериментов Аккерс и Чарльтон пришли к следующим выводам.

1. Существуют два типа речных русел с упорядоченным переотложением наносов (или динамически устойчивые русла) — прямолинейные с ленточными или побочными грядами и извилистые с поочередной сменой зон размыва и намыва по каждому берегу.

2. Первоначально прямолинейное русло становится извилистым при определенном расходе донных наносов (больше некоторого

критического), когда исходные побочни вырастают вверх и заставляют русловой поток огибать их и размывать противоположные участки берега.

3. Ширина меандрирующего русла примерно в два раза больше ширины прямолинейного при одинаковых значениях расходов воды и наносов.

4. Длина меандр связана с расходом воды

$$L = 38,0 Q^{0,467}. \quad (2.8)$$

5. Если после образования излучин увеличить расход наносов, то их длина начинает уменьшаться (этот вывод не ясен - за счет каких изменений русла происходило сокращение длины излучины).

6. Опыты с флуоресцентными метками показали, что наносы, поступающие от размыва одного берега, никогда не перемещались к противоположному.

7. Когда уклон долины оказывается недостаточным для развития гидравлического уклона, обеспечивающего перемещение заданного количества наносов в форме побочней или меандр, тогда возникает осередковый тип русла.

Экспериментальные исследования образования осередков выполняли в СССР А.В.Андреев и И.А.Ярославцев (1953), а в США - Леопольд и Вольман (1957).

А.В.Андреев и И.А.Ярославцев показали, что блуждание реки обусловлено перемещением наносов в форме гряд, остановка или торможение которых приводят к образованию осередков. Этому процессу способствует уменьшение уклона водной поверхности и увеличение ширины русла.

Леопольд и Вольман в результате своих наблюдений на р.Хоро-Крик и на русловой модели отмечают, что при прочих равных условиях на развитие многорукавности оказывает влияние гранулометрический состав донных наносов и отложений - чем больше изменчивость крупности отложений, тем вероятнее возникновение русловых отмелей. После образования осередков на участке исходного одорукавного русла происходило увеличение уклона водной поверхности.

Таким образом, можно видеть, что морфометрия русел тесно связана с типом русловых процессов и с факторами, их определяющими. Это обстоятельство побудило к поискам связей между морфометрическими характеристиками русла раздельно для каждого типа руслового процесса. Обобщение исследований этого направления выпол-

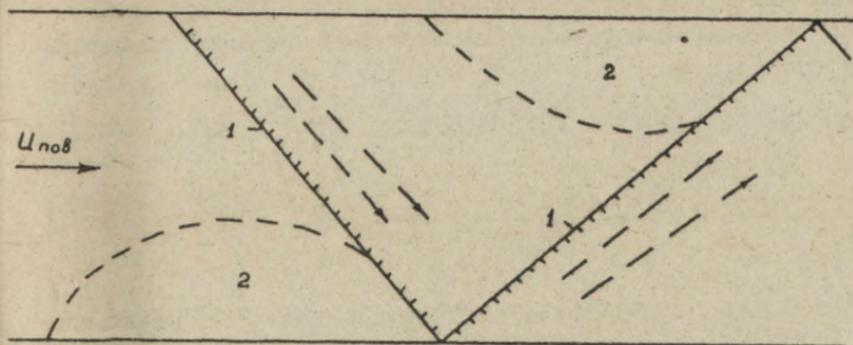


Рис. 38. Расположение гребней (1) и наиболее высоких участков (2) побочневых гряд

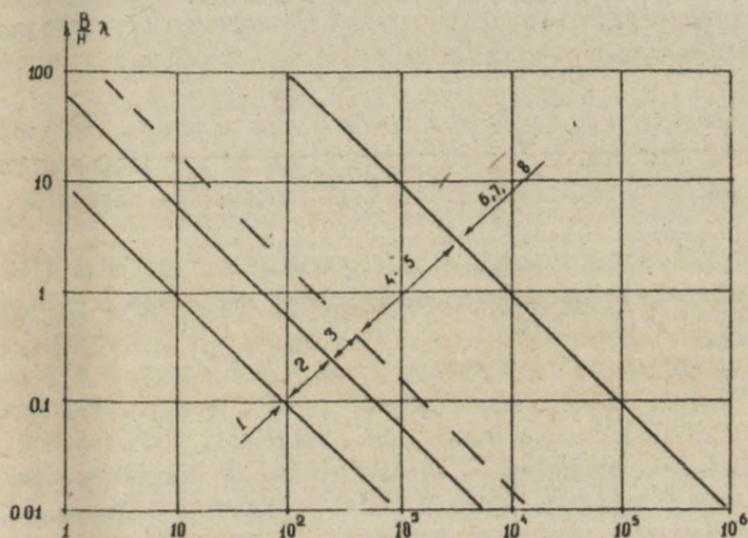


Рис. 39. Критериальная зависимость перехода одних типов руслового процесса в другой (по Н.С. Знаменской, 1979):

1 - ленточные гряды; 2 - побочки; 3 - осередки; 4 - ограниченное меандрирование; 5 - русловая многорукавность; 6 - свободное меандрирование; 7 - незавершенное меандрирование; 8 - пойменная многорукавность

нено Н.С.Знаменской (1977), которая получила линейные связи между критерием гидравлических свойств потока и его относительной гладкостью

$$\frac{2gJH}{V^2} \left(\frac{B}{H} \right) = f \left(\frac{H}{d} \right) \quad \text{или} \quad (2.9)$$

$$\frac{B}{H} \lambda = f \left(\frac{H}{d} \right) \quad \text{.. где} \quad \lambda = \frac{2gJH}{V^2} \quad (2.10)$$

Графический вид этих связей представлен на рис. 39. Достаточно четкое разделение точек получилось только для ленточно-грядового и побочного типов руслового процесса. Это обстоятельство связано как с некоторым произволом в получении значений $\frac{H}{d}$ и $\frac{B}{H}$, которые на любом участке реки существенно меняются в пространстве и во времени, так и с учетом водного режима реки и соотношения стока взвешенных и донных наносов, влияние которых, возможно, оказывается весьма ощутимым при переходе от свободного к незавершенному меандрированию и затем - к пойменной многорукавности.

Отсюда следует, что чем загруженнее поток наносами, тем полнее он должен использовать уклон долины для их транспорта и тем меньше должна быть его извилистость по отношению к осевой линии долины.

В работе Н.Е. Кондратьева, И.В. Попова и Б.Ф. Сидченко (1982) показано, что тип руслового процесса хорошо коррелирует со значениями B_d/B_p , B_d/B_{np} и J_d/J_p , где B_d и J_d - ширина и уклон дна долины соответственно; B_p и J_p - ширина и уклон руслового потока; B_{np} - ширина пояса руслоформирования равна размаху меандр или ширине пояса меандрирования, при русловой многорукавности - ширине русла вместе с шириной островов, при пойменной многорукавности - ширине всех рукавов на заданном участке.

Связь этих показателей, а также обобщенного критерия λ и коэффициента извилистости русла с типом русловых процессов представлена в табл. I.

Таблица I

Значения относительных показателей использования русловым потоком ширины и уклона долины при различных типах руслового процесса

№	Тип процесса	$\frac{J_p}{J_y}$	$\frac{B_y}{B_p}$	$\frac{B_{np}}{B_p}$	$\frac{B_y}{B_{np}}$	A	K
1	Свободное меандрирование	0,50	18,3	8,9	2,1	36,6	2,0
2	Незавершенное меандрирование	0,71	10,4	5,7	1,8	14,6	1,41
3	Пойменная многорукавность	0,82	6,5	5,6	1,2	7,9	1,22
4	Ограниченное меандрирование	0,86	5,1	3,4	1,5	5,9	1,16
5	Побочневый тип	0,93	2,4	1,2	2,1	2,6	1,07
6	Русловая многорукавность	0,97	1,9	1,0	1,9	2,0	1,03

Примечание.

$$A = \frac{J_y}{J_p} \frac{B_y}{B_p} ; \quad K - \text{коэффициент извилистости русла.}$$

Приведенные в табл. I соотношения рассматриваются как критерии типа русловых процессов, исходя из того, что ширина дна долины отражает проявление ограничивающего фактора, а уклон дна долины - потенциально возможный максимум энергии данного потока или его предельно возможную удельную транспортирующую способность.

2.7. Распространенность типов руслового процесса по территории СССР

В отделе русловых процессов ГТИ была составлена карта распределения групп типов русловых процессов по территории СССР. На ней выделяются: 1) однорукавные меандрирующие реки, на которых предположительно могут развиваться ленточно-рядовый и побочневый русловые процессы; 2) реки с ограниченным меандрированием; 3) свободномеандрирующие и 4) многорукавные, в группу которых отнесены незавершенно меандрирующие, а также реки с русловой и

пойменной многорукавностью. Всего рассмотрено 4338 рек общей длиной 412345 км. Полученные результаты приведены в табл.2.

Таблица 2

Распределение типов руслового процесса на территории СССР

Территория	Длина участков по оси долины, км/%			Развет- вленное русло	Длина обследо- ванных рек	Число рек
	Меандрирование свобод- ное	ограни- ченное	Немеандри- рующие			
Русская равнина	<u>41510</u> 56	<u>4580</u> 6	<u>23785</u> 32	<u>4380</u> 6	<u>74255</u> 100	498
Зап. Сиб. и Сев. Казахстан	<u>36920</u> 74	-	<u>9970</u> 20	<u>2800</u> 6	<u>49690</u> 100	208
Средняя и Южная Сибирь	<u>36990</u> 35	<u>4625</u> 4.5	<u>53260</u> 51.5	<u>9470</u> 9	<u>104415</u> 100	987
Северо- Восток СССР	<u>27490</u> 35	<u>4440</u> 6	<u>11070</u> 14	<u>35850</u> 45	<u>78850</u> 100	883
Дальний Восток (южная половина)	<u>22255</u> 34	<u>7110</u> 11	<u>23760</u> 36	<u>12365</u> 19	<u>65490</u> 100	1190
Средняя Азия	<u>3770</u> 16	<u>2470</u> 10	<u>14165</u> 59	<u>3790</u> 15	<u>24101</u> 100	283
Кавказ	<u>3290</u> 21	<u>1140</u> 8	<u>7510</u> 48	<u>3600</u> 23	<u>15540</u> 100	289
Всего по СССР	<u>172225</u> 42	<u>24435</u> 6	<u>143520</u> 35	<u>72165</u> 17	<u>412345</u> 100	4338

В СССР наиболее распространены реки со свободным меандрированием - 42 %. Затем следуют немеандрирующие реки (предположительно с ленточно-градовым и побочным типами русловых процессов) - 35 %.

В Средней Азии, Средней и Южной Сибири и на Кавказе преобладают немеандрирующие реки - 59, 51, 5 и 48 %, соответственно. В Западной Сибири и на Русской равнине большинство рек характе-

ризуются свободным меандрированием (74 и 56 %).

Многорукавные русла преобладают на Северо-востоке СССР (45 %). Распространенность ограниченного меандрирования незначительная и изменяется по территории СССР от 4,5 до 11 %.

Ленточно-грядовый и побочный типы русловых процессов (немеандрирующие, однорукавные реки) имеют глубоковрезанные речные долины. Свободное меандрирование свойственно для равнинных территорий. Русловая многорукавность чаще наблюдается при выходе рек из гор, когда поток вынужден транспортировать большое количество наносов при уменьшении уклона местности. Пойменная многорукавность свойственна низовьям крупных рек или участкам выхода рек из гор на равнину.

На определенных участках рек основные факторы русловых процессов могут практически не изменяться. В этом случае русловые преобразования будут протекать по одной и той же схеме и внешний облик русла (макроформа русла, по Н.Е.Кондратьеву) будет иметь свои характерные особенности. Такие участки принято называть морфологически однородными. При незначительной изменчивости ограничивающих факторов по длине реки или при их отсутствии границы морфологически однородных участков совпадают с местами изменения водности потока или местами впадения притоков.

3. ПОЙМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ РАВНИННЫХ РЕК

Под поймой реки в самом общем случае понимается толща осадочных отложений или пород, поверхность которых периодически затопливается водным потоком, проложившим свое русло в этой толще.

На подавляющем большинстве равнинных рек поймы сформированы в результате отложения речных наносов и плановых деформаций русел. Такие поймы называются собственно речными или современными в отличие от так называемых унаследованных, т.е. образованных отложениями других агентов эрозионно-аккумулятивной деятельности (ледников, флювиогляциальных потоков, озер, болот и т.д.).

Мы будем рассматривать морфологические и другие, производные от них, особенности только современных пойм (называя их просто поймами), поскольку генезис последних, как станет ясно в дальнейшем, определяется динамикой русловых потоков и процессами плановых деформаций русел. Основными видами этих деформаций

являются меандрирование и русловая многорукавность. Поймы меандрирующих рек в силу их широкого распространения и больших размеров гораздо чаще оказывались объектом хозяйственного использования, а следовательно, и научного исследования. Закономерности их формирования, по сравнению с островными поймами, лучше изучены и поэтому мы уделаем им больше места.

3.1. Возникновение речных пойм

Речные поймы располагаются на дне долин, происхождение которых связано с определенным сочетанием эндогенных и экзогенных процессов, т.е. с движениями земной коры, ледников, флювиогляциальных и речных потоков. История формирования речных долин является важной проблемой геоморфологии и ее подробное рассмотрение не обязательно для уяснения процессов формирования современных речных пойм, в то время как изучение происхождения унаследованных речной пойм требует обратного.

Первоначальное дно речной долины может быть широким или узким по сравнению с протекающим в его пределах русловым потоком. В обоих случаях процессы формирования современной поймы будут одинаковыми в своих главных чертах. Рассмотрим схему возникновения речной поймы, предложенную Е.В. Шандером (1951).

Исходным положением схемы является наличие узкого тальвега, дно которого полностью занято русловым потоком (рис. 40, а). В этом случае на дне долины нет условий для накопления речных наносов. Если какое-то количество наносов и отлагается во время спада расходов и уровня, то во время следующего паводка они вновь переносятся потоком вниз по течению. На отдельных, достаточно выпуклых берегах такого потока при этом может на длительное время отлагаться незначительное количество аллювия, образующего зачатки прирусловой отмели, которая прижимает к склону исходного тальвега.

Извилистость потока в этой стадии развития долины вынужденная, то есть ему приходится следовать плановым очертаниям склонов долины. По мере хода боковой эрозии один из склонов долины начинает отступать и ее дно расширяется (рис. 40). На противоположном берегу, от которого русло отходит (на месте, как бы оставленном руслом), образуется толща, сложенная донными наносами потока — русловым аллювием (рис. 40, б). В этой второй стадии

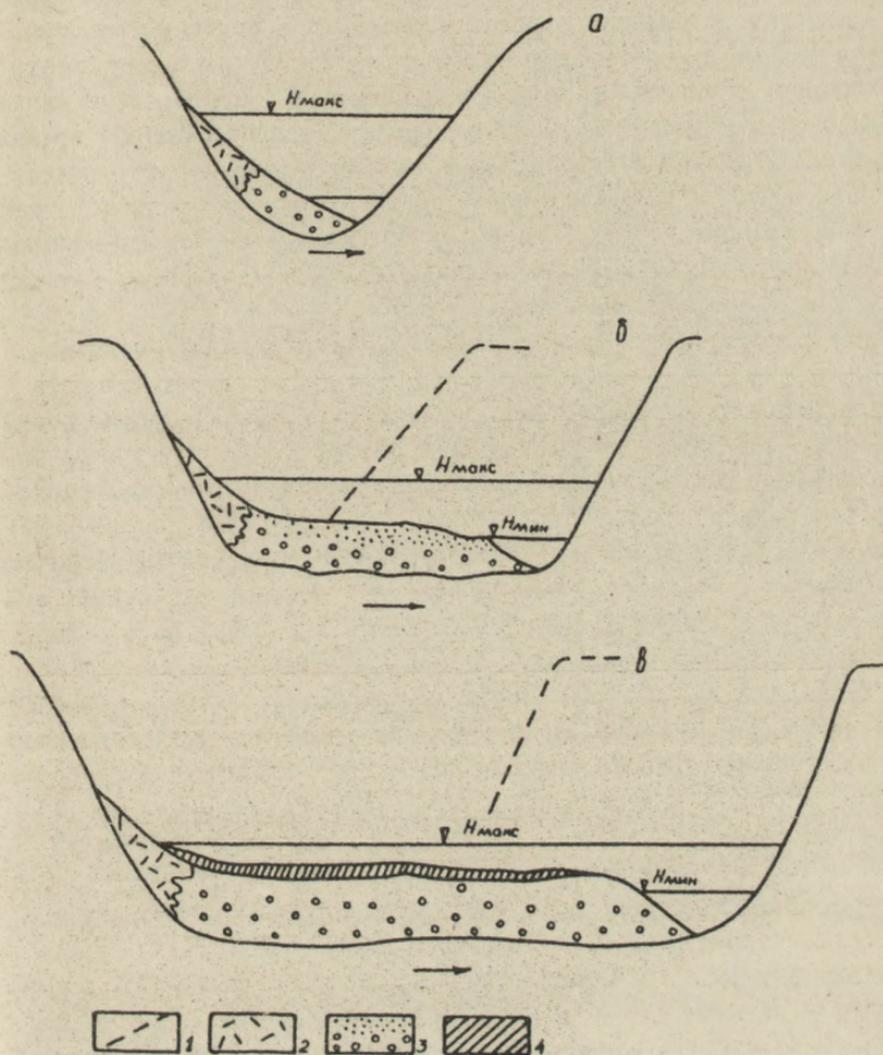


Рис. 40. Схема начальных стадий развития поймы в эрозивной долине (по Е.В. Шаннеру, 1951):

а, б, в - поперечные профили долины в три последовательные стадии ее развития;

1 - положение подмываемого берега в предыдущую фазу;

2 - склоновые отложения; 3 - русловой аллювий;

4 - пойменный аллювий

поверхность прируслового скопления аллювия еще недостаточно широкая, как и все дно долины. В силу этого в паводок происходит довольно значительный рост уровня воды, поток по всей ширине долины имеет большие глубины и скорости и поэтому способен отлагать лишь донные наносы на всей своей ширине. В результате дальнейшего смещения русла в плане происходит непрерывное увеличение ширины и высоты отмели, образующей выпуклый берег врезанной в склон долины излучины. Частота и слой затопления отмели, а также скорости течения над ней уменьшаются, что вызывает осаждение на ее поверхности все более мелких частиц. Этому процессу благоприятствует поселение пионерной растительности, которая оказывает тормозящее влияние на поток.

Таким образом, при расширении дна долины условия осадконакопления в меженном потоке и за его пределами (на поверхности отмели) становятся различными. "Это стоит в связи с двумя взаимно связанными причинами. Во-первых, теперь уже не требуется такого резкого подъема уровня реки для пропуска паводковых расходов, как раньше. Значительно меньшее его повышение обеспечивает полностью громадный прирост площади живого сечения" (Е.В. Шанцер, 1951, с. 23). Уменьшение высоты паводков так же, как и рост отмели вверх, приводит к снижению глубин и скоростей потока над ней.

"Во-вторых, уменьшение скоростей делает возможным укоренение растительности, которой ранее угрожала опасность быть сорванной паводком или засыпанной песком. Дно долины покрывается кустарниками, лесами - и лугами... Мелкие донные наносы не могут более выноситься за пределы русла далее, чем до границ узкой прирусловой полосы. Наоборот, взвешенные наносы получают возможность оседать из медленно текущих, а местами и почти стоячих разливов. Поверх руслового аллювия первичной береговой отмели начинает формироваться толща тонкопесчаного, супесчаного и суглинистого периодического наилка - пойменный аллювий. С этого момента можно считать законченным процесс превращения прирусловой отмели в пойму в строгом смысле этого слова" (Е.В. Шанцер, 1951, с. 23).

Таким образом, в разрезе аллювиальных отложений (поймы) можно выделить две группы фаций: 1) русловне фация аллювия, сложенная донными и полувзвешенными наносами и 2) пойменные фации аллювия, сложенные взвешенными наносами. Эти группы

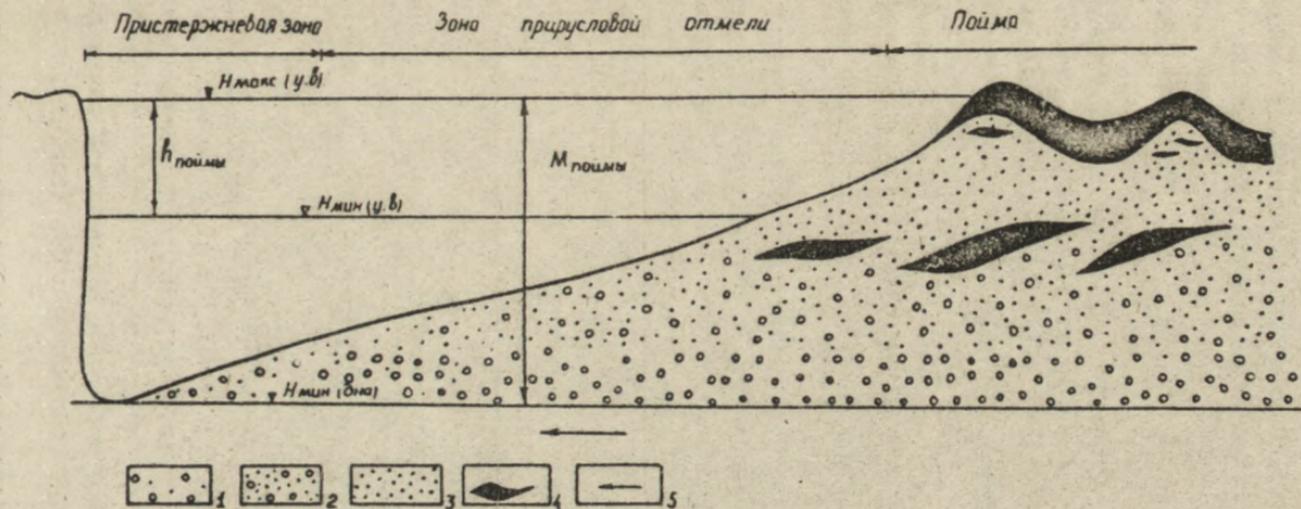


Рис. 41. Поперечный разрез русла (на плесе) и прирусловой поймы:

1 - отложения пристрежневой фации (гравий, крупный песок); 2 - отложения фации прирусловой отмели (крупный, средний и мелкий песок); 3 - отложения фации береговых валов или прирусловых грив (средний и мелкий песок, супесь); 4 - пойменная фация аллювия - отложение взвешенных наносов (суглинки, супесь); 5 - направление смещения русла.

фаций можно разделить на ряд фаций в соответствии с различиями условий их образования.

Нетрудно понять, что и в случае первоначально широкого дна речной долины, заполненного какими-либо осадочными отложениями или породами, произойдет их замещение речными наносами на части ширины, охваченной смещением русла реки, и на глубине, равной разнице высотных отметок исходной поверхности унаследованной поймы и нижней точки дна русла.

За период своего существования реки со свободным и незавершенным меандрированием в результате периодически повторяющихся процессов образования и спрямления излучин не один раз пересекали весь поперечник дна долины и увеличивали его ширину, размывая ее склоны. В результате поймы таких рек получили весьма характерные плановые очертания (рис.17) - вся поверхность поймы представлена отдельными сегментами или их частями, разделенными ложбинами старого русла, и границы поймы состоят из отдельных соприкасающихся друг с другом дуг.

В случае ограничения пояса меандрирования склонами речной долины также происходило заполнение дна перестраиваемыми речными наносами при сползании излучин. Поэтому все поймы меандрирующих рек в настоящее время сложены речными наносами.

Приведенная схема формирования поймы построена при допущении о неизменном водном режиме реки и отсутствии вертикальных перемещений русла. Именно для этих условий, которые, следуя Е.В. Манцеру, назовем нормальными, т.е. взятыми за точку отсчета при проведении дальнейших рассуждений, вводятся понятия **н о р м а л ь н о й** **в ы с о т ы** **и** **м о щ н о с т и** **п о й м ы**.

Рост пойменных отложений вверх, очевидно, ограничен положением максимального уровня воды в реке. Как показывают непосредственные наблюдения, отметки поверхности поймы близки к значению среднего максимального уровня воды. Таким образом, **н о р м а л ь н а я** **в ы с о т а** **п о й м ы** в любой момент времени - это разница между средним максимальным и рабочим уровнем воды на данном участке реки. Обычно, говоря о высоте поймы, подразумевают превышение ее поверхности над меженным уровнем воды и сравнивают его с максимальным значением нормальной высоты поймы. В таком случае мощность поймы равна разнице в отметках $\bar{H}_{\text{макс}}$ и нижней точки дна русла на ближайшем к данному поперечнику плесе (рис.41).

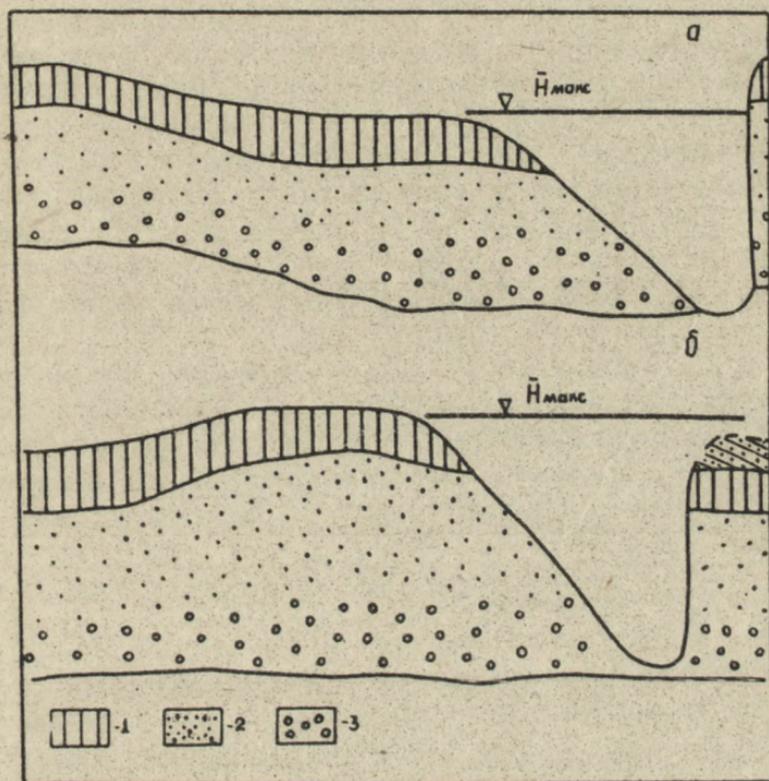


Рис. 42. Поперечные разрезы ступенчатой поймы:

- а - в случае вреза реки при поднятии территории;
- б - в случае увеличения водности потока (высоты уровня воды);
- 1 - суглинки; 2 - мелкий и средний песок; 3 - крупный песок и гравий

В случае вертикальных перемещений русла или при изменениях $\bar{H}_{\text{макс}}$ будут формироваться участки поймы различной высоты и мощности, отличной от той, нормальной, которую мы можем наблюдать в настоящее время. В этом нетрудно убедиться путем рассмотрения формирования поймы по аналогии с разобранный схемой, но с учетом данных условий.

Для пояснения сказанного рассмотрим конкретные примеры. Представим себе, что на какой-то стадии переформирования поймы произошло поднятие территории данного участка реки. Стремление реки сохранить свою транспортирующую способность (выработанный продольный профиль) вызывает врез ее русла в подстилающие породы. При этом высота поймы ввиду снижения положения водной поверхности также уменьшится, но мощность ее остается прежней (рис. 42, а). В случае увеличения водности реки увеличатся значения максимальных уровней воды и будет формироваться высокая пойма с большей мощностью (рис. 42, б). Нетрудно продолжить эти примеры, задаваясь иными условиями.

Из сказанного следует вывод о том, что сравнение высоты, мощности и отметок подошвы разновозрастных участков (сегментов) поймы позволяет фиксировать изменения водного режима реки и направление вертикального смещения русла с течением времени. Эти приемы используются в таких областях знаний, как палеогеография и неотектоника.

3.2. Формирование рельефа и строения пойм меандрирующих рек

Поймы меандрирующих рек формируются в результате развития излучин русла, т.е. путем образования отдельных сегментовидных участков. При свободном и незавершенном меандрировании развитие каждой излучины заканчивается ее спрямлением, после которого на вновь образованном участке русла весь процесс возобновляется. Вследствие этого вся пойма оказывается состоящей из отдельных сегментов или их частей.

Таким образом, рассмотрение процесса формирования рельефа и строения пойм следует разделить на две части. Сначала мы разберем формирование одного сегмента при развитии излучины (прируслового сегмента), а затем рассмотрим те его изменения, которые происходят после ее отчленения от главного русла, т.е. при ином расположении руслового потока относительно данного сегмента.

3.2.1. Формирование рельефа и строения прирусловых сегментов в ходе развития одной излучины при свободном и незавершенном меандрировании

Основные особенности рельефа и строения каждого прируслового сегмента поймы сводятся к следующему:

1) от основания толщ пойменных отложений к ее кровле наблюдается уменьшение крупности частиц как общая тенденция в чередовании слоев различного механического состава; 2) от верховой к низовой части сегмента высота поймы уменьшается, а мощность пойменной фации аллювия увеличивается; 3) рельеф поверхности каждого сегмента характеризуется чередованием грив и мелгривных понижений, которые имеют в плане дугообразные очертания, как и линия выпуклого намываемого берега.

В данном разделе мы рассмотрим причины образования указанных особенностей.

Формирование новых участков поймы происходит в результате причленения к выпуклому берегу каждой излучины все новых и новых объемов речных наносов при одновременном размыве и отступании противоположного вогнутого берега (рис. 41, 43). В результате этого мощность формируемых аллювиальных отложений (поймы), при неизменном положении продольного профиля реки, близка к нормальной.

Прирусловая отмель, изображенная на плане и в разрезе русла (рис. 41, 44), представляет собой подводное продолжение намываемого выпуклого берега. По склону отмели наблюдается закономерное изменение крупности донных отложений (рис. 43). В зоне наибольших глубин и скоростей поток транспортирует и отлагает наиболее крупные частицы (гравий и крупный песок), из которых складывается самый нижний слой пойменной толщ — пристрежневая фация аллювия (рис. 43). Выше на склоне прирусловой отмели глубины и скорости потока постепенно снижаются, поэтому здесь транспортируются и откладываются более мелкие фракции донных наносов (средний, мелкий и крупный песок) — фация прирусловой отмели. Слои отложений этой фации имеют наклон как в направлении поперек потока (такой же, как и наклон поверхности отмели), так и вдоль потока (косая слоистость) в силу того, что перемещение песчаного материала по поверхности отмели происходит в форме песчаных гряд (см. раздел 1.1).

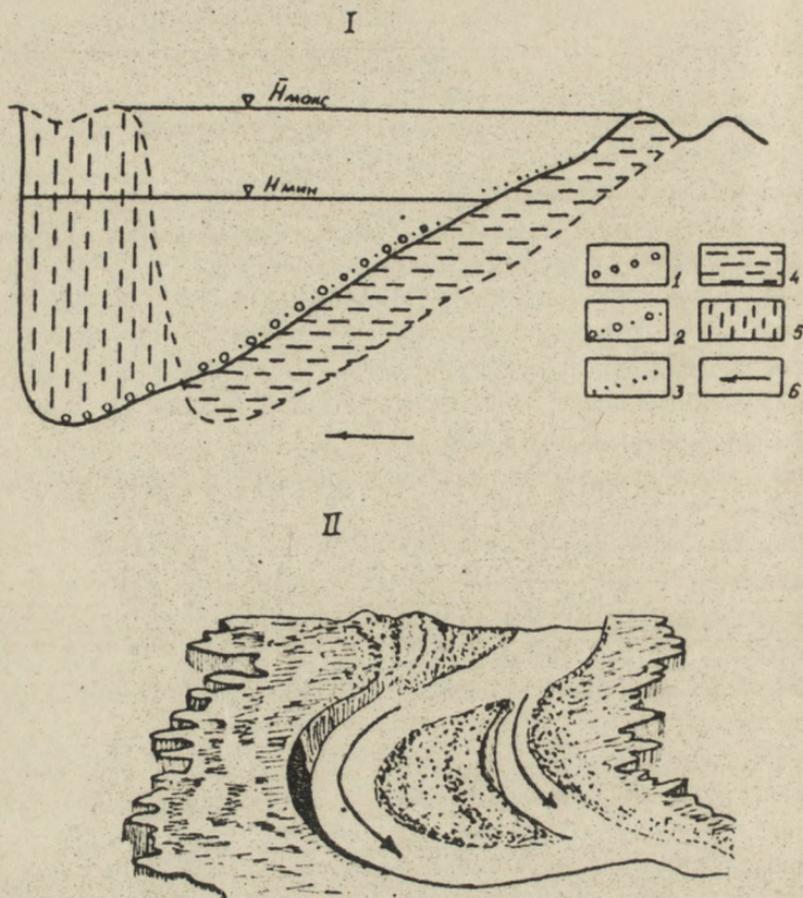


Рис. 43. Схема развития речной излучины по Е. В. Шанцеру:
I - поперечный разрез; II - общий вид.

- 1 - динамическая область дна наибольших скоростей течения (пристрелневая);
- 2 - область прирусловой отмели;
- 3 - область песчаного пляжа (наиболее высокой, обсыхающей в межень части песчаного пляжа);
- 4 - намыв;
- 5 - размыв;
- 6 - направление смещения русла

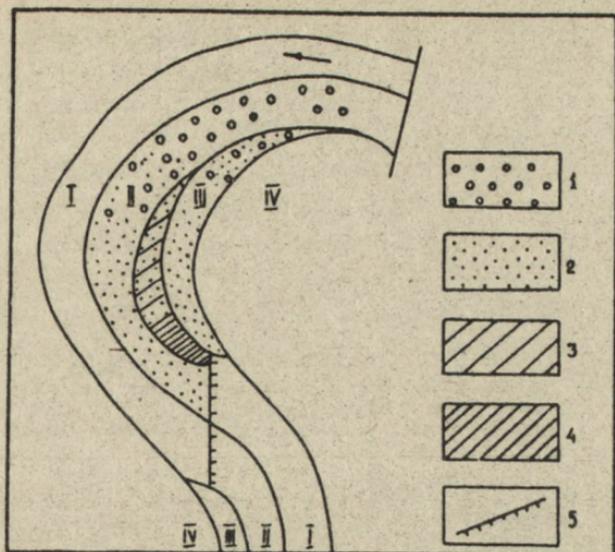


Рис. 44. Схема взаимного расположения динамических зон и осадконакопления меандрирующего потока:

I - стрежневая зона - плес; II - зона постоянно затопленной части прирусловой отмели; III - зона обсыхающей в межень части прирусловой отмели (песчаный пляж); IV - пойма.

1 - область наиболее крупных отложений прирусловой отмели (крупный песок, гравий); 2 - область накопления среднего и мелкого песка; 3 - область умеренного заиления прирусловых песков в межень; 4 - область отложений ила; 5 - положение сечения русла с наименьшими глубинами - пережат



Рис. 45. Схема возникновения диагональной слоистости в русловом аллювии при движении песчаных волн по дну реки (по Шанцеру Е.В., 1951)

Схема косой слоистости отложений прирусловой отмели в результате грядового перемещения наносов представлена на рис. 45.

Песчаные гряды на поверхности прирусловой отмели формируются и перемещаются главным образом в половодье. В межень грядовый рельеф склона отмели несколько сглаживается, в подвальях гряд отлагается материал размыва их гребней вперемежку с тонкозернистым осадком взвешенных наносов. Особенно ярко процесс отложения иловатых частиц на слой песка выражен в низовой части прирусловой отмели, где в межень возникает относительно застойная зона (рис. 44). Скорость движения песчаных гряд по поверхности склона отмели в различных ее частях различна. В верховой отмели гряды движутся быстрее, чем в низовой и средних частях. В результате этого гряды наползают одна на другую и формируют толщу песков с косой слоистостью в пределах "налегающих друг на друга линзовидных слоев" (Е.В. Шанцер, 1951, с. 45). Нижние линзы косой слоистости сформированы, как правило, более крупными грядами по сравнению с верхними, что обусловлено убыванием глубины и скоростей течения при увеличении высоты мысленно зафиксированного в пространстве участка отмели (рис. 45).

Общая тенденция уменьшения крупности аллювия вверх по разрезу поймы в действительности весьма схематична, поскольку она установлена из условия уменьшения скоростей потока в пространстве (в направлении поперек потока). Для уточнения этой схемы следует принять во внимание процессы колебания расходов воды и скоростей течения во времени, а также изменение скоростей течения по длине излучины.

"После прохождения пика паводка, параллельно со спадом полных вод, границы всех фаций начинают смещаться в сторону стрежня (вогнутого берега излучины - Ю.К.); при новом подъеме уровня реки они смещаются в обратном направлении. Тем самым в довольно широкой пограничной зоне между двумя фациями наблюдаются попеременно условия, характерные то для одной, то для другой из них. Соответственно и в образующихся отложениях можно наблюдать чередование прослоев несколько различного облика" (Е.В. Шанцер, 1951, с. 49, 50).

Наиболее высокая (прибрежная) часть прирусловой отмели затопляется лишь в период прохождения паводков или половодья, скорости течения здесь большую часть времени затопления оказываются достаточно высокими, поэтому мелкие частицы взвешенных наносов

здесь практически не откладываются.

В пристрелневой зоне потока постоянно поддерживаются высокие скорости течения и также нет условий для осаждения взвешенных наносов.

Такие условия создаются лишь в межень вдоль выпуклого берега в прибрежной области потока, где наблюдаются весьма малые глубины и скорости течения. Наиболее значительные отложения суглинистых частиц происходят в области подвалов прекративших свое движение гряд. При прочих равных условиях наибольшему заилению подвержена низовая малководная область прирусловой отмели (рис. 44). В последующее половодье отложенная линза суглинка не размывается, так как за длительный период летней и зимней межени она достаточно уплотняется и погребается новыми слоями песка.

Такие линзы часто можно обнаружить в разрезах размываемого берега вблизи меженного уреза воды. Они залегают с небольшим наклоном в сторону бывшего древнего плеса (в соответствии с наклоном прирусловой отмели, на поверхности которой эти линзы были сформированы).

Таким образом, в процессе развития одной излучины русла формируется участок поймы, имеющий рассмотренные особенности строения (рис. 4Г) и характерные очертания в плане, сходные с полукругом или сегментом окружности, и его принято называть сегментом поймы.

Для дальнейшего изложения нашего вопроса необходимо ввести широко употребляемые понятия: прирусловая, центральная и притеррасная пойма. Содержание этих понятий в различных работах оказывается различным и достаточно объективных и строгих определений в литературе мы не встречали.

Прирусловой поймой условимся называть сегменты поймы, сформированные функционирующими (продолжающими свое развитие) в данное время излучинами основного русла и проток. Это наиболее молодые сегменты поймы. Притеррасная пойма - это сегменты или их уцелевшие части, сформированные в ходе развития прежнего русла, расположенные у склона долины (под террасой), заболоченные или имеющие делювиальный покров. В обоих случаях отмечаются ощутимые изменения рельефа сегментов, свойственного аллювиальным отложениям.

Центральная пойма - это все оставшиеся сегменты поймы или их части, ограниченные ложбинами прежних русел.

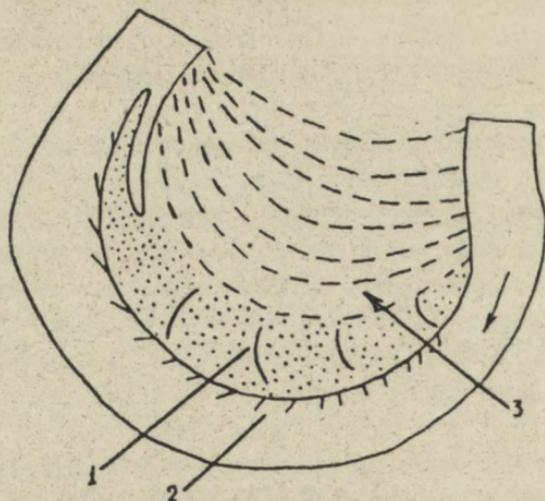


Рис. 46. План прируслового сегмента свободно меандрирующей реки:

- 1 - гребни гряд на поверхности песчаного пляжа;
- 2 - гребни гряд, расположенные ниже меженного горизонта воды;
- 3 - линии гряд сегментов

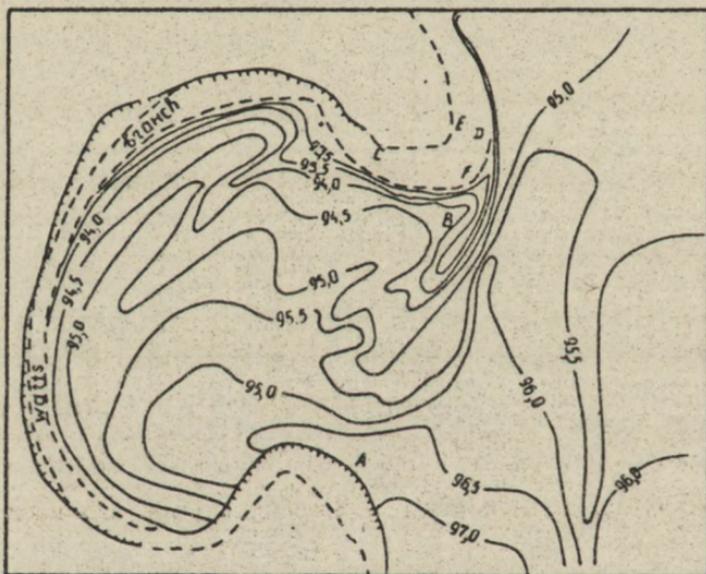


Рис. 47. Рельеф поверхности сегмента меандрирующей реки (по Вольману и Леопольду, 1957)

Каждый прирусловой сегмент поймы любой средней и крупной меандрирующей реки характеризуется наклоном своей поверхности вниз по течению и гривистым рельефом (рис. 46, 47). Этот наклон заметно больше наклона водной поверхности, поэтому высота поймы убывает от верховой к низовой части сегмента. Эта особенность рельефа поймы еще в 1955 г. отмечалась Н.И.Маккавеевым, а в 1957 г. о ней писали Леопольд и Вольман после обследования более 50 пойм рек в США (рис. 47). Кроме того, от верховой к низовой части сегмента наблюдается закономерное уменьшение крупности аллювиальных отложений в надводной в межень толще поймы. Эти особенности обусловлены тем, что верховая часть песчаного пляжа является началом зоны замедления струй потока, прошедших вдоль вышележащего вогнутого берега и насыщенных продуктами его размыва. Именно здесь над верховой частью пляжа из этих струй откладывается наибольшее количество влекомых наносов и наиболее крупные их частицы.

В результате вся поверхность песчаного пляжа и последующие отложения пойменных грив получают продольный (вниз по течению) наклон.

Кроме наклона поверхности сегментов меандрирующих рек вниз по течению есть еще одна причина, обуславливающая общее уменьшение высоты сегмента поймы в направлении от верховой к низовой части.

Эта причина состоит в том, что расстояние между гривами или доля площади поймы, занятая межгривными понижениями, существенно изменяется по длине сегмента. Так, на пойме р. Иртыш гривы в верховых частях сегментов расположены друг от друга на расстоянии 30-40 м, а в низовой - 80-100 м.

На рис. 46 представлен схематический план сегмента поймы и показаны очертания грив. Эта особенность рельефа пойменных сегментов рассматривалась многими авторами (Е.В.Шанцер, 1951; В.Е.Останин, 1961; Н.С.Знаменская, 1973; Р.С.Чалов, 1973). Анализ точек зрения, высказанных по этому поводу, легко убеждает в том, что все они являются интерпретацией соображений, впервые высказанных Е.В.Шанцером: "Смещение русла происходит как бы скачками от паводка к паводку, величина его зависит от интенсивности разлива, меняющейся из года в год, с одной стороны, и от конкретно сложившейся к данному моменту динамики потока, неодинаковой в силу непрерывно идущей деформации русла. От этих же

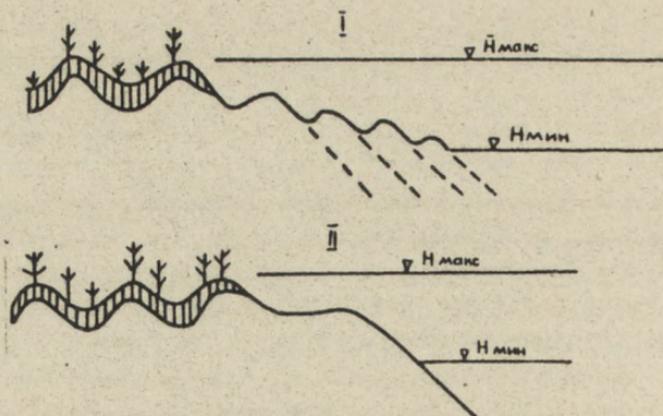


Рис.48. Поперечные разрезы поверхности прирусловой части сегмента:

I - предполагаемый по схеме образования гривистого рельефа поймы по Е.В. Шанцеру; II - фактический

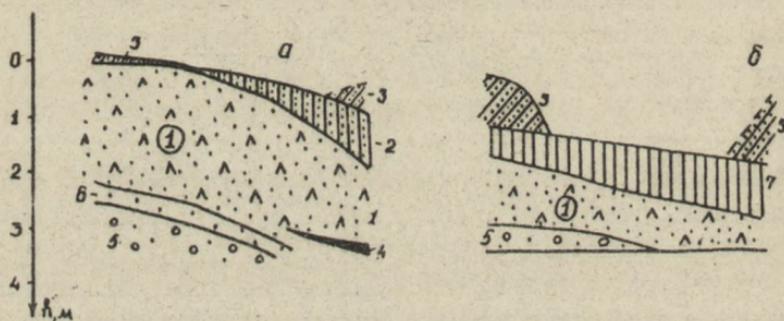


Рис.49. Продольные разрезы гривы (а) и межгривья (б):

I - мелкий песок с заиленными прослойками; 2 - суглинок с прослойками мелкого песка и супеси; 3-отложения фации наложенного прирусловья - супесь, мелкий песок; 4 - тяжелый суглинок; 5 - крупный песок с гравием; 6 - средний и крупный песок; 7 - средний суглинок

переменных величин зависит и количество влекомых наносов, выносимых с прирусловой отмели. В итоге, во-первых, зона их накопления скачкообразно смещается, с чем и связано образование серии параллельных обособленных валов, отмечающих на поверхности поймы последовательные стадии смещения русла, во-вторых, от этого зависит неодинаковая высота валов". (Е.В. Шандер, 1951, с. 63, 64).

Данное объяснение иллюстрируется рис. 48, I. Если бы оно было справедливо, то расстояние между соседними гривами оказалось бы близким к величине ежегодных плановых деформаций русла, т.е. одна грива должна формироваться за один цикл (скачок) этих деформаций. На самом деле расстояние между гривами оказывается более чем в 10 раз больше скорости плановых деформаций (100-200 м при величине размыва вогнутых берегов 5-10 м/год). Кроме этого, в вертикальных разрезах грив хорошо просматриваются годовые слои аллювия, свидетельствующие о том, что одна грива формируется в течение 10-20 лет. Четкость границ годовых слоев обусловлена тем, что ежегодно во время спада уровней воды на поверхность формирующейся гривы оседает то или иное количество взвешенных наносов, в последующее половодье такой илистый слой вновь перекрывается отложениями донных наносов (песком).

На наш взгляд, образование грив на намываемом берегу обусловлено тем, что на входе в любую данную излучину максимум удельного расхода донных наносов располагается у размываемого берега вышележащей излучины, но на некотором расстоянии от него. Эти наиболее насыщенные наносами струи потока идут далее вдоль зоны аккумуляции наносов - над прирусловой отмелью, также на некотором расстоянии от бровки выпуклого берега, которая представлена первой от русла гривой. Таким образом, зона максимальной интенсивности отложений наносов - основание будущей гривы, неизбежно должна отстоять на некотором удалении от речного склона предшествующей гривы. Зарождение новой гривы возможно только после того, как сформируется предшествующая ей грива, т.е. достигнет высоты, равной примерно среднему максимальному уровню воды.

Такой взгляд вполне согласуется с тем обстоятельством, что на поверхности пляжа всегда можно обнаружить лишь один продольный гребень - зародыш будущей гривы, и с тем, что первая от русла грива имеет практически такую же высоту и строение, что и остальные, более древние гривы сегмента (рис. 48, II).

Таким образом, основные этапы своего развития каждая грива проходит в фазу ее прируслового расположения.

Расстояние между соседними гривами данного сегмента при мало меняющемся среднегодовом объеме аккумуляции наносов на прирусловой отмели зависит от скорости плановых деформаций излучины. Чем быстрее смещается вогнутый берег, тем больше расстояние между соседними гривами. С уменьшением скорости размыва прирусловая отмель и пляж становятся более узкими, аккумуляция наносов происходит на меньшей площади и поэтому гривы располагаются ближе друг к другу. В начальной стадии развития излучины в силу большого уклона водной поверхности и малой кривизны русла в плане у намываемого берега поддерживаются достаточно высокие скорости потока и поэтому интенсивность аккумуляции донных наносов оказывается незначительной - объемы намыва на выпуклом берегу меньше объемов размыва вогнутого берега. В результате этого первые, наиболее старые участки прирусловых сегментов (их тыловая часть) имеют меньшую высоту по сравнению с теми, которые формируются в последующие фазы развития излучины. Верховая часть этого пониженного участка сегмента заносится отложениями наносов, выпадающих здесь из спрямляющих сегмент потоков воды при затоплении поймы.

Сверху вниз по течению вдоль каждой гривы и межгрия прируслового сегмента можно видеть существенное увеличение мощности пойменной фации аллювия (рис. 49). Это обусловлено следующими особенностями накопления отложений указанной фации в различных частях сегментов.

Низовая часть сегмента отличается наименьшей высотой (рис. 47), а значит, и наибольшим слоем, длительностью и частотой затопления поймы водами. Этого уже достаточно для образования здесь наиболее значительного слоя отложений взвешенных наносов, более того, в определенные фазы затопления поймы в низовой части сегмента вода практически не перемещается - отстаивается. Такой застой пойм вод наблюдается в начале процесса затопления, когда вода выходит на сегмент с низового его края. Течение над сегментом поймы возникает лишь после перелива воды из русла на пойму через верховую часть сегмента. В этой фазе затопления поймы взвешенные наносы также в большом количестве выпадают в низовой части сегмента, поскольку по его длине происходит увеличение глубин пойменного потока (уменьшение высоты поймы) и уменьшение скоростей течения. В период спада половодья перелив через верховые части сегментов прекращается и в низовых вновь некоторое время стоит вода и отлагаются взвешенные наносы.

Таким образом, мы рассмотрели процессы образования основных особенностей строения и морфологии прирусловых сегментов и условия их образования. В результате того, что развитие лобой излучины заканчивается его отчленением и образованием нового русла, вся пойма в целом состоит из сегментов или их частей (бывших когда-то прирусловыми), разделенных ложбинами прежнего русла. Эти ложбины постепенно заполняются наносами, проходя стадии протоки, озера и болота, а огибаемые ими части сегментов получают при этом некоторые новые особенности строения и рельефа.

Для завершения картины формирования поймы меандрирующих рек необходимо получить представления о дальнейших преобразованиях бывших прирусловых сегментов и оконтуривающих их ложбин старых русел при ином их расположении в плане относительно руслового потока или главного русла.

3.2.2. Формирование фаций наложенного прирусловья и фаций старичного аллювия - дальнейшие этапы развития рельефа и строения поймы

После спрямления излучины русла сформированный сегмент подвергается изменениям, не характерным до этого, вследствие нового его расположения относительно главного русла.

В случае, если новое русло будет удаляться от данного сегмента, то интенсивность осадконакопления на его поверхности будет весьма небольшой. Края ложбины старого русла (вход и выход) через 5-10 лет окажутся занесенными песком, и почти весь год (за исключением 30-50 дней) старица будет представлять собой постепенно заиляющееся пойменное озеро. Ввиду удаленности русла сюда будут выноситься лишь мелкие взвешенные частицы.

Но такое состояние сегмента поймы и огибающей его ложбины старого русла является временным. Рано или поздно блуждающее русло подойдет к данному сегменту и будет его размывать (рис. 50). При этом в период перелива воды через бровку размываемого берега на поверхность вдольрусловой полосы поймы выносятся наносы, которые постепенно на ней отлагаются, причем так, что вблизи бровки размываемого берега оседают более крупные частицы, а в глубь поймы выносятся более мелкие.

В результате на исходной поверхности поймы происходит сортировка вновь аккумулирующихся наносов по крупности (рис. 50). Эти отложения в определенной степени перестраивают первичный аккумулятивный рельеф сегмента и покрывают, как правило, уже хорошо оформленный перегнойно-аккумулятивный (гумусовый) горизонт почвы. Поэтому Е.В. Шандер назвал их наложенными. Поскольку кроме аллювиальных наложенных фаций на поверхности поймы могут возникать и неаллювиальные (торф, делювий), то мы называем эти отложения фацией наложенного прирусловья.

Весьма яркой особенностью указанной фации является то, что она практически всегда залегает на гумусированном слое почвы и имеет обратный для пойменных отложений порядок напластования - нижние слои этой фации сложены более мелкими частицами, а верхние - более крупными (рис. 50). Такой порядок напластования был

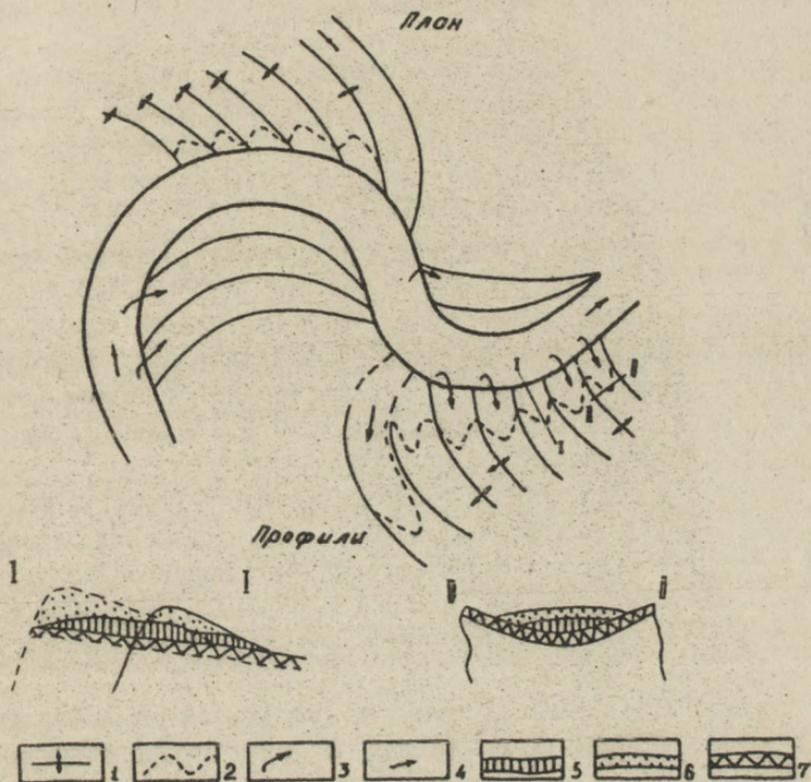


Рис.50. Схема формирования фации наложенного прирусловья:
1 - гряды первичного аккумулятивного рельефа; 2 - плановые очертания отложений фации наложенного прирусловья; 3 - направление выходящих на пойму потоков; 4 - направление течения воды в главном русле и в старицах (протоках); 5 - супеси и суглинки; 6 - пески; 7 - гумусированный (перегнойно-аккумулятивный) слой, венчающий формирование отложений при образовании первичного аккумулятивного рельефа

объяснен Е.В.Шандером (1951) и определяется сочетанием уменьшения крупности отложений фации по мере удаления от бровки размываемого берега и смещением самой бровки в направлении выноса наносов на пойму. Иллюстрация этого объяснения приведена на профиле I-I (рис. 50), где показаны два последовательных положения размываемого берега.

Мощность отложений фации наложенного прирусловья зависит не только от времени ее формирования, но и от ряда других условий: 1) от места по длине вогнутого берега; 2) от исходной высоты поверхности первичной аккумулятивной толщи; 3) от скорости идущего от бровки на пойму потока воды.

При прочих равных условиях на бровке берега, представленной низовой (наиболее низкой) частью сегмента, мощность отложений фации наложенного прирусловья оказывается наибольшей (рис. 49, III).

Процесс выноса наносов на бровку размываемого берега излучины идет более интенсивно в нижней (по течению) половине этого берега, что было установлено Н.С.Знаменской (1973) на основе лабораторных экспериментов.

В лабораторных условиях такая закономерность обусловлена тем, что в низовой половине вогнутого берега происходит перелив воды из русла на пойму при ее затоплении, а в верховой половине, как правило, вода над бровкой размываемого берега двигается с поймы в русло — здесь проходят спрямляющие потоки воды от верховой к низовой части сегмента.

В естественных условиях в отдельных случаях может наблюдаться перелив воды на пойму и в верховой половине бровки размываемого берега излучины, но нагруженность наносами струй потока, выходящих на пойму в низовой половине размываемого берега, всегда больше в силу того, что поток вдоль размываемого берега насыщается наносами.

Чем выше скорость выхода потока воды на пойму, тем (при прочих равных условиях) интенсивнее движение восходящих вверх от дна русла токов воды и тем больше расход выносимых на пойму донных и взвешенных наносов.

В межгрядных понижениях слой отложений фации наложенного прирусловья заметно больше, чем на гривах.

В случае если разрез размываемого берега представлен верховой частью сегмента, то на вершинах гряд мощность фации наложенного прирусловья пренебрежимо мала, поскольку отметки вершин

грив в этом случае близки к предельно возможным при условии, что продольный профиль реки в данный момент оказался в том же положении, что и в период формирования размываемого сейчас сегмента поймы.

Кроме рассмотренных групп фаций аллювия (русловой, пойменной и фации наложенного прирусловья) существенную роль в строении поймы играет так называемая группа старичных (озерных) фаций аллювия, которая образуется в результате отложения наносов (главным образом, взвешенных) в ложбинах старых русел, в свою очередь возникающих вследствие спрямлений русла и его скачкообразного перехода в другую часть дна долины.

"В разрезе поймы старичные отложения образуют четко оформленные линзы, основание которых уходит иной раз глубоко под урез межених вод, а кровля лежит значительно выше. По уровню своего залегания они располагаются на тех же высотах, что и русловой аллювий, но ограничены от последнего достаточно резко" (Е.В.Ланцер, 1951, с. 32).

Режим осадконакопления в старицах может быть весьма изменчивым, а может быть и сравнительно постоянным как во времени, так и в пространстве.

Например, после отделения какого-либо участка русла река может надолго отойти от него, предварительно закупорив вход и выход ложбины старого русла. В таком случае можно наблюдать весьма медленное, идущее столетиями, заиливание пойменного озера осадками глинистых и суглинистых частиц, которые образуют довольно однородную (без прослоек различного механического состава) толщу. В верхней части разреза таких отложений чаще всего залегают слои торфа (стадия болота). Однако в любой стадии заполнения старицы отложениями озерного типа блуждающая река может подойти к ней и вскрыть один или оба конца старицы. В этом случае в ложбине старого русла создается периодический проточный режим и поверх глин и суглинков начнут отлагаться чередующиеся слои песка той или иной крупности, слои супеси и суглинков. Их чередование будет обусловлено сезонными колебаниями уровней воды и скоростей течения. Такое чередование отходов и подходов реки к старице может повторяться неоднократно и поэтому строение старичных отложений в каком-либо месте может быть весьма разнообразным.

Кроме сказанного следует учитывать, что в процессе наступания реки на ложбину старого русла по длине последней происходит сортировка отлагающегося материала по крупности. Наиболее

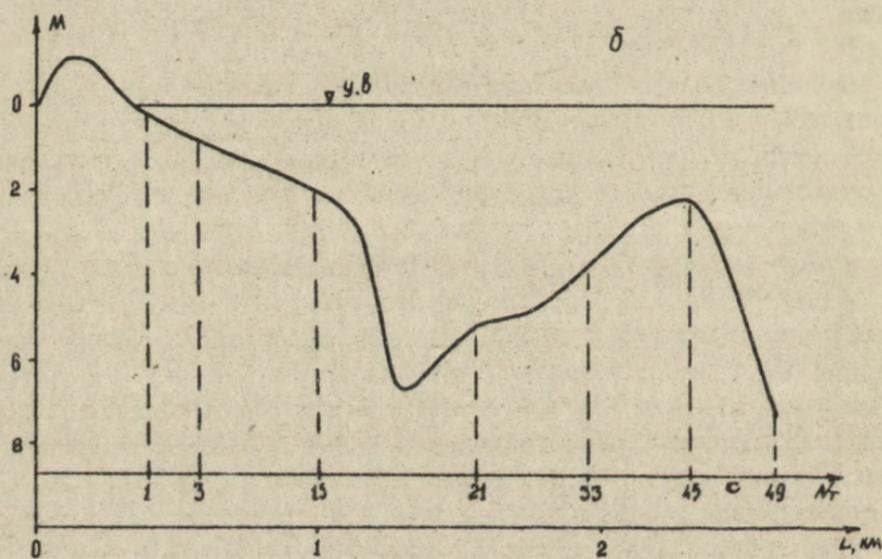
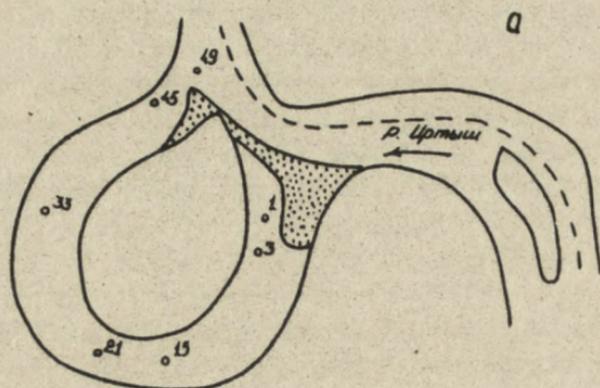


Рис. 51. План (а) и продольный профиль (б) старицы на р. Иртыш

крупные частицы будут откладываться на входе потока в старицу, и этот вход будет заноситься быстрее других участков. В результате даже при непрерывном наступлении реки в сторону отклоненного русла вход в него (верховая часть старицы) весьма быстро перекрывается и высота отложений достигает верхнего предела осадконакопления на пойме.

Продольный профиль тела занесения входа старицы обычно характеризуется наклоном поверхности, уменьшением толщины одновозрастных слоев аллювия и уменьшением крупности отложенных частиц в каждом слое в направлении выноса наносов (от русла в сторону поймы).

В зависимости от скорости потока на входе в старицу и теплоты его насыщенности донными наносами последние могут перемещаться как в форме гряд (размеры и скорость которых зависят от этих же факторов), так и без образования каких-либо форм. Поскольку эти факторы подвержены непрерывным и периодическим сезонным изменениям, слой отложений за какой-либо год включает в себя отложения, весьма различные по механическому составу и текстуре. Так как слой отложений на дне входа в старицу за один год невелик по сравнению с амплитудой колебаний уровня (глубины) воды, то главные особенности условий формирования в соседних годовых слоях оказываются практически одинаковыми. Поэтому в разрезе старичных отложений, при заметной динамике условий их накопления, хорошо просматриваются годовые слои. Границы годовых слоев выражены достаточно четко, поскольку подъем волны половодья или паводка происходит значительно быстрее спада. На подъеме при возникновении потока воды через старицу в нее поступает большое количество песчаных частиц, возрастающее с ростом глубин и скоростей. По мере спада их доля в общем расходе наносов постепенно сокращается и в конце спада, когда над входом в старицу возникают застойные зоны, поверх песка отлагаются суглинки и глины. В отличие от толщи русловых фаций аллювия, где ведущая роль в создании облика разреза принадлежит пескам, здесь суглинистые и глинистые слои явно преобладают.

Продольный профиль поверхности тела заиления истока старицы, как правило, ассиметричный (рис. 51) и напоминает профиль гряды. Положением низового откоса тела заиления фиксируется область, за пределами которой транспортируются весьма мелкие взвешенные наносы, способные отлагаться лишь в период застоя во внутренней,

заполненной стоячей водой, области ложбины старого русла.

Отметки дна устья старицы, подрезаемой наступающим руслом, всегда заметно меньше отметок дна ее истока, поскольку здесь поток, выходящий из старицы, несет уже только мелкие взвешенные наносы. Следовательно, на выходе из старицы в период затопления дна ее истока создается промывной режим, препятствующий значительной аккумуляции наносов. Тем не менее в начальный период подъема уровня воды старица заполняется водой со стороны своего устья (с низового конца), здесь происходит заметная аккумуляция донных и взвешенных наносов, поступающих из русла. При этом так же, как и в истоке старицы, наблюдается уменьшение крупности отложений в направлении от русла в старицу. Однако это явление выражено менее ярко по сравнению с областью истока старицы, поскольку значения скоростей течения и их градиент в продольном направлении выражены при этом не так значительно, как в фазу движения потока по старице сверху вниз.

Таким образом, на выходе из старицы в русло наблюдается повышение отметок ее дна и увеличение крупности слагающих его частиц.

Данная схема продольного профиля старицы может быть усложнена отдельными повышениями дна во внутренней, достаточно удаленной от ее концов, части старицы. Эти повышения приурочены обычно к местам вклинивания в данную старицу других, более старых и менее глубоких ложбин старого русла. Потоки воды по этим ложбинам перемещаются с достаточно большими скоростями и при выходе в более молодую, а следовательно, и более глубокую старицу теряют скорость и освобождаются от частиц, которые они транспортировали.

Процесс смещения русла в сторону старицы не всегда заканчивается полным размывом ложбины старого русла и огибаемого ее участка поймы. Река может резко изменить свое местоположение на дне долины, оставив данный участок русла. В этом случае наступающее ранее русло самопревратится в старицу. В более древнюю старицу теперь не будут поступать донные наносы (они начнут оседать на входе и выходе новой старицы), процесс заполнения ее наносами станет весьма медленным и сравнительно одинаковым как по скорости накопления, так и по крупности отложений в различных ее частях. Старица постепенно заполняется суглинистыми и глинистыми отложениями, которые при уровне, близком к $H_{\text{макс}}$ 95 % - ной обеспеченности, покрываются слоями торфа или отложениями пойменной фации аллювия.

Переход от старичных отложений к отложениям пойменной фации аллювия весьма условный, поскольку и те, и другие сложены главным образом частицами взвешенных наносов. Различие сводится к тому, что старичные отложения включают большое количество остатков растительного и животного мира старичного озера, а также растительные остатки, приносимые в старицу в периоды разливов реки.

Как уже отмечалось, условия заполнения ложбины старого русла аллювием могут неоднократно и весьма резко меняться, что обуславливает разнообразие строения старичных отложений. Новое русло довольно часто возникает в ложбине старицы. В этом случае в области намываемого берега можно видеть наложение русловых фаций аллювия на частично размывные (срезанные сверху) старичные. Главные различия условий формирования старичного аллювия возникают из-за различного режима поступления в него речных наносов, что в свою очередь зависит от направления смещения русла по отношению к старице (наступление или отступление). Поскольку мы выяснили основные черты хода осадконакопления в старице в этих двух случаях, то можем определить генезис слоев любого конкретного разреза.

3.2.3. Общий облик поверхности пойм свободно и незавершенно меандрирующих рек

Подводя итог рассмотрению генезиса особенностей рельефа и строения пойм меандрирующих рек, следует кратко охарактеризовать общий облик поверхности поймы при свободном и незавершенно меандрировании.

Основной структурной единицей пойм является сегмент. Вся пойма представляет собой совокупность сегментов или уцелевших их частей, разнообразно сопрягающихся друг с другом. На аэрофотоснимках соответствующего масштаба эти сегменты (или части сегментов) легко выделяются. По площади поймы наблюдается значительная пестрота ее высоты и строения и, как следствие, почвенного и растительного покрова. Причины этой пестроты в пределах любой поперечной зоны поймы кроются в изменениях указанных свойств внутри одного сегмента поймы в направлении от его верховой к низовой части и, кроме того, могут быть обусловлены неодинаковой высотой сегментов, принадлежащих различным (разновозрастным) поясам меандрирования. В свою очередь, разновысотность поясов меандрирования (ступенчатость поверхности поймы) может быть обусловлена

только изменениями положения продольного профиля из-за тектонических движений земной коры или вследствие колебаний водности рек.

Если допустить, что в период формирования современной поймы водность и режим реки не претерпевали значительных изменений и вертикальные тектонические перемещения не имели существенного значения, то, очевидно, весь набор разновысотных участков поймы и их распределение могут быть установлены на основе обследования одного сегмента поймы,

Каждый сегмент имеет достаточно устойчивый уклон сверху вниз по течению, заметно превышающий уклон водной поверхности реки. Поэтому, выделив на аэрофотоснимках поймы различные части сегментов, мы получим карту частоты или слоя затопления поймы, которая при сохранении тех же контуров будет являться и картой строения и механического состава пойменной толщи, поскольку вдоль линии наклона каждого сегмента вниз по течению мы наблюдаем закономерное увеличение мощности пойменной фации аллювия. Кроме того, на основе целенаправленных полевых наблюдений можно на аэрофотоснимках выделить области с развитой фацией наложенного прирусловья. Высота таких участков также оказывается вполне определенной (на 0,5-1 м больше высоты исходной поверхности данной части сегмента). Составив таким образом карту высотных зон поймы и механического состава верхней (надводной в межень) толщи отложений и наложив на нее поперечное деление поймы на части (прирусловую, центральную и притеррасную), получим карты распределения по поверхности поймы различных почвенных комбинаций и растительных ассоциаций. Контуров ложбин старого русла на таких картах также будут ограничивать отдельные участки с определенным набором свойств.

Пример такой карты приведен на рис. 52.

Кроме описанных общих закономерностей формирования и морфологических признаков поймы свободно и незавершенно меандрирующих рек имеют определенные различия в некоторых деталях. При свободном меандрировании концы отчленившихся излучин располагаются очень близко - уклон водной поверхности в старице незначительный и дальнейшие процессы происходят по аналогии с озерами: ложе медленно заносится глинистыми осадками с примесью органического материала, доля которого в общей массе отложений увеличивается по мере повышения отметки дна, осадки приобретают сапропелевидный характер, озеро сменяется болотом.

При незавершенно меандрировании между концами отступившей

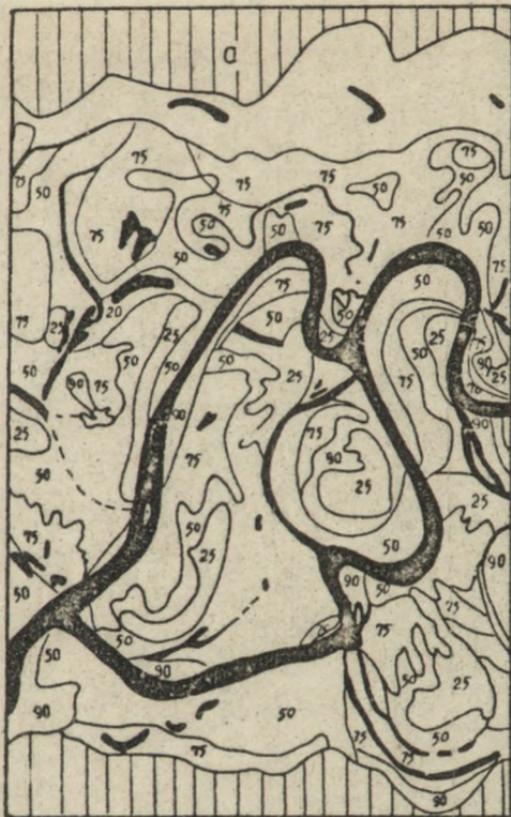
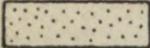
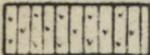
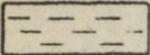
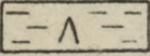
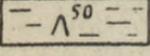
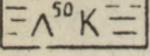
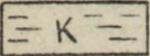
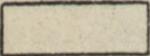
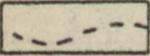
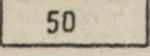
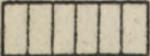


Рис. 52. Фрагменты схемы распределения зон различной частоты затопления (а) и ситуационного плана поверхности (б) поймы свободно меандрирующей реки

Условные обозначения:

-  - водная поверхность главного русла, проток и озер;
-  - прирусловые пески;
-  - заросли тальника и ив;
-  - густой осиново-тополево-березовый лес с подлеском из краснопрутника, свидины белой и т.п.;
-  - парковый лес из тополя, березы и сосны;
-  - чистые болота и заболоченные луга;
-  - залесенные на 100 % болота;
-  - залесенные на 50 % болота и на 50 % чистые;
-  - залесенные на 50 % и на остальные 50 % закустаренные болотные массивы;
-  - закустаренные на 100 % болота;
-  - луга;
-  - узкие ложбины старых проток (русел);
-  - частота полного затопления участка, % (на схеме - "а");
-  - внепойменная территория.

излучины сохраняется заметный перепад уровня воды, она долгое время функционирует как постоянно действующая протока, но со значительно ослабленной по сравнению с главным руслом мощностью. Разрыв ее выпуклого берега существенно ослабевает и не компенсирует налив на выпуклом берегу. Поэтому протока быстро сужается, и при уменьшении ее ширины в 5-10 раз вход в протоку перекрывается наносами и функционирует только в половодье. В итоге на таких более грубозернистых отложениях формируется узкое болото. Прирусловые валы, сформированные в период существования протоки и окаймляющие сегмент с внешней стороны, отличаются от таковых в главном русле как более тяжелым механическим составом нижних и верхних слоев аллювия, так и меньшим (в 10-20 раз) расстоянием между собой; высота их такая же, как и валов главного русла, поскольку зависит от амплитуды колебаний уровня. Часто протока по ходу описанного процесса меандрирует, создавая более мелкие сегменты. Кроме того, при незавершенном меандрировании наблюдается большее разнообразие сегментов по степени их развитости. При прочих равных условиях неразвитые сегменты, отделившиеся от прирусловья на ранних этапах развития, оказываются более низкими, чем развитые, что следует учитывать при составлении карт-схем затопления таких пойм.

3.2.4. Поймы ограниченно меандрирующих рек

Этот тип пойм наиболее прост по своему рельефу и строению (рис. 53) и представлен обособленными разновозрастными сегментами поймы, располагающимися попеременно то у одного, то у другого склона речной долины. Сползание излучин при переотложении рекой наносов обуславливает полную переработку каждого сегмента. Поверхность сегмента имеет устойчивый наклон вниз по течению и в направлении к склону террасы, что обусловлено ориентацией зоны налива и грив, которые снижаются от верховой к низовой части, как и при других разновидностях меандрирования, а также тем, что в процессе сползания русла каждая грива как бы отступает к террасе и одновременно размывается с верхового конца.

Аккумуляция наносов на поверхности гривы, идущая одновременно с ее стачиванием, не может компенсировать заданный первоначальными условиями формирования гривы на поверхности песчаного пляжа наклон ее продольного профиля, что можно подтвердить, рассмотрев баланс размыва - налива на отрезке реки достаточной длины.

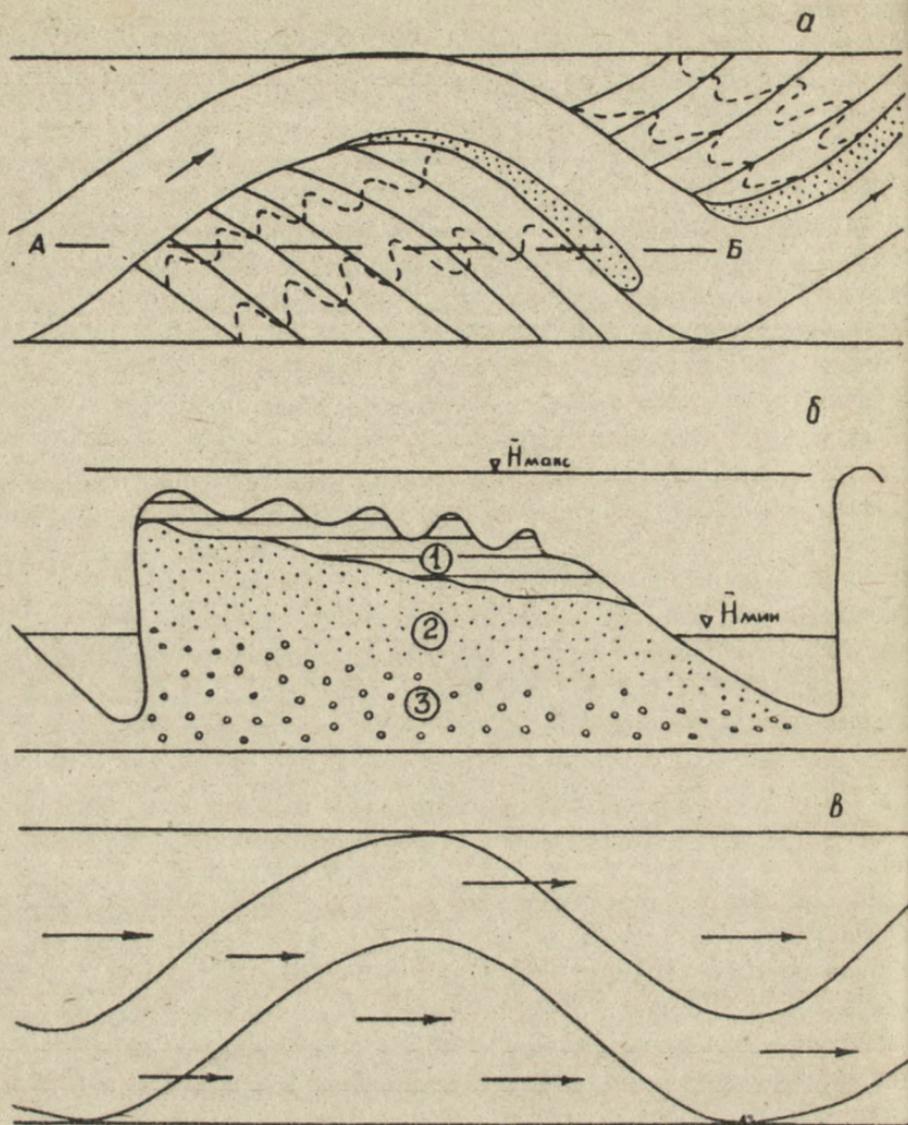


Рис. 53. Схемы поймы при ограниченном меандрировании:
а - план с изображением линии гравия (непрерывные линии) и границ затопления поймы (пунктир) при различных горизонтах воды; б - продольный профиль по линии А Б; 1 - пойменная фация аллювия (суглинков); 2 - средний песок; 3 - крупный песок; в - транзитный поток воды в плане при полном затоплении поймы

Мощность пойменной фации аллювия также увеличивается от верховой к низовой части каждой гривы и межгривья.

В отличие от пойм свободно и незавершено меандрирующих рек здесь нет старичных озер, проток (с соответствующими фациями аллювия) и болот на их поверхности. Для составления карт-схем зон затопления и распределения природных комплексов на поверхности таких пойм применяются те же принципы, что и для пойм свободно и незавершено меандрирующих рек.

3.3. Островные поймы

Как уже отмечалось, морфологические особенности этого типа пойм и их генезис изучены в меньшей степени по сравнению с поймами меандрирующих рек. Такие поймы образуются при русловой много рукавности и представлены многочисленными островами, разъединенными протоками или причлененными к берегу (рис. 54).

Причленение островов к берегам, как отмечает И.В. Попов (1959), происходит в результате меандрирования протоки с размывом одного из ее берегов. Рост острова в ширину в ходе меандрирования протоки происходит так же, как и рост сегмента поймы меандрирующей реки. При степени развитости излучины протоки I,5-I,7 начинается ее отмирание - размыв берега и транспортирующая способность потока ослабевают при неизменном или даже увеличивающемся поступлении наносов на вход в протоку. В результате остров причленяется к берегу. Неоднократное повторение процесса создает характерный рисунок поймы в плане. Размеры и ориентация линий этого рисунка не соответствуют очертаниям всего русла, но сходны с планом отдельных протоков. Таким образом, вдольбереговая пойма состоит из отдельных участков - бывших островов, имеющих наклон вниз по течению и гривистый рельеф поверхности примерно на половине своей площади. Границы между этими участками представлены занесенными ложбинами проток-меандр. Положение этих ложбин так же, как и зоны различной частоты затопления внутри островов, хорошо просматривается на аэрофотоснимках благодаря избирательному поселению растительности на участках поймы различной высоты и затопляемости.

Значительная часть площади поймы представлена островами и осередками, оконтуренными в межень рукавами руслового потока.

В зависимости от подвижности русла и особенностей водного режима такие поймы, очевидно, представлены разнообразными морфологическими типами или подтипами с определенными индивидуальными свой-

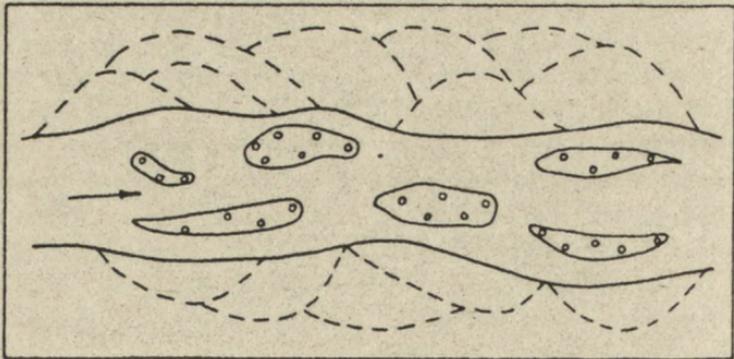


Рис. 54. Островная пойма, формирующаяся в ходе русловой много-
рукавности (по И.В. Попову).

Пунктиром показаны занесенные ложбины проток

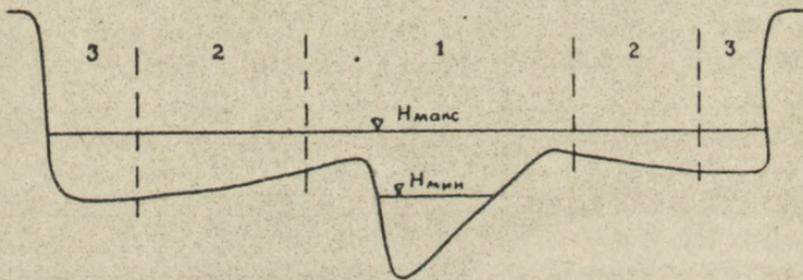


Рис. 55. Упрощенная схема поперечного сечения поверхности
поймы:

1 - область русла и прирусловой поймы; 2 - центральная
пойма; 3 - притеррасная пойма

ствами.

3.4. Процессы затопления и гидрологический режим пойм меандрирующих рек

3.4.1. Процессы затопления поймы

В простейшей и весьма грубой схеме затопления поймы ее поверхность считается ровной с небольшим наклоном от русла к террасе (рис. 55). Такой наклон объясняется тем, что вблизи русла во время весенних разливов выпадают наиболее крупные наносы и в наибольшем количестве, а с удалением от русла слой ежегодных отложений, как и их крупность, убывает. При этом поперечник поймы делится на три части: прирусловую, центральную и притеррасную. Движение воды на затопленной пойме в данной схеме происходит вдоль по речной долине.

Такие представления, которые не так давно считались достаточными, были построены без знания закономерностей формирования рельефа и строения пойм, рассмотренных в предыдущей главе.

На самом деле соотношение высот различных поперечных зон поймы может быть любым, что обусловлено наличием или отсутствием вертикальных смещений русла и колебаний водности рек, а не приведенными выше причинами, которые не учитывают, что каждый участок поймы когда-то был прирусловым и прошел все этапы развития, в то время как современный прирусловый участок еще не закончил своего формирования. Со стороны размываемого берега всегда находится старый массив поймы с хорошо сформированным почвенным и растительным покровом, а на намываемом берегу — молодой участок поймы с неразвитым профилем почвы и пионерной растительностью. Это обстоятельство обуславливает резкие различия облика указанных участков, которые нельзя объединять в одну прирусловую пойму.

Как было показано ранее (гл. 2), высота конкретного сегмента поймы является функцией отношения амплитуды колебаний уровня воды и высотного положения продольного профиля реки в период его формирования к этим же показателям реки в настоящее время. Кроме этого, поверхность поймы снижается от верховой к низовой части внутри каждого сегмента, а также от гривы к межгривью. Столь сложный реальный рельеф поверхности обуславливает сложность картины затопления поймы и пойменных течений в периоды повышения уровня воды в реке.

Рассмотрим наиболее простой вариант, когда все разновозрастные сегменты одновысотны в смысле одинаковой высоты их одноименных частей. Данное условие выполняется обязательно на поймах однородных участков ограниченно меандрирующих рек, где все сегменты имеют один и тот же возраст и сформированы одним и тем же русловым потоком. На поймах свободно и незавершенно меандрирующих рек такой случай является одним из возможных вариантов.

При исследовании процесса затопления поймы весьма полезным оказывается ввести в рассмотрение понятия пойменного массива (И.В. Попов, 1969) - участка поймы с замкнутым гидравлическим циклом, в пределах которого выполняется равенство между поступлением на него воды из русла и суммой объемов аккумуляции воды и ее оттока в русло. При ограниченном меандрировании пойменным массивом является один сегмент поймы (рис. 52). На поймах, выработанных в ходе свободного и незавершенно меандрирования, пойменные массивы ограничиваются главным руслом и протоками на пойме. Более ясное представление о пойменном массиве в данном случае можно получить при рассмотрении процесса его затопления (рис. 56).

В начальную фазу затопления пойменного массива вода на пойму поступает через пониженные ложбины старого русла с их низовой по течению стороны (рис. 56), поскольку верховые участки ложбин старого русла имеют большую высоту слоя отложений над уровнем воды в реке (см. раздел 3.2.2). Из ложбин старого русла вода выходит на низовые участки сегментов поймы.

В этой стадии затопления наблюдается заметная разница уровня воды в русле и на пойме в поперечных сечениях, удаленных от устья данной ложбины и одновременно пересекающих ее. Например, на поперечнике I-I (рис. 56) отметки водной поверхности на пойме и в ложбинах стариц будут меньше, чем в русле реки, на величину, равную разнице отметок водной поверхности между точками Р и А главного русла, поскольку вода в старицы и на пойму поступает из русла в точке А, а поперечник I-I пересекает его в точке Р. При уклоне водной поверхности 10 см/км и расстоянии между точками Р и А по руслу 10 км падение уровня от русла к пойме на данном поперечнике составит 1 м.

По мере дальнейшего повышения уровня воды внутри каждого сегмента поймы происходит увеличение затопленной площади в направлении от низовой к верховой части (рис. 51, 53) и начинается поступление воды из русла в старицы через их верховые участки.

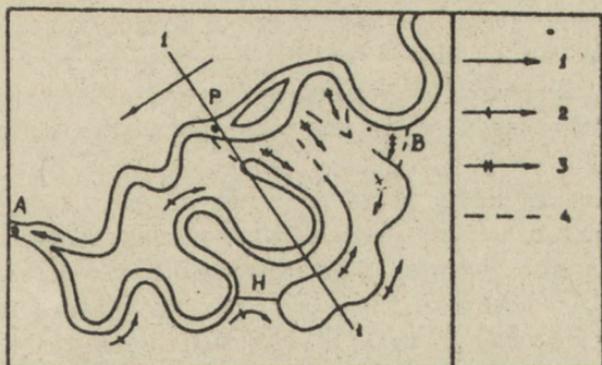


Рис. 56. План гидрографической сети пойменного массива при свободном меандрировании:

I - направление оси долины; 2 и 3 - течение в ложбинах старых русел соответственно в первую и вторую фазы затопления поймы; I-I - линия поперечника поймы.

Н и В - места расположения соответственно низовых и верховых прорв



Рис. 57. Изображение последовательности затопления одного сегмента поймы меандрирующей реки:

1 и 2 - последовательные границы затопления;

3 - наиболее высокая (верховая) часть сегмента

С этого момента возникает прямое направление течения в старицах - вторая стадия затопления поймы. Отметки водной поверхности в русле и на пойме в поперечном сечении практически выравниваются.

В процессе отмирания ложбин старого русла их верховые концы перекрываются слоем наносов до отметок поверхности сегментов поймы, поэтому в эту фазу затопления одновременно наблюдается перелив воды из русла на пойму через пониженные участки берега, представленные низовыми частями сегментов. В местах такого перелива уровень воды в русле оказывается выше, чем на пойме, затопленной сначала путем поступления воды из русла через низовые концы стариц. Поэтому уклоны водной поверхности переливающихся на пойму потоков во вторую фазу затопления оказываются весьма значительными, что обуславливает сосредоточенный размыв поймы и образование так называемых верховых прорыв - эрозионных ложбин на пойме. Кроме верховых прорыв на пойме могут быть центральные и низовые прорывы, образованные за счет перепадов уровня воды между участками поймы, первоначальное затопление которых происходило из заметно удаленных друг от друга точек русла. На рис. 56 показаны места расположения низовых и верховых прорыв пойменного массива. В следующую, третью, фазу происходит полное затопление поймы (верховых частей сегментов) и образование единого транзитного потока воды вдоль оси долины. В данном случае приведенное выше понятие пойменного массива не имеет смысла или можно считать, что вся пойма рассматриваемого отрезка реки есть один пойменный массив. После прохождения пика паводка начинается последовательное освобождение поймы от воды.

Сначала обнажаются гривы верховых частей сегментов, а по межгрявьям, прорывам и ложбинам старого русла вода продолжает двигаться из русла на пойму в направлении общего течения реки (четвертая фаза). Затем из под воды выходят верховые границы пойменных массивов, и гидравлическая связь поймы с рекой осуществляется через низовые прорывы и концы ложбин старого русла (пятая фаза). В дальнейшем освобождаются от воды водоразделы между низовыми частями сегментов центральной и притеррасной поймы и ложбинами старого и современного русла. Эти водоразделы располагаются вдоль вогнутого, размывавшегося или размываемого, берега и образованы фацией наложенного прирусловья. Из-за наличия таких водоразделов в межгрявьях низовых частей сегментов центральной и притеррасной поймы

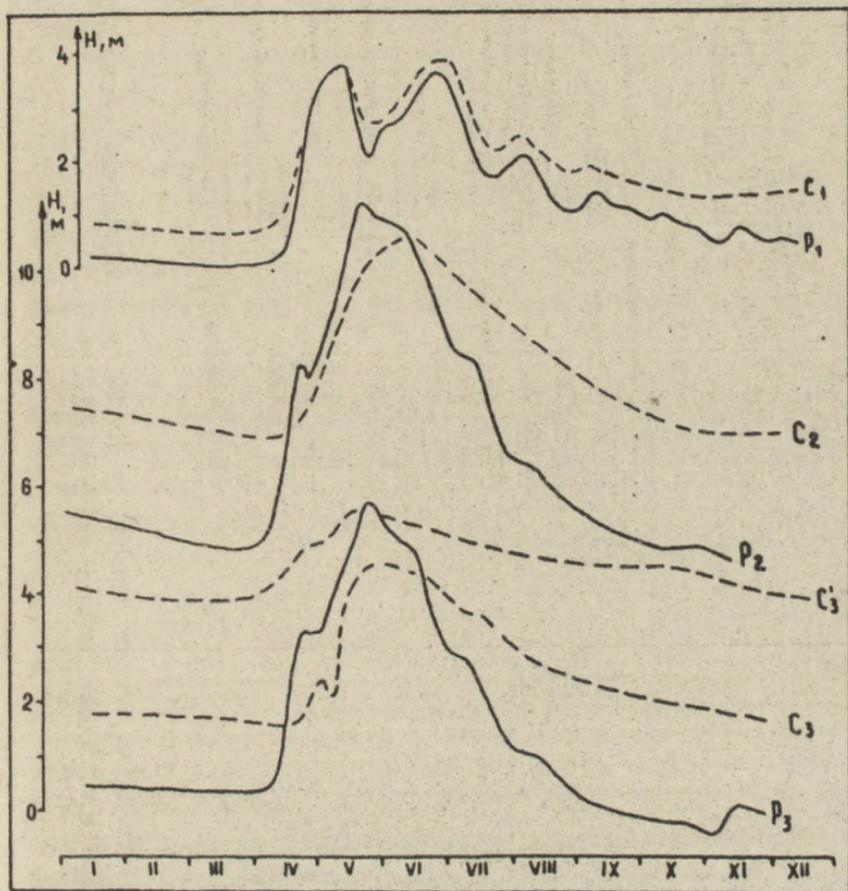


Рис. 58. Совмещенные графики хода уровня воды в русле р.Чулым (P_1 , P_2 и P_3) и грунтовых вод в скважинах (C_1 , C_2 , C_3 и C'_3) по створам: Тегульдэт (P_1 и C_1), Зырянское (P_2 и C_2) и Асино (P_3 , C_3 и C'_3):

- C_1 - скважина на пойме в 150 м от русла;
- C_2 - скважина на террасе в 600 м от русла;
- C_3 - скважина на пойме в 200 м от русла под террасой;
- C'_3 - скважина на пойме в 7000 м от русла на противоположном по отношению к C_3 берегу

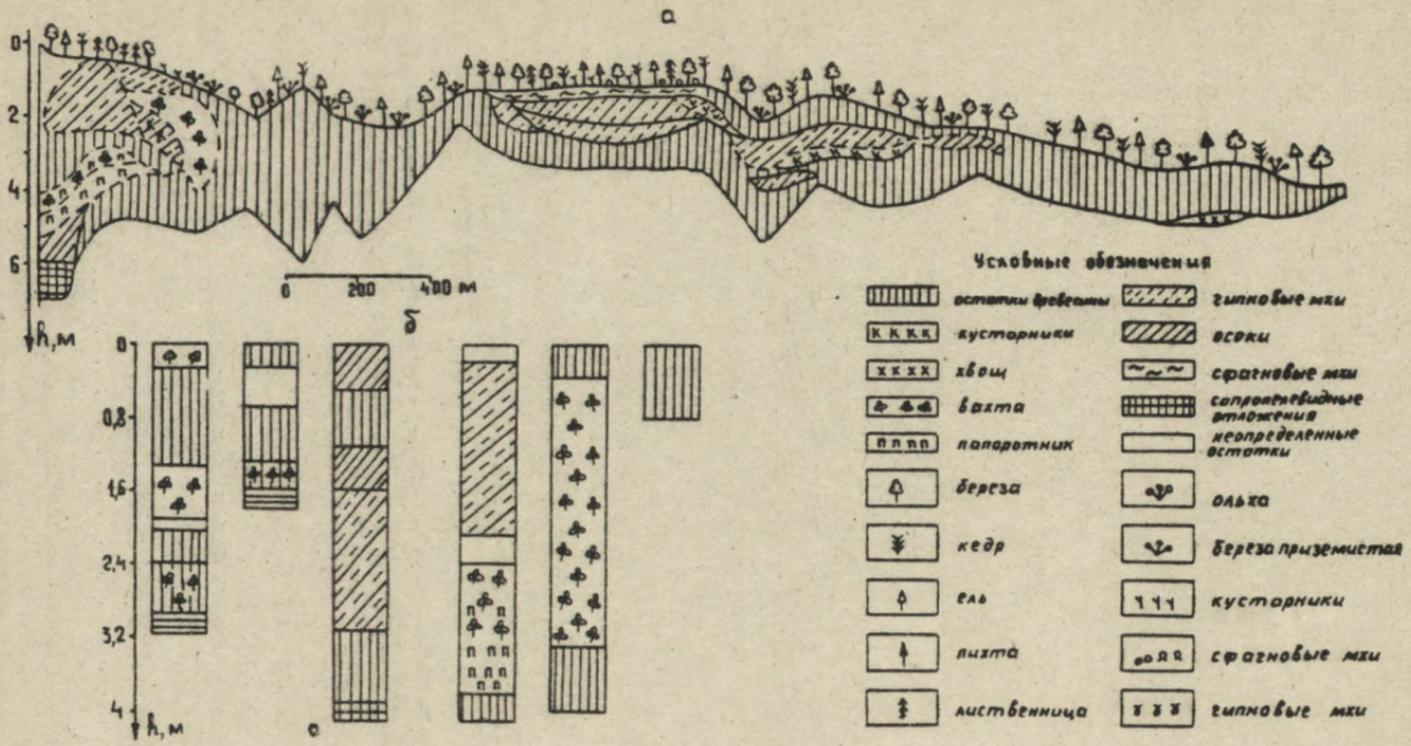


Рис. 59. Разрез болотного массива поймы нижнего течения р. Чулым (а) и послонные показатели ботанического состава и степени разложения основных видов торфа (б)

образуются временные озера (шестая фаза затопления), которые высыхают на 20-30 дней позже даты схода воды с прирусловых сегментов, межгивные ложбины которых не закрыты отложениями наносов (фацией наложенного прирусловья). Уровень воды в этих временных пойменных вторичных озерах оказывается выше уровня воды в русле на данном поперечнике. В случае, когда разновозрастные сегменты оказываются существенно разновысотными, на поверхности поймы после спада уровня воды в русле возникают весьма крупные вторичные озера - "соры", границы или водоразделы которых представлены отложениями фации наложенного прирусловья вокруг низких групп частей сегментов поймы. Такие вторичные озера вызывают заболачивание центральной поймы. Болота притеррасной поймы на поверхности сегментов чаще всего образуются из-за высокого стояния уровня грунтовых вод здесь (рис. 58), а под самой террасой залегают болота ложбин старого русла. Поверхность этих болот из-за нарастания мощного слоя торфа может быть весьма высокой и редко затапливаемой речными водами. В качестве примера на рис. 59 приведен разрез притеррасного болотного массива поймы р.Чулым.

3.4.2. Гидрологический режим пойм

К характеристикам затопления пойм, или поемности, относятся частота, слой и длительность затопления, а также даты начала и конца затопления.

Изложенные в главе 2 представления о формировании рельефа и строения поймы позволяют сделать вывод о том, что отметки ее поверхности располагаются в пределах амплитуды колебаний максимальных уровней воды, что подтверждается опубликованными данными результатов обследования большого числа пойм.

В качестве примера в табл. 2 приведены данные о распределении площади поймы р.Чулым по высотным зонам.

Таблица 2

Относительные значения площадей затопления поймы
р.Чулым при различных горизонтах воды, %

Обеспеченность максимального уровня, %	95	75	50	25	10	I
Площадь затопления поймы	9	50	70	90	98	100

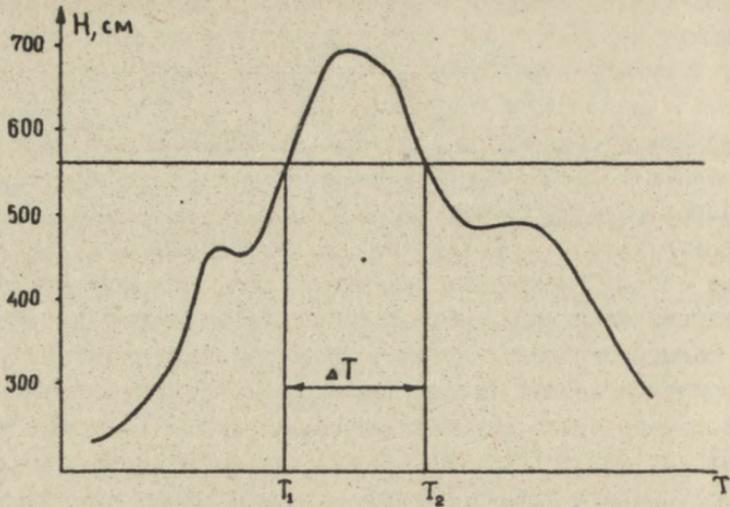


Рис. 60. Определение длительности стояния (ΔT), дат выхода (T_1) и схода (T_2) максимального уровня воды 50% обеспеченности

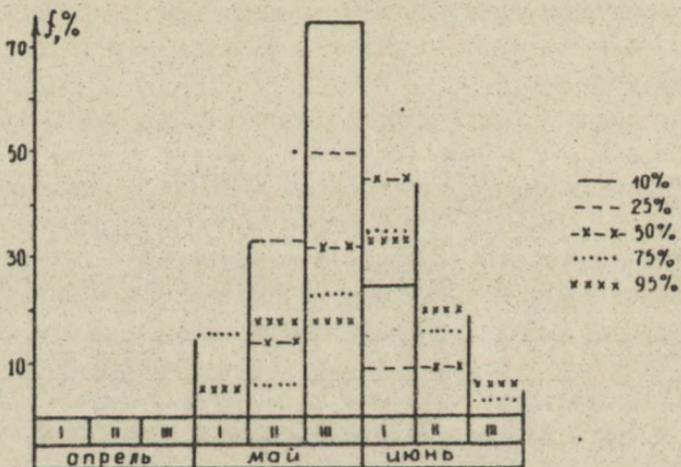


Рис. 61. Пример графика условно* повторяемости дат выхода (или схода) максимальных уровней воды 10, 25, 50, 75 и 95 % обеспеченности

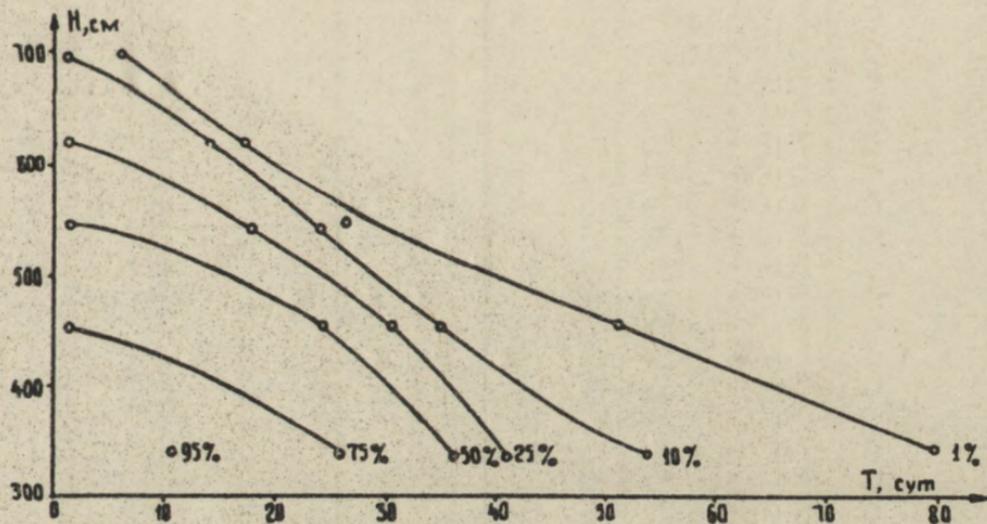


Рис. 62. Пример графика продолжительности стояния (длительности затопления) заданных уровней воды

Отсюда следует, что при расчетах характеристик емкости в качестве опорных отметок поверхности поймы целесообразно брать максимальные уровни воды ($H_{\text{макс}}$) определенной обеспеченности. Обеспеченность $H_{\text{макс}}$ затопляющего определенные участки поймы, дает непосредственно частоту затопления.

Для проведения расчетов используются данные ближайшего водомерного поста, характеризующие уровневый режим определенного участка реки. Ряд водомерных наблюдений для получения достоверных результатов должен быть большим (50 и более лет).

Расчеты выполняют в следующей последовательности.

1. Составляют ряд ежегодных значений $H_{\text{макс}}$ и путем построения эмпирической кривой обеспеченности находят их опорные значения.

2. Для каждого опорного $H_{\text{макс}}$ по таблицам или графикам ежедневных уровней воды определяется дата его установления и схода и продолжительность стояния (рис. 60).

3. Полученные таким образом значения, меняющиеся из года в год, обобщаются в виде эмпирических кривых обеспеченности (рис. 62) и повторяемости (рис. 61), по которым для каждой высотной отметки поймы ($H_{\text{макс}}$) можно определить характеристики емкости заданной вероятности.

При построении графика продолжительности стояния $H_{\text{макс}}$ допускается, что наименьшее ее значение для каждого опорного уровня воды равно 1 дню, а обеспеченность такой длительности его затопления равна обеспеченности самого уровня воды. При определении повторяемости дат наступления и схода $H_{\text{макс}}$ за расчетную единицу времени принимается одна декада, а общее число случаев наблюдения данного уровня воды за 100 %.

3.5. Типы речных пойм и их связь с типами руслового процесса

Типизацией принято считать способ обоснованного сведения многообразия проявления данного природного объекта к небольшому числу избранных его типов.

Очевидно, что любая типизация отражает состояние изученности данного объекта (вопроса) и наиболее точна, если в ее основу положены необходимые и достаточные причинно-следственные связи процессов, формирующих главные отличительные и одновременно объединяющие признаки объекта. В этом случае типизация служит как для

упорядочения наших представлений в какой-то области знаний, так и для прогноза изменения свойств или облика объектов при изменениях в цепи главных причинно-следственных связей. Любой объект природы имеет очень большое число связей с его окружением, поэтому неизбежно требуется выделение главных (и соответственно типов объекта), а все второстепенные связи могут быть использованы для выделения подтипов, количество которых может быть довольно большим.

Поскольку поймы рек являются областью исследования ряда наук, неизбежно возникали различные специализированные типизации, отражающие потребности данных исследований и степень их завершенности.

Довольно широко известными являются типизации ботаника Р.А. Еленевского (1936), почвовед В.Р. Вильямса (1949), геоморфолога Е.В. Шанцера (1951), гидрологов Н.И. Маккавеева (1955) и И.В. Попова (1968). Приведенный ниже анализ этих типизаций выполнен И.В. Поповым (1969).

В.Р. Вильямс выделяет поймы зернистые и слоистые. Первые характеризуются глинистыми почвами и ровной поверхностью, а вторые - слоистыми песчаными почвами и грядистым рельефом поверхности.

Р.А. Еленевский, используя такие признаки, как происхождение, рельеф и строение поймы, выделяет два класса типов пойм: А - неразвитые, Б - развитые. Схема его типизации показана на рис. 63.

Дадим краткое описание этих типов.

Класс А - н е р а з в и т ы е п о й м ы, сложен в своей толще породами неаллювиального происхождения.

1. **Н а д м о р е н н а я** пойма образована продуктами отложений ледников, в которые врезано русло реки. Сверху моренные отложения перекрыты тонким слоем суглинка, образованного в результате осаждения взвешенных в воде наносов.

2. **Н а д к о р е н н а я** пойма подстилается коренными породами дна речной долины.

3. **Д р е в н е о з е р н о - т о р ф я н а я** пойма возникает, когда русло реки проходит по месту древнего ложа озера, заполненного озерными отложениями. Наличие таких пойм соответствует схеме образования речных долин, данной В.В. Докучаевым еще в 1878 году.

4. **О з е р н о - п л а в н е в а я** пойма образуется в местах впадения реки в озеро, где река отлагает наносы и образует низкие острова с озерками и болотами.

5. **Л и м а н н а я** пойма представляет собой систему замкну-

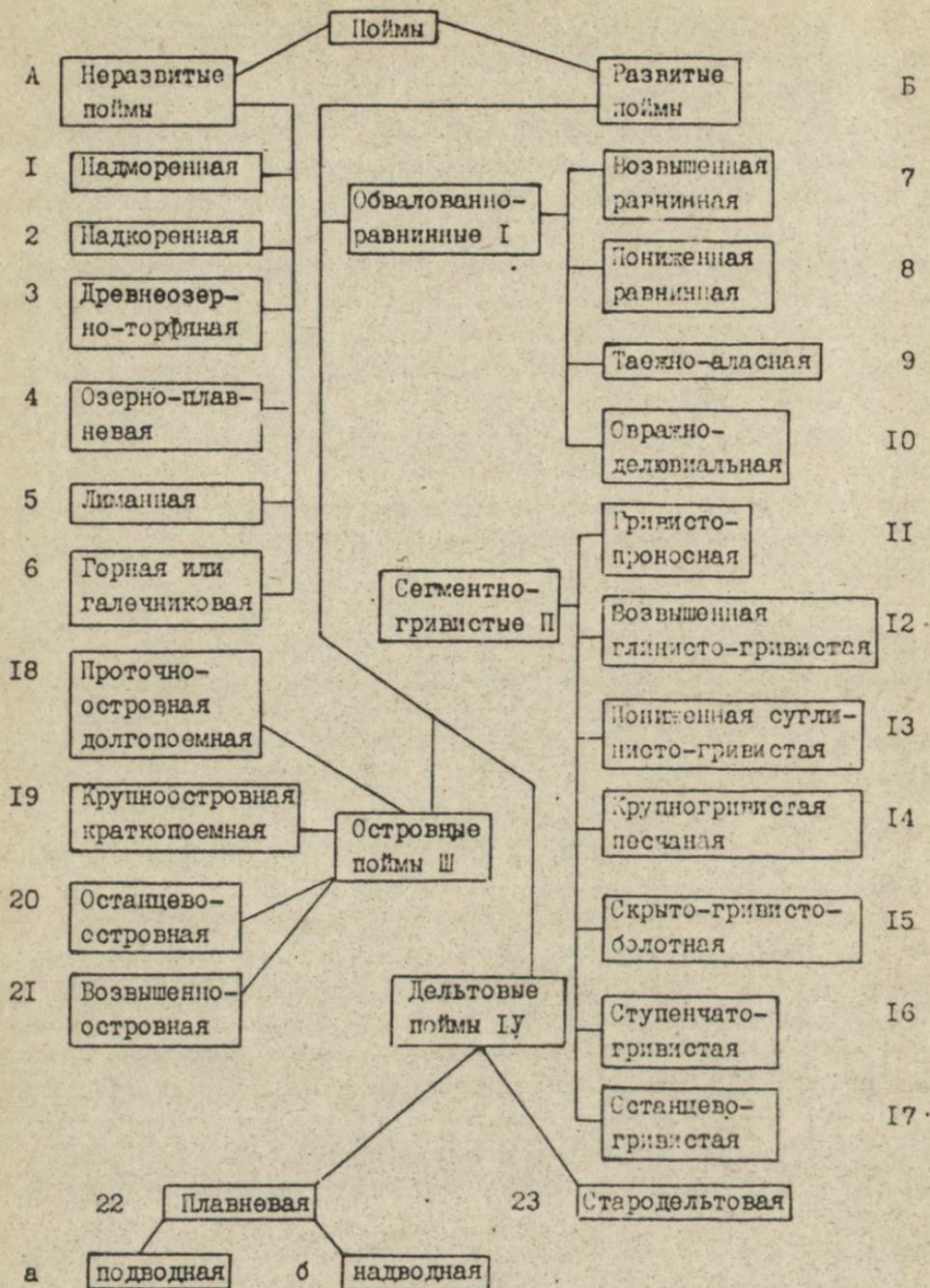


Рис. 63. Схема типизации пойм по Р.А. Еленевскому

тых депрессий - лиманов. В половодье эти лиманы сливаются между собой, а в межень разобщаются. Такие поймы образуются при протекании реки по низким ровным степным участкам, когда сила потока (уклон местности) оказывается недостаточной для глубокого врезания русла и поток в половодье затопляет прилегающие участки местности.

6. Горные поймы образуются в ходе плановых деформаций русел горных рек, сложены крупными аллювиальными отложениями с примесью продуктов осыпей со склонов долины (делювия). Эти поймы обычно узкие, с неразвитой пойменной фацией аллювия из-за того, что в период кратковременных разливов пойменные потоки имеют большие скорости течения, препятствующие отложению взвешенных наносов.

Класс Б - развитые поймы, сложены во всей своей толще аллювиальными отложениями, они созданы в процессе перетолжения рекой наносов путем деформаций русла.

Развитые поймы делятся на четыре группы типов:

I - обвалованно-равнинные, II - сегментно-гривистые, III - островные, IV - дельтовые.

Группа типов обвалованных пойм характеризуется наличием высокого участка поймы (вала) вдоль русла реки и выровненной поверхности. Сегментно-гривистые поймы имеют гривистый микрорельеф поверхности. Островные поймы возникают при формировании рекой островов. Дельтовые поймы, являясь по существу тоже островными, образуются в дельтах крупных рек.

Характеристика многих типов этого класса пойм ясна из их названия (рис. 63) и в расшифровке нуждаются только некоторые из них.

Останцево-гривистая пойма образуется в ходе свободного меандрирования, когда в окружении поверхности аллювиальных отложений располагаются высокие незатопляемые остатки террасы. Такие останцы возникают при соединении размываемых берегов двух излучин, размывающих в процессе своего развития склон террасы (рис. 64).

Скрито-гривисто-болотная пойма характеризуется развитием на поверхности аллювиальных отложений слоя торфа, нивелирующего ее исходный гривистый рельеф.

Ступенчато-гривистая пойма возникает при сочетании плановых и высотных деформаций русла реки, когда разновозрастные пояса меандрирования или сегменты поймы формируются при заметной разнице в высоте продольного профиля реки.

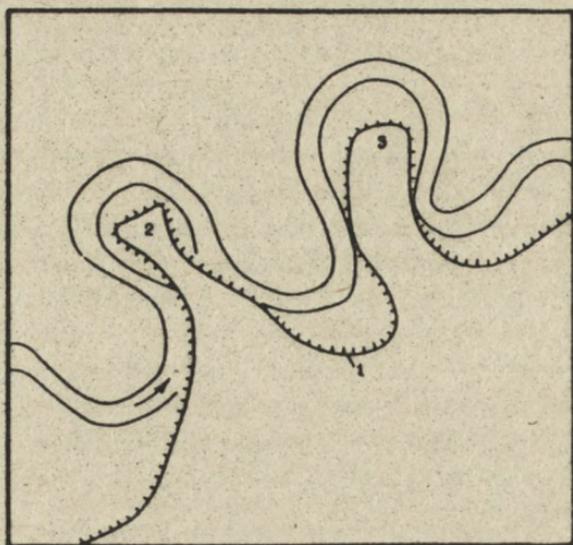


Рис. 64. Схема, поясняющая образование останцев на пойме свободно меандрирующей реки:

I - склон террасы; 2 и 3 - участки террасы, которые при дальнейшем развитии излучины превратятся в останцы

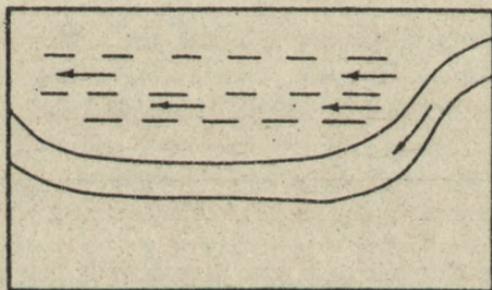


Рис. 65. Схема участка реки с параллельно-гравистой поймой

Г р и в и с т о - п р о п о с н а я пойма характеризуется наличием прямых параллельных друг другу и линии берега повывшений с разделяющими их ложбинами, по которым в половодье движутся сосредоточенные пойменные потоки (рис. 65). Генезис таких участков поймы, как отмечает И.В.Попов (1969), не вполне ясен. Е.В.Шанцер считал, что такие поймы образуются при смещении прямолинейного участка русла параллельно самому себе так, что вдоль намываемого берега происходит причленение побочной и образование прямых параллельных грив.

Т а е ж н о - а л а с н а я пойма характерна для районов многолетней мерзлоты, где при оттаивании линз льда в толще поймы ее поверхность проседает и образуются своеобразные вторичные озера - аласы.

О в р а ж н о - д е л ь в и а л ь н а я пойма возникает при сильном размыве террасы временными водотоками с образованием оврагов. Материал размыва в виде конусов выноса отлагается на относительно узкой пойме, перекрывая первичные аллювиальные отложения и рельеф поверхности.

С т а р о д е л ь т о в а я пойма представлена наиболее старыми и высокими островами в дельте реки.

П л а в н е в а я пойма - это молодые низкие острова.

П о д в о д н а я пойма - скопления наносов, находящиеся под поверхностью воды.

Данные разновидности дельтовых пойм представляют собой различные стадии развития дельтовых островов.

Названия остальных типов пойм, на наш взгляд, не нуждаются в пояснении.

Положительным моментом типизации Р.А.Еленевского является то, что в ее основу положен большой фактический материал по поймам различных природных зон и участков течения реки, свидетельствующий об огромной работе, проделанной автором. Недостаток этой типизации обусловлен отсутствием в то время систематизированных представлений о русловых деформациях и, как считает Е.В.Шанцер, отсутствием связи процессов образования пойм с русловыми переформированиями.

Е.В.Шанцер (1951) рассматривает только поймы, сформированные самой рекой (рис. 66).

Типизация Н.И.Маккавеева представлена на рис. 67.

Поймы в местах впадения притоков выделяются (ввиду их отличия

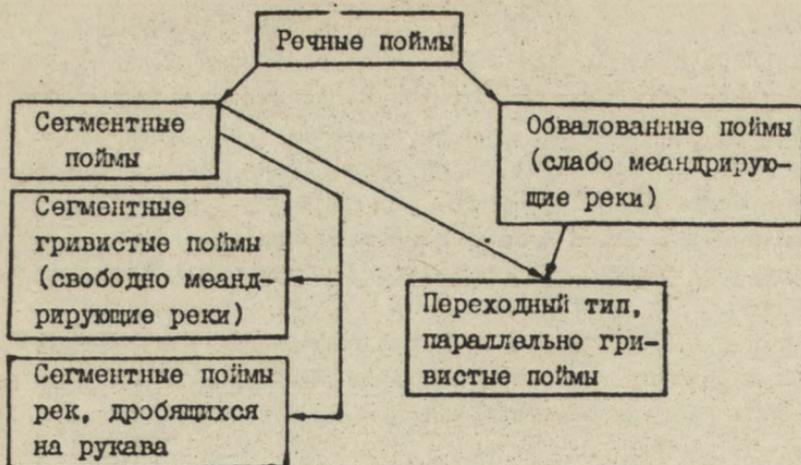


Рис. 66. Схема типизации пойм по Е.В.Манцерову



Рис. 67. Схема типизации пойм по Н.И.Маккаеву

по крупности и порядку напластования аллювия) от участков пойм главной реки, расположенных выше и ниже места впадения.

Отличительными признаками пойм в районах развития глубинной эрозии являются их малая ширина, наклон поверхности от террасы к руслу, большая крупность и плохая сортировка аллювиальных отложений, нередко смешанных с продуктами осыпей. К поймам районов развития боковой эрозии, очевидно, относятся все разновидности пойм, созданных в ходе плановых деформаций русла.

Как отмечает И.В. Попов, наиболее правильной по принципу построения является типизация Е.В. Манцера, в которой типы пойм выделяются в связи с характером плановых деформаций речных русел, наличие которых является необходимым и достаточным условием образования пойм реками. Следуя этой идее и опираясь на новых представлениях о типах русловых процессов, И.В. Попов (1968) предлагает делить поймы на современные и унаследованные.

Современные поймы, созданные в ходе плановых деформаций русла реки, делятся в соответствии с типами русловых процессов на следующие типы:

1) поймы ограниченно меандрирующих рек; 2) поймы свободно меандрирующих рек; 3) поймы рек с незавершенным меандрированием; 4) островные поймы рек с русловой многорукавностью; 5) поймы рек с русловым процессом типа пойменной многорукавности.

К унаследованным поймам относятся первые пять типов неразвитых пойм, по Р.А. Еленевскому (надморенная, надкоренная, древнеозерно-торфяная, озерно-плавневая, лиманная).

"Однако данный тип руслового процесса может встречаться в довольно широком диапазоне значений и характеристик основных факторов руслообразования. Поэтому правомерно ожидать, что особенности факторов руслообразования (водного режима, размеров и соотношения расходов донных и взвешенных наносов) могут приводить к появлению разновидностей пойм, объяснить которые только ссылкой на тип руслового процесса окажется недостаточным... В зависимости от соотношения состава и количества донных и взвешенных наносов могут возникать и различные соотношения мощности русловой и пойменной фаций аллювия и также образовываться поймы разной высоты и, следовательно, разной затопляемости и устойчивости при прочих равных условиях."

Наконец, необходимо иметь в виду, что на особенности строения поймы при данном типе руслового процесса могут воздействовать

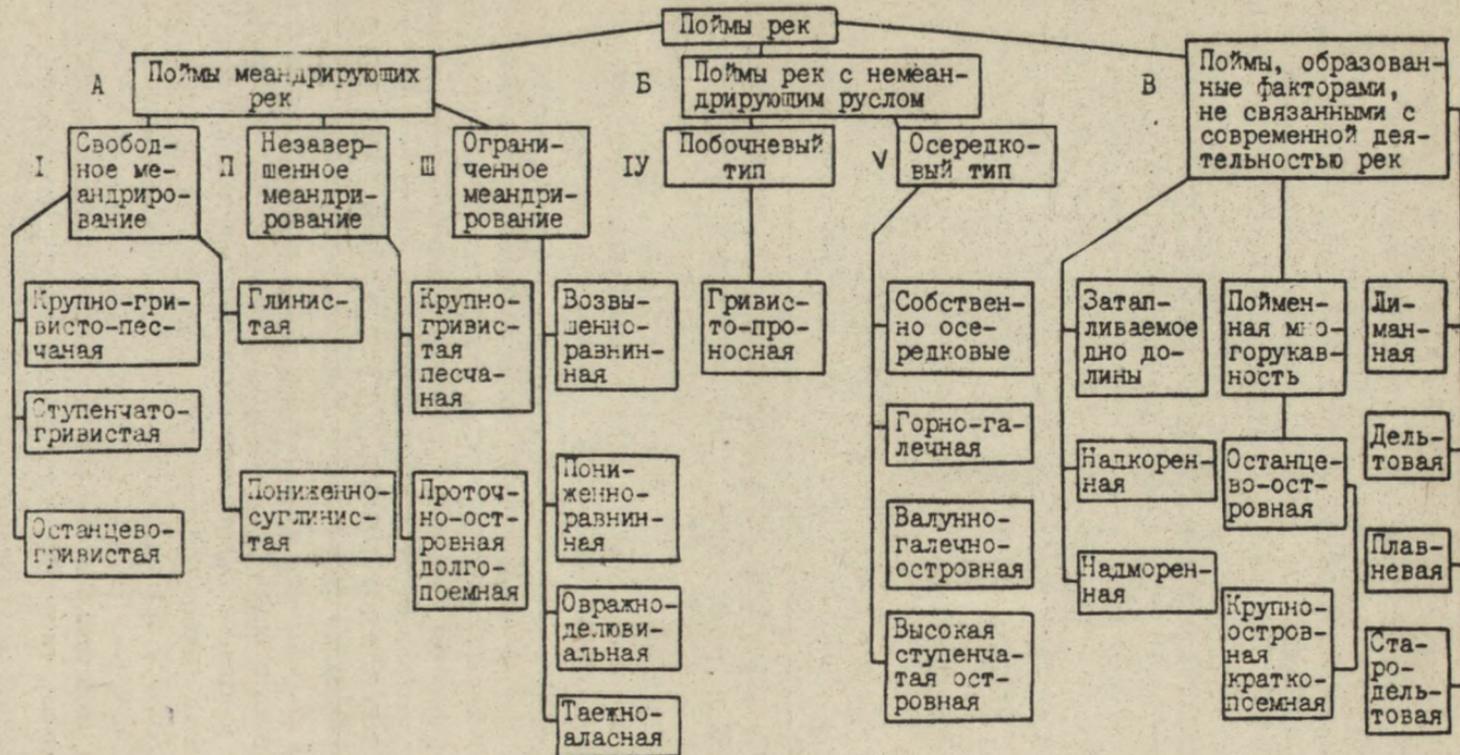


Рис. 68. Связь типов руслового процесса с типами по́йм, выделенных Р.А.Еленевским. (по И.В.Полову, 1968)

вторичные факторы, не связанные непосредственно с русловым процессом, например, болотообразовательные процессы, карст и термокарст, делювиальные выносы и т.п.

Таким образом, кроме основных признаков, положенных в основу типизации, оказывается необходимым учесть вторичные признаки, определяющие собой уже отдельные разновидности пойм данного типа, т.е. учесть влияние основных факторов руслообразования и факторов, не связанных непосредственно с русловым процессом" (И.В.Попов, 1969, с. 196-197).

Отсюда следует, что типы развитых пойм, по Р.А.Еленевскому, **нужно** рассматривать как подтипы или разновидности типов пойм, выделенных И.В.Поповым, что находится в полном соответствии с принципами построения типизаций, которые были изложены в начале данного раздела. Связь типов русловых процессов ГТИ с разновидностями пойм, выделенными Р.А.Еленевским, представлена на рис.68.

4. РУСЛОВЫЕ И ПОЙМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНЫХ РЕК

До недавнего времени русловые процессы горных рек были изучены крайне слабо, что было связано с меньшим их освоением по сравнению с равнинными. Наши представления в этой области свелись к очевидным различиям горных и равнинных рек в уклонах водной поверхности, скоростях течения и крупности донных наносов и отложений. В последние 20-30 лет проведены довольно детальные натурные исследования динамики русел горных рек (В.В.Ромашин, 1967; В.Ф.Талмаза и А.Н.Крошкин, 1968; З.Д.Копалиани и В.В.Ромашин, 1971; З.Д.Копалиани и В.С.Ихаддзе, 1972; Р.С.Чалов, 1979; и др.), которые позволили установить: 1) формы и особенности транспорта донных наносов горными реками; 2) типы русел и русловых переформирований; 3) морфологические и гидроморфометрические связи элементов русла и потока; 4) закономерности транспорта донных наносов и ряд других особенностей.

4.1. Формы транспорта наносов горными реками

На горных реках по сравнению с равнинными наблюдается значительно большая изменчивость уклонов, скоростей течения и крупности материала, слагающего русло. В зависимости от численного значения этих характеристик транспорт донных наносов осуществляется как без образования русловых форм, так и с группировкой их в подвижные скопления. Первая, так называемая бесструктурная форма

транспорта наносов, имеет место при весьма значительных уклонах водной поверхности (более 25 ‰) и крупности донных отложений (d), которая соизмерима с глубиной потока (h).

При уклонах 0,04-0,05 отношение $\frac{d}{h} \geq 1$. Так, по В.Н.Гончарову

$$\frac{d_5}{h} = \frac{i}{0,059} \quad (41)$$

а по И.Ф.Талмаза

$$\frac{d_{отм}}{h} = \frac{i}{0,053} \quad (42)$$

Здесь d_5 - диаметр частиц крупной фракции, обеспеченный на 5 % веса всех частиц; $d_{отм}$ - средняя крупность частиц отмытки дна.

Русла таких потоков характеризуются чередованием порогов и водопадов, сложенных обломками горных пород. В подобных условиях при обтекании глыбы горной породы потоком образуется подпор и спад водной поверхности по длине глыбы, что обуславливает превышение гидростатического давления с верховой стороны обломка над гидростатическим давлением с его нижней части. К гидродинамическому напору добавляется гидростатический, поток оказывается в состоянии перемещать обломки крупнее тех, которые соответствуют его скорости. Кроме этого, поток вымывает более мелкие частицы из-под крупных, что приводит к их перекачиванию вниз по течению, хотя скорости течения также оказываются недостаточными для смещения глыбы. Это явление было установлено Н.И.Маккавеевым и А.М.Олинцким и названо аблювиальным эффектом (Экспериментальная геоморфология, 1969).

Наблюдения за перемещением маркированных глыб (Литвин Л.Ф., Чалов Р.С., 1975) показали, что более крупные обломки перемещаются даже на большие расстояния, чем мелкие. Их массовое движение происходит лишь в отдельные годы при высоких половодьях или паводках. С перемещением крупного обломка в движение приходит значительное количество более мелких, накопившихся перед ним. Возникает попятная эрозия дна, усиливающая аблювиальный эффект под крупными глыбами, расположенными выше по течению (Р.С.Чалов, 1979).

На участках горных рек с уклонами дна долины меньше 20-25 ‰ и отношении $\frac{h}{d} > 3$ транспорт донных наносов осуществляется как путем смещения целостных морфологических образований - осередков, побочней, гряд, так и путем перемещения отдельных частиц. Образованные из гальки и валунов русловые формы в течение длительного

времени (нескольких лет) могут не изменять своего местоположения. Транспорт наносов в таком случае происходит путем перестроения отдельных частиц с одной русловой формы на другую. В.Ф.Талмаза и А.Н.Крошкин (1968) выделяют на таких участках горных рек три разновидности расходов воды: 1) руслоприспосабливающиеся; 2) руслоформирующие и 3) руслоразрушающие.

Руслоприспосабливающиеся расходы переносят отдельные частицы донных наносов с одного места их скопления на другое, но при этом не изменяют положение и форму скоплений (перекатов, осередков и т.д.). Руслоформирующие деформируют скопления наносов (перекатов), но не разрушают их.

Руслоразрушающие расходы смывают все старые русловые формы и затем частично строят новые. Кратковременность существования таких расходов (резкость паводка) приводит к тому, что доформирование русла происходит в последующие половодья.

Первая разновидность расходов наблюдается ежегодно, а вторая и третья — один раз в несколько лет. Если в период между двумя последовательными русловыми съемками на горной реке не наблюдались руслоразрушающие расходы воды, то можно прийти к выводу о неизменности положения русловых форм, что в общем случае будет неверно.

4.2. Типизации русел и русловых процессов горных рек

Как отмечает Р.С.Чалов (1979), исследование закономерностей динамики русел горных рек затруднено из-за отсутствия периодических русловых съемок. Поэтому в литературе чаще описывают и классифицируют разновидности русел горных рек без увязки со схемами морфологических преобразований.

Р.С.Чалов выделяет следующие типы русел горных рек:

- а) порожиисто-водопадные; б) с неразвитыми аллювиальными формами;
- в) с развитыми аллювиальными формами.

Поскольку гидрологические исследования русловых процессов направлены на выявление закономерностей переформирования аллювиальных форм, то с позиций гидроморфологического метода первые два типа русла не могут являться объектами исследований, так как представляют собой верхние звенья гидрографической сети, в которых нет закономерного перестроения наносов, а происходит неупорядоченный, бесструктурный перенос крупнообломочного материала вниз по течению. Этот материал на определенный участок горного потока

поступает как со склонов долины, так и с вышележащих участков русла.

В.Ф.Талмаза и А.Н.Крошкин (1968) обобщили предложения ряда авторов по признакам выделения разновидностей речных русел и дали следующую сводку этих предложений.

1. По морфологическим признакам:

а) участки, расположенные вдоль хребтов, поперек и по диагонали; б) участки истока, верхний, средний, нижний.

2. По характеру грунта, слагающего русла: скальные, переходные и аллювиальные.

3. По воздействию селевых потоков: подвергавшиеся ранее воздействию селя и не подвергавшиеся.

4. По плановым очертаниям: прямолинейные или слабоизогнутые, извилистые и разбросанные.

5. По степени пойменности: каньонные, долинные, пойменные и блуждающие.

Указанные разновидности выделяются в зависимости от отношения ширины русла реки при среднemaxимальных расходах $V_{\text{макс}}$ к ширине русла при среднеминимальных расходах $V_{\text{мин}}$ (каньоны - 1,1-1,2; долинные - 1,3-2,0; пойменные 2,0-5,0; блуждающие - 5-20).

6. По устойчивости: наибольшей устойчивости, устойчивые и неустойчивые.

7. По русловым процессам: плесовые, перекатные, разбросанные, блуждающие, селевые.

З.Д.Копалиани и В.С.Цхададзе (1972) выделяют три типа русел горных рек: 1) с преобладающим влиянием ограничивающего фактора, 2) русловое блуждание с формированием осередков и побочной и 3) горная пойменная многорукавность.

Первый тип русел может иметь прямолинейную или извилистую форму в плане. Извилистость русла в данном случае повторяет извилистость склонов речной долины, т.е. является вынужденной, или ортографической. Характерным свойством таких русел является бесструктурность транспорта донных наносов или, другими словами, отсутствие закономерных морфологических изменений.

Русловое блуждание горных рек протекает, видимо, так же, как и на равнинных реках, но с той разницей, что заметные движения русловых форм происходят не ежегодно, а лишь в отдельные многоводные годы.

Горная пойменная многорукавность

развивается в расширениях дна речных долин, т.е. при наличии относительно широкой поймы. В отличие от пойменной-многорукавности равнинных рек в данном случае большинство рукавов частично или полностью пересыхают в летнюю межень и практически весь меженный расход воды проходит по одному руслу. Так же, как и на равнинных реках, одни рукава с течением времени отмирают, а другие разрабатываются.

З.Д.Копалиани и В.С.Цхададзе выделяют две разновидности этого типа: а) пойменное блуждание и б) долинное блуждание.

Пойменное блуждание характеризуется образованием одних и отмиранием других рукавов русла на пойме. В случае долинного блуждания в половодье происходит полное разрушение существующей толщи поймы и образование новой с изменением всего рельефа ее поверхности.

Очевидно, что между горными и равнинными участками рек расположены промежуточные-полугорные, на которых не исключены схемы русловых переформирований, свойственные как равнинным, так и горным рекам. Поэтому можно считать, что на отдельных участках горных рек русловые процессы могут протекать по тем же схемам морфологических переформирований, что и на равнинных, но с определенными особенностями, обусловленными геоморфологическими различиями горных и равнинных территорий.

4.3. Гидроморфометрические связи

Между основными гидравлическими, гидрологическими и морфологическими характеристиками потока и русла в случае формирования русла (его плановых очертаний и рельефа дна) самим потоком устанавливаются определенные соотношения. А.Н.Крошкин на основе полевых и лабораторных измерений установил, что ширина русла (B), так же как и диаметр наносов его слагающих (d), может быть выражена через средний многолетний максимальный расход воды ($\bar{Q}_{\text{макс}}$) и уклон русла (i)

$$B = \frac{2,6}{i^{0,2}} \left(\frac{\bar{Q}_{\text{макс}}}{\sqrt{g}} \right)^{0,4} \quad (4.3)$$

З.Д.Копалиани и В.В.Ромашин (1970) по 114 участкам рек Западной Грузии получили зависимость такой же структуры

$$B = \frac{5,25}{i^{0,33}} \left(\frac{\bar{Q}_{\text{макс}}}{\sqrt{g}} \right)^{0,4}, \quad (4.4)$$

а также связи длины (λ) и ширины (B) русловых форм с $\bar{Q}_{\text{макс}}$:

$$\lambda = 10 \bar{Q}_{\text{макс}}^{0,62}; \quad B = 3,2 \bar{Q}_{\text{макс}}^{0,62}. \quad (4.5)$$

Связи между крупностью донных наносов и отложений с водностью и уклоном реки имеют следующий вид:

$$d_0 = 4,0 \left(\frac{\bar{Q}_{\text{макс}}}{\sqrt{g}} \right)^{0,4} \cdot i; \quad (4.6)$$

$$d_c = 1,64 \left(\frac{\bar{Q}_{\text{макс}}}{\sqrt{g}} \right)^{0,4} \cdot i; \quad (4.7)$$

$$d_B = 0,18 \left(\frac{\bar{Q}_{\text{макс}}}{\sqrt{g}} \right)^{0,4} \cdot i, \quad (4.8)$$

где d_0, d_c, d_B - соответственно диаметры наиболее крупных частиц, опрокидываемых, сальтируемых и взвешиваемых при прохождении по руслу среднего из максимальных расходов воды ($\bar{Q}_{\text{макс}}$).

4.4. Поймы горных рек

На горных реках прослеживается весьма четкое различие между донными и взвешенными наносами. Подавляющая часть взвешенных наносов в условиях горных рек проносится транзитом и не оседает на поверхности отмелей. Количество их в потоке не зависит от его скорости, а определяется процессами склонового выветривания и эрозии (З.Д.Копалиани, В.С.Цхададзе, 1972). Поэтому, как отмечает В.В.Ромашин (1967), в отличие от равнинных рек на горных нет четкого разделения в плане между руслом и поймой. Здесь можно видеть меженное русло, участки поймы, сложенные с поверхности русловым аллювием, который перемещается при высоких паводках, и массивы поймы, закрепленные наилком и растительностью. Это обстоятельство позволяет выделять на дне горной долины собственно пойму, паводочное русло и внутри него - меженное русло.

В зависимости от генезиса пойменных участков Р.С.Чалов (1970) выделяет следующие их разновидности: а) скелетные поймы; б) побочные или проточно-побочные; в) ложбинно- или проточно-островные.

С к е л е т н ы е поймы представлены выходами скальных пород или россыпями глыб обвального происхождения. На таком неаллювиальном фундаменте поток во время разлива откладывает маломощный слой наилка, на котором поселяется травянистая и древесная растительность.

На отдельных участках горных рек формируются галечно-валунные побочки, которые в течение нескольких лет могут не смещаться потоком. На наиболее высокой части таких остановившихся побочной образуется маломощный слой пойменной фации аллювия, который в дальнейшем закрепляется растительностью и таким образом формируется п о б о ч н е в а я п о й м а, поверхность которой имеет наклон в сторону русла. При сравнительно больших поперечных размерах побочной (несколько десятков метров) в их прибереговой части образуются промывы (протоки), которые в дальнейшем заносятся, и на их месте остаются ложбины. Остановившийся побочень, или прирусловая отмель, покрывается наилком и закрепляется растительностью. Так возникает разновидность побочной поймы - п р о т о ч н о - п о б о ч н е в а я п о й м а.

П р о т о ч н о - и л и л о ж б и н н о - о с т р о в н ы е поймы формируются в случае горной русловой многорукавности. Пойма представлена осередками или островами как в русле, так и причленившимися к берегам. Образование островов и осередков в данном случае может стимулироваться загромождением русла крупными обломками склонов речной долины, но это условие не является обязательным. В самом общем случае русловые отмели возникают и развиваются или при непрерывном накоплении наносов, или при их перераспределении с одной части отмели на другую.

Таким образом, можно видеть, что поймы горных рек могут быть унаследованными, т.е. не созданными перераспределением наносов рекой, и аллювиальными, сложенными речными наносами в ходе плановых деформаций русла.

Приведенные описания типов пойм горных рек имеют один существенный недостаток - отсутствие схем плановых деформаций русла, которые обуславливают формирование аллювиальных толщ. Кроме этого, как было отмечено раньше, на отдельных участках горных и полугорных рек могут развиваться разновидности меандрирования и, следова-

тельно, должны иметь место соответствующие типы пойм.

В отличие от пойм равнинных рек поймы горных рек узкие и не имеют непрерывного протяжения вдоль русла реки, а представлены отдельными разобщенными участками в местах расширения дна речной долины.

Дальнейший прогресс представлений о русловых и пойменных процессах горных рек может быть обеспечен проведением и обобщением массовых и многолетних стационарных наблюдений, а также путем лабораторных экспериментов на моделях горных рек.

5. КАЧЕСТВЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ВЛИЯНИИ НА РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ СООРУЖЕНИЙ И МЕРОПРИЯТИЙ

Все речные инженерные сооружения и мероприятия Б.Ф.Снищенко (Н.Е.Кондратьев, И.В.Попов, Б.Ф.Снищенко, 1982) предлагает разделить на активные и пассивные (рис. 69). Первые оказывают ощутимое влияние на основные факторы русловых процессов и тем самым вызывают ту или иную перестройку русловых форм, изменение характера и темпов их динамики. Вторые не оказывают заметного влияния на русловые процессы, но их гарантированная безаварийная работа обеспечивается в случае удачного, обоснованного расположения, позволяющего избежать нежелательные воздействия русловых деформаций хотя бы на какой-то намеченный период. В отдельных случаях, связанных зачастую с просчетами проектирования, приходится прибегать к устройству защитных (активных) сооружений.

Активные сооружения и мероприятия делятся на две категории, различающиеся пространственными масштабами и интенсивностью воздействия на основные факторы русловых процессов.

Первая категория мероприятий существенно изменяет русловый режим на значительных по протяженности участках рек, а вторая оказывает локальное воздействие на русловые процессы.

В настоящее время влияние на русловые процессы перечисленных активных сооружений и мероприятий изучено не в равной мере, что связано главным образом с их неодинаковой степенью воздействия. Мы рассмотрим наиболее важные в практическом отношении и поэтому наиболее изученные случаи, преимущественно в рамках качественных представлений. Методы количественных оценок можно найти в специальных работах, на которые для каждого конкретного случая даны ссылки.

5.1. Плотины ГЭС

Плотины, образующие водохранилища, особенно крупные, обуславливают ощутимые изменения различных характеристик реки и, в частности, изменения русла, не характерные до постройки плотины. В верхнем бьефе - участке реки, испытывающем подпор от плотины, - увеличиваются глубины, уменьшаются уклоны водной поверхности и скорости течения, что приводит к разнообразным последствиям, одним из которых является осаждение транспортируемых рекой наносов и образование новых аккумулятивных форм.

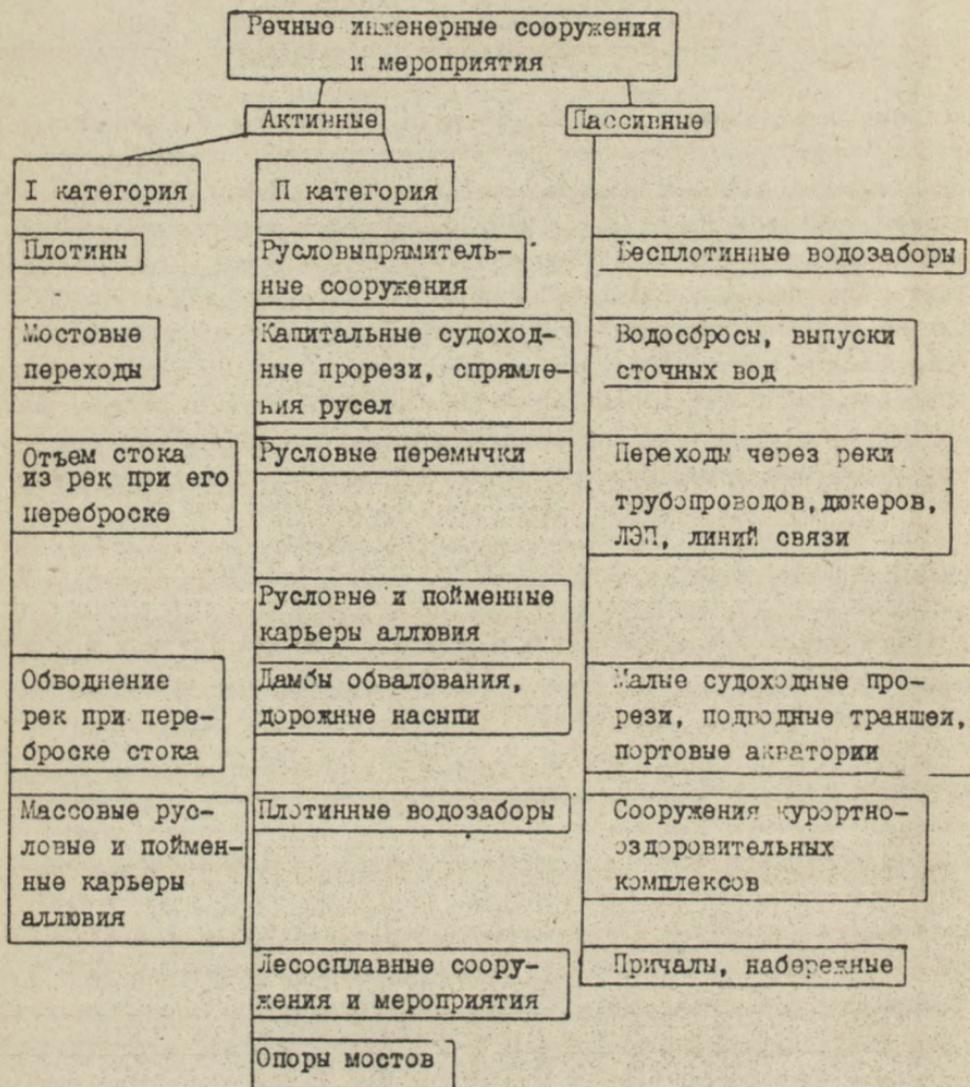


Рис. 69. Классификация речных инженерных сооружений и мероприятий по характеру взаимодействия с русловым процессом

Кроме этого, возникают процессы переформирования откосов берегов водохранилища.

В нижний бьеф - участок реки ниже плотины - поступление наносов существенно уменьшается или прекращается полностью и таким образом транспорт наносов русловым потоком здесь не компенсируется их притоком из верхнего бьефа, что приводит к общему размыву русла, его углублению или, в случае выхода на дне трудноразмываемых пород, расширению из-за некомпенсированного размыва берегов.

Различия в характере и направлении необратимых деформаций русла в верхнем и нижнем бьефах плотины обуславливают целесообразность их отдельного рассмотрения.

Аккумулятивные процессы в верхних бьефах

Верхние бьефы делят на подпорные бьефы и водохранилища. Первые - это небольшие водоемы с малоизменяющейся величиной подпора и суточным регулированием расходов воды. Вторые имеют емкость, достаточную для сезонного и многолетнего регулирования речного стока, что обуславливает значительные изменения отметки уровня воды в них и смещения зоны выклинивания подпора.

При изучении и прогнозировании процессов аккумуляции наносов в верхних бьефах различают две их разновидности: 1 - отложение взвешенных наносов - заиление и 2 - отложение донных наносов - занесение. На равнинных реках, где сток донных наносов составляет около 10% от стока взвешенных, ведущим процессом является заиление, а в условиях горных и полугорных рек, когда сток донных наносов оказывается весьма ощутимым, во внимание приходится принимать оба явления или только процесс занесения.

Скорость заполнения емкости водохранилища речными наносами определяется главным образом соотношением их стока и объема водохранилища (табл. 3).

Отложение донных наносов начинается в верхней части водохранилища - в зоне выклинивания подпора. Тело занесения имеет форму конуса наносных выносов и постепенно растет в высоту, что, с одной стороны, приводит к росту скоростей потока над ним, увеличению транспортирующей способности потока и постепенному смещению нижней границы отложений донных наносов в сторону плотины. С другой стороны, этот же процесс роста русловой отмели в высоту приводит к перемещению зоны выклинивания подпора в верх по реке и

Таблица 3

Связь отношения объема водохранилища (W) к годовому стоку наносов (R) с относительной величиной заполнения емкости водохранилища речными наносами (по Г.И.Шамову, 1954)

$\frac{W}{R}$	Годичное отложение, %	$\frac{W}{R}$	Годичное отложение, %
1000-200	0,5	20-10	5,0-10,0
200-100	0,5-1,0	10-5	10,0-20,0
100-50	1,0-2,0	5-1	20,0-100
50-20	2,0-5,0		

распространению в этом же направлении верхней границы отложений русловых наносов. Таким образом, длина участка занесения постепенно увеличивается как в сторону плотины, так и в верх по реке. В средней и приплотинной части водохранилищ равнинных рек в это время происходит заиление. В зависимости от относительных темпов занесения и заиления получаются разнообразные отношения мощности отложений взвешенных и донных наносов в равноудаленных от плотины створах на различных водохранилищах. На рис. 70 приведен один из возможных результатов одновременного заиления и занесения объема водохранилища. В данном случае аккумулятивное скопление донных наносов продвинулось в среднюю и нижнюю части водохранилища после их полного заиления, когда взвешенные наносы практически перестали здесь осаждаться в связи с ростом скоростей потока в верхнем бьефе.

В случаях, когда подпор от плотины оказывается незначительным или когда в стоке наносов преобладают руслоформирующие фракции (горные реки), заполнение емкости водохранилища происходит преимущественно путем занесения.

По данным В.С.Лалшенкова (1979), процесс заиления водохранилища сопровождается образованием твердых границ раздела между "мутным" потоком, несущим взвешенные наносы, и прилегающими к нему с боков участками относительно застойных вод. Этот процесс начинается в верхней проточной части зоны заиления. Поскольку транспортирующая способность "мутного" потока убывает от его стрежня к условным берегам, представленным застойными массами воды, осажде-ние взвешенных наносов протекает более интенсивно по боковым гра-

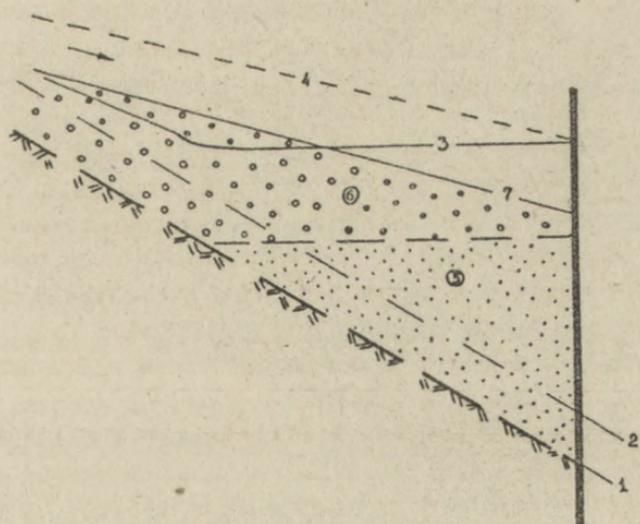


Рис. 70. Схематизированный продольный разрез возможного варианта аккумулятивных образований в верхнем бьефе водохранилища:

1 и 2 - соответственно исходные линии дна и водной поверхности реки; 3 и 4 - водная поверхность в верхнем бьефе соответственно в начале и конце заполнения водохранилища наносами; 5 - отложения взвешенных наносов; 6 - отложение донных наносов; 7 - новая линия дна реки

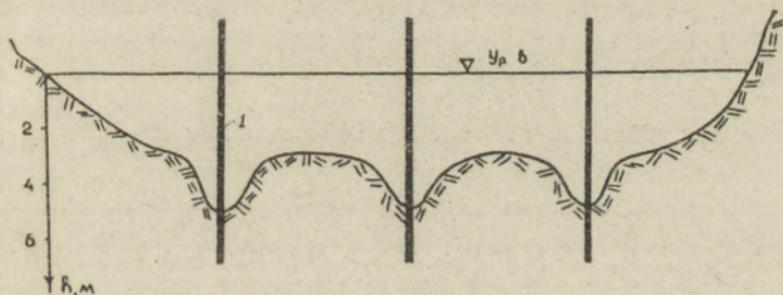


Рис. 71. Поперечное сечение потока с ямами местного размыва у опор моста (I)

ницам потока. В результате здесь постепенно образуются продольные приурезные валы, которые постепенно растут не только вверх, но и в длину, в сторону плотины. Возникшее таким образом русло между приурезными валами продолжает заилиться и подниматься вверх. При некотором возвышении русла и уровня воды в нем над водной поверхностью окружающих участков водохранилища при одновременных колебаниях расхода и уровня воды реки может произойти сосредоточенный прорыв приурезного вала и переход основной части потока в пониженную часть водохранилища, где затем возобновляется процесс формирования новых приурезных валов и русла и последующий свал потока в другую часть водохранилища.

В результате смещения тела занесения и зоны выклинивания подпора вверх по реке происходит дробление русла на рукава, образование пойменных протоков, изменение экологических условий на пойме. Эти же процессы начнутся и на притоках, подпираемых главной рекой. Перемещение русел вверх неизбежно скатывается на условиях эксплуатации водозаборов, водовыпусков, мостов и других гидротехнических сооружений на реке и ее притоках. Например, водозаборы и водовыпуски могут оказаться засыпанными наносами, а высота пролетов моста существенно уменьшится, что отразится на условиях судоходства. Поэтому весьма важно заранее предвидеть такие последствия и своевременно принимать меры по их предотвращению или по реконструкции сооружений.

Согласно теории аккумулятивные процессы в верхнем бьефе должны завершиться тогда, когда по всей длине реки произойдет подъем дна на высоту плотины, то есть река переместится вверх параллельно своему исходному положению и восстановит прежние уклоны, скорости и транспортирующую способность.

Достаточно подробный обзор методов расчета процессов заиления и занесения водохранилищ выполнен В.С.Лапшенковым (1979), к работе которого мы отсылаем заинтересованного читателя. Здесь лишь отметим, что все их многообразие можно разделить на три группы:

- 1) эмпирические методы, базирующиеся на непосредственных наблюдениях за аккумуляцией наносов в верхних бьефах;
- 2) методы, основанные на оценке объемов аккумуляции по разности транспортирующей способности потока в смежных створах и не учитывающие непрерывное изменение элементов потока при этом (балансовые методы);
- 3) методы, определяющие величину отложений наносов с учетом непрерывных изменений характеристик русла и потока.

В настоящее время используются и совершенствуются методы всех трех групп.

Кроме процессов накопления наносов в водохранилищах происходит переработка берегов в результате разрушающего действия волн, оползней и обвалов, возникающих вследствие резких колебаний депрессионной кривой подземных вод при изменении уровня воды в водохранилище. Переформирования берегов водохранилищ прекращаются после образования достаточно пологой береговой отмели, исключая возникновение обвалов, оползней и способствующей разрушению ветровых волн при подходе их к берегу.

Деформации речных русел в нижних бьефах

В нижних бьефах всегда развивается общий размыв русла, обусловленный тем, что вынос (транспорт) потоком донных наносов не компенсируется их поступлением сверху. В результате этого отметки дна русла реки существенно снижаются (до нескольких метров), т.е. происходит врез русла в подстилающие породы. Сначала яма размыва располагается вблизи плотины, но с течением времени ее нижняя граница смещается вниз по течению; глубина вреза в этом направлении уменьшается, т.е. поток формирует меньший уклон русла. Ограничение общего размыва может произойти в следующих случаях:

- 1) размыв толщи рыхлых отложений до неразмываемых пород;
- 2) уменьшение уклонов и скоростей потока до неразмывающих значений (врез русла ограничен высотой базиса эрозии - уровнем воды водоприемника);
- 3) вынос наносов из верхнего бьефа, который может приостановить размыв или сменить его на аккумуляцию, что зависит от соотношения транспортирующей способности потока к данному моменту времени и объема притока донных наносов из верхнего бьефа.

В случае, когда по отношению к крупности аллювия поток сохраняет достаточную размывающую способность, но на его дне вскрываются трудноразмываемые породы или формируется отмостка, ограничивающая вертикальный врез, происходит усиление размыва берегов.

Образование отмостки русла обусловлено наличием в донных отложениях достаточного количества крупных частиц, которые при имеющихся скоростях течения поток не в состоянии транспортировать. Вынос потоком средних и мелких фракций наносов без компенсации их приносом сверху приводит к тому, что количество крупных частиц

в составе донных отложений возрастает и, наконец, образуется сплошной поверхностный слой, состоящий только из этих частиц, устойчивых к размыву. О возможности образования отмостки можно судить по величине отношения диаметра частиц, крупнее которых в донных отложениях содержится только 5% по весу (d_5), к диаметру частиц, мельче которых в пробе донных отложений содержится также 5% (d_{95}). При $d_5/d_{95} > 5$ практически всегда возникает отмостка (Кноров В.С., 1962). Если такие условия имеют место в нижнем бьефе, то следует ожидать наряду с глубинным врезом потока усиление плановых деформаций или размыва берегов и расширения русла.

Врез русла обуславливает, в дополнение к снижению максимальных расходов и уровней воды, уменьшение или прекращение затопления поймы и ускоряет отмирание пойменных проток. Он может привести к перестройке русловых форм и изменению типа русловых процессов. Длина заметного размыва русла реки в нижнем бьефе оказывается весьма значительной — десятки и даже сотни километров.

Поскольку видовой состав и продуктивность пойменных лугов были сформированы под воздействием естественного режима затопления и отложения илистых наносов, то изменения этого режима должны привести к изменениям урожайности сенокосов. Такие изменения, как показывает практика, оказываются весьма неблагоприятными: продуктивность пойменных лугов — основной кормовой базы животноводства, снижается в несколько раз.

На притоках, впадающих в зону размыва нижнего бьефа, происходит рост уклонов водной поверхности и увеличение выноса донных наносов по сравнению с их поступлением с водосбора. Следовательно, на этих притоках будет происходить попятная эрозия русла с теми же последствиями, что и на главной реке.

Процесс вреза русел и усиление размыва берегов в нижнем бьефе могут привести к обсыханию оголовков водозаборов, подмыву устоев мостов, стенок набережных и причалов и пр., т.е. неблагоприятным последствиям на большом участке реки. Отсюда видно, как важно заблаговременно оценить русловые деформации, которые будут вызваны регулированием стока, и принять необходимые меры для уменьшения их нежелательных последствий.

Способы расчетов величин общего размыва в нижних бьефах разрабатывались рядом авторов. Достаточно подробную их сводку можно найти в работе В.С.Лапшенкова (1979).

5.2. Мостовые переходы

Деформации русла в створе мостового перехода можно разделить на три вида: 1) общий однонаправленный размыв дна, возникающий вследствие сжатия потока опорами моста и подводными насыпями; 2) местные воронкообразные размывы перед опорами и у оголовков струенанправляющих (регуляционных) сооружений; 3) знакопеременные во времени деформации (размывы и намывы), обусловленные естественным ходом русловых процессов - движением через створ моста русловых форм.

Общие размывы происходят по всей ширине руслового потока и обусловлены увеличением его скоростей в результате стеснения подводными насыпями и опорами моста. Они прекращаются после углубления русла в створе моста, снижения скорости транспорта донных наносов и установления равновесия между их притоком в створ моста сверху и выносом вниз по течению.

Местный размыв обусловлен нарушением структуры скоростного поля потока при обтекании им подводных частей инженерного сооружения и имеет форму воронки на дне, расположенной непосредственно у основания сооружения. В частности, такие характерные воронки можно наблюдать у лобовых граней опор моста (рис. 71). Изучение механизма местного размыва и разработка способов его количественной оценки были выполнены И.Я.Ярославцевым (1957).

Образование местного размыва обусловлено следующими обстоятельствами.

"При обтекании потоком сооружения, в частности промежуточной опоры моста, происходит резкое торможение набегающих на опору струй, т.е. происходит удар потока о лобовую грань препятствия. Таким образом, при набегании потока на опору кинетическая энергия поступательного движения жидкости преобразуется в результате удара о лобовую грань в энергию давления. Наличие добавочного (сверх гидростатического) давления в ограниченной зоне потока, примыкающей непосредственно к лобовой грани опоры, и возникающий в связи с этим перепад давлений между этой областью и остальным потоком приводят к следующей ступени преобразования энергии - к преобразованию энергии давления в кинетическую энергию поперечных токов. Поперечные токи направлены по граням опоры в стороны и вниз, ко дну.

Достигая размываемого дна, нисходящие по опоре струи отражаются от него и захватывают при этом частицы грунта. Таким образом,

энергия нисходящих токов в значительной мере затрачивается на подъем и перемещение частиц грунта. При этом кинетическая энергия нисходящих струй частично вновь трансформируется в энергию устойчивых вихревых движений, которые и являются непосредственной причиной отрыва частиц грунта... Размыв затухает тогда, когда энергия нисходящих струй, рассеивающаяся по мере спуска их в воронку, будет уже не достаточной для подъема и выноса частиц грунта (О.В.Андреев, И.А.Ярославцев, 1959, с.32). Схема этого явления, полученная киносъемкой, представлена на рис. 72. Методика расчета глубины местного размыва, разработанная И.А.Ярославцевым, основана на том, что энергия нисходящих струй зависит от кинетической энергии набегающего на опору потока (при заданной форме опоры), и величина ее на уровне дна оказывается тем меньше, чем глубже воронка размыва. При некоторой глубине воронки энергия ударяющихся о дно струй оказывается недостаточной для отрыва зерен данной крупности, и местный размыв прекращается.

Таким образом, расчет заглубления каждой опоры моста выполняется с учетом: 1) знакопеременных деформаций, обусловленных естественным ходом руслового процесса; 2) общего размыва дна в створе моста; 3) местного размыва у лобовых граней опор.

Направление и величина знакопеременных деформаций устанавливаются путем определения типа русловых процессов и сравнения разновременных планов русла. Так, например, при движении по руслу гряд максимальные глубины, приуроченные к их подвальям, будут наблюдаться на всем створе, поэтому минимальные отметки дна в поперечном сечении определяются по нижней огибающей совмещенных поперечных сечений русла в различных частях гряд.

После установления возможных минимальных отметок линии дна в створе моста их снижают на величину общего и местного размывов. Методика расчетов общего и местного размывов приводится в работе О.В.Андреева и И.А.Ярославцева (1959).

Кроме определения глубины заложения основания опор моста качественный и количественный прогноз естественного хода русловых деформаций на достаточно длительный срок необходим для выбора местоположения различных регуляционных сооружений, предназначенных для защиты мостового перехода от повреждений. К таким сооружениям относятся струнаправляющие и отбойные дамбы, траверсы, запруды, полузапруды и береговые укрепления. Их назначение и способы устройства освещаются в курсе "Гидротехнические сооружения".

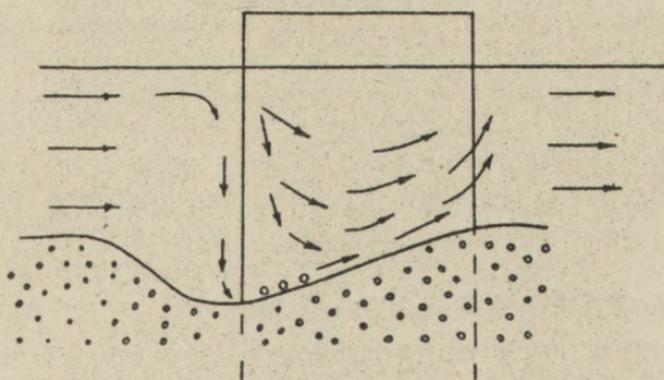


Рис. 72. Схема течений, обуславливающих местный размыв дна при обтекании потоком опоры моста

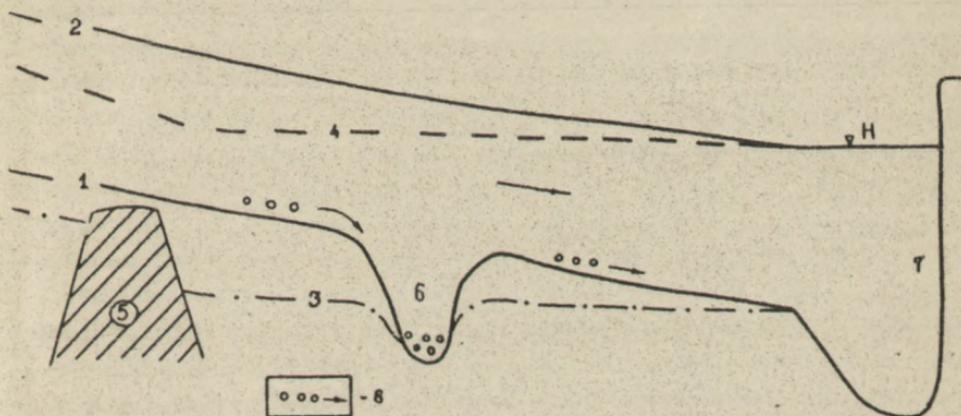


Рис. 73. Схема вреза руслового потока (продольный разрез) в подстилающие грунты в результате устройства руслового карьера:
1-2 - исходные, а 3 и 4 - последующие положения соответственно линии дна и водной поверхности; 5 - трудноразмываемые породы; 6 - русловой карьер; 7 - водоприемник (река, озеро); 8 - транспорт донных наносов

Таким образом, можно видеть, что мостовые переходы, воздействуя на русловые деформации, сами подвергаются их действию, учет которого в проектах мостов необходим для нормальной эксплуатации последних. В гидроморфологическом толковании влияние мостовых переходов на русловые процессы сводится, главным образом, к усилению притока наносов на нижележащий отрезок русла в период проявления общих и местных размывов, что вызывает временную перестройку русловых форм для обеспечения транспорта повышенного расхода донных наносов. Для конкретизации схем этих изменений необходимы массовые стационарные русловые наблюдения.

5.3. Русловые карьеры

Гравийно-песчаные и гравийно-галечниковые донные отложения и наносы рек являются объектом добычи для нужд строительства, масштабы которого непрерывно возрастают. Эта добыча сопряжена с образованием в руслах рек глубоких ям - карьеров. Рассмотрим их влияние на деформации русла в предположении, что ложе реки выполнено размываемым материалом. Поскольку карьеры-ямы являются ловушками (отстойниками) для донных наносов, движущихся сверху, ниже карьера происходит некомпенсированный вынос материала, слагающего русло. В результате этого отметки дна реки здесь постепенно уменьшаются - русловой поток врезаается в аллювиальные отложения. Величина вреза убывает вниз по течению - река уменьшает свой уклон и транспортирующую способность в соответствии с уменьшением или полным прекращением притока донных наносов сверху (рис. 73). Такая просадка русла и уровня воды в области карьера и ниже по течению приводит к увеличению уклона водной поверхности, скоростей потока и его транспортирующей способности у верховой (по течению) границы карьера и отсюда вверх по реке начинает распространяться попятная эрозия - река стремится побыстрее засыпать карьер и затем восстановить прежнее высотное положение и форму продольного профиля. Эрозионный врез может быть приостановлен, если поток в результате размыва вскрыет достаточно прочные породы. В таких местах возникают резкие переломы продольного профиля потока - выходы трудноразмываемых пород являются местными базисами эрозии.

Эрозионные процессы на главной реке вызывают такие же и на притоках.

В результате просадки реки нарушается работа водозаборов, устойчивость опор мостов, береговых откосов, снижаются уровни грун-

товых вод на пойме и речных террасах, изменяется режим затопления поймы или происходит ее превращение в надпойменную террасу, а новые массивы поймы формируются на более низком уровне.

Для того чтобы получить представление о масштабах влияния русловых карьеров на деформации русла и о возможных последствиях этих деформаций, рассмотрим конкретный пример - р.Томь, где добыча галечно-гравийного материала велась в районе Томска (70 км от устья) с 1955 г., объемы добычи возрастали из года в год. С 1955 по 1967 г. среднегодовой объем разработок составил 1,3 млн/м³, в 1975 г. - 3,5 млн/м³, а в 1983 г. - 10 млн/м³. За 25 лет было добыто более 100 млн/м³. Годовой сток донных наносов р.Томи у Томска составляет около 200 тыс/м³. Следовательно, река сможет занести выработанные карьеры примерно за 500 лет.

Дно реки и меженный уровень воды р.Томи у Томска за период с 1960 по 1980 г. снизились на 2 м, падение водной поверхности на участке длиной 70 км от Томска до устья изменилось с 2,7 до 0,7 м, т.е. сейчас уклон водной поверхности на этом участке в летнюю межень ничтожно мал - 1 см/км. Из-за столь малого уклона водной поверхности возникла угроза возникновения временных обратных течений на р.Томи при сочетании подъемов уровня воды в р.Оби и низких расходов и уровней воды на Томи, что может привести к попаданию сточных вод города в водозаборы.

Посадка уровня воды в Томи потребовала заново построить оголовки водозаборов, обусловила врез русла правобережного притока - р.Ушайки, протекающей через город, и деформации мостов через нее из-за размыва дна под опорами. Весьма существенно изменился облик р.Томи - линия берега стала изрезанной, рядом с мелями образованы глубокие ямы, сужения реки чередуются с расширениями, в целом весь вид реки создает впечатление ее обмеления, хотя на самом деле водность Томи осталась прежней.

Распространению эрозии русла вверх по течению оказали препятствие выходы скальных пород на дне реки в 300 м выше коммунального моста через Томь. В этом месте на длине около 900 м падение водной поверхности в летнюю межень составляет около 1 м, а глубины - 0,7-1 м. Образовавшийся таким образом порог препятствует судоходству и, в частности, не позволяет проходить в верх по реке составам барж для перевозки гравия с вышележащих участков реки. Разработка здесь судоходной траншеи приведет к распространению вреза русла вверх по течению и к дальнейшим изменениям внешнего облика реки - обнажению и заилению прибрежных отмелей, образованию

застойных зон вблизи берегов, уменьшению ширины реки и т.д.

Столь неблагоприятные последствия разработки русловых карьеров и одновременно с этим необходимость удовлетворения потребностей в галечно-гравийном материале заставляют искать способы рационализации подобных мероприятий.

Например, целесообразно сравнивать варианты добычи донных наносов из русла и с поймы, где подобные работы приведут только к образованию пойменных озер без изменения высотного и планового положения русла реки. Если же карьеры приходится разрабатывать в русле реки, то следует стремиться к такому их размещению в плане, чтобы в них не поступали донные наносы, например, вести разработку в форме глухих прорезей в русловых островах или прибрежных отмелях, где транспорт и осаждение донных наносов уже не происходят.

Кроме этого, весьма важным моментом является ограничение объемов добычи материалов из русел рек. В ряде случаев галечно-гравийный материал может быть заменен каким-либо другим (например, щебенкой или землей), что, видимо, не всегда еще принимается во внимание.

5.4. Некоторые приемы целенаправленного воздействия на русловые процессы

Активное воздействие на русловые процессы осуществляется с помощью специальных сооружений и мероприятий, охватывает небольшие участки реки и обеспечивает решение следующих задач:

- 1) увеличение глубин на перекатах для целей судоходства;
- 2) снижение или полное прекращение размыва вогнутого берега излучины или какой-то его части;
- 3) предотвращение образования новых рукавов русла;
- 4) снижение темпов занесения входа в искусственные или естественные боковые отводы воды из главного русла.

Ниже рассматриваются существующие приемы решения этих задач.

Способы увеличения глубин на перекатах

Мероприятия по поддержанию судоходных глубин на перекатах делят на дноуглубительные и выправительные. В большинстве случаев для улучшения судоходных условий на перекатах прибегают к дноуглублению - удалению грунта с судового хода механическими средствами. Преимущество этого способа перед русловыправлением связано с наличием весьма производительной техники и с легкостью исправлений возможных ошибок в трассировании прорези.

Во многих частных случаях наибольший эффект в регулировании глубин на перекатах, при минимуме затрат, может быть обеспечен сочетанием дноуглубительных и выправительных работ. Именно последние представляют интерес с позиций теории русловых процессов и поэтому мы на них остановимся несколько подробнее. Все рассматриваемые случаи выправительных мероприятий могут сочетаться с предшествующими или последующими дноуглубительными работами.

Поскольку перекаты формируются вследствие отложения донных наносов, то для их самоуглубления необходимо обеспечить или транзит наносов путем увеличения скоростей потока, или их относ от судового хода к берегам, или же уменьшить приток наносов с вышележащего участка русла.

Для обеспечения транзита наносов над перекатом русловой поток сжимают полузапрудами и струенаправляющими дамбами (метод Лелявского). Пример их расположения приведен на рис. 74. Продольная дамба продляет вышележащий вогнутый берег до седловины переката и кроме стеснения живого сечения поддерживает винтообразное движение воды у вогнутого берега, обуславливающее относ донных наносов с судового хода. Поперечные полузапруды дополнительно стесняют сечение потока.

М.В.Потапов (1947) разработал способ создания в потоке искусственных циркуляционных течений с помощью поверхностных струенаправляющих щитов. Схема расположения таких щитов и их работы над перекатом приведена на рис. 75. Щиты крепятся к нижней поверхности плавучего настила из бревен. Их размеры зависят от глубины потока H : высота - от $0,2H$ до $0,4H$; длина - $1,5H$; угол между горизонтальной осью щита и направлением потока составляет $20-30^\circ$.

На участке деления русла островом можно уменьшить поступление донных наносов в судоходный рукав также путем устройства поверхностных щитов на входе во второстепенную протоку (рис. 76). В этом случае поверхностные осветленные струи отклоняются на судовой ход, а донные, насыщенные наносами, отвлекаются в несудоходную протоку. Дополнительно можно рекомендовать устройство плетневых или ветвистых затопленных поперечных стенок в нижней части русла протоки, которые будут способствовать отложению в ней донных наносов и уменьшению их поступления в русло ниже слияния рукавов, что в итоге уменьшит аккумуляцию наносов на перекате, расположенном ниже острова.

Мы не останавливаемся здесь на конструкции и технологии устройства струенаправляющих сооружений. Эти вопросы являются обла-

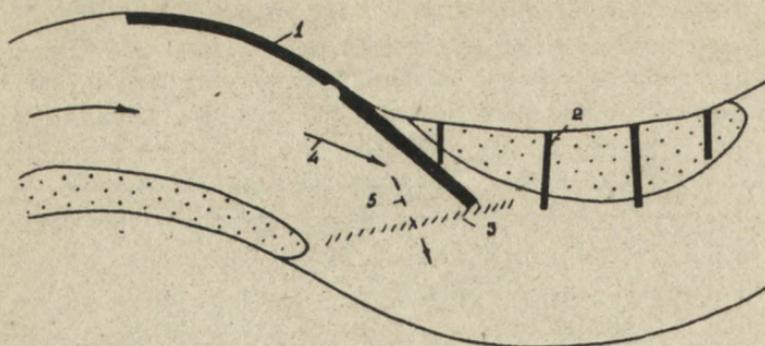


Рис. 74. Пример расположения продольной дамбы (1) и поперечных полузапруд (2) в русле для обеспечения транзита донных наносов над гребнем переката (3):

4 и 5 - направление поверхностных и донных струй



Рис. 75. Схема расположения и работы щитов Потапова над перекатом (а - план; б - поперечное сечение русла):

1 - щиты; 2 - направление поверхностных струй; 3 - направление донных струй; 4 и 5 - соответственно поперечное сечение потока до и после установки щитов

тью работы гидротехников и освещены в ряде монографий (И.И. Леви, 1955; В.А. Матусович, 1958; К.Ф. Артамонов, 1957; С.Т. Алтунин, 1962).

Регулирование плановых деформаций русел

Необходимость регулирования темпов размыва берега может возникнуть в связи с движением русла в сторону населенного пункта или какого-либо сооружения на берегу. Таким сооружением может быть опора ЛЭП, недостаточно заглубленный трубопровод, насосная станция и др. На небольших реках можно рекомендовать какое-либо искусственное крепление берега, например стенками из свай, вбитых в дно, отсыпкой крупнообломочного материала на береговой откос и пр. Такие приемы достаточно известны и освещены в гидротехнической литературе.

При выборе материала для крепления берега стремятся использовать местный природный строительный материал (грунт, камни). В случае его непригодности по условию неразмываемости потоком предпочтение следует отдавать искусственным гибким покрытиям, например бетонным тюфякам, которые представляют собой систему из множества небольших бетонных плит, соединенных между собой проволочными шарнирами. Такая защита, в отличие от жестких монолитных плит, способна изменять свою форму при размыве дна под ней без нарушения своей целостности. Весьма радикальным способом регулирования размыва берега является отклонение поверхностных струй от размываемого берега к намываемому, что приводит к движению донных струй с наносами в обратном направлении. Такая, обратная естественной, циркуляция водных масс создается путем устройства поверхностных струенаправляющих щитов М.В.Потапова (1947). В этом случае ряды струенаправляющих щитов занимают большую часть ширины потока и поэтому применение этого способа возможно на несудоходных реках.

На больших и средних реках длина размываемого берега нередко составляет несколько километров, а высота от нижней точки дна - 10-30 метров. В таких условиях стоимость надежного крепления берега, как правило, значительно превосходит стоимость спасаемых сооружений. В данном случае для снижения скорости размыва берега можно рекомендовать разработку траншеи в тыловой части прирусловой отмели на намываемом берегу, т.е. отторжение прирусловой отмели от выпуклого берега, что обеспечит прохождение за ней части расхода воды и наносов. Поскольку вход в такую протоку располага-

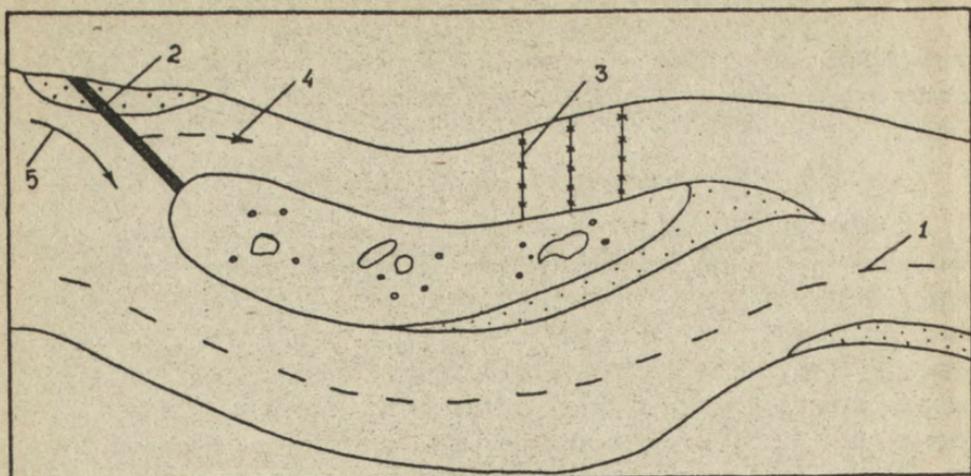


Рис. 76. Схема заграждения несудоходной протоки:

1 - линия судового хода; 2 - система поверхностных щитов; 3 - ветвистые или плетневые заграждения; 4 - 5 - соответственно траектории донных и поверхностных струй на входе в протоку после установки струенаправляющих щитов

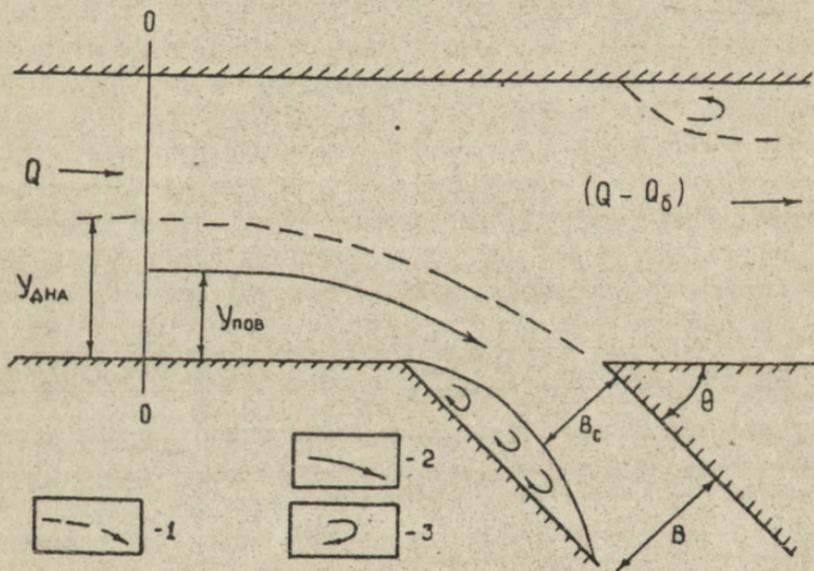


Рис. 77. Схема движения воды в боковой отвод:

1 - 2 - соответственно границы зоны захвата боковым отводом донных и поверхностных струй основного потока; 3 - области застойных зон (депрессии водной поверхности)

ется в начале зоны намыва, то в него будут отвлекаться наиболее насыщенные наносами струи потока. Захваченные спрямлением наносы не будут поступать на склон прирусловой отмели, темпы ее намыва ослабнут и в такой же мере уменьшится размыв противоположного берега.

Обратная задача - предотвращение образования нового русла в тыловой части развитой излучины (возникает в связи со стремлением сохранить главное русло на прежнем месте, например у населенного пункта) - может быть решена путем устройства на пойме поперечных дамб - препятствий для образования сосредоточенного пойменного потока. Этим приемом можно воспользоваться и после возникновения спрямления для прекращения его дальнейшей разработки.

Регулирование притока донных наносов в бесплотинные водозаборные каналы

Весьма распространенным речным инженерным сооружением является канал, отводящий воду из русла реки. Результаты лабораторных исследований такого деления потоков обобщены в монографии К.В.Гришанина (1979, с. 175-184) и сводятся к следующему.

Отвод части потока сопровождается определенной деформацией водной поверхности. Выше верхового ребра отвода в основном русле и вдоль верховой стенки отвода на поверхности образуются депрессии. Расширение потока ниже отвода (за счет уменьшения расхода воды в русле реки) приводит к образованию застойной зоны у противоположного берега ниже места деления потока (рис. 77). Другая застойная или водоворотная зона образуется вдоль верхового откоса канала в его начале, поскольку идущий сюда поток прижимается к противоположному, низовому откосу, то есть испытывает боковое сжатие (рис. 77). Размеры указанных водоворотных зон в плане зависят от относительной величины водоотбора. Возрастание водоотбора при заданном поперечном сечении канала уменьшает площадь водоворотной зоны в канале и увеличивает ее в основном русле.

Отклонение струй потока в отвод начинается в створе 0-0 (рис. 77), который располагается выше верхового ребра канала на расстоянии

$$X = 0,55 Y_{\text{дна}} \quad (5.1)$$

Ширина (Y) отклоняющегося в отвод потока увеличивается от поверхности ко дну так, что граница раздела потоков в поперечном сечении

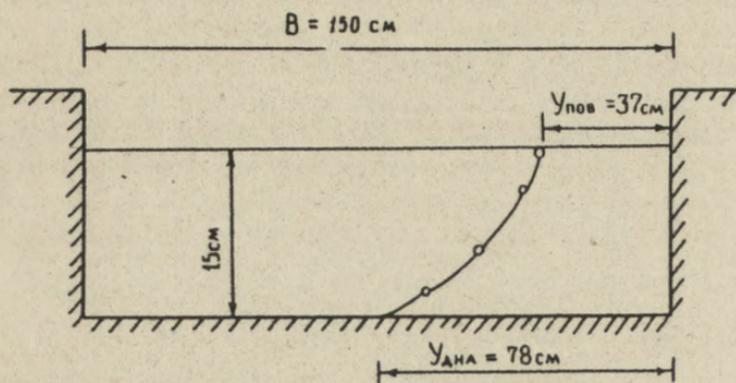


Рис. 78. Линия раздела транзитного и ответвляющегося потоков в плоскости поперечного сечения главного русла

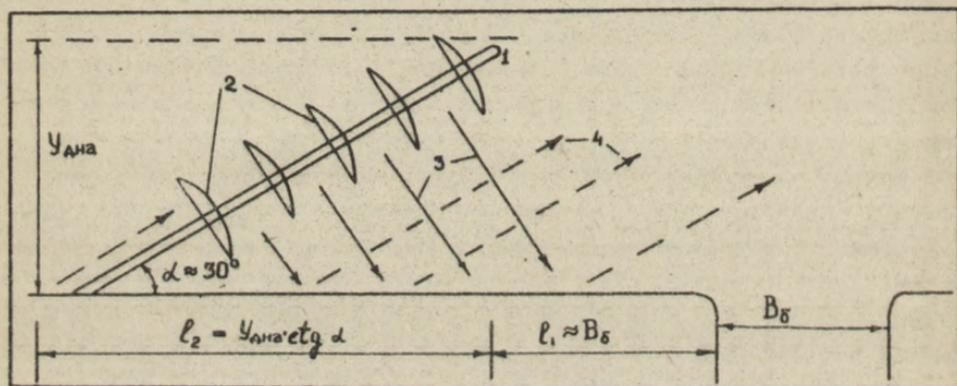


Рис. 79. Схематический план расположения струнаправлительной системы перед входом в канал:

1 - донный щит; 2 - система поверхностных щитов; 3 - направление поверхностных струй; 4 - направление донных струй

имеет вид, показанный на рис. 78. Величина Y дна зависит от относительной величины водоотбора и ширины канала. На основании опытов были получены следующие зависимости:

$$Y_{\text{дна}} = 1,55 \left(\frac{q_{\delta}}{q} + 0,2 \right) B_{\delta}; \quad (5.2)$$

$$Y_{\text{дна}} = \left(1,65 \frac{Q_{\delta}}{Q} + 0,04 \right) B; \quad (5.3)$$

$$Y_{\text{дна}} = \left(2,14 \frac{Q_{\delta}}{Q} + 0,07 \right) B, \quad (5.4)$$

где B_{δ} и B соответственно ширина отвода и главного русла; q_{δ} и q - удельные, а Q_{δ} и Q - полные расходы воды соответственно в боковом отводе и магистральном русле до разделения. Зависимость (5.2) была предложена Шаумяном, а (5.3) и (5.4) - Образовским соответственно для потоков в жестком и деформируемом руслах.

Опыт эксплуатации таких каналов показал, что во многих случаях вход в них весьма быстро перекрывается отложениями донных и полувзвешенных наносов, поступающих сюда из магистрального русла (реки) вместе с водой. Ежегодный слой отложений может достигать до 1 м. Поскольку расчистки канала сопряжены со значительными затратами, возникла необходимость поиска методов борьбы с заносимостью водозаборных каналов. Этот метод был разработан М.В.Потаповым (1947), который предложил регулировать указанный процесс с помощью двойной струнаправляющей системы. Эта система состоит из донного и нескольких поверхностных щитов, скрепленных между собой настилом из бревен. Схематически план такой системы представлен на рис. 79. Система работает следующим образом.

Донный щит останавливает наиболее крупные донные наносы, они, двигаясь вдоль него, выходят за пределы ширины зоны захвата донных струй каналом. Поверхностные щиты отклоняют верхние струи потока в сторону берега перед входом в канал. В результате набегания этих струй на берег происходит отклонение (отжим) донных слоев потока от входа в канал, то есть возникает винтообразное движение водных масс (рис. 79).

Размеры струнаправляющей системы определяются величиной $Y_{\text{дна}}$ и глубиной магистрального потока. Длина всей системы, как видно из рис. 79, составит

$$L = Y_{\text{дна}} / \sin \alpha. \quad (5.5)$$

Высоту как донного, так и поверхностных щитов рекомендуется принимать в пределах от 0,2 до 0,4 глубины потока H , а длину поверхностных щитов - около $1,5 H$.

Совместная работа донного и поверхностных щитов весьма эффективно снижает приток донных наносов в канал, но и усиливает размыв берега. Поэтому ее целесообразно рекомендовать для каналов без крепления ложа. Если же откосы и дно канала делаются жесткими (например, покрыты бетонными плитами), то возникает вопрос о предотвращении размыва берега у входа в канал. В этом случае приходится ограничиться только устройством донного щита и предусмотреть периодические расчистки канала от донных отложений.

При решении вопроса о типе крепления берега у оголовка канала следует исходить из того, что любая локальная защита размываемого берега может быть только временной, требующей периодической реставрации. Во всех случаях можно рекомендовать отсыпку крупнообломочного материала (камней) на береговой откос. Преимуществом такого крепления является простота и, пожалуй, наименьшая стоимость устройства, а также его гибкость - по мере вымывания дна под нижним слоем камней крепление будет деформироваться, но сохранять свою целостность в течение нескольких лет в отличие от жесткого крепления, например, бетонными плитами. Также можно применить специально изготовленные гибкие крепления - асфальтовые или бетонные тюфяки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные схемы русловых и пойменных переформирований и морфологические приемы их оценки позволяют во многих случаях дать обоснованные рекомендации (принципы) для выбора мест расположения инженерных сооружений на дне речных долин и мероприятий по регулированию нежелательного воздействия на эти сооружения русловых деформаций.

Таковыми сооружениями являются опоры ЛЭП, насосные станции - водовыпускные оголовки, трубопроводные и мостовые переходы.

Уже одно определение типа русловых процессов дает качественное представление о возможных вариантах изменения русловых форм, что во многих случаях исключает необходимость выполнения каких-либо количественных измерений. Например, в случае развития русла по схеме свободного меандрирования минимум плановых деформаций наблюдается в местах смены знака кривизны плановых очертаний русла, следовательно, на таких участках вполне возможно устройство перехода ЛЭП или трубопровода. Много интересных частных примеров, иллюстрирующих возможности творческого применения гидроморфологических представлений о русловых процессах для решения задач строительства сооружений на реках, можно найти в монографии И.В.Попова (1969). В общем случае изученные, хотя и в разной степени, типы русловых переформирований речных русел позволяют наметить оптимальную программу работ по установлению характера, направления и темпов движения русла. Эта программа включает следующие этапы:

- 1) подбор разновременных аэрофотоснимков (карт) дна речной долины;
- 2) установление типа русловых процессов и определение на этой основе необходимого комплекса полевых работ, исходя из требований, устанавливаемых видом инженерного сооружения;
- 3) расчет скорости плановых деформаций русла путем совмещения его разновременных планов и оценка точности этого расчета.

Изложенные закономерности формирования речных пойм позволяют по аэрофотоснимкам поймы выявлять распределение по ее площади участков с различной высотой и строением, что весьма важно как для размещения здесь тех или иных сооружений, так и для составления карт затопления, почв и растительности пойменных территорий, необходимых при планировании мелиоративных мероприятий.

Необходимо отметить, что во многих случаях применение морфо-

логических закономерностей русловых и пойменных процессов в практике планирования размещения сооружений на дне речных долин требует творческого подхода, учитывающего, с одной стороны, все особенности режима данного руслового потока, с другой стороны, назначение и возможные конструкции инженерного сооружения, т.е. предполагает наличие определенного минимума знаний курса "Гидротехнические сооружения" для возможности совместной работы гидрологов и гидротехников.

ЛИТЕРАТУРА

- А н д р е е в О. В., Я р о с л а в ц е в И. И. Защита мостовых переходов от размыва. - М.: Автотрансиздат, 1959. - 148 с.
- А л т у н и н С. Т. Регулирование русел. М.: Сельхозиздат, 1962. - 352 с.
- А н ц ы ф е р о в С. М. О механизме образования песчаных волн. - Метеорология и гидрология, 1969, № 3, с. 79-86.
- А р т а м о н о в К. Ф. Регулировочные сооружения и работы на реках в предгорных районах. - Фрунзе, 1957. - 171 с.
- Б о г о л ю б о в И. В., М а к р и н о в а О. В. Экспериментальные исследования естественного потока на закруглении русла. - Труды ГГИ, 1947, вып. 2 (56), с. 79-99.
- В е л и к а н о в М. А. Русловой процесс. М.: Изд-во физико-математической литературы, 1958. - 395 с.
- В е л и к а н о в М. А. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеоздат, 1949. - 472 с.
- В е л и к а н о в а З. М. Лабораторные исследования речной излучины. - Труды ГГИ, 1968, вып. 147, с. 87-95.
- В е л и к а н о в а З. М. Грядовое движение наносов на модели речной излучины. - Труды ГГИ, 1969, вып. 169, с. 87-95.
- Г р и ш а н и н К. В. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеоздат, 1979. - 310 с.
- Д о к у ч а е в В. В. Способы образования речных долин Европейской России. соч., т.2. - М.-Л., Изд-во АН СССР, 1949. - 427 с.
- З н а м е н с к а я Н. С. Донные наносы и русловые процессы. - Л.: Гидрометеоздат, 1976. - 185 с.
- К н о р о з В. С. Естественная отмостка русел, образованных материалами неоднородной крупности. - Изв. ВНИГ, 1962, т. 70, с. 21-51.
- К о з м е н к о А. С. Основы противоэрозийной мелиорации. - Л.: Сельхозгиз, 1954. - 424 с.
- К о м л е в А. М., Б л у к к е П. П. Опыт определения интенсивности плановых деформаций русла р. Тром-Оган по возрасту древесной растительности на намывных берегах. - В кн.: Вопросы гидрометеорологии Сибири. Новосибирск, 1965, с. 175-180.

Кондратьев Н. Е. О дискретности русловых процессов. В кн.: Проблема русловых процессов. - Л.: Гидрометеиздат, 1953, с. 34-42.

Кондратьев Н. Е., Ляпин А. Н., Попов А. В., Пиньковский С. И., Федоров Н. Н., Якунин И. А. Русловой процесс. - Л.: Гидрометеиздат, 1959. - 371 с.

Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Смищенко Б. Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. - Л.: Гидрометеиздат, 1982. - 272 с.

Копалиани З. Д., Цхададзе В. С. Типы речных русел Западной Грузии. - Труды ГТИ, 1972, вып. 195, с. 20-32.

Копалиани З. Д., Ромашин В. В. Проблемы русловой динамики горных рек. - Труды ГТИ, 1971, вып. 183, с. 81-98.

Лапшенков В. С. Прогнозирование русловых деформаций в бьефах речных гидроузлов. - Л.: Гидрометеиздат, 1979. - 237 с.

Леви И. И. Гидротехнические сооружения на равнинных реках. - Л., 1955. - 32 с.

Литвин Л. Ф., Чалов Р. С. О руслоформирующей деятельности временных и постоянных водотоков в горах. - Геоморфология, 1975, № 1, с. 81-85.

Лосиевский А. И. Лабораторное исследование процессов образования перекатов. - М., 1934. - 113 с.

Лохтин В. М. О механизме речного русла. - СПб., 1897. - 100 с.

Ляпин А. Н. Об устойчивости речных берегов. - Труды ГТИ, 1973, вып. 209, с. 117-131.

Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. - М.: Изд-во АН СССР, 1955. - 347 с.

Маккавеев Н. И. и др. Экспериментальная геоморфология. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1961. - 194 с.

Матусевич В. А. Выправление рек. - М.: Речной транспорт, 1958. - 255 с.

Попов И. В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство. - Л.: Гидрометеиздат, 1969. - 364 с.

Потапов М. В. Регулирование водных потоков методом искусственной поперечной циркуляции. - М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1947. - 76 с.

Розовский И. Л. Движение воды на повороте открытого русла. Киев: Изд-во АН УССР, - 1957. - 188 с.

Ромашин В. В. Некоторые особенности руслового процесса на горной реке. - Труды ГТИ, 1967, вып. 144, с. 66-76.

Россинский К. И., Кузьмин И. А. Речные русла. - В кн.: Гидрологические основы речной гидротехники; ав. С.Н. Крицкий и М. Ф. Менкель. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950, с. 52-97.

Талмаза В. Ф., Крошкин А. Н. Гидроморфометрические характеристики горных рек. Фрунзе, 1968. - 204 с.

Чалов Р. С. Рельеф пойм. - В кн.: Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970, вып. I, с. 192-204.

Чалов Р. С. Географические исследования русловых процессов. - Изд-во МГУ, 1979. - 231 с.

Шамон Г. И. Речные наносы. Л.: Гидрометеиздат, 1954. - 345 с.

Шанцер Е. В. Аллювий рек умеренного пояса и его значение для познания закономерностей строения и формирования аллювиальных свит. - Тр. Ин-та геол. наук АН СССР, 1951, вып. 135, Сер. геол. (№ 55). - 274 с.

Шуляк Б. А. Физика волн на поверхности сыпучей среды и жидкости. - М.: Наука, 1971. - 400с.

Экспериментальная геоморфология. - Изд-во Моск. ун-та, 1969, вып. 2. - 178 с.

Ярославцев И. А. Расчет местного размыва у опор мостов. - Изд. ЦНИИС, 1957.

Ярославцев И. А. Особенности руслового процесса на излучине реки в паводок. - Труды ГТИ, 1966, вып. 136, с. 77-81.

Ackers P. Experiments on small streams in alluvium.-Jour. Hydraul. Div. Proc. ASCE., 1964, HY 4, p. 1-37.

Ackers P., Charlton F. Dimensional analysis of alluvial channels with special reference to meander length.-Jour. Hyd. Res., 1970, N 3, p.287-314.

Blue R., Herbert J., Lancefield R. Flow around a river bend investigated.-Civil engineering, May, 1943, p.50-62.

Leopold L.B., Wolman M. River channel patterns: braided, meandering and straight.-U.S. Geol. Survey Proc. Paper 262-O, 1957.- 48 p.

Matthes G.H. Basis aspects of stream meanders. Trans. Amer. Geophys. Union, 1941, pt. III, p. 30-41.

Vogel H., Thompson P. Existence of helicoidal flow. Civ. Engineering, 1934, v. 4, #7, p. 70-79.

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
I. ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ГИДРОМОРФОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЙ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ	8
I.1. Представления о русловых формах и дискретности русловых процессов - теоретическая основа гид- роморфологического метода	8
I.2. Звенья гидрографической сети и понятие об обрати- мых и необратимых деформациях	14
I.3. Основные факторы русловых процессов	19
I.4. Деление речных наносов на различные категории по способу их транспорта потоком	21
I.5. Использование карт и материалов аэрофотосъемки при изучении русловых и пойменных процессов.....	24
I.6. Выводы.	25
2. ТИПЫ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ РАВНИННЫХ РЕК (ПО РАЗРАБОТКАМ ГГИ)	27
2.1. О классификациях речных русел и русловых процес- сов	27
2.2. Ленточно-грядовый и побочный типы руслового процесса	28
2.2.1. Ленточно-грядовый тип руслового процесса	28
2.2.2. Побочный тип руслового процесса	30
2.2.3. Определение расхода донных наносов по данным о русловых переформированиях	32
2.3. Русловые процессы меандрирующих рек	34
2.3.1. Ограниченное меандрирование	34
2.3.2. Свободное и незавершенное меандрирование	41
2.3.3. Количественные характеристики меандриро- вания	52
2.3.4. Размыв берегов, способы определения его интенсивности, оценка стока донных нано- сов по данным о деформациях русла	53
2.4. Качественная и количественная характеристика русловой и пойменной многорукавности	61
2.4.1. Русловая многорукавность	61
2.4.2. Пойменная многорукавность	64
2.5. Типы речных островов	67

2.6. Изучение причин образования различных схем русловых переформирований	69
2.7. Распространенность типов руслового процесса по территории СССР	79
3. ПОЙМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ РАВНИННЫХ РЕК	81
3.1. Возникновение речных пойм	82
3.2. Формирование рельефа и строения пойм меандрирую- щих рек	88
3.2.1. Формирование рельефа и строения прирусло- вых сегментов в ходе развития одной излу- чины при свободном и незавершенном меанд- рировании	89
3.2.2. Формирование фаций наложенного прирусло- вья и фаций старичного аллювия - даль- нейшие этапы развития рельефа и строения поймы	100
3.2.3. Общий облик поверхности пойм свободно и незавершенно меандрирующих рек	107
3.2.4. Поймы ограниченно меандрирующих рек	III
3.3. Островные поймы	113
3.4. Процессы затопления и гидрологический режим пойм меандрирующих рек	115
3.4.1. Процессы затопления поймы	115
3.4.2. Гидрологический режим пойм	121
3.5. Типы речных пойм и их связь с типами руслового процесса	124
4. РУСЛОВЫЕ И ПОЙМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНЫХ РЕК	133
4.1. Формы транспорта наносов горными реками	133
4.2. Типизации русел и русловых процессов горных рек	135
4.3. Гидроморфометрические связи	137
4.4. Поймы горных рек	138
5. КАЧЕСТВЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ВЛИЯНИИ НА РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ СООРУЖЕНИЙ И МЕРОПРИЯТИЙ	141
5.1. Плотины ГЭС	141
5.2. Мостовые переходы	149
5.3. Русловые карьеры	152
5.4. Некоторые приемы целенаправленного воздействия на русловые процессы	154
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	163
ЛИТЕРАТУРА	165

Юрий Иванович Каменсков

РУСЛОВЫЕ И ПОЙМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Учебное пособие

Редактор Е.С.Юзефович

ИБ 1837

Подписано в печать 4.01.87. КЗ 06004.
Формат 60x84 1/16. Бумага типографская № 3.
Печать офсетная. Печ. л. 10,75. Усл. печ. л. 10,0. Уч.-изд. л. 9,0.
Тираж 500 экз. Заказ 230. Цена 40 к.

Издательство ТГУ, 634029, Томск, ул. Никитина, 4
Ротапринт ТГУ, 634029, Томск, ул. Никитина, 4

1-650913

Томский госуниверситет 1878



Научная библиотека 00350675



ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТОМСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА