557.48
Т 60

И. В. ПОПОВ

ДЕФОРМАЦИИ РЕЧНЫХ РУСЕЛ И ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Издание второе дополненное и переработанное

233064

БИБЛИОТЕКА
Ленинградского
Гидрометеорологического
Института

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛЕНИНГРАД • 1969

УДК 551.482.212

Книга представляет собой значительно дополненное и переработанное второе издание опубликованной в 1965 г. монографии. В книге изложены основы новой гидролого-морфологической теории руслового процесса и, в частности, его типизация и количественные характеристики деформаций русла и поймы. Приведены приемы анализа натурных материалов и вновь разработанные морфометрические методы расчета деформаций, в том числе расчеты предельных глубин размыва и плановых смещений русла. Даются расширенные рекомендации по выбору оптимальных условий размещения сооружений и способов защиты уже существующих.

В монографии обобщен более чем 10-летний опыт экспертиз и заключений по проектам различных сооружений. Рассматриваются примеры применения гидролого-морфологического анализа при различных видах строительного проектирования

Рассчитана на гидрологов, проектировщиков и изыскателей, а также студентов высших учебных заведений. Может быть теоретическим и практическим пособием при строительном проектировании.

This is a revised and enlarged second edition of I. V. Popov's monograph published in 1965. The book is concerned with principles of a new hydromorphological theory of the river-bed process. River-bed patterns and quantitative characteristics of river-bed and flood-plain deformation are included. Methods of analysis of field data are given; newly developed technique for estimation of river-bed deformation is presented. Recommendations are given on location of new hydraulic structures and protection of the existing ones.

More than 10-year experience gained in hydraulic design is generalized in this monograph. Practical uses of hydromorphological analysis are discussed.

The book is addressed to hydrologists, designers and surveyors, as well as to post-graduates and students. It may serve as a manual on hydraulic design.

2-9-6
75-1969

ПРЕДИСЛОВИЕ

Второе дополненное и переработанное издание монографии «Деформации речных русел и гидротехническое строительство» обязано своим появлением тому, что с момента выхода первого издания (1965 г.) изложенная в нем гидролого-морфологическая теория руслового процесса получила дальнейшее существенное развитие. За это время появился ряд новых разработок и существенно усилились методы инженерного применения выводов этой теории. Это позволяет еще более конкретизировать многие положения и рекомендации, даваемые в первом издании. К тому же за это время в области оценки руслового процесса при проектировании появились нормативные документы, требующие для своего применения систематического и детального изложения теоретической и практической части проблемы со всеми ее дополнениями и изменениями, поскольку эти документы основаны на гидролого-морфологической теории руслового процесса.

Как указывалось в предисловии к первому изданию книги, гидролого-морфологическая теория руслового процесса зародилась и была разработана в отделе русловых процессов ГГИ на основе идей Н. Е. Кондратьева и при непосредственном участии автора.

Основным содержанием гидролого-морфологической теории руслового процесса является дискретный подход к изучению этого явления. Этот подход обусловливает не только выделение типичных морфологических образований, формирующихся в ходе развития этого процесса, но и соответствующих им гидродинамических структур в потоке. В конечном виде эта теория должна выразиться в синтезе этих двух аспектов проблемы, т. е. в создании гидравлической теории русловых форм. Это позволит существенно конкретизировать и усовершенствовать методы расчета и прогноза русловых деформаций. Однако это еще задача будущего и в настоящей книге рассматривается только морфологический аспект проблемы. Он ценен тем, что позволяет решать многие задачи, возникающие при строительном

проектировании, относительно простыми средствами. Действительно, дискретные представления в современной гидравлике и гидродинамике развиты еще крайне недостаточно, равно как и в основанных на них методах инженерных расчетов руслового процесса. Кроме того, для их производства требуется получение многих исходных данных, основанных на нестандартных и очень трудоемких полевых исследованиях.

Вместе с тем морфологические исследования руслового процесса оказались на первых порах проще, так как в основном требовали лишь широко распространенных топографических, геологических, геоморфологических и гидрологических стандартных материалов. Это и обусловило то обстоятельство, что этим исследованиям оказалось возможным уделить сразу же большое внимание, тем более, что морфологические представления о речном русле и пойме оказались достаточно скудными.

В ходе морфологических исследований быстро обнаружилось, что на их основе можно решать большой круг инженерных задач, связанных с оценкой деформаций речных русел и пойм, поскольку удалось обнаружить ряд достаточно надежных морфологических закономерностей руслового процесса, позволяющих предвидеть ход будущих переформирований, а главное достаточно четко типизировать схемы развития руслового процесса. Типизация руслового процесса благодаря наличию четких внешних признаков имеет первостепенное значение, так как позволяет предвидеть ход деформаций уже на ранних стадиях проектирования, без трудоемких полевых работ, пользуясь только картографическими материалами.

Наряду с выявлением морфологических закономерностей руслового процесса и его типизацией удалось разработать и ряд приемов получения и обработки исходных натурных материалов, что в свою очередь позволяет по-новому поставить вопрос о составе, программе и способах производства полевых исследований и их существенной рационализации. Полевые исследования, как известно, составляют существенную часть стоимости проекта гидротехнических сооружений и поэтому их рационализация и ускорение являются весьма важными вопросами. В частности, автором разработаны способы анализа уже имеющихся аэрофотоснимков и восстановления, даже по разовому снимку, схем плановых деформаций речного русла при свободном меандрировании. Показана возможность типизации руслового процесса (установление свойственных данному участку реки схем переформирований речного русла и поймы) па основе даже относительно мелкомасштабных карт и возможность получения по ним представления о балансе наносов речных участков большого протяжения.

Все это позволяет утверждать о возможности создания общей схемы и приемов изучения деформаций речных русел по

натурным материалам, получивших название гидролого-морфологического анализа руслового процесса.

Несомненно, что и типизация руслового процесса и предлагаемые приемы его гидролого-морфологического анализа подлежат дальнейшему усовершенствованию и развитию. Однако то обстоятельство, что их удалось проверить на большом фактическом материале и применить для решения ряда инженерных задач, позволяет утверждать, что принципы его осуществления не должны претерпеть существенных изменений и себя оправдывают.

Интерес, проявленный к этим методам исследования руслового процесса при многочисленных докладах о них, проведении ряда семинаров для проектировщиков и изыскателей, при большом числе консультаций по проектам, наконец при чтении специальных курсов в высших учебных заведениях, позволяет автору надеяться, что обобщение и дальнейшее развитие его предшествующих работ, предпринятое в настоящей книге, окажут действенную помощь при решении многочисленных задач, связанных с необходимостью оценки руслового процесса в самых разнообразных целях.

В заключение автор еще раз подчеркивает, что в книге излагаются основы только гидролого-морфологического аспекта теории руслового процесса и его гидролого-морфологического анализа. Это отнюдь не умаляет значения гидравлического аспекта проблемы, по которому выполнено уже большое число весьма ценных работ.

Второе, о чем следует предупредить читателя, — это далеко не полное освещение всех возможностей применения гидролого-морфологического анализа. Они показываются только на примерах решений инженерных задач, в которых автору пришлось участвовать непосредственно и неоднократно. К ним принадлежат: вопросы выбора места расположения на берегах рек переходов линий высоковольтных передач, переходов через реки трубопроводов, водозаборных сооружений и вопросы составления фоновых прогнозов руслового процесса в условиях регулирования стока.

ВВЕДЕНИЕ

1. ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ К ОЦЕНКЕ РУСЛОВЫХ И ПОЙМЕННЫХ ПЕРЕФОРМИРОВАНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

На реках СССР ежегодно возводятся сотни сооружений самого различного назначения. Строятся сложные комплексы гидроэнергетических узлов, речных портов, многочисленные водозаборы, сбросы использованных вод, переходы линий высоковольтных передач, трубопроводов различного назначения, мостовые переходы, переправы, набережные, пристани и причалы, русловыправительные сооружения, различные защитные устройства и многие другие. В непосредственной близости от берегов рек возводятся промышленные и гражданские сооружения, на поймах прокладываются оросительные и осушительные системы, дороги, строятся пруды-охладители, рыбохозяйственные сооружения, располагаются ценнейшие сельскохозяйственные угодья.

Все эти разнообразнейшие сооружения всегда в той или иной мере нуждаются в оценке современных и предвидении будущих переформирований речных русел и пойм, поскольку любой проектировщик, строитель или эксплуатационник должен обеспечить оптимальные условия работы сооружения. Во всех случаях они должны убедиться в том, что их сооружению либо ничто не угрожает, либо отдать себе полный отчет в возможных осложнениях при строительстве и эксплуатации этих сооружений, с тем чтобы разработать системы наиболее эффективных защитных мероприятий.

В ходе переформирований берегов реки и ее русла происходит сложное перераспределение поступления и расходования наносов, транспортируемых потоком, и как следствие крупные местные изменения мутности воды и расходов наносов — факторы, весьма важные для суждения об изменении качества воды, условий заиления водохранилищ, борьбы с выносом наносов на поймы или, наоборот для усиления их отложений, если оно при-

водит к повышению плодородия пойменных почв (если этому благоприятствует состав этих наносов).

В наше время становиться в позу инженера, о котором говорил в 1894 г. на VI Международном конгрессе в Гааге Н. С. Лелявский, по меньшей мере неудобно. А говорил Лелявский следующее: «В одном очень давнем доношении министерству по поводу неоднократных разрушений Черторойских сооружений (р. Днепр. — *И. П.*) было наивно и чистосердечно, между прочим, сказано что причина их, т. е. явлений, произведших разрушения, «сокрыта на глубине водной пучины...»

С того времени неизмеримо возросли число, размеры, хозяйственная значимость сооружений, а в связи с этим и размеры их влияния на реку.

Еще два-три десятка лет тому назад проектировщиков интересовали преимущественно данные, относящиеся непосредственно к створу сооружений, и лишь в исключительных случаях при особо крупных сооружениях возникала необходимость оценки речных участков большого протяжения. В наше время возникновение необходимости оценки возможных переформирований речных русел не только для участков протяжением в сотни километров, но и для целых речных систем представляет собой отнюдь не исключительный случай, так как регулирование стока крупных рек и неизбежно следующая за ним перестройка речных русел и пойм, обусловленная изменением водного режима, является распространенным и обычным мероприятием.

За последние 10 лет неоднократно возникали задачи, в которых первоочередными вопросами ставилась оценка общего характера русловых и пойменных переформирований. Обусловливалось это необходимостью комплексного решения проблем, учета нужд самых различных областей народного хозяйства.

Так, например, при строительстве Мингечаурской ГЭС весьма существенным оказалось решение вопроса о том, какова будет в результате регулирования стока судьба излучин на этой реке на всем участке от Мингечаура до устья протяжением около 600 км, произойдет ли нивелирование отметок дна, плёсов и перекатов или их разности увеличатся, в какой мере произойдет изменение отметок уровня свободной водной поверхности, как отразится на русловом процессе падение уровня Каспия? и т. п. Возникли эти вопросы потому, что они были важными для оценки будущих условий орошения Кура-Араксинской низменности, издавна являющейся ценнейшим сельскохозяйственным массивом, водоснабжение которого базировалось на водах р. Куры, подаваемых множеством насосных станций, расположенных на ее берегах. Затрагивались интересы рыбного хозяйства, развитого на р. Куре, местного судоходства и др.

Подобный комплекс задач решался и для участка Волго-Ахтубинской поймы протяжением 500 км в связи со строитель-

ством ГЭС имени XXII съезда КПСС. Здесь особо важной явилась судьба многочисленных волжских проток-воложек, источников орошения поймы, в том числе и проблема Денежной воложки, пересыхание которой угрожало отходом Волги на 8—9 км от такого крупнейшего промышленного центра, каким является Волгоград.

Существенным оказалось предвидение хода русловых переформирований в условиях регулирования стока на участке р. Оби от слияния рек Бии и Катуни до г. Колпашево протяжением более 1000 км, на р. Иртише от его истока из оз. Зайсан до г. Омска. При проектировании первого варианта Саратовской ГЭС необходимо было оценить влияние сосредоточения потока в одном русле на русловые переформирования, которые могли представить существенную угрозу сооружениям ГЭС и условиям судоходства и водозаборов.

Какие же новые условия возникают на реке в условиях регулирования ее стока водохранилищами? Рассмотрим следующую схему.

На рис. 1 *А* показано расположение основных зон, создающихся на зарегулированной реке в случае строительства водохранилищ, и особенности их нового режима. На рис. 1 *Б* показан возможный эффект воздействия нового водного режима на деформации речного русла и поймы.

В зоне выклинивания подпора расходы воды после создания водохранилища остаются такими же, как в естественных условиях, так как с водосбора в реку продолжает поступать прежнее количество воды. Однако эти расходы воды проходят при повышенных по сравнению с наблюдавшимися до регулирования уровнях, что обусловлено явлением подпора, создаваемого плотиной водохранилища. При наличии переменного подпора границы этой зоны оказываются подвижными. В период наполнения водохранилища водами половодий и паводков верхняя граница зоны перемещается вверх по реке.

В результате создания подпора и, следовательно, уменьшения скоростей течения в русле реки создаются благоприятные условия для отложения наносов и прежде однорукавное, русло вследствие образования в нем крупных скоплений наносов может стать распластанным и многорукавным.

Затопляемость пойм на подобных участках увеличивается, в связи с этим возможно проникновение на них большего количества наносов, чем это наблюдалось в естественных условиях, в том числе и песчаных наносов. Это может привести к тому, что пойма потеряет прежнее хозяйственное значение. Можно представить себе и такой случай, когда в связи с увеличением скоростей течения вследствие увеличения глубины затопления на ней возникнут промывы, и многорукавность участка будет усугубляться появлением новых пойменных протоков. Также возможно

возникновение многорукавных русел в результате увеличения выноса наносов с поймы в русло, в котором они будут накапливаться. Могут быть также случаи, когда в зоне выклинивания подпора образуется переуглубление русла, которое можно наблюдать на приустьевых участках рек, впадающих в море. Это возможно при относительно резких переломах продольного профиля в связи с близостью базиса эрозии, т. е. в условиях, когда поток для пропуска поступающей по нему воды, не имея возможности изменить уклон, вынужден разрабатывать свое русло. Как видим эффект регулирования стока в отношении развития русловых и пойменных деформаций может быть далеко не однозначным.

В зоне, непосредственно занятой водохранилищем, также возникают новые процессы, не наблюдающиеся в естественных условиях.

Чаша водохранилища подвержена заилению— отложению на его дне наносов, которые до регулирования транспортировались потоком во взвешенном состоянии. Одновременно наблюдаются явления занесения водохранилища — накопление в нем наносов до регулирования перемещавшихся в виде сползающих гряд. Эти явления связаны с резким уменьшением скоростей течения вследствие создания подпора. Оба описанных явления при достаточно обильном поступлении наносов в водохранилища способны значительно сократить срок его существования. Подобные явления имеют особенно важное значение в горах, где благодаря большим уклонам рек и скоростям потоков они несут значительное количество наносов. На первых порах, когда еще не было опыта строительства водохранилищ и были слабо разработаны приемы расчетов заиления и занесения, срок их работы сокращался до нескольких лет, вместо ожидавшихся десятилетий (Шамов, 1939 и др.).

Крупным переформированиям подвергаются берега вновь построенных водохранилищ, подверженных ветро-волновым воздействиям, сопровождающимся также возникновением вдольбереговых течений. Зарегистрированы случаи, когда перемещения берегов под воздействием ветрового волнения за один год составляли десятки метров (Кондратьев, 1960).

Переформирования берегов водохранилищ заканчиваются как только создается береговая отмель, способная разрушить сформировавшиеся на акватории водохранилища волны на подходе их к берегам. Этим собственно и объясняется отсутствие крупных береговых переформирований на озерах, в которых береговая отмель сформировалась и давно приобрела уклоны, препятствующие достижению берегов крупными волнами.

В связи с резкими изменениями депрессионной кривой подземных вод вследствие новых условий их выклинивания

возникают оползневые явления и обвалы берегов водохранилищ (Золотарев, 1955). Объем поступления наносов от переформирования берегов может быть вполне соизмерим с объемами наносов, приносимых в водохранилище главной рекой и притоками, и способен также ускорить процесс заиления и занесения водохранилищ.

Поскольку вопросы переформирования берегов представляют собой в значительной мере самостоятельную проблему и не связаны непосредственно с вопросами руслового процесса, рассмотрение их ограничим изложенным и перейдем к описанию деформаций, происходящих в нижнем бьефе сооружений.

Деформации на участке, непосредственно прилегающем к плотине водохранилища, обусловленные прямым воздействием сбросов и повышенных скоростей, возникающих под их влиянием, исследованы достаточно подробно; существуют и методы их инженерного расчета (Россинский, 1961 г др.). Поэтому основной интерес представляют переформирования, вызванные резким нарушением водного режима, влияние которого нередко распространяется на сотни километров ниже плотин. Эти переформирования далеко не всегда учитываются при проектировании и строительстве плотин на реках, а вместе с тем могут иметь весьма нежелательный для эксплуатации подобных участков эффект. Итак, зона нижнего бьефа — это участок, на который распространяются изменения в водном режиме, вызванные регулированием стока. Как указывалось, она может иметь длину в несколько сот километров, а нижней ее границей даже может служить водоприемник (море, озеро), в который река сбрасывает свои воды.

В зоне нижнего бьефа расходы и уровни воды распределяются внутри года более равномерно, чем в естественных условиях (в этом цель регулирования стока).

В большей части случаев подъемы уровня оказываются на подобных участках меньшими, чем в естественных условиях, вместе с тем всегда резко уменьшается сток наносов, задерживаемых в водохранилище. Поэтому на участках с разветвленным руслом снижение высоты затопления поймы или его полное прекращение должно способствовать отмиранию протоков. Все это создает необходимость орошения пойм на подобных участках и значительные трудности его осуществления из-за исчезновения местных источников водоснабжения, каковыми часто являются пойменные протоки. В главном русле реки на бесприточных участках возникают однонаправленные деформации — обычно врезание русла, а при наличии неразмываемых пород, лежащих в основании поймы, — усиленные плановые деформации русла.

Обычно процессы размыва, наблюдающиеся на бесприточном участке в нижнем бьефе сооружений, связывают с тем, что на

такие участки поступает осветленная в водохранилище вода, и, якобы, поэтому поток оказывается способным захватить больше частиц, чем раньше, и появляется необратимый размыв. Появление однонаправленного размыва в этом случае связано не с увеличением транспортирующей способности потока, а с отсутствием компенсации местного размыва потоком наносов, ранее поступивших на участок, ныне задерживаемых в водохранилище. Не следует при этом упускать из вида, что снижение высоты половодий, задерживаемых в водохранилище, способно существенно ослабить интенсивность руслового процесса, наблюдавшуюся в естественных условиях, и еще неизвестно, сможет ли повышенная межень полностью компенсировать это ослабление.

Начавшиеся однонаправленные деформации речного русла в нижнем бьефе сооружения будут развиваться до тех пор, пока поток в результате местных переформирований не установит равенство между объемами размывов и намывов. На участке, непосредственно прилегающем к плотине, деформации будут продолжаться до тех пор, пока поток не размоет всей толщи отложений, накопленных при естественном режиме, до неразмываемых слоев пород. Длина зоны нижнего бьефа в основном определяется приточностью. При отсутствии притоков она может фактически распространяться до самого водоприемника. Если же есть притоки, способные существенно пополнить сток воды и наносов и сделать практически неощутимым влияние водохранилища на водный режим и сток наносов, то длина зоны нижнего бьефа может оказаться значительно меньшей.

Итак, однонаправленные деформации, возникающие на бесприточном участке в нижнем бьефе сооружений, должны ослабевать и во времени, и по длине реки и в пределе должны прекратиться. Сроки их прекращения могут составлять десятилетия и даже более длительные периоды. Морфологическим эффектом появления однонаправленного процесса, кроме образования сползающей зоны размыва, является образование непосредственно следующей перед ней вниз по течению зоны временной аккумуляции наносов.

Эта зона образуется вследствие отложения в ней материала, поступающего из зоны размыва. Временная она потому, что на верхнюю ее границу надвигается зона размыва, что одновременно приводит и к сползанию ее нижней границы, так как наносы получают возможность откладываться все ниже по реке.

В зоне размыва русло, если есть базальный горизонт, будет расширено, поскольку в этом случае будут преобладать плановые деформации. Снижение высоты половодий должно привести к уменьшению затопляемости пойм, резкому уменьшению скоростей течения в рукавах и притоках (в зоне размыва это произойдет и вследствие снижения отметок дна) и обмелению. Таким образом, должно наблюдаться уменьшение многорукав-

ности, если она была до сооружения плотины, в результате занесения рукавов и протоков, т. е. переход к однорукавному руслу. Снижение высоты половодий должно привести к уменьшению намыва перекатов, а повышенная межень — к увеличению их сработки. Поэтому отметки дна плёсов и перекатов должны нивелироваться. Вместе с тем снизится скорость сползания крупных побочней, но могут появиться новые, меньших размеров.

При оценке влияния снижения уровня воды на русловые переформирования следует учесть, что в нижнем бьефе русловые образования находятся в условиях кратковременных попусков суточного регулирования (нередко нескольких за сутки). Эти попуски по высоте могут не только достигать, но и превышать отметки пиков весеннего половодья в естественных условиях, однако действие их непродолжительное. Из-за этого они далеко не всегда способны привести к существенным переформированиям крупных форм, которые в этих условиях могут сохраняться длительное время в прежнем состоянии, деформируясь только под влияним значительных продолжительных сбросов. Несмотря на кратковременность попусков суточного регулирования, в период суточного провала, как показали эксперименты ГГИ на реках Тверце и Свири, на перекатах те же, что в естественных условиях, расходы воды проходят при уровнях, существенно более высоких, а следовательно, при пониженных скоростях; при увеличении расходов воды они проходят при уровнях, несколько пониженных по сравнению с установившимся режимом, т. е. при повышенных скоростях по сравнению с естественным режимом. Это должно ослабить размыв плёсов и усилить их намыв. Следовательно, подвижность гряд средних размеров может оказаться благодаря попускам меньшей, чем в естественных условиях, а относительное уменьшение подвижности крупных побочней будет благоприятствовать накоплению этих гряд на перекатах и последние могут оказаться не только не срабатывающимися, а нарастающими. Особенно значительно это явление будет в зоне временной аккумуляции и может не наблюдаться в зоне размыва. При резких подъемах уровня воды во время попусков побочни могут оказаться отторженными из-за промыва своих пониженных прибереговых участков.

Таким образом, в зависимости от соотношения характера влияния всех перечисленных выше факторов на ход русловых деформаций их воздействие на переформирования русла будет не однозначным, т. е. может получаться различный морфологический эффект.

Было бы неправильно предположить, что ослабление интенсивности руслового процесса в нижних бьефах сооружений наблюдается всегда. Известны случаи, когда на зарегулированных участках рек, в зоне нижнего бьефа развивались деформации

более интенсивные, чем в естественных условиях. Связано это с тем, что в результате попусков из водохранилищ колебания уровня воды оказывались бóльшими, чем в естественных условиях. Подобная ситуация создается, например, на озерных реках, отличающихся небольшими колебаниями уровня воды в результате регулирующего влияния озер, из которых они вытекают. Известны случаи, когда подобным явлением придавался характер общего закона и без особой нужды проектировались дорогостоющие берегоукрепительные мероприятия. Например, по аналогии с процессом усиления деформаций на р. Свири, вытекающей из Онежского озера, происшедшим вследствие того, что попуски здесь вызывали бóльшие колебания уровня, чем наблюдавшиеся в естественных условиях, для нижнего бьефа Пермской ГЭС на р. Каме проектировались крупные берегоукрепительные работы, хотя здесь колебания уровня воды при попусках должны быть в 3—4 раза меньшими, чем в естественных условиях.

Легко видеть, что процессы врезания русла в зонах нижнего бьефа должны еще больше снизить затопляемость пойм и ускорить процесс отмирания пойменных протоков.

При оценке всех подобных явлений весьма существенно выяснить роль притоков в новых условиях.

Притоки, впадающие в зоне выклинивания, вследствие создания водохранилища должны оказаться в подпоре, часто на участках большого протяжения. В связи с этим на их устьевых участках создаются условия, благоприятные для аккумуляции наносов. Последняя может привести к существенному нарушению баланса наносов, имевшего место до создания подпора. В частности, при резком уменьшении выноса наносов из притоков возможно даже появление в главной реке в зоне выклинивания подпора однонаправленного размыва, связанного с отсутствием его компенсации, наблюдавшейся в естественных условиях благодаря поступлению наносов из этих притоков. В то же время на приустьевых участках притоков, на которых разовьются аккумулятивные образования, возможно образование широких распластанных и многорукавных русел, т. е. коренные изменения в ходе деформаций, наблюдавшихся до регулирования стока.

На притоках, впадающих в зону нижнего бьефа, можно ожидать увеличения выноса из них наносов в главную реку. Это произойдет в результате того, что половодья, проходящие по этим притокам и сохраняющиеся такими же как в естественных условиях, будут поступать в главную реку при пониженных вследствие создания водохранилища уровнях воды. Это приведет к увеличению уклонов притоков и как следствие к усилению размывающей их деятельности либо путем врезания, либо при наличии базального горизонта путем усиления плановых

деформаций, что может также привести к образованию многорукавности — спрямления излучин и т. п. (рис. 1 *III*). Их русла начнут разрабатываться, в этих условиях в главную реку будет поступать большее, чем раньше, количество наносов и в ней могут не только ослабеть процессы врезания, но могут появиться не существовавшие прежде аккумулятивные образования и многорукавность.

Во всех рассмотренных случаях условия эксплуатации подобных участков рек и их пойм могут коренным образом видоизмениться и не предусматривать эти изменения нельзя. Именно из-за неучета возможного выноса наносов в главное русло из притоков, впадающих в нижний бьеф гидроузла, оказалось неожиданным резкое ухудшение условий судоходства на р. Волге ниже Рыбинского водохранилища. Здесь объем русловыправительных землечерпательных работ увеличился более чем в 5 раз.

Из приведенных выше случаев видно, что протяжение участков, подлежащих оценке, составляет нередко сотни километров и, если решать задачу обычным путем гидравлических расчетов, то она требует десятков лет только для того, чтобы получить исходные данные, необходимые для такого расчета. Очевидно, что откладывать на такой срок строительство сооружений нереально и требуется новый подход к оценке руслового процесса. В рассматриваемых случаях речь шла о необходимости оценки руслового процесса в условиях регулирования стока, т. е. при создании обстановки, способной коренным образом нарушить естественный ход руслового процесса.

Однако необходимость оценки русловых и пойменных деформаций на участках большого протяжения возникает не только в условиях строительства крупных водорегулирующих сооружений. К этому вынуждает и сама суть руслового процесса. В подавляющем большинстве случаев он выражается в деформациях определенных морфологических образований, создающихся потоком при перемещении им наносов. Находясь под воздействием потока, эти морфологические образования, прежде всего такие, как побочни, излучины русла, разветвленные участки и т. п., развиваются в тесном взаимодействии. Поэтому для выяснения причин деформаций любого створа, любого короткого участка всегда требуется найти его место в пределах существующего на участке целостного морфологического образования, выяснить общий характер его переформирований и взаимодействия со смежными русловыми формами. Поэтому даже и в том случае, когда речь идет о проектировании отдельного сооружения, не влияющего на развитие руслового процесса, всегда возникает задача оценки этого процесса для достаточно большого по протяжению участка реки.

Яркий пример этого — случай на р. Оке. В районе с. Желнино выше г. Дзержинска проектировался водозабор. Была об-

наружена резкая интенсификация руслового процесса на участке водозабора, причем она связывалась с влиянием регулирования стока р. Волги водохранилищем Горьковской ГЭС (Ока впадает в нижний бьеф этой ГЭС, что давало возможность предположить о снижении базиса эрозии этой реки). Морфологический анализ показал, что усиление русловых деформаций на участке в первую очередь связано с происшедшим на нем спрямлением излучин и, следовательно, значительным увеличением уклонов. Таким образом, причиной усиления деформаций русла оказался естественный ход развития руслового процесса.

Необходимость учета участков большого протяжения обусловливается также и тем, что на каждой реке имеются местные базисы эрозии как естественные, так и искусственные. Местные базисы эрозии распространяют свое влияние на участки длиной в десятки километров, и нарушение этих базисов в ходе естественного развития русловых переформирований или в результате искусственных воздействий, естественно, скажутся на всем протяжении этих участков.

В связи с огромными масштабами строительства и большой потребностью в строительных материалах, например таких, как гравий, резко увеличилась добыча этого материала из речных русел. При этом часто забывается о том, что подобные разработки (они, как правило, ведутся на перекатах), если они разрушают местный базис эрозии, часто представленный так называемыми лимитирующими перекатами, ведут к изменению в ходе руслового процесса на участке большого протяжения. Это может нарушить работу множества расположенных на участке сооружений. Подобных случаев можно привести множество, но особенно наглядно это видно на случаях обсыхания водозаборов на р. Днестре ниже Дубоссарской ГЭС и на р. Томи у г. Томска. В обоих случаях причиной обмеления русла являлась разработка ниже расположенных гравийных перекатов с целью добычи строительных материалов.

Рассматривая значение оценки руслового процесса при проектировании отдельных видов сооружений, необходимо отметить следующее.

Особенно велика роль оценки руслового процесса при проектировании и строительстве водозаборных сооружений. Сведения о наносах — непременном компоненте русловых и пойменных деформаций, их составе, крупности, режиме поступления необходимы для оценки качества воды. Вместе с тем водоприемники, обычно строящиеся непосредственно в русле реки или у ее берегов, и насосные станции, проектирующиеся в непосредственной близости от русла, часто на поймах рек, не могут быть удачно расположены, если не будут учтены не только высотные, но и плановые деформации речных русел и пойм. Без учета руслового процесса нельзя разработать системы наиболее

эффективных защитных мероприятий по обеспечению нормальной работы водозабора в случае, если месторасположение его оказывается вынужденным.

Большой интерес к оценке именно плановых деформаций речных русел был проявлен в связи с проектированием и строительством все расширяющейся сети линий высоковольтных передач (ЛЭП), особенно при их переходах через большие реки. В этих условиях для сокращения пролета перехода выгодно располагать опоры ЛЭП в наибольшей допустимой близости к берегам русла и естественно при этом, что устойчивость и надежность береговых опор непосредственно зависят от плановых переформирований речного русла на участке перехода.

Иногда пролеты на переходах оказываются настолько большими, что приходится размещать опоры ЛЭП непосредственно в русле реки, и тогда особое значение приобретает оценка колебаний отметок дна.

Не менее распространенными в последние годы стали переходы через реки трубопроводов, прежде всего таких, как газо- и нефтепроводы. На первый взгляд кажется, что при проектировании и эксплуатации переходов трубопроводов через реки основной задачей является оценка высотных деформаций дна речного русла с тем, чтобы правильно заглубить траншеи подводного перехода и гарантировать отсутствие размывов и обнажения труб, так как последнее нередко ведет к крупным авариям.

Однако решение этой задачи требует учета также и плановых деформаций русла, поскольку изменение отметок дна неразрывно связано с перемещением русловых форм — сползанием гряд, островов, излучин, увеличением их кривизны и т. п., в ходе которого меняется местоположение глубоких и мелководных участков. И в этом случае необходимо учесть общий характер переформирования русла на участках относительно большого протяжения.

Необходимость учета деформаций не только створа сооружений, но и целых участков реки неизбежно возникает и при проектировании мостовых переходов, набережных, причальных, русловыправительных сооружений, при планировании землечерпательных сооружений, при планировании землечерпательных работ как для учета их объема, так и для выбора мест свалок грунта. Известны случаи, когда неудачное расположение свалок не только увеличивало объем землечерпания на перекатном участке, но обусловливало резкое ухудшение судоходных условий вследствие увеличения объема отложения на перекатах, расположенных ниже подвергшихся черпанию, как это случилось, например, на р. Свири.

На поймах стали располагать заводские территории, различные комплексы промышленных и гражданских сооружений, для

чего осуществляются обвалования, поднятие поверхности до незатопляемых отметок, спрямления речных русел. Тем самым резко нарушаются условия протекания потока, и русловой процесс претерпевает коренные изменения. Особенно сложная ситуация возникает при этом в узлах слияния рек, а также в горных условиях, когда приходится учитывать не только собственно русловой процесс, но и влияние притоков. В частности, в горах особо следует учесть влияние селевых выносов не только из притоков, но и из обычно сухих боковых долин.

Без учета русловых и пойменных деформаций, всегда связанных с процессами переотложения наносов, нельзя быть уверенным в надежности проектируемых на пойме осушительных и оросительных каналов, подверженных деформациям своих русел, занесению и заилению.

На р. Полометь (Валдай) ценнейшие сенокосные угодья, расположенные в речной пойме, стали терять свое значение из-за образования тончайшего наилка, покрывавшего поверхность листьев травяной растительности и делающего сено непригодным. Вставал даже вопрос о переселении в связи с этим многих колхозов. Это было вызвано усилением руслового процесса вследствие непродуманного выбора из русла реки крупного материала, ограничивавшего деформации речного русла. В результате этого начался прорыв береговых валов и усиленный вынос наносов на пойму. Случаи порчи сенокосных угодий на поймах, связанные с изменениями в ходе руслового процесса, обусловленными на первый взгляд незначительными факторами, не являются большой редкостью.

933064

В книге автора «Жизнь речного русла» (1955), например, описан случай, имевший место еще в 1897 г. на р. Суре. Пойма этой реки довольно неожиданно начала разрушаться, а расположенные сельскохозяйственные угодья начали портиться. На первых порах это связывалось со строительством плотины на реке для нужд одной из местных фабрик и дало даже основание для возбуждения иска со стороны землевладельцев к владельцам фабрики. Однако при подробном расследовании выяснилось, что причина разрушения поймы заключалась отнюдь не в строительстве этой плотины, а произошло из-за разрушения старой плотины, расположенной много ниже фабричной и игравшей роль местного базиса эрозии. Увеличение скоростей течения вследствие разрушения этой старой плотины и привело к усиленному размыву пойм. Иск был отклонен. Можно было бы привести и ряд других примеров, показывающих важность учета влияния изменений гидродинамических условий потока на устойчивость их берегов.

БИБЛИОТЕКА
Ленинградского
Гидрометеорологического
Института

2. РАЗМЕРЫ ДЕФОРМАЦИЙ РЕЧНЫХ РУСЕЛ И ПОЙМ

Чтобы не быть голословным, утверждая о большой значимости широкого использования данных о русловом процессе при проектировании, строительстве и эксплуатации сооружений на реках, приведем некоторые данные о размерах деформаций речных русел и пойм, происходящих в естественных условиях. Как указывалось в предыдущем разделе, в условиях регулирования стока или при других видах нарушения естественного развития руслового процесса эти деформации оказываются еще большими.

а. Плановые деформации речных русел

Приведем данные о плановых деформациях, собранные по литературным материалам.

Б. К. Штегман (1952) наблюдал на р. Или, как на протяжении 4 лет одна и та же петля русла неоднократно прорывалась, а затем снова развивалась и подвергалась последующему прорыву.

По данным Е. И. Сахарова (1960), на Северной Двине нередки случаи, когда за одно половодье срезаются участки поймы шириной 10—20 м.

Н. И. Маккавеев (1955) оценивает скорость перемещения берегов русла Средней Волги в 6—12 м/год, Среднего Дона 5—8 м/год и Средней Оки 3—5 м/год, иногда до 50 м/год (1955 г.).

По натурным наблюдениям Гидропроекта, левый берег Волги ниже Саратова с 18/IV по 24/IX 1955 г. сместился до 18 м.

Е. В. Шанцер (1955) указывает, что скорость смещения русла Волги на участке ниже Ульяновска составляет 14—60 м/год, Оки ниже Рязани — 1,6—4,2 м/год.

По Б. В. Полякову (1951), русло Волги у Саратова смещается со скоростью до 100 м/год, р. Дона у ст. Потемкинской — со скоростью 60—130 м/год.

И. В. Попов (1963) для Нижней Волги дает следующие скорости плановых деформаций берегов (табл. 1).

На р. Десне у с. Бежицы (г. Брянск) он же обнаружил смещения вогнутого берега, равные 10 м/год.

Натурные наблюдения на р. Куре ниже Мингечаура, выполняемые УГМС Азербайджанской ССР по заданию ГГИ, дали возможность обнаружить перемещение подмываемых берегов до 50 м за половодье.

Г. А. Трегубов (1959) приводит таблицу распределения величин плановых смещений берегов по длине участков рек Амура и Зеи протяжением 200—250 км с незавершенным меандрированием (табл. 2).

Таблица 1

Смещение берегов р. Волги на отдельных участках ниже г. Волгограда

Участок	Среднее смещение берега, м/год		Период наблюдений
	размыв	намыв	
Левый берег главного русла р. Волги против о. Денежный (г. Волгоград на протяжении 9 км) . . .	45	45	1913—52
Верхняя часть Куропаткинской воложки на протяжении 10 км . .	30—40	35—40	1913—52
Нижняя часть Куропаткинской воложки на протяжении 1 км . . .	20—30	20—30	1913—52
Главное русло Волги у о. Сарептский	10	10	1913—40
Главное русло Волги у Отрадненского переката	70—100	—	1913—40
Левые берега Волги на участке Поповицкого переката в вершине излучин на протяжении 6,2 км . .	100—260	20—40 и 440	1954—57
Правые берега в пределах того же участка на подходе к излучине на протяжении 8,5 км	10—140 средняя 30	—	
Левый берег Волги на участке Солодниковских перекатов	7—40	7—10	1913—40
Правый берег Волги у начала Саралевской воложки	50	—	1954—57
р. Волга на участке Соленского водного узла	23—25	—	1913—60
р. Волга, верхняя часть участка Никольское — Астрахань	17	50	1913—60
р. Волга, нижняя часть участка Никольское — Астрахань	10	26	1913—60

Таблица 2

Степень устойчивости берегов рек Среднего Амура и Нижней Зеи

Смещение бровок берегов в плане, м/год	Протяжение участков с данной величиной смещения в % от длины реки		Количество материала, поступающего в поток с 1 км берега, м³
	Амура	Зеи	
До 0,5	11	3	До 2 000
0,5—1,0	23	52	2 000—10 000
1,0—3,0	17	12	10 000—30 000
3,0—5,0	44	20	30 000—50 000
Больше 5,0	5	13	Более 50 000

№ п/п	Участок	Среднегодовой расход, м³/сек.	Длина участка, км	Деформации					
				размыв на участке, м		длина фронта размыва, км			
				средний	наибольший	средняя	наибольшая	суммарная	% к общей длине участка
									р. Ока
1	г. Рязань — р. Проня	480	80	1,2	10	1,8	8,0	57	72
2	р. Проня — с. Юшта	600	62	2,9	7,5	2,2	7,5	34	54
3	р. Юшта — с. Рубецкое	625	100	2,8	16	2,2	6,9	72	72
4	с. Рубецкое — р. Мокша	720	100	1,8	6,0	1,8	5,5	74	74
5	р. Мокша — с. Нарышкино	860	20	2,6	11	1,7	4,6	17	86
6	с. Нарышкино — с. Окшово	900	39	2,8	11	2,0	5,7	34	84
7	с. Окшово — с. Н. Азовка	905	48	2,6	12	2,0	6,3	35	51
									р.
8	Исток реки — с. Калистратиха (1950—1958 гг).	1110	175	15	46	2,0	4	64	37
9	с. Калистратиха — г. Камень-на-Оби (1956—1958 гг.)	1580	280	16	26	2,9	10	208	74
10	с. Огурцево — г. Новосибирск (1901—1940 гг.)	1700	36	2,6	5,6	5,1	11	36	100
11	г. Новосибирск — с. Кожевниково (1901—1940 гг.)	1740	170	4,5	13	4,6	17	110	65
12	с. Кожевниково—р. Томь (1901—1940 гг.)	1800	876	4,4	33	7,1	14	71	82
13	р. Томь — г. Колпашево (1901—1940 гг.)	4720	256	6,5	20	5,3	20	142	56
									р. Иртыш
14	г. Павлодар — г. Урлютюб	880	342	2,6	7,0	4,2	15,7	342,7	100

Обь

21	42	4	7,7	104	60	161	15	34	15	32
14	22	2,7	7,0	236	84	113	14	40	14	32
1,9	—	6,0	—	6,0	16	16	4,6	8	6,0	10
4,1	9,1	3,8	14	85	50	77	4,2	11	5,0	20
3,7	9,1	3,6	7,0	25	29	40	2,5	5,0	6,3	12
6,9	10	4,0	10	100	39	70	4,9	6,2	9,2	12

(1937—1956 гг.)

2,2	5,0	3,5	11,2	274,8	80	80	—	—	—	—

Таблица 3

ном и ограниченном меандрировании

берегов русла							Деформации островов			
намыв на участке, м		длина фронта намыва, м				Длина фронта намыва по отношению к длине фронта размыва, %	размыв, м		намыв, м	
средний	наибольший	средняя	наибольшая	суммарная	% к общей длине участка		средний	наибольший	средний	наибольший
(1879—1926 гг.)										
1,6	47	2,2	6,8	74	43	130	—	—	—	—
2,2	10	2,8	7,2	77	124	230	—	—	—	—
3,2	17	2,2	6,0	96	96	132	—	—	—	—
2,5	14	2,0	5,8	96	96	129	—	—	—	—
4,6	16	2,6	5,8	18	99	104	—	—	—	—
4,4	12	2,5	4,7	38	97	110	—	—	—	—
4,6	15	2,0	5,2	43	90	125	—	—	—	—

Указывается, что наибольшая скорость разрушения падает на волнобой в период подъема и спада воды, на период ледохода приходится 19% обрушенного материала и на период полного затопления берега — 6,5%. Таким образом, по мнению Трегубова, главным агентом являются волновые воздействия, а ледоход в данном случае вызывал относительно небольшие разрушения.

На экспериментальных площадках на р. Амуре у г. Хабаровска средняя полоса смещения бровки берега при размыве за 2 года на обнаженных берегах составила 13,9 м, или около 7 м/год, а на заросших — 7,7 м, или около 4 м/год.

На р. Зее между с. Малой Сазанской и с. Даниловкой отмечены случаи обрушения берега за 1 сутки, охватывающие полосу шириной 10 м при высоте берегов 15—20 м. Сопоставление съемок этого участка русла р. Зеи за 1910—1947 гг. показало, что ежегодный прирост длины фронтов размыва составляет в среднем 40 м/год при суммарной их длине 40 км. Плановое смещение бровок берегов составило в среднем 3,5 м/год, причем в зоне обрывов — 6—7 м/год. Ежегодный выброс песка в реку при подмыве берегов достигает 60—80 тыс. м^3 с 1 пог. км берега.

С. Т. Алтунин (1960) описывает случай, когда на Амударье у г. Турткуль река за 110 суток (с 4/VI по 23/IX 1936 г.) сместилась вправо на 600 м. В 1937—1938 гг. на том же участке за 30—40 мин. была смыта полоса берега шириной 15—20 м. Сопоставление съемок этого участка за 60 лет показало, что участок реки длиной 50 км сместился за этот период вправо на 6 км, а местами до 30 км. В среднем это соответствовало ежегодному смещению 100 м при высоте берега 6 м.

Приведенные выше данные о скорости плановых смещений речного русла в случае подмыва потоком пойменных берегов получены для участков протяжением в сотни километров и поэтому могут приниматься как достаточно распространенные на реках СССР. Из них следует, что размыв берегов на 10—15 м/год в глубь поймы не представляет исключительного явления, достаточно широко распространен на реках СССР и не считаться с ним нельзя.

Действительно, если многие сооружения проектируются на безаварийную работу в течение 50—100 лет, то даже плановые смещения берегов русла в 1 м приобретают существенно важное практическое значение, особенно в случаях меандрирующих рек, когда однонаправленные смещения излучин продолжаются иногда сотни лет.

В табл. 3 приведены более детальные данные по бесприточным участкам крупных рек.

б. Высотные деформации речного русла

Большие переформирования русла, сильно осложняющие работу сооружений на реке, возникают в процессе сползания крупных песчаных грядообразных скоплений в ее русле, получивших название побочней и осередков. В табл. 4 приводятся скорости сползания этих образований. Легко видеть, что надвижение на створ сооружения подобных крупных песчаных масс длиной на больших реках нередко в несколько километров, а высотой 4—6 м и более коренным образом изменяет строение речного русла, способно полностью изолировать сооружение от потока и превратить прежде глубоководный плёс в участок высокого выпуклого берега.

Перемещение крупных побочней в зависимости от колебания стока воды и наносов идет неравномерно от года к году, поэтому скорости их сползания могут существенно превышать или быть меньшими указанных в табл. 4.

Приведем примеры.

На р. Волге у устья р. Самары расположен крупный левобережный отторженный побочень — крупное песчаное сползающее вниз по течению скопление наносов в виде огромной гряды протяженностью около 4 км. Подвалье этой гряды представляет собой глубоководный плёс — разность отметок гребня гряды и наиболее глубокой части подвалья — плёса составляет около 12 м при длине ее около 1 км и ширине глубокой части более 100 м. Вся масса наносов, образующих эти так называемые Аннаевские пески, ежегодно в весеннее половодье сползает вниз по течению, следовательно, перемещается расположенная ниже этого скопления плёсовая лощина. Поэтому если взять какой-либо створ в главном русле Волги ниже этой лощины, то через некоторое время в нем будет наблюдаться постепенное увеличение глубин, происходящее вследствие надвижения описанной плёсовой лощины. Затем глубины начнут резко уменьшаться (примерно на 12 м) в результате надвижения песчаного скопления, а впоследствии будут опять увеличиваться при надвижении расположенного выше него следующего плёса и т. п.

Скорость перемещения Аннаевских песков была оценена в 150 м/год (табл. 4). Но это были данные за маловодный 1921 г. Если же вычислить среднюю скорость их сползания за 1932—1962 гг. (Левин, 1963), когда наблюдались и высокие половодья, то она окажется равной уже 600—700 м/год. На этом же участке имеется правобережный побочень, который перемещается с меньшей, но все же значительной средней скоростью, равной 100 м/год. Выше его расположен глубоководный сползающий плёс (подвалье гряды, расположенной выше по течению), наинизшие отметки дна которого примерно на 1 м ниже

Таблица 4

Сведения о скорости перемещения побочней

Река, перекат (побочень), участок	Скорость сползания, м/год	Автор
Волга — Рязанский перекат	40—520	Б. В. Поляков (1951)
Волга — Аннаевский побочень у г. Куйбышева	150 (1921 г.)	К. И. Россинский и И. А. Кузьмин (1947)
Средняя Волга	100	Н. И. Маккавеев (1955)
Нижняя Волга	50	Б. А. Апполов, Н. И. Маккавеев (1955)
Амур	200—600	Г. С. Башкиров (1956)
Волга — Купоросный перекат (1913—40 гг.)	11	И. В. Попов (1963)
Волга — Бекетовский перекат	200	То же
Волга — Отрадненский перекат (1913—40 гг.)	90	„
Волга — побочень о. Денежный (1952—56 гг.)	200	„
Волга — Волгоград — Красноармейск, средняя по участку (1952—61 гг.)	170	„
Волга — Нижне-Солодниковский перекат (1957 г.)	1000	„
Волга—Черноярский перекат (1913—40 гг.)	185	„
Волга — Верхне-Соленский перекат (1913—60 гг.)	200	„
Волга — побочень у с. Вязовая Грива (1913—60 гг.)	110	„
Рейн	270	По данным Грабенау, В. В. Поляков (1951)
Дунай	200	Б. В. Поляков (1951)
Обь, район г. Барнаула (1898—63 гг.)	100—900	И. В. Попов (1962)
Ока, верховья (1926—48 гг.)	50	И. В. Попов (1964)
Висла среднее и нижнее течение (1904—44 гг.)	100	И. В. Попов (1964)
Даугава у г. Риги	12—60	В. В. Ромашин (1964)
Северная Двина, Кама	50—250	Р. С. Чалов (1963)

дна плёсовой лощины Аннаевских песков. Длина этой плёсовой лощины около 600 м, ширина 100 м.

Приведенные скорости сползания крупных песчаных скоплений отнюдь не являются исключительными, что видно из другого примера — перемещения побочня на р. Оби у г. Барнаула (данные наблюдений ГГИ).

На этом участке в русле р. Оби расположен крупный сползающий побочень. Схема его движения показана на рис. 2. Она освещает ход сползания побочня за период с 1958 по 1962 г.

На рис. 2 видно, что за период с марта 1958 г. по март 1959 г., т. е. за одно половодье, низовая оконечность побочня

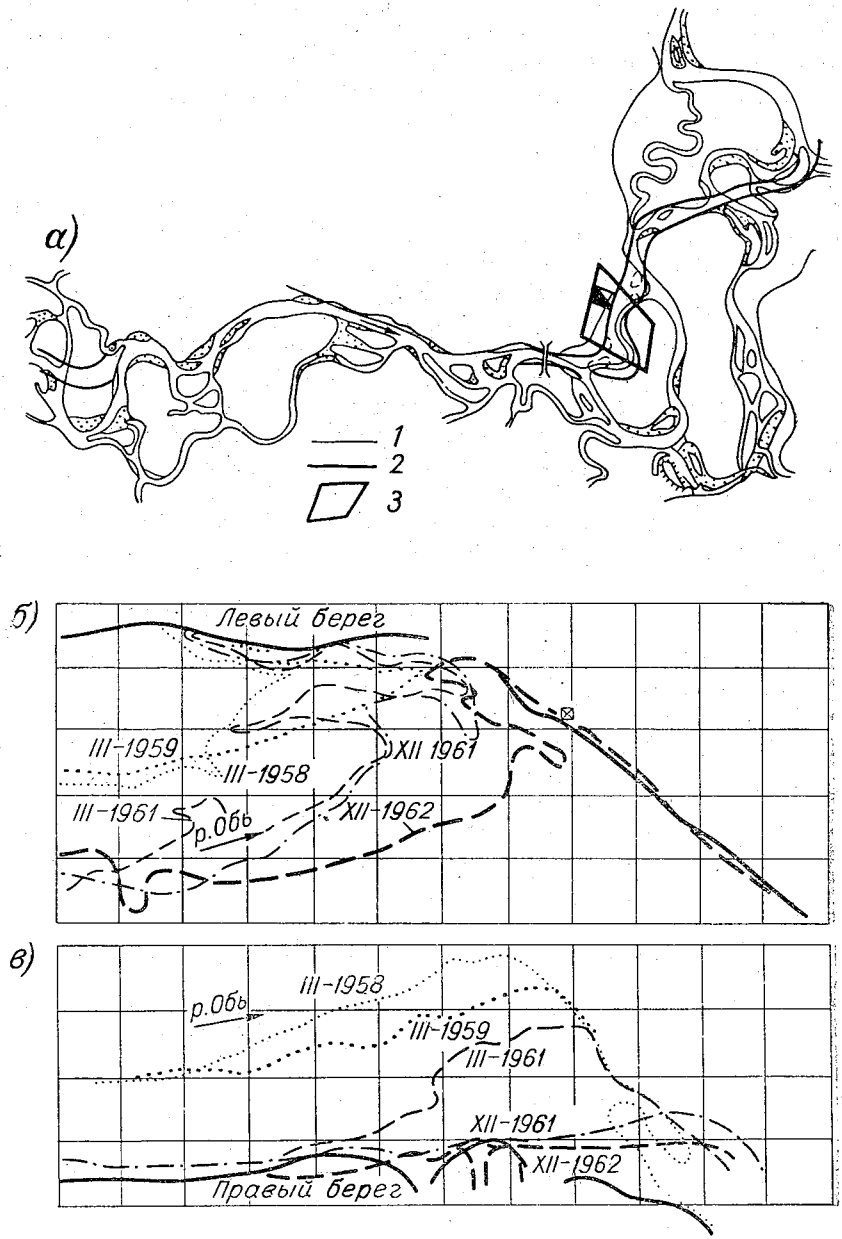


Рис. 2. Сползающий побочень на р. Оби в районе г. Барнаула.

1 — 1897 г., *2* — 1956 г., *3* — участок детальной съемки.
а — общая схема, *б* — деформации левого берега, *в* — деформации правого берега;.

спустилась вниз по реке на 530 м. С марта 1959 г. по март 1961 г., т. е. за 2 года, сползание замедлилось и низовая оконечность побочня спустилась только на 200 м, т. е. 100 м за одно половодье. С марта 1961 г. по декабрь 1961 г. (одно половодье) скорость сползания вновь увеличилась почти вдвое (200 м за половодье), при этом низовая часть стала одновременно смещаться вправо, к середине реки.

С декабря 1961 г. по декабрь 1962 г. ухвостье побочня продвинулось вниз по реке еще на 250 м. Таким образом, за 4 года побочень сполз вниз по течению на 1,2 км.

В ходе сползания побочня между вытянутой его низовой оконечностью и берегом русла образовался затон. Этот затон, открывающийся в расположенный ниже побочня плёс, также претерпевает существенные изменения. Так, с марта 1958 г. по март 1959 г. верховая оконечность затона сместилась вниз по течению на 150 м, а с марта 1959 г. по март 1961 г. спустилась еще на 170 м. В последующий год она несколько поднялась вверх по реке (примерно на 200 м), но прежнего положения (1958 г.) не достигла. После половодья 1962 г. затон резко обмелел и его верховая оконечность спустилась сразу почти на 1 км (950 м).

Закономерно сползал вниз и плёс, расположенный ниже побочня. Створ наибольших глубин сместился вниз по течению за период с 1958 по 1962 г. на 500 м, причем наибольшие глубины уменьшились на 2 м.

Расположенный у противоположного берега и несколько ниже по течению другой побочень (правобережный) за 1958—1962 гг. сместился вниз по течению на полную свою длину — 1,5 км. Наряду со сползанием описываемого левобережья побочня происходило его расширение в сторону правого берега. За период с 1958 по 1962 г. он расширился почти вдвое (табл. 5).

Таблица 5

Период	Скорость смещения побочня в сторону правого берега, м
Март 1958 — март 1959	0
Март 1959 — март 1961	250—300
Март 1961 — декабрь 1961	100—150
Декабрь 1961 — декабрь 1962	0

В связи с описанными переформированиями фарватер за 1958—1962 гг. сместился вправо на 2—3 ширины русла. Одновременно со сплозанием правобережного побочня нарастал и

темп размыва ранее прикрываемого им правого, вогнутого берега реки (табл. 6).

Таблица 6

Период	Средняя из наибольших на участках размыва скорость смещения бровки берега, м/год
1947—1957	20
1958—1961	25—30
1962—1963	60

О высотных деформациях дна речного русла дает представление табл. 7. Цифры, помещенные в ней, также свидетельствуют, что и с этими величинами нельзя не считаться.

Таблица 7

Изменение дна на перекатах судоходных рек

Река	Участок реки	Колебания отметок дна на перекатах за навигацию, м
Урал	г. Уральск — с. Индер	3,0
Дон	р. Цымла — г. Северский Донец . .	2,3
Днепр	г. Киев — г. Кременчуг	2,1
Волга	пос. Ураковский — пгт Камское Устье	1,8
Кама	Устье Вишеры — устье Чусовой . .	1,3
Белая	г. Уфа — устье	0,9
Ветлуга	пгт Ветлужский — устье	0,7
Сухона	г. Тотьма — Брусенец	0,1
Амударья	г. Чарджоу — Дарганата	1,5

в. Поступление и расходование наносов в ходе деформаций речного русла

Происходящие в руслах и на поймах рек деформации всегда связаны с поступлением в поток и расходованием из него наносов.

Проиллюстрируем это цифрами.

На участке р. Волги между Волгоградом и Астраханью до сооружения ГЭС им. XXII съезда КПСС соотношения между объемами наносов, приносимых на участок, и местными объемами деформаций речного русла были следующие.

На участок в створ Дубовки река в среднем многолетнем приносит около 14 млн. м^3/год взвешенных наносов. Приход донных наносов по гидрометрическим данным составляет всего около 0,2 млн. м^3/год, т. е. в сумме на участок поступает 14,2 млн. м^3/год наносов.

Вместе с тем в результате размывов берегов в реку на участке Волгоград—Астрахань поступает 43 млн. м³/год взвешенных и донных наносов (размыв мелкозернистой пойменной и крупнозернистой русловой фаций аллювия, слагающих пойменные берега).

Вынос наносов через замыкающий участок створ по гидрометрическим данным составляет 14 млн. м³/год.

На намыв берегов русла и островов расходуется около 21 млн. м³/год наносов, а на пойме осаждается 22 млн. м³/год, что дает ежегодный слой наилка на поверхности поймы порядка 2—3 мм/год.

Из приведенных цифр видно, что объем наносов, поступающих в поток от местных размывов, дает 75% суммарного их прихода, и принос наносов с верховых участков в данном случае составляет только 25% суммарного прихода. Примерно 40% общего объема наносов, полученных рекой на участке, расходуется на намыв берегов (формирование новых прирусловых участков поймы), 40% — на образование наилка в глубине поймы и 20% выносится в дельту.

Поступление и расходование наносов внутри участка Волгоград — Астрахань идет неравномерно, что еще более усложняет их баланс по длине участка. Это видно из данных табл. 8.

Таблица 8

Распределение объемов размыва и намыва берегов русла р. Волги между Волгоградом и Астраханью за период 1913—1960 гг.

Участок	Длина участка, км	Размыв берегов в тыс. м³/год на 1 км размывающихся участков	Намыв берегов в тыс. м³/год на 1 км намывающихся участков
г. Волгоград — г. Красноармейск . .	45	500	81
г. Красноармейск — пос. Каменный Яр	95	342	164,5
пос. Каменный Яр — с. Копановка .	165	226	182
с. Копановка — г. Астрахань . . .	210	82,3	103

При этом на всех участках, за исключением участка Каменный Яр—Копановка, преобладает размыв правых берегов русла и лишь на этом участке объем размыва правого берега преобладает над размывом левого берега, дающем 127 тыс. м³/год на 1 км длины размываемых участков.

Размыв правого берега (на 1 км длины размываемых участков) оказался по участкам следующим:

г. Волгоград — г. Красноармейск . . . . . 345 тыс. м³
г. Красноармейск — пос. Каменный Яр . . . . 220 тыс. м³
с. Копановка — г. Астрахань . . . . . 47 тыс. м³

В табл. 9 приведены соотношения элементов поступления и расходования наносов по длине р. Оби, вычисленные для участка исток—Новосибирск (устье р. Бердь) за 1951—1958 гг., а для участка Новосибирск—Колпашево за 1904—1948 гг.

Таблица 9

Элементы прихода и расходования наносов по длине р. Оби между с. Огурцево (Новосибирская ГЭС) и г. Колпашево, установленные по гидрометрическим данным и сопоставлению карт

Элементы прихода и расходования наносов	млн. м³/год	% от суммарного поступления	Тыс. м³/год на 1 км деформирующегося участка
Приход наносов			
Поступление взвешенных наносов через верховой створ участка	9,0	33	—
То же по притокам	2,2	8	—
Размыв берегов русла			
левого	5,6	20	16
правого	8,2	30	23
суммарный	13,8	50	39
Размыв берегов островов	2,4	9	7
Суммарный размыв берегов	16,2	59	46
Всего учтенный на участке	23,4	100	
Расходование наносов			
Вынос взвешенных наносов через замыкающий створ участка	8,6	31	—
Намыв берегов русла			
левого	3,8	14	18
правого	6,5	24	30
суммарный	10,3	38	48
Намыв берегов островов	4,1	15	19
Суммарный намыв берегов	14,4	53	67
Всего учтенный на участке	23,0	84	
Разность учтенного прихода и расходования наносов	4,4	16	

В дополнение к этим данным можно привести сведения об объемах поступления наносов при размыве берегов русла, собранные Н. И. Маккавеевым (1955) по различным литературным источникам, а для р. Волги — на основе совмещения планов разных лет съемки на участках перекатов, обследования некоторых участков в натуре и актов лесхозов о ежегодных потерях лесных площадей на пойме в результате подмыва берегов (табл. 10).

Приведенные выше данные об объемах поступления и расходования наносов на реках показывают существенное значение учета местных деформаций русла при оценке распределения

Таблица 10

Объемы поступления наносов от размыва берегов

Река, участок	За какой период (годы)	Объем размыва на 1 км длины русла, м³	В целом на участке, млн. м³
Средняя Волга	1945, 1946, 1947	11 400	—
Нижняя Волга		36 100	
Волга на участке от г. Горького	1945, невысокое половодье	—	63
до г. Астрахани	1946, среднее половодье	—	71
	1947, высокое половодье	—	77
Средний Иртыш и Нижний Иртыш	В среднем за год	—	10
Средний Днепр	1940	12 000—15 000	—
Луара	1856 (маловодный)	—	2,5
	1875 (средний)	—	3,2
	1865—1859	3 900	9,1
Нижняя Миссисипи	В среднем за год	55 000	—

наносов по длине рек, без чего невозможна их надежная оценка для нужд гидротехнического проектирования.

Подведем итоги. В строительных нормах, действующих в СССР, указываются ориентировочные сроки службы сооружений. Предельные сроки службы сооружений без потери их эксплуатационных качеств или так называемая долговечность сооружений устанавливается в зависимости от их значимости по трем основным градациям. Долговечность сооружений первой степени должна превышать 100 лет, второй степени должна составлять 50—100 лет, третьей степени — 20—50 лет. В особо ответственных случаях, как, например, при сооружениях крупных плотин, вероятность появления некоторых гидрологических факторов (например, максимальных расходов) оценивается обеспеченностью 0,01%, или 1 раз в 10 000 лет.

Таким образом, при проектировании сооружений на реках приходится считаться с величинами деформаций, на осуществление которых требуются во всяком случае десятилетия и столетия. Поэтому даже кажущиеся на первый взгляд не столь существенными годичные деформации речного русла приобретают серьезное значение при их оценке за столь длительные промежутки времени.

Все эти случаи говорят о следующем.

1. Русловой процесс необходимо учитывать и предвидеть ход его развития. Это важно не только при новом строительстве на реках и в их поймах, но и при любых мероприятиях, пусть даже на первый взгляд и несущественных, но могущих оказать отри-

цательный эффект на условия использования рек в самых различных целях.

2. Важная особенность современных требований к оценке русловых и пойменных деформаций, возникающих при проектировании и эксплуатации сооружений на реках, сводится к тому, что данные только об отдельных створах или коротких участках перестают удовлетворять практику. Во многих случаях требуется оценка общего характера переформирований речных русел и пойм на участках большего протяжения, своего рода фоновый прогноз подобных деформаций и для естественных условий и, что особенно важно, в условиях регулирования стока рек.

3. Учитывая неуклонное возрастание роли перспективного планирования развития нашего социалистического хозяйства, подобные оценки и фоновые прогнозы оказываются совершенно необходимыми уже на ранних стадиях проектирования, в условиях, когда проектировщик еще не имеет возможности затратить значительные средства и время, обычно требующиеся для детальных исследований. Это положение с особой настоятельностью требует создания методов оценки руслового процесса при минимальных исходных материалах и создания наиболее рациональных, быстрых и не требующих капитальных затрат способов осуществления полевых работ. Последнее приобретает особое значение для все расширяющегося использования еще слабоизученных территорий, в частности, Средней Азии, Сибири, Дальнего Востока и др.

3. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ О РАЗВИТИИ И СОСТОЯНИИ ТЕОРИИ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

а. Сложность проблемы

Из приведенных выше фактов следует, что русловой процесс выражается в непрерывных видоизменениях морфологического строения речного русла, происходящих под действием текущей воды, причем весьма различно в разных природных условиях.

Многочисленные факты неполноценного учета или даже игнорирования руслового процесса при проектировании и эксплуатации самых разнообразных сооружений на реках и особенно при разработке и осуществлении защитных мероприятий в значительной мере свидетельствуют о том, что состояние теории руслового процесса еще далеко не удовлетворяет запросам практики.

Действительно, если для детальных расчетов отдельных сторон руслового процесса, особенно для участков непосредственного влияния сооружений на переформирования речного русла, на которых он развивается в явных формах и весьма

интенсивно, и имеются расчетные методы и приемы оценки, то как только встает вопрос об оценке переформирований сколько-нибудь значительных по протяжению речных участков, современные приемы расчета оказываются недостаточными, дающими очень схематизированное решение. Вместе с тем в современных условиях эта вторая задача, как было показано в предыдущих разделах, приобретает особое значение, поскольку переформирования русла и особенно коренное их изменение, обусловленное регулированием стока, преобразующим основные факторы руслового процесса, неизбежно затрагивают интересы множества отраслей народного хозяйства, вызывая и коренные изменения условий эксплуатации рек и речных пойм.

Удовлетворительные результаты дает расчет ряда гидравлических явлений в потоках при заданных граничных условиях. Однако еще очень спорными являются приемы расчета деформаций по рассчитанным таким путем гидродинамическим характеристикам. Это связано, с нашей точки зрения, прежде всего с тем, что в основе этих расчетов лежат не только схематизированные данные о структуре потоков, но и грубо осредненный балансовый метод в виде, не учитывающем особенностей структурных форм движения наносов, прежде всего их грядового движения, а также закономерностей плановых деформаций русел и процессов обмена наносами между руслом и поймой.

Именно поэтому в тех случаях, когда структурность потока и движения наносов приобретает второстепенное значение, а деформации русла носят ярко выраженный однонаправленный характер, результаты их расчетов оказываются удовлетворительными. Можно, по-видимому, считать достаточно надежными расчеты местных размывов в нижних бьефах сооружений и значительно менее удовлетворительными результаты расчетов процессов, связанных с хорошо выраженными явлениями переотложений наносов, когда проблемы структурности потока и движения наносов выступают на первый план — оценка деформаций на всем участке зоны суточного регулирования и всего нижнего бьефа, в зоне переменного подпора и т. д.

Оценка плановых деформаций речного русла еще крайне несовершенна и зачастую просто игнорируется, а весь расчет сводится к оценке высотных переформирований. Между тем это два взаимосвязанных процесса, которые необходимо учитывать одновременно.

Несовершенство теоретических основ, порождающее недостаточность приемов инженерного расчета, сказывается, естественно, на методике полевых исследований и изысканий и лабораторных экспериментах. Состояние методики полевых исследований очень образно характеризует Э. И. Роот, обобщивший в своем докладе на конференции изыскателей Гидропроекта, проведенной в апреле 1963 г. в Ленинграде, опыт работ более,

чем сорока экспедиций Гидропроекта — организации, обладающей самым крупным в мире изыскательским аппаратом. Э. И. Роот сказал, что, если бы собрать вместе всех изыскателей, то они попали бы в положение строителей Вавилонской башни, которые оказались говорящими на разных языках, настолько разноречива и различна методика проведения полевых изысканий. Вместо научно-обоснованной программы изысканий нередко приходится встречать набор более или менее стандартных работ, состав которых далеко не всегда обосновывается конкретными задачами.

Учитывая опыт работ ГГИ по оценке руслового процесса для нужд гидротехнического проектирования, можно утверждать, что в настоящее время еще нет четких указаний, регламентирующих выбор места расположения сооружений по условиям развития русловых и пойменных деформаций, тем более применительно к особенностям развития руслового процесса в различных природных условиях. В отношении методов расчета этих деформаций обычно приходится прибегать к решениям, обоснованным опытом и интуицией.

При разработке систем защитных мероприятий весьма слабо учитываются природные тенденции развития руслового процесса, его местные особенности, в результате чего эти мероприятия оказываются либо малоэффективными, либо чрезвычайно громоздкими и дорогостоящими.

Казалось бы подобное положение дел должно было привести к большому числу аварий и значительному экономическому ущербу, вызванному неудачным проектированием и обусловившему непредвиденные осложнения при эксплуатации сооружений. Однако надо иметь в виду, во-первых, тот факт, что проектирование ответственных сооружений выполняется обычно специалистами, имеющими очень большой личный опыт и развитую интуицию в отношении оценки влияния руслового процесса. Во-вторых, надо иметь в виду, что непредвиденные осложнения, вызываемые развитием руслового процесса, стали настолько привычными, что редко относятся к неудачам проектирования и расцениваются как стихийное бедствие, предусмотреть которое нельзя, т. е. расцениваются как неизбежное зло. Несовершенство теории руслового процесса имеет свои объективные причины.

Первая из них — сложность и многогранность самой проблемы, допускающая возможность ее изучения в самых различных аспектах, а также возможность самостоятельного изучения отдельных ее сторон и частных проявлений.

Сложность проблемы обусловлена следующим.

Ареной деятельности современного потока являются речные долины, созданные в течение нередко нескольких геологических эпох и, следовательно, носящие на себе отпечаток работы потоков, существовавших в совершенно отличных от современных

физико-географических и, в частности, гидрологических условиях, и следы деятельности многочисленных и изменявшихся во времени эндогенных и экзогенных факторов. Вследствие этого для решения проблемы, в первую очередь для объяснения происходящих на реке морфологических преобразований и выявления схем их развития, необходимо привлекать геологические и геоморфологические данные (происхождение долин, история их развития и смена главнейших факторов их формирования, строение склонов и дна, данные об аллювии, отражающем деятельность потока, тектонические и неотектонические движения и т. д.). Все это вопросы дисциплин естественноисторического цикла.

Действующей силой руслового процесса является воздействие перемещения воды. Поэтому решение проблемы требует привлечения широкого комплекса данных гидравлики и гидромеханики, а также и механики грунтов. Легко видеть, что это совсем другой цикл дисциплин — дисциплин физико-математического направления.

Поскольку деятельность воды в разные фазы водного и ледового режимов резко различна, а следовательно, меняются условия поступления и изъятия из потока наносов, т. е. условия их переотложения (транспорта), а значит, и деформаций речных русел и пойм, то привлечение к решению проблемы гидрологических и метеорологических данных оказывается особенно важным. Последние особенно необходимы для расчетов волнения, эоловых процессов, нередко соседствующих с русловыми, термических явлений и т. д. В этом случае речь идет о науках географо-геофизического цикла.

Таким образом, для решения проблемы руслового процесса требуются данные и методы многих научных дисциплин самых различных направлений. Вместе с тем до недавнего времени исследования динамики речной сети и, в частности, речного русла велись в значительной мере разрозненно, при отсутствии общей платформы. Поэтому хотя достигнуты отличные решения отдельных частных инженерных задач, но попытки их объединения в целостную систему оказываются еще весьма затрудненными, не разработана методика фоновых прогнозов русловых и пойменных переформирований.

б. Геоморфологические исследования

Среди геоморфологических проблем наибольшее значение для исследования современного руслового процесса, особенно в условиях регулирования стока, когда встает задача его оценки для участков большого протяжения или для целых речных систем, имеют: схема развития эрозионного рельефа (речных долин), в частности, продольного профиля рек, происхождение тер-

рас, оценка влияния ограничивающих процесс факторов, а равно и других природных факторов, например, тектоники, колебаний базисов эрозии и др.

Охарактеризуем кратко состояние этих проблем.

В геоморфологии до сравнительно недавнего времени господствовали идеи Дэвиса, по сути дела развивающие эволюционную схему развития рельефа, предложенную еще в 70-х годах И. Д. Черским.

Основная идея схемы Дэвиса сводится к тому, что развитие речной долины проходит ряд последовательных стадий, образующих при данном постоянном положении базиса эрозии замкнутый цикл врезания в начальной стадии формирования долины до почти полного его прекращения в конечной. Она применима только как общая схема развития рельефа суши после поднятия материка на значительную высоту и при условии, что потоки возникают уже после этого поднятия и затем начинают формировать рельеф этого материка. Эти ограничения показывают, что она не может быть универсальной и применима лишь для ограниченного числа случаев.

Уже вскоре после своего появления она становится в противоречие с накапливаемыми геологическими и геоморфологическими фактами. Еще В. В. Докучаев (1878) писал: «Далеко не все Слепороды, Супои, Оржицы, Золотоноши, Ирклеи, Голтвы и проч. могут похвастаться своим цветущим прошлым, силой, мощностью и энергией свой молодости. У многих из них, наверное, никогда не было ничего подобного, не было ни детства, ни юности, ни возмужалости (стадии развития рек по Дэвису. — *И. П.*) — они родились стариками, у них никогда не хватало сил прорыть для своего ложа даже лёсс, — у них в сущности нет своего русла и определенных берегов, нет собственного дома, — они воспользовались и до сих пор довольствуются теми, уже готовыми, блюдцами, ложбинами и западинами, которые остались после ледника и только больше заболотили их... Словом если желательно точно решить вопрос, имеем ли мы дело с умирающей рекой или же она никогда не пользовалась настоящей, действительной жизнью, необходимо поближе и повнимательнее изучить рельеф и геологическое строение ее долины».

Рядом последующих исследований подтверждена возможность формирования рек на любой стадии развития рельефа. Кроме рек, названных Докучаевым, таково большинство рек лесных равнин СССР, образовавшихся после великого оледенения и не проходивших стадий развития Дэвиса (реки Нева, Волхов, Вуокса и др.). Таким образом, фактор времени, кладущийся Дэвисом в качестве главенствующего в схему развития рельефа, далеко не всегда является ведущим. Разнородность геологического строения территории, изменчивость климатического фактора, определяющего работу текущей воды, приводит

к разновременности разработки земной поверхности текущими водами и как следствие к повсеместным отклонениям от схемы Дэвиса, сохраняющей свое значение лишь для условий горных стран и в масштабах геологических эпох.

Не оправдывает себя и положение Дэвиса о том, что для всех стадий развития реки характерна закономерная схема расположения участков размыва, переноса и отложения материала по длине реки. В верховьях реки, по представлениям Дэвиса, всегда преобладает размыв и врезание русла, в среднем течении транзит наносов, а в нижнем их аккумуляция. При этом все эти участки перемещаются вверх по течению, т. е. развитие продольного профиля осуществляется путем пятящейся (регрессивной) эрозии. Дэвис признавал, что нормальный ход развития реки и ее продольного профиля может быть нарушен в любой его стадии движениями земной коры. При этом он считал, что между изменениями высотного положения базиса эрозии и направлением деформаций существует всегда однозначная связь — повышение базиса эрозии ведет к преобладанию явлений аккумуляции, понижение — к преобладанию явлений размыва.

И опять-таки накопленный геоморфологический и гидрологический материал свидетельствует об умозрительности этих положений и о том, что они далеко не универсальны. Известно, что столь закономерное чередование участков размыва, транзита и отложения наносов свойственно лишь может быть горным рекам и их распределение по длине равнинных рек значительно более сложно и подчинено влиянию многочисленных факторов.

Е. В. Шанцер (1951) установил, что все типы аллювия не отражают последовательные стадии развития речной долины и зависят, во всяком случае для крупных рек, прежде всего от особенностей гидрологического режима.

Б. В. Поляков (1951), а в последующем Н. И. Маккавеев (1955) показывают огромную роль особенностей гидравлики потока в приустьевой его части, особенно в период половодья, обусловленных морфологией речной долины и характером приточности. Эти особенности вызывают неоднозначность связи изменений высотного положения базиса эрозии и направления деформаций речного русла. Именно ими объясняется переуглубление многих приустьевых участков рек, например, Черноморья, побережья Франции и др. Русло р. Волги на приустьевом участке по этим причинам переуглублено на 36 м и на всем ее нижнем участке наблюдается продолжающийся размыв, в то время как выше лежащий участок намывается (Н. И. Маккавеев, 1955). Размыв наблюдается и на многих приустьевых участках притоков р. Волги, где он обусловлен несовпадением сроков прохождения половодья на главной реке и притоке.

Создание крупных водохранилищ и связанных с этим переформирования русла в зоне выклинивания подпора и нижнего

бьефа также подтверждают обусловленное многочисленными местными факторами отсутствие однозначной связи между изменениями в положении базисов эрозии и направлением деформаций русла и поймы. Этот вопрос был рассмотрен выше и нет нужды повторяться.

Очень большую роль в развитии продольного профиля играют местные базисы эрозии, нередко препятствующие распространению регрессивной эрозии по всему протяжению реки.

Надо отметить, что уже сам Дэвис, первоначально придававший большое значение явлениям перехватов верховьями одних рек верховьев других, в нормальном ходе развития эрозионного цикла уже в 1909 г. был вынужден искать для их объяснения другие причины (изменение водоносности рек, тектоника и т. п.), на что, например, указывает Дьюри (1954 г.), а последующие исследователи [М. П. Рудский (1905), А. П. Павлов (1898), В. В. Докучаев (1949), Н. С. Щукин (1934), В. П. Мирошниченко (1946), С. Н. Никитин (1900), П. С. Макеев (1941), А. А. Вирский (1952), А. С. Козменко (1954), Н. И. Маккавеев (1955), за рубежом Хортон, Дьюри (1954) и др.] выдвигают положение о зонах отсутствия эрозии на приводораздельных пространствах и невозможности перехватов в результате нормального эрозионного цикла.

Н. И. Маккавеев (1951, 1955) показывает, что большинство рек увеличивает свою длину за счет отложений в устьевых участках, но не путем пятящейся эрозии. Например, годовой прирост длины р. Урала составляет 82 м, р. Сырдарьи — 97 м, р. Куры — 20—30 м, р. Миссисипи — 80—350 м, Янцзы — 60—83 м. Он же указывает на возможность нарастания водоразделов и, как следствие, прекращения пятящейся эрозии, даже если она и наблюдалась. Эоловые наносы на р. Буге дают прирост высоты местности на 20 см в столетие. В Мукдене за 2000 лет слой почво-грунта нарос на 2 м. Накопления органического вещества составляют 1,2—1,3 см в год. Вместе с тем эрозионный смыв дает величину порядка 0,1 мм в год.

Отдавая должное идее эволюции рельефа, приходится все же признать, что безоговорочное принятие схем Дэвиса как универсальных, что прежде всего было связано с ограниченностью натурных материалов, не могло не сказаться отрицательно на приложении геоморфологических выводов и положений к исследованию современного руслового процесса. Ее кажущаяся универсальность не способствовала до недавнего времени детальному исследованию речных долин и более тесной увязки схем развития речных долин с главнейшим его фактором — гидрологическими условиями территорий.

Лишь в последнее время наметилось сближение геоморфологических и гидравлических точек зрения главным образом благодаря работам Н. И. Маккавеева (1955), Г. И. Горецкого

(1948), Н. А. Ржаницына (1959), Е. В. Шанцера (1951) и ГГИ [имеется в виду монография «Русловой процесс» под ред. Н. Е. Кондратьева (1959)].

В частности, особое значение имеет выделение Е. В. Шанцером современного и древнего аллювия, позволяющее на основании их изучения детально анализировать историю развития современного руслового процесса и его связи с определяющими факторами. Это обеспечивает возможность детального анализа условий формирования типов речных русел и пойм на любых участках рек и тем самым учет разнообразных местных условий, что особенно важно для создания надежных основ полноценного решения инженерных задач.

Для разработки методов анализа формирования речных долин и русел предстоит сделать еще очень многое, так как ряд важнейших для оценки руслового процесса моментов еще далеко не выяснен. Даже в самой схеме формирования речной долины многое остается еще неясным.

Факты резкого несоответствия размеров многих речных долин возможностям современного речного потока, протекающего по ним, еще в 1934 г. И. С. Щукин называл «мучительной загадкой», как и факт прогрессирующего по мере врезания потока сужения долины.

Вопросу резкого несоответствия размеров долин и протекающих по ним современных речных потоков посвящена работа Дьюри 1954 г.

Дьюри связывает это явление с прогрессирующим уменьшением стока. Таких же воззрений придерживается и А. С. Козменко (1954). Существуют и другие точки зрения на проблему сужения долины по мере врезания потока. Например, это явление объясняется тем, что по мере врезания русла и роста высоты подмываемых склонов у их подножия скапливается все большее количество материала в виде обвалов, оползней и конусов выноса, препятствующих плановым деформациям. Связывается это и с уменьшением уклонов по мере врезания и ослаблением работы потоков. Иногда высказываются предположения, что по мере врезания поток, размывая толщу рыхлых отложений и углубляясь в коренные породы, прекращает свои плановые деформации. Последнее предположение представляется очень маловероятным, так как имеются многочисленные случаи, когда в связи с врезанием потока до пород, слабо подвергающихся размыву, плановые деформации усиливаются, а не ослабевают.

Наконец, далеко не ясен процесс образования надпойменных террас. Как следует из приведенного выше описания формирования речной долины, аккумулятивные террасы рассматривались как прежние поймы, переставшие затопляться вследствие врезания потока. Тем самым предполагается, что каждая над-

пойменная терраса сложена одновозрастным аллювием, а уступы террас являются стратиграфическими границами разновозрастных его толщ.

Однако многочисленные геологические разрезы речных долин, полученные в связи с массовым развитием гидротехнического строительства, привели к довольно неожиданным выводам. Д. Н. Боровиков, М. Г. Кипиани, А. Д. Колбутов (1960), И. Г. Кокешко и А. Д. Колбутов (1960) обнаружили, что надпойменные террасы часто оказываются сложенными переслаивающими разновозрастными толщами и, следовательно, прямой связи между отметками поверхности террас и сроками формирования слагающих толщ отложений не выявляется, она свойственна только современным поймам и современному аллювию. Только в современных поймах обнаруживается устойчивая их высота по длине реки и уклоны поверхности, соответствующие уклонам потока (рис. 3). Поверхности же террас обычно залегают горизонтально, причем относительные их высоты увеличиваются вниз по течению реки, возрастает в этом же направлении порядковый номер террас; к низовьям высокие террасы отступают от реки и сливаются со ступенчатыми склонами водоразделов. Число надпойменных террас от верховьев к среднему течению увеличивается, а затем уменьшается вниз по течению, наблюдаются значительные колебания их высот относительно уреза современного потока, т. е. имеет место неустойчивость высот террас по длине реки. При этом большие превышения надпойменных террас над уровнем поверхности поймы приурочены к переломам и ступеням продольного профиля (здесь уровень поверхности поймы совпадает с отметками нижней надпойменной террасы). Пойма представлена на таких участках скульптурными или смешанными аккумулятивно-эрозионными участками. Надпойменные террасы (их бывает до 6—10) часто представляют собой огромные равнинные пространства — днища и склоны ложбин стока (проходных долин) — озеровидных расширений, лиманов, заливообразных понижений.

Таким образом, надпойменные террасы не являются стратиграфическими эталонами — их уступы не разграничивают разновозрастные толщи (рис. 3), это многоярусные (разновозрастные слои) образования. Все это ставит под вопрос чисто речное происхождение террас, которые, по-видимому, обычно являются озерными образованиями. При этом указанные авторы считают, что озеровидные расширения могли создаваться в ходе циклических изменений водности в период после сброса флювиогляциональных вод, цикличности, хорошо показанной в работах Л. С. Берга, М. С. Эйгенсона, И. В. Максимова, А. В. Шнитникова. Следовательно, для их образования не требовалось однонаправленного убывания водности, как это утверждает Дьюри и др.

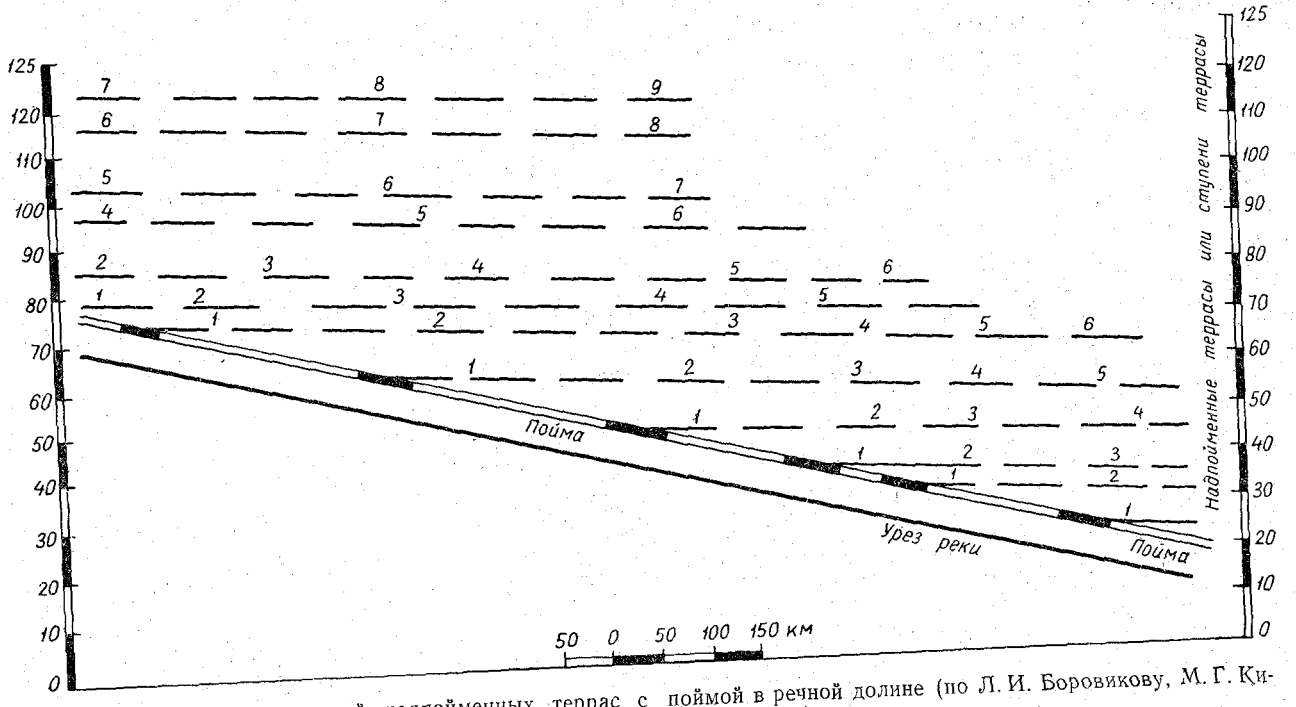


Рис. 3. Схема соотношений надпойменных террас с поймой в речной долине (по Л. И. Боровикову, М. Г. Киллиани и А. Д. Колбутову).

В последние годы некоторые геоморфологи [особенно К. И. Геренчук (1960), С. К. Горелов (1963), А. П. Рождественский (1963), Г. Я. Гвин (1963)] большое внимание уделяют выявлению влияния на деформации речного русла тектонических движений. В их работах тектонические движения признаются чуть ли не решающим фактором, определяющим тот или иной тип современного руслового процесса. Так, например, свободное меандрирование связывается с участками опускания земной поверхности, ограниченное меандрирование — с поднимающимися участками. Такая позиция практически игнорирует вопрос о несопоставимости величин колебаний земной поверхности и деформаций, обусловленных изменениями водного режима и стока наносов, т. е. упускает из вида существенность главнейших факторов руслообразования. Кроме того, в существующей постановке вопрос о влиянии тектоники, по сути дела, сводится к рассуждениям о воздействии на тип транспорта наносов (руслового процесса) ограничивающих условий. Действительно, влиянием этих условий можно объяснить те же явления, которые связываются с тектоникой, допустив при этом полное отсутствие колебательных движений.

Это отнюдь не означает отрицание роли тектонических движений на формирование гидрографической сети в целом на крупные изменения в направлении основных ее стволов и т. п.

Подробный обзор взглядов отечественных и зарубежных исследований на развитие речных долин помещен в монографии «Русловой процесс» (1959). Поэтому, не останавливаясь на этом вопросе, отметим, что отсутствие общей схемы, по-видимому, вполне правомерно, учитывая разнообразие природных условий. Однако создание общей схемы разработки потоком своей долины, учитывающей разнообразие местных условий, безусловно возможно при комплексном подходе к решению вопроса. Схема эта имеет не только существенное общетеоретическое значение, но и чисто прикладное, поскольку с этим связан вопрос о происхождении террас, выяснения их связей с современной поймой, а следовательно, с современным русловым процессом и ограничивающими его развитие факторами. В решении этих вопросов важное место должен занять лабораторный эксперимент, еще далеко не в полной мере используемый.

Таким образом, приходится констатировать, что для целей исследования современного руслового процесса из области геоморфологии можно привлекать очень большой, но еще нуждающийся в обобщении и уточнении по ряду вопросов материал. Как указывалось, особенно ценными являются результаты исследования закономерностей формирования аллювия, но еще далеко не выяснены его количественные взаимосвязи с гидрологическими и гидродинамическими факторами.

в. Гидравлические исследования

Если геоморфологи подходили к русловому процессу с позиций макромасштабов и во времени и в пространстве и лишь изучение аллювия вынуждало их обратиться к вопросам гидравлики и гидрологии, то гидравлические исследования, осуществлявшиеся в основном инженерами-путейцами, строились на совсем другой основе. Вековые изменения в ходе руслового процесса представлялись им малозначащими. Эти исследования, начатые во второй половине XIX в., были направлены на обеспечение задач преимущественно местного улучшения судоходных условий, не предусматривающих обычно крупных изменений хода самого руслового процесса и тем более определяющих его факторов. Лишь значительно позже в связи с развитием регулирования водного режима рек, приводящего к коренной перестройке руслового процесса, выявилась необходимость учитывать вековые тенденции развития процесса, так как переформирования русла, ранее требовавшие столетий, а иногда и тысячелетий, стали развиваться в течение нескольких лет или десятков лет. К этому же вынуждает и принятая расчетная долговременность обеспечивающих это регулирование крупнейших гидротехнических сооружений.

Имея дело с короткими участками — непосредственно районами гидротехнических сооружений — и стремясь получить быстрый эффект, исследователи прежнего времени естественно шли по линии изучения и решения отдельных частных сторон руслового процесса. К этому же их приводило и отсутствие больших массовых материалов по деформации речных русел и пойм.

Не вдаваясь в детали вопроса об истории развития приложения гидравлики и гидродинамики к русловым потокам, поскольку подобный обзор помещен в монографии «Русловой процесс» (1959), отметим только важнейшие на наш взгляд выводы.

«Непосредственный механизм взаимодействия потока и размываемого дна вполне определяется законами механики и гидродинамики. Это обстоятельство и послужило основанием для представления о возможности создания чисто гидродинамической теории руслового процесса. Однако возможности такого одностороннего подхода оказались весьма ограниченными. Это объясняется, в первую очередь, тем, что крупные русловые формы возникают в условиях переменного водного режима, отображают все разнообразие характеристик жидкого и твердого стока, т. е. факторов гидрологического характера и, следовательно, не могут быть объяснены только средствами гидродинамики. Кроме того, гидродинамическим методом значительно легче решается задача при заданной схеме движения и значительно труднее — задача, требующая нахождения самой схемы движения. Последние трудности усугубляются тем, что гидро-

динамические задачи лишь в самых простых случаях решаются во вполне строгой постановке. В более сложных случаях, а русловые задачи при наличии размываемого дна являются наиболее сложными, уравнения гидродинамики применяются в упрощенном виде и допустимость сделанных упрощений проверяется только опытом. Таким образом, гидродинамический метод хорошо объясняет и дает количественную оценку явления при наличии качественно известной схемы движения, но обычно оказывается ненадежным и трудноиспользуемым при попытках абстрактного воспроизведения сложного природного процесса. Наконец следует учесть, что русловой процесс развивается с участием множества других природных факторов — геологических, геоморфологических и климатических, влияние которых может быть весьма разнообразным, начиная от едва ощутимого до решающего.

Таким образом, в цепи причинно-следственных зависимостей гидродинамическое звено остается внутренним, определяющим лишь непосредственную связь между текущей водой и размываемым руслом. Русловой же процесс, взятый в целом, имеет своей первопричиной природные, в первую очередь гидрологические факторы, и в конечном проявлении имеет геоморфологический характер» (Кондратьев, 1959).

г. Гидролого-морфологические исследования

Итак, геоморфологические исследования руслового процесса, как указывалось выше, в итоге сводились к изучению его вековых изменений, т. е. медленно развивающихся однонаправленных или необратимых деформаций речных долин и основных их элементов. Гидравлические исследования в основном были направлены на изучение деталей процесса его внутренней механической стороны. Вместе с тем русловой процесс это прежде всего процесс изменений морфологического строения речных русел, он неразрывно связан с переотложением наносов. Современный русловой процесс в силу последнего обстоятельства (переотложения наносов) носит ярко выраженный характер, развивается быстро и в явных формах, которые оказываются настолько же разнообразными, насколько различны условия, создающие водный режим и сток наносов — эти основные факторы руслового процесса. Вот эта та важнейшая сторона руслового процесса до недавнего времени оказывалась наиболее слабо исследованной.

Не будет большим преувеличением утверждать, что до недавнего времени морфологии речного русла уделялось не слишком большое внимание.

Под морфологическими исследованиями руслового процесса следует понимать решение двух основных задач: изучение форм

проявления руслового процесса и его связей с определяющими его факторами. Эти исследования должны сопровождаться получением количественного выражения связи отдельных элементов морфологии речного русла между собой (морфометрических закономерностей) и определяющими факторами (гидроморфологические зависимости).

Ограниченность представлений о многообразии типов руслового процесса из-за скудности исходных натурных материалов и вместе с тем стремление быстро получить расчетные схемы для обеспечения инженерных задач привели к тому, что преимущественное развитие получили разработки морфометрических зависимостей, имеющих вспомогательное значение. Они осуществлялись в предположении о значительном однообразии форм проявления руслового процесса или делались попытки учесть это разнообразие некоторыми эмпирическими коэффициентами, физический смысл которых оказывался не всегда достаточно определенным. При этом оценивались грубо осредненные величины и расчет нередко оказывался очень далеким от натуры.

Подробный обзор существующих морфометрических зависимостей дан в монографии ГГИ «Русловой процесс» (1959), поэтому здесь напомним только главнейшие.

В 1924 г. В. Г. Глушков получил эмпирическую зависимость, связывающую ширину и среднюю глубину русла, причем характеристика средней формы последнего, по автору, зависит от состава грунтов ложа

$$\frac{\sqrt{B}}{H} = k,$$

где для песчаных грунтов $k = 5{,}5$, для скальных — $k = 1{,}4$. Таким путем можно оценить среднюю глубину потока при уровнях выхода воды на пойму, но не превышающих их.

С. И. Рыбкин (1947), рассматривая эту зависимость совместно с уравнением Шези, выразил ширину и глубину русла однозначно через расход воды и продольный уклон свободной водной поверхности, найдя эти выражения эмпирическим путем, на основе обработки натурных материалов по некоторым рекам бассейна Верхней Волги.

И. А. Белинский и Г. П. Калинин шли этим же путем, используя для этого не только расход воды и уклон, но параметр k и коэффициент шероховатости.

М. А. Великанов, применив принцип размерности, усовершенствовал эти эмпирические зависимости, учтя и крупность донных отложений.

И. И. Якунин дал формулы, позволяющие определять не только средние значения ширины и глубины русла по бесприточным участкам, но и вычислять их раздельно для плёсов и перекатов, исследовав в этих целях вариации глубин.

Известны усовершенствованные зависимости С. И. Рыбкина, зависимости С. Т. Алтунина и И. А. Базунова (1953) и др.

Близкие зависимости были получены за рубежом Т. Бленчем, Инглисом, Леопольдом и Вольманом и др. Заслугой последних двух авторов надо считать, что ими сделана попытка выяснить особенности этих зависимостей для прямолинейных, меандрирующих и разветвленных участков (Попов, 1963).

Несколько особняком стоят морфометрические зависимости Н. А. Ржаницына (1960), исследовавшего закономерности изменения основных морфометрических характеристик русла в зависимости от порядка приточности. Используя идею Хортона об определении порядка приточности начиная с верхних звеньев сети, Н. А. Ржаницын устанавливает систему коэффициентов, характеризующих изменения основных морфометрических характеристик при переходе от одного класса притока к другому. Им же предложена система локальных зависимостей, позволяющих анализировать морфометрические зависимости, свойственные коротким участкам.

Н. Е. Кондратьев (1959) считает, что всем описанным выше системам морфометрических зависимостей, в том числе и гидроморфологических (связывающих размеры русла с характеристиками водности потоков), предстоит еще пройти сложный путь развития, прежде чем они приобретут теоретическое значение.

Действительно, если учесть многообразие форм проявления руслового процесса, каждой из которых свойственны и свои морфометрические и гидроморфологические соотношения, то очевидно, что статистическая их обработка без учета природных закономерностей деформаций речных русел и пойм представляет собой путь исследования чрезвычайно длительный, трудоемкий и в конечном итоге достаточно неопределенный, поскольку при такой постановке любые из этих зависимостей не характеризуют непосредственно особенностей деформаций и, что особенно важно, плановых, а главное обходят вопрос о факторах процесса, не вскрывая причинно-следственных связей.

По этим причинам разработка морфометрических связей без предварительных морфологических исследований практически оказывается бесперспективной, представляя собой лишь очень грубые схемы.

Наконец, необходимо упомянуть об особом виде гидроморфологических зависимостей, а именно об использовании плановых характеристик гидрографической сети (ее структуре, густоте) для исследования условий формирования стока с водосборов и приближенной характеристики их водоносности. Кроме Хортона, в этом направлении работали Рундо (1921), М. А. Великанов (1948), Б. П. Панов (1948), В. А. Троицкий (1948), Н. А. Ржаницын. В последнее время интересные исследования

выполнены Курдюмовым (1963). Прямого отношения к русловому процессу эти исследования не имеют.

Даже из приведенного краткого обзора гидравлических и морфометрических исследований можно видеть, что при их осуществлении без должного внимания остались принципы изучения руслового процесса, сформулированные еще В. М. Лохтиным (1897). В. М. Лохтин, отлично знавший разнообразие и сложность проявлений руслового процесса, правомерно указывал на беспомощность подхода к этой проблеме исключительно с позиций чистой гидравлики и требовал: «поменьше формул и побольше наблюдательности».

Осталось без должного внимания и второе важнейшее указание Лохтина о том, что формы речного русла есть результат той или иной комбинации геоморфологических и гидрологических свойств водосбора реки. Слишком далеко от этих установок находятся общие принципы руслообразования, сформулированные М. А. Великановым в виде трех известных основных постулатов: взаимодействие потока и русла, минимум затраты энергии и ограниченность природных комплексов. Отражая гидравлический аспект проблемы, эти постулаты, по сути дела, игнорируют морфологический и гидрологический ее аспекты, за что ратовал Лохтин.

Дальнейшее развитие идеи Лохтина нашли в работах И. А. Кузьмина и К. И. Россинского (1947). Их исследованиям свойственно стремление увязать русловой процесс с его независимыми факторами, под которыми понимаются: русловой поток с наносами и геоморфологическая обстановка. В соответствии с этим эти авторы различают многолетние, вековые однонаправленные деформации и периодические русловые деформации, подчиненные внутригодовым изменениям водного режима. В соответствии с основными особенностями морфологического строения рек — наличием русла и поймы — речные наносы делятся на две категории — взвешенные, расходуемые потоком на построение поймы, и русловые, определяющие внешний облик речного русла и играющие основную роль в руслоформировании. Ими же в качестве основной устойчивой формы руслового процесса признается подвижная песчаная гряда, достаточным условием появления и развития которой является наличие турбулентности потока и размываемых грунтов. Кузьмин и Россинский в зависимости от хода изменений плановых очертаний речного русла и механических свойств грунтов берегов выделяют три типа руслового процесса.

Широтой анализа и энциклопедичностью отличается монография Н. И. Маккавеева (1955). Подводящими итоги исследований этого направления изучения руслового процесса являются монография «Русловой процесс» под ред. Н. Е. Кондратьева (1959) и книга автора «Методические основы исследований

руслового процесса» (1961), в которых систематизируются существующие и предлагаются новые пути подхода к проблеме, значительное внимание уделяется морфологическому аспекту проблемы; в частности, в последней работе сделана попытка выделения основных типов и измерителей руслового процесса и предложена методика проведения гидролого-морфологического анализа на основе привлечения материалов аэрофотосъемки и использования гидрологических данных.

Признавая главнейшими факторами руслового процесса сток воды и наносов, легко видеть, что весь арсенал многочисленных гидрологических материалов и методов исследований должен быть полноценно использован для изучения руслового процесса.

Особое значение при этом получает типизация водного режима рек, необходимая для увязки с нею типов руслового процесса. Затруднения в использовании гидрологических данных заключаются в том, что при постановке гидрологических исследований нужды изучения руслового процесса учитываются далеко не в полной мере. Особенно недостаточно они учитываются в программах массовых наблюдений сети гидрометеорологических станций УГМС, поставляющей основной фонд этих материалов. Основными недостатками этих материалов являются следующие.

Створовый характер наблюдений за гидрологическим режимом существенно ограничивает возможности применения их материалов, так как морфологический подход к проблеме требует данных по участкам, часто значительного протяжения. Это приводит к тому, что данные по скоростному полю потока, гранулометрии наносов, морфометрии русла, получаемые при этих наблюдениях, можно использовать только для грубых схем и обобщений. Особенно сложно положение с материалами по гидравлике пойменных створов и с исходными данными для решения проблем расчетов неустановившегося режима — проблем формирования паводочной волны в реальной гидрографической сети.

Исследование стока наносов, насчитывающее уже десятки лет, велось с тех же позиций, как и исследование стока воды,— основной его целью являлась оценка мутности воды и определение суммарных количеств наносов без учета сложных путей их перераспределения в процессе транспорта. Надо признать, что такая постановка исследований в основном удовлетворяет задачам оценки качества воды и в известной мере расчета заиления водохранилищ, но недостаточность их для целей исследования русловых процессов очевидна. Если к этому прибавить, что учету поддается лишь сток взвешенных наносов, а надежных методов измерения стока донных наносов практически нет, то положение еще более осложняется.

Связь стока наносов с деформациями речного русла требует увязки весовых и объемных единиц, но и эта проблема еще очень слабо изучена, так как объемные веса отложений исследованы слабо. В этих же целях требуется исследование закономерностей формирования стока наносов, определяемого в конечном итоге эрозионными процессами на водосборе.

Прямые натурные наблюдения эрозионных процессов на водосборах крайне ограничены и явления так называемой плоскостной эрозии, равно как и их учет, изучены и разработаны далеко не полно.

Сложность заключается не только в малочисленности и створовом характере наблюдений, но и в отсутствии надежных методов измерения, что прежде всего относится к съемкам скоростного поля потока, определению расходов донных наносов и, что особенно важно, гранулометрического состава отложений и многих других характеристик потока и русла. Все это значительно ограничивает и возможности осуществления полевых экспедиционных работ, увеличивая их трудоемкость и стоимость.

Огромный фонд материалов русловых исследований создан в учреждениях и организациях Министерства речного флота — имеется в виду исследование перекатов. Однако на составе и полноте этих материалов также сказалась недооценка морфологической стороны проблемы, что выразилось прежде всего в недостаточности изображения морфологической ситуации на лоцманских картах, по своей подробности намного уступающих даже подобным картам конца XIX и начала XX веков. Детальные же съемки перекатов оказались в основном направленными к учету землечерпательных работ. Им свойственно ограничение участка съемки непосредственным районом работ и по этой причине недостаточное освещение целостных морфологических образований и часто невозможность судить о взаимосвязях сложных русловых образований, взаимосвязях, обычно очень тесных и подчас решающих для оценки деформаций данного руслового образования. Явно недостаточно и освещение скоростного поля потока и гранулометрического состава наносов на участках, подлежащих исследованию. Практически исключается и возможность проследить по этим съемкам взаимосвязь русловых и пойменных деформаций и даже плановых переформирований берегов речного русла, так как многие съемки ограничиваются урезом меженных уровней воды и очень схематичным условным изображением бровок берегов, далеко не всегда позволяющим произвести количественную оценку этих деформаций.

Все это заставляет с особым вниманием отнестись к методике исследований руслового процесса и привлечения к ним новой техники и новых методов работ, а также изыскивать способы наиболее рационального использования существующих материалов.

Все вышеприведенное позволяет прийти к следующим выводам о путях построения теории руслового

1. Успешная разработка теории руслового процесса можна только на основе учета дискретности процесса.

2. Будучи ярко выраженным морфологическим процессом, определяемым многочисленными природными факторами, русловой процесс должен исследоваться всесторонне. Его теория лежит на стыке ряда наук, в первую очередь гидродинамики, гидрологии и геоморфологии. Поэтому создание его теории требует коллективного труда специалистов этих дисциплин.

3. При исследовании сложных многофакторных природных процессов неизбежно возникает необходимость «сведения всего разнообразия частных проявлений к немногим простым схемам», выявления общего и деталей процесса, не имеющих существенного значения. С этой точки зрения, поскольку процесс оказывается четко оформленным морфологически, особое значение приобретает выделение качественно различных форм его проявления со сведением их до минимума. Последующей задачей должна быть их детализация.

4. Главнейшими задачами практического использования теории руслового процесса, исходя из современных потребностей гидротехнического проектирования, должны быть: а) разработка метода его прогнозирования для участков большого протяжения в условиях естественного и зарегулированного режима и б) создание уточненных методов расчета местных деформаций речных русел и пойм в заданных условиях.

5. Современные знания и приемы оценки руслового процесса показывают, что ряд задач можно решать достаточно надежно на основе гидродинамических методов, ряд же вопросов успешно решается на основе непосредственного гидрологоморфологического анализа руслового процесса на натурных материалах, причем часто носящих даже общий характер. Такое решение задачи во всяком случае удовлетворяет ранним стадиям проектирования и обеспечивает выбор оптимального места расположения сооружений и средств их защиты при вынужденном их расположении.

Последующие главы и имеют основной задачей показать широкие возможности этого метода анализа руслового процесса.

ЧАСТЬ I

ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

Глава I

РУСЛОВОЙ ПРОЦЕСС И ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЕГО ФАКТОРЫ

1. ДИСКРЕТНОСТЬ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

Из сведений о деформациях русла и поймы, приведенных во Введении, следует, что русловой процесс, развивающийся на реках, в подавляющем большинстве случаев получает четкое морфологическое выражение. Деформации речного русла обусловливаются смещением по реке песчаных гряд. Небольшие гряды не определяют собой внешний облик русла; крупные гряды, соизмеримые с размерами русла, уже в значительной мере определяют его внешний вид. При этом типы русел отличаются значительным разнообразием — на одних речных участках наблюдается только смещение песчаных гряд, на других наряду с этим происходит развитие излучин, иногда развиваются многорукавные русла и т. д.

Таким образом, русловой процесс прежде всего является процессом морфологическим, выражающимся в изменениях строения речного русла и поймы, которые постоянно происходят под действием текущей воды. Идея о дискретности русловых потоков и руслового процесса наиболее четко была сформулирована Н. Е. Кондратьевым (1953). Под дискретностью или структурностью понимается свойство материи раздробляться на отдельные элементы и образовывать из них обособленные группы и отдельности, в свою очередь объединяющиеся в более крупные группы и соединения. Каждому элементу, группе, соединению свойственны свои качественные отличия, свое содержание и как следствие свои методы и приемы исследований. Н. Е. Кондратьев показывает, что потоку и руслу свойственны дискретные формы, без исследования которых невозможно создание полно-

ценной теории этого процесса. Одновременно указывается на скудность дискретных представлений о русловом процессе. Легко видеть, что проблема дискретности сводится к философской проблеме о соотношении формы и содержания.

При гидравлическом исследовании руслового процесса основным содержанием является изучение механизма взаимодействия потока и размываемых грунтов его русла, а морфология последнего выступает как форма процесса. При морфологическом исследовании основным содержанием процесса является развитие форм и лишь тип русла является по отношению к ним формой процесса. Естественно при этом, что разработка полноценной теории этого процесса возможна лишь на основе сочетания этих двух главнейших аспектов проблемы, которое должно привести к созданию теории русловых форм.

Можно подойти к постановке этой проблемы и с других позиций, а именно рассматривать гидравлический аспект проблемы как исследование внутреннего содержания процесса — непосредственных взаимосвязей, а морфологический аспект рассматривать как исследование влияния на русловой процесс внешних факторов его развития. И при такой постановке очевидно, что создание полноценной теории развития русловых форм требует объединения этих двух аспектов проблемы.

С этих точек зрения становится очевидной недостаточность распространенного определения термина русловой процесс — взаимодействие потока и грунтов его ложа, так как такое определение отражает только одну сторону процесса — механизм взаимодействия потока и грунтов его ложа — и в нем игнорируется морфологический аспект проблемы. Поэтому более правомерным является приведенная выше формулировка этого термина: русловой процесс — это изменение морфологического строения речного русла, постоянно проходящее под действием текущей воды. Такая формулировка термина предусматривает и морфологический и гидравлический аспекты проблемы, учитывает наличие внутренних и внешних факторов процесса, непосредственных и опосредствованных связей.

2. РУСЛОВОЙ ПРОЦЕСС — ТРАНСПОРТ НАНОСОВ

а. Эрозия и переотложения наносов. Необратимые и обратимые деформации

Деформации речного русла неизбежно связаны с переотложениями наносов. Представить себе русловые деформации, не сопровождающиеся поступлением в поток или изъятием из него наносов, невозможно. Поэтому можно утверждать, что русловые и пойменные деформации являются в первую очередь выраже-

нием транспорта наносов, осуществляемого путем их непрерывного переотложения.

При такой постановке вопроса важно рассмотреть схему формирования стока наносов в гидрографической сети водосборов и выяснить соответствующие разным видам транспорта наносов (имеются в виду процессы размыва, переноса и отложения) особенности морфологического строения речных русел и пойм и особенности изменений этого строения.

Стекание воды по поверхности водосборов сопровождается эрозией почв и коренных пород, слагающих эту поверхность. В результате этого процесса вода, собирающаяся в руслицах и руслах, уже несет некоторое количество твердого материала. В соответствии с направленностью процесса перемещения наносов потоком процесс эрозии, развивающийся в верхних звеньях гидрографической сети, следует отличать от процесса их транспортирования в постоянных руслах.

При эрозии происходит однонаправленный процесс перехода неаллювиальных (коренных) или древних аллювиальных пород (отложений, созданных в иных гидрологических условиях, чем современные) в современный аллювий. Этот процесс является необратимым, поскольку разрушенные породы никогда не могут быть восстановлены в их первоначальном состоянии тем или иным потоком.

Учитывая, что площадь водосбора, на которой может развиваться эрозия, неизмеримо больше, чем площади поверхности размыва в русловой сети, процесс эрозии следует рассматривать как первоисточник поступления наносов в русловые потоки. Таким образом, можно утверждать, что каждый поток оказывается вынужденным транспортировать количество наносов, заданное ему его природными особенностями. Транспорт наносов характерен непрерывно происходящими переотложениями наносов. Значит, если характерным признаком эрозии является однонаправленность или необратимость процесса, то отличительной особенностью транспорта наносов является его обратимость — непрерывное чередование в пространстве и времени размывов и намывов русла (поймы). Эрозионные процессы, развиваясь, как указывалось, в основном в верховых звеньях гидрографической сети, могут происходить и в речных руслах, выражаясь в вековом врезании речной долины и подмыве ее склонов, сложенных коренными породами, приводящем к разработке долины в ширину. Следовательно, врезание потока в неаллювиальные породы или подмывы их потоком являются первоисточником поступления наносов. Легко видеть, что подмыв потоком пойменных берегов или размыв образовавшихся в русле скоплений наносов не являются первоисточниками поступления наносов, поскольку в этом случае размываются им же ранее отложенные наносы.

Наряду с абсолютно необратимыми процессами можно выделить такие деформации русла и поймы реки, которые хотя и могут изменить направление своего развития, но изменения происходят в очень длительные периоды, по своей продолжительности несоизмеримые с периодами обратимых деформаций, рассматриваемых в данном частном случае. Подобные деформации могут быть названы условно необратимыми. Например, условно необратимыми по отношению к деформациям русла, обусловленным перемещением песчаных гряд, следует считать процесс формирования поймы в ходе плановых деформаций русла, так как в этом случае наносы на длительное время, иногда века, откладываются потоком, образуя фундамент поймы и верхние слои пойменных отложений. Они вновь начнут возвращаться в поток лишь в случае, когда русло реки на данном участке, смещаясь в плане, вновь вернется к прежнему положению, и ранее созданная им пойма начнет разрушаться в результате подмыва ее берегов и т. п.

К необратимым деформациям можно отнести и процесс формирования речных дельт, т. е. процесс, обусловленный не разрушением коренных пород, а созданием многовековых накоплений аллювия. В этом случае также характерен длительное время однонаправленный процесс. Итак, различным видам работы потока свойствен и различный способ транспортирования им наносов: однонаправленный процесс эрозии — разрушение коренных пород и переотложение наносов (собственно транспорт наносов в виде одновременно идущих размыва, переноса и отложения), характерное обратимостью процесса. В соответствии с этим среди морфологических образований можно также выделить две основные их группы: эрозионные образования, сложенные неаллювиальными отложениями, и эрозионно-аккумулятивные формы, образующиеся скоплениями речных наносов.

Если однонаправленные деформации (врезание или аккумуляция наносов) представляют собой вековой процесс, приводящий также к необратимым изменениям строения водосбора и, таким образом, являются рельефообразующими, то обратимые деформации характерны годичными и сезонными циклами, значительно более быстротечны и непосредственно выражают собой русловой процесс, т. е. являются главным предметом настоящего исследования.

К эрозионным образованиям относятся склоны речной долины, структурные террасы (псевдотеррасы), останцевые образования, разновидности базисов эрозии, существование которых обусловлено наличием трудноразмываемых пород. К эрозионно-аккумулятивным образованиям относятся аккумулятивные террасы, речные поймы и все русловые образования, сложенные речными наносами (подвижные скопления наносов).

Значение эрозионных образований (необратимых деформа-

ций) при исследованиях современного руслового процесса определяется тем, что их разрушение является первоисточником поступления в поток наносов, что важно для предвидения условий изменения количества и состава наносов, которые должен транспортировать поток и, следовательно, для учета того материала, из которого строятся различные эрозионно-аккумулятивные формы. Кроме того, в случаях, когда эрозионные образования сложены породами более устойчивыми, чем отложения наносов, они оказывают ограничивающее влияние на свободное развитие руслового процесса, а следовательно, и на типы эрозионно-аккумулятивных образований в русле и на пойме реки. Наконец, изучение эрозионных образований существенно для выявления общих многовековых тенденций и особенностей развития руслового процесса, так как помогает восстановить ход развития речных долин — историю руслового процесса. Это прежде всего важно для того, чтобы выявить формы, принадлежащие современному русловому процессу и, следовательно, обязанные своим существованием современным гидрологическим и геоморфологическим условиям, и древние образования, созданные этими же или другими факторами, имеющими отличия от современных. Тем самым связи между русловым процессом и определяющими его факторами получают более четкое и определенное выражение.

б. Особенности движения наносов в различных звеньях гидрографической сети

Рассмотрим как сказываются особенности процессов эрозии и транспорта наносов на строении различных звеньев гидрографический сети.

Связь между особенностями движения наносов и структурой морфологических образований при анализе натурных материалов выявляется достаточно отчетливо, причем повсеместно во всех районах, подверженных эрозии. Такой анализ позволяет составить принципиальную схему, показывающую связь между характером движения наносов и особенностями возникающих при этом морфологических эрозионно-аккумулированных образований (рис. 4).

Общепринятой классификации эрозионных форм рельефа еще не создано, хотя известен ряд попыток типизации этих форм, принадлежащих В. В. Докучаеву, В. П. Амалицкому, И. А. Костычеву, В. И. Ефремову, С. Н. Никитину, И. Ф. Саваренскому, Н. И. Сус (1949), С. С. Соболеву (1948), А. С. Козменко (1954), С. В. Наумову (1956) и др. А. С. Козменко наиболее четко провел разделение эрозионных форм на древние и современные, что важно, так как размеры современной эрозии несоизмеримо малы по сравнению с древней, наблюдавшейся в период сброса флювиогляциальных вод. Он выдвигает на этой основе концеп-

цию о невозможности перехода современных форм к формам, выработанным древней мощной эрозией (переход оврага в балку балки в речную долину). Положение это правомерно, так как полноценно учитывается такой основной движущий фактор эрозии, как водоносность. Очевидно, что формы, созданные резко различными по величине потоками, должны сильно разниться между собой и их можно рассматривать как самостоятельные. Поэтому, вероятно, не очень правы те, кто упрекает Козменко в исключении «такого распространенного термина, как овраг», в изолированном рассмотрении форм древнего и современного размыва и в отрицании возможности перехода современных форм в древние в условиях существующей водоносности.

Кроме сказанного выше, положительным в типизации Козменко (для нужд исследования руслового процесса) является следующее:

1) достаточно четкое разделение форм, основанное не только на внешних признаках, но и на попытке увязать эти формы с их геологическим строением, размерами стока воды и наносов;

2) отсутствие слишком дробного деления форм по чисто внешним признакам, тесная их связь с особенностями руслового процесса и формами эрозии;

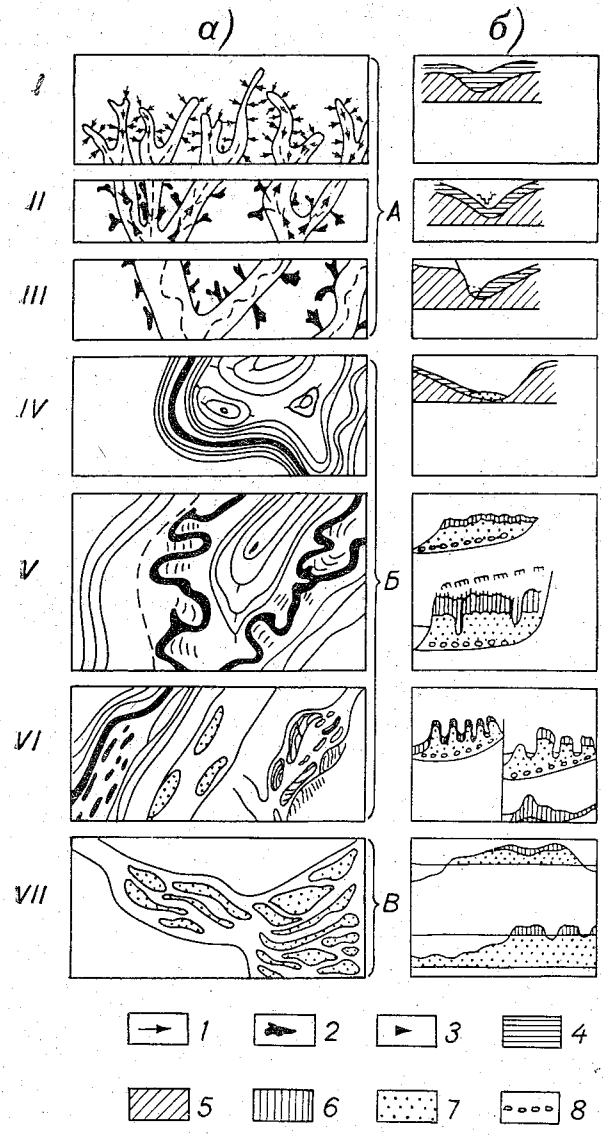
3) четкое разъяснение содержания применяемых терминов, пусть даже иногда и условных (суходол и др.).

Итак, в качестве основных звеньев гидрографической сети примем морфологические образования, выделенные Козменко (1954).

Самым верхним звеном современной гидрографической сети в районах, подверженных эрозии, являются (пользуясь терминологией Козменко) ложбины стока.

Ложбины стока в северных и центральных районах Европейской территории СССР представляют собой эрозионные образования, выработанные в период существования большей водности, чем современная, и, таким образом, являющиеся реликтовыми. Образовавшись первоначально в результате работы мощных потоков талых вод, стекавших в результате стаивания ледников, ложбины в последующем, т. е. после окончания сброса флювиогляциальных вод, оказались выполненными толщей покровной породы. В настоящее время по ним происходит сток атмосферных осадков и вынос только тех наносов, которые формируются так называемым струйчатым размывом или плоскостным смывом, т. е. разновидностью эрозионного процесса, характеризующейся отсутствием сосредоточенного размыва поверхностей, по которым стекает вода.

В соответствии с этим ложбины стока имеют пологие склоны, невыраженное дно, прямой продольный профиль и



отличаются отсутствием русла и накоплений аллювия — повсеместно на склонах и дне обнаруживается только покровная порода.

Площади водосборов, ложбин невелики, не превышают обычно 0,05 км². Однако в силу большого их распространения на водосборах поступающие из них наносы играют существенную роль в формировании их стока с данного водосбора.

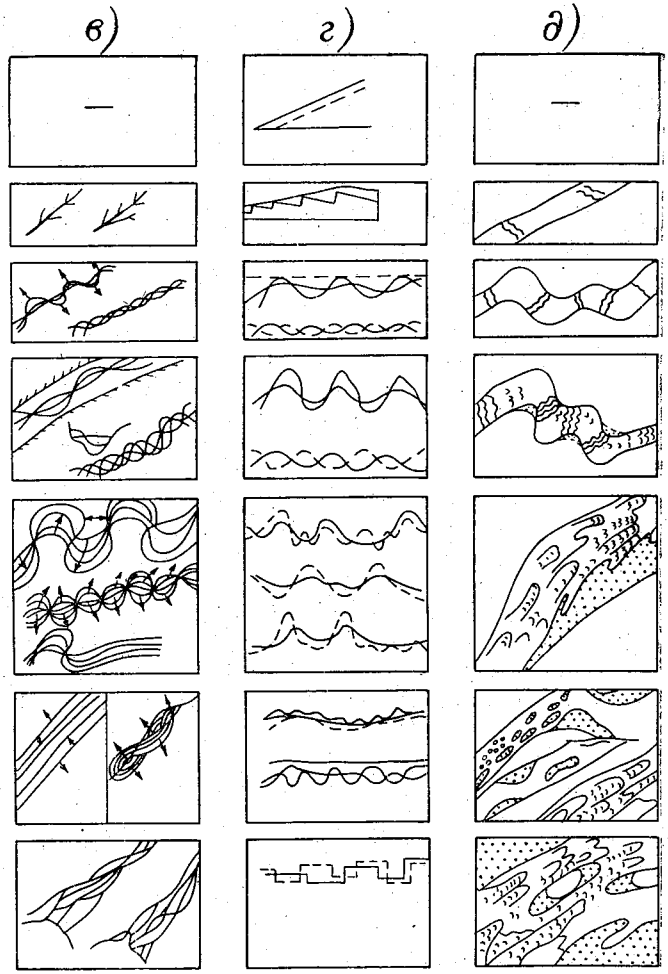


Рис. 4. Формирование стока наносов в различных звеньях гидрографической сети равнинных рек.

а — основные звенья сети, *б* — типичные разрезы звеньев сети, *в* — характер плановых деформаций, *г* — высотные деформации, *д* — формы скоплений в русле звена; *I* — ложбины, *II* — лощины, *III* — суходолы, *IV* — речные долины I типа, *V* — речные долины II типа в среднем течении, *VI* — то же на предустьевых участках, *VII* — дельты; *A* — зона формирования стока наносов, *B* — зона транспорта (переотложения), *B* — зона аккумуляции; *1* — плоскостной смыв, *2* — береговой размыв, *3* — донный размыв, *4* — покровная порода; *5* — коренные породы, *6* — пойменная фация аллювия, *7* — русловой аллювий, *8* — базальный горизонт.

Явления плоскостного смыва рассмотрены в ряде работ, в том числе у Козменко (1955) и в работе автора (1959). Данные о величинах смыва, приводимые разными авторами, сильно

разнятся между собой. Это в основном связано с тем, что явление это сложное и определяется множеством факторов. Среди последних следует назвать такие, как интенсивность и продолжительность атмосферных осадков и снеготаяния, длина, уклоны и форма поверхности смыва, слагающие склоны грунта, их промерзаемость, влажность перед выпадением дождя, характер растительности, распашка склонов и др.

Из приведенного краткого перечисления факторов, влияющих на плоскостной смыв, видно, насколько трудно создать надежные схемы для расчета его величин и насколько важно усилить исследования этого сложного процесса. Многие авторы [В. М. Маккавеев (1938), М. А. Великанов (1948), Н. И. Маккавеев (1955) и др.] пытались связать величину смыва с крутизной склонов или с мутностью потоков. Однако успешность применения предлагаемых схем в значительной мере зависит от того, имеется ли возможность учесть влияние перечисленных выше факторов, выступающих в различных комбинациях и соотношениях, как в многолетнем разрезе, так и в отдельные годы. Кроме того, должны быть учтены сложные пути и перераспределение стока наносов по мере их перемещения от источника поступления до, например, створа, где измеряется мутность. При этом обычно упускается из вида, что мутность в данном створе является результатом не только плоскостного смыва, но и других рассматриваемых ниже видов эрозии и местных размывов, возникающих в ходе транспорта наносов по длине реки. Следует тоже учесть, что часть наносов, поступивших в реку с водосбора, надолго выключается из транспорта их по руслу в результате отложения на поверхности поймы (наилка).

О том, какое значение для формирования мутности имеют особенности путей стока наносов, дает представление следующий факт.

Имеются предположения, что в р. Обь попадает и участвует в формировании ее стока примерно только 20% суммарного смыва на водосборе. Подобных примеров можно привести много. По всем этим причинам расчетные данные о величинах плоскостного смыва можно расценивать как очень приближенные и часто преуменьшающие фактически наблюдающиеся.

Для районов Центрально-Черноземной области, по А. С. Козменко (1954), явления смыва захватывают от 7 до 35% площади водосбора при условии почти полной его распашки. Для задернованных водосборов эти цифры должны быть существенно меньшими. Данные, характеризующие величины смыва поверхности бассейнов, по Б. А. Аполлову (1951), помещены в табл. 11. Они получены на основе оценки мутности потоков. Величина смыва оценивается десятыми и сотыми долями миллиметра. А. В. Волин (1946) оценивает средний слой стока наносов с поверхности Русской равнины равным 0,03 мм/год. Н. И. Макка-

Таблица 11

Данные о смыве водосборов

Водосбор реки	Продолжительность смыва слоя почвы в 1 мм, лет	Слой годичного смыва, мм	Водосбор реки	Продолжительность смыва слоя почвы в 1 мм, лет	Слой годичного смыва, мм
Волги	140	0,0071	Темзы	61	0,011
Дона	50	0,02	Роны	3,7	0,27
Дуная	11	0,091	Сулака	0,6	0,67
Эльбы	59	0,017	Риони	6	0,17
Мааса	37	0,027	Белого Нила . .	558	0,0018
По	4,1	0,24	Голубого Нила	14	0,071

веев (1955) оценивает смыв с водораздельных пространств 0,1 мм/год. А. С. Козменко (1954) для глубоко расчлененных районов центральной лесостепи и других более засушливых районов ЕТС величину смыва на приводораздельной части склона определяет в 0,1—0,2 мм/год, в нижней части — в 1—1,5 мм. Средний смыв оценивается в 0,3—0,4 мм/год.

Л о щ и н ы. Слияние ложбин приводит к образованию другой более крупной эрозионной формы — лощин. Они являются значительно лучше выраженным эрозионным образованием. Кроме развивающегося на их склонах плоскостного смыва, появляются сосредоточенные, правда временные, потоки, приводящие к явлениям так называемых донного и берегового размыва — на дне и склонах лощин образуются промоины, рвы и овраги.

Вследствие более сосредоточенного размыва склоны лощин оказываются круче, чем у ложбин, склоны их асимметричны, покровная порода залегает неравномерным слоем, мощность ее больше на дне лощин и меньше на склонах, продольный профиль принимает ступенчатый вид и благодаря боковому размыву возникают ветвистые русла, причем ветвистость их увеличивается со временем. Сечение русла близко к трапецеидальному, со ступенчатыми склонами, являющимися отражением различных этапов врезания этих русел под влиянием донного размыва.

При малых уклонах (до 0,02) поперечное сечение русла развитого водотока, осуществляющего донный размыв, имеет обычно глубину 1—3 м, ширину от 1 до 15—20 м. На рис. 5 приведен аэрофотоснимок, показывающий явления бокового размыва. В коротких лощинах русло часто бывает трехслойным и занимает все дно этого образования. В руслах встречаются временные скопления наносов, двигавшихся в период половодья и скопившихся при пересыхании русел. Эти скопления не приурочены к определенным очертаниям русла, но чаще всего встре-

чаются близ устьев боковых ветвей. Площади водосборов лощин обычно превышают 0,05 км². Лощина также является очень распространенным на водосборе образованием, и роль ее в формировании стока наносов, особенно учитывая увеличение его интенсивности, весьма значительная.

Количественные характеристики явлений донного и берегового размыва по причинам, указанным при оценке величин плоскостного смыва, тоже отмечаются большой пестротой.

По Козменко (1954), в бассейне р. Красивой Мечи при площадях водосбора до 200—250 км² площади, занимаемые донным размывом, составляют 0,4%, береговым — 0,1%, что в сумме дает 0,5% общей площади водосбора, а иногда до 4,5—5,5%

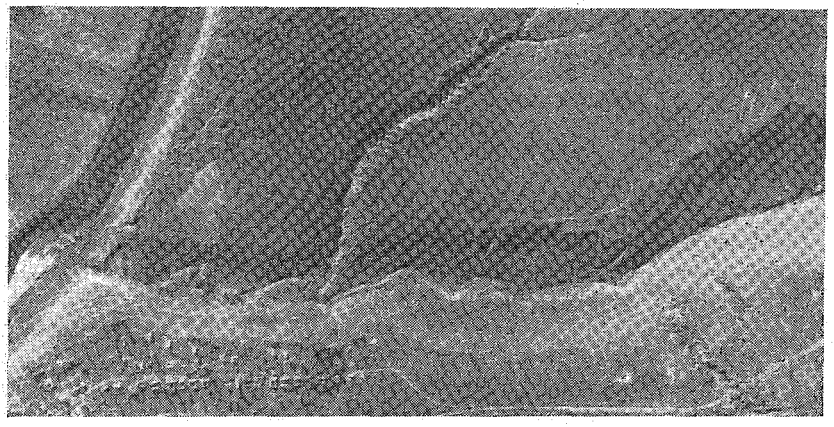


Рис. 5. Суходол с извилистым руслом временного потока, впадающий в речную долину, промоина и береговой размыв на его склонах.

площади водосбора. Донным размывом оказывается поражено часто около 44% длины лощинной и суходольной (см. ниже) сети.

Примерно на половине площади, занятой донным и береговым размывом, наблюдается интенсивно прогрессирующее развитие промоин, рвов и оврагов.

В табл. 12 приведены данные о линейном годовом приросте береговых промоин, по Козменко (1954), для разных областей. По данным Тульской экспедиции 1909—1911 гг. (Козменко, 1954), суммарный объем выноса материала из донных промоин составляет в среднем 56 м³/год с 1 га при отнесении к общей площади водосбора, занятой размывом. Суммарный годовой вынос из береговых промоин составляет в среднем 18 м³/год с 1 га при отнесении к общей площади водосбора р. Красивой Мечи. При этих объемах размыва на образование существую-

Таблица 12

Область	Район	Годовой линейный прирост, м	За период лет
Липецкая	Елецкий	0,5	30
Курская	Дмитриевский	0,4	20
Белгородская	Старооскольский	4—6	10
Ульяновская	Ульяновский	2—4	25
Куйбышевская	Сызранский	2	2
Пензенская	Сердобский	0,6	10
Пензенская	Пензенский	0,8—3,5	13
Сумская	Кролевецкий	5	24
Полтавская	Лубенский	1,2	9
Черкасская	Уманский	1,5	39
Кировоградская	Кировоградский	4	60
Молдавская ССР	г. Кишинева	3,2	23
Донецкая (Донбасс)	Артемовский	0,6	25

щих промоин и рвов потребовалось около 30—40 лет, а оврагов — 60—70 лет (по состоянию на 1940 г.), т. е. начало их образования относится к концу XIX в. А. С. Козменко считает, что развитие донных и береговых размывов началось примерно 150 лет тому назад, в период усиленного освоения лесных и залежных земель.

В заключение приведем карту распространения различных видов эрозии на ЕТС, по С. С. Соболеву (рис. 6).

Суходолы — это переходное звено к речным долинам и наиболее отчетливо выраженное верхнее звено гидрографической сети, в котором донный и береговой размыв проявляются наиболее отчетливо. На склонах по-прежнему имеется плоскостной смыв.

Хорошо выраженный донный и береговой размыв приводит к появлению извилистого русла с временным потоком. Поперечное сечение характерно асимметричностью. На более крутом склоне покровная порода обычно отсутствует и обнажаются коренные породы.

Извилистое, смещающееся в плане русло обусловливает возможность накопления аллювия, и в суходольном звене гидрографической сети впервые обнаруживаются, правда маломощные, его скопления, обычно приуроченные к участкам выпуклых берегов и на перегибах русла от одной излучины к другой (перекаты). Продольный профиль суходола по руслу приобретает волнистость, свойственную рекам. Площади водосборов суходолов превышают 1—1,5 км^2.

Таковы основные особенности верхних звеньев гидрографической сети. Так как во всех этих звеньях наблюдается преимущественно однонаправленный процесс эрозии — размыв и вынос

материала, то площади, занятые этими звеньями, представляют собой области питания потока наносами. Поступившие в реку с этих площадей наносы и задают постоянным потокам тот сток наносов, который они вынуждены транспортировать к водо-

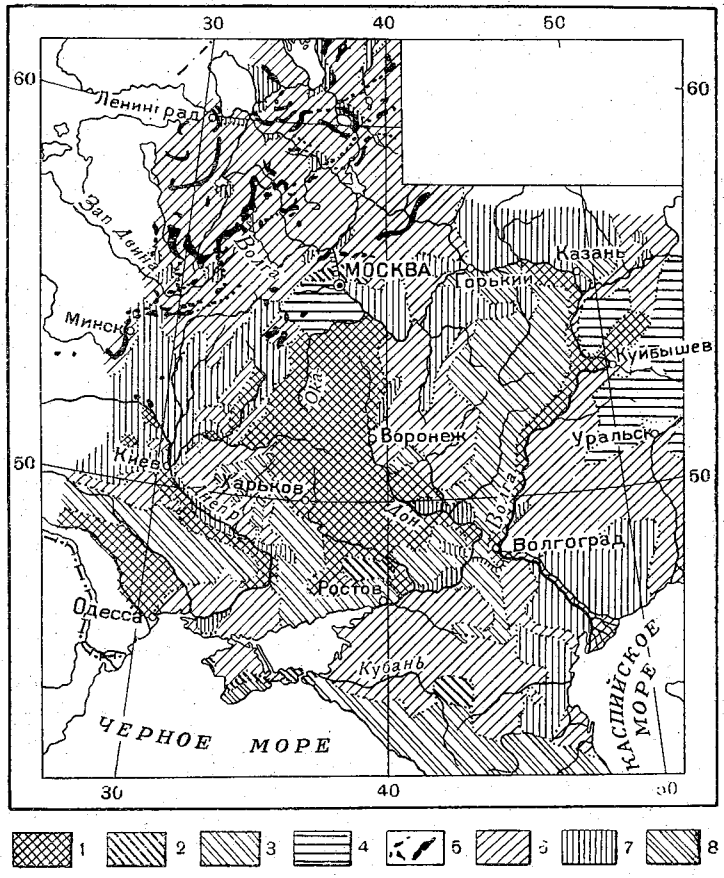


Рис. 6. Карта районов распространения эрозии на возделываемых землях Европейской территории СССР (по С. С. Соболеву).

1 — сильная плоскостная и овражная эрозия, *2* — сильная плоскостная и значительная овражная эрозия, *3* — значительная плоскостная и овражная эрозия, *4* — значительная плоскостная и изредка овражная эрозия, *5* — значительная плоскостная эрозия, *6* — плоскостная и овражная эрозия встречается лишь местами на склонах речных долин и балок, *7* — плоскостная и овражная эрозия очень слаба, *8* — горные районы.

приемникам (озеру, морю) уже в форме переотложения, благодаря которому и возникают обратимые деформации, т. е. собственно русловой процесс. Вопрос о формах переотложения наносов, т. е. типах руслового процесса, рассмат-

ривается подробно в специальных главах этой книги, поэтому пока отметим только главнейшие морфологические особенности нижних звеньев гидрографической сети, образующихся в результате слияния суходолов.

Речными долинами называются выработанные водой, стекающей с поверхности материков, относительно узкие, вытянутые в длину полые формы рельефа с общим наклоном дна от одного своего конца к другому, характерные тем, что они имеют в своих пределах русло потока, никогда не пересекают друг друга, а сливаются, образуя ниже точки слияния общую полую форму.

Главнейшими элементами речных долин являются следующие.

Бровка долины — линия сопряжения крутого склона долины с поверхностью прилегающей к ней местности. При небольшой крутизне склона бровка долины иногда бывает не выражена и может быть намечена только по косвенным признакам как граница распространения различных видов растительности, грунтовых разностей и т. п.

Склон долины — поверхность части долины, ограниченная сверху ее бровкой, а снизу подошвой склона (перегибом к ее дну). Склоны могут быть отвесными (иногда нависшими), прямыми, выпуклыми, ступенчатыми.

Дно долины — поверхность между подошвами склонов.

Пойма — часть дна долины, затапливаемая при подъемах уровня воды в реке и сформированная в ходе плановых деформаций русла. Последнее обстоятельство важно учитывать потому, что в слабовыраженных долинах затапливается не только их дно, но часто и обширные участки прилегающей к ним местности (например, в Полесьях) по своему происхождению, либо совсем не эрозионно-аккумулятивного происхождения, либо представляющие собой образования, созданные не современным потоком, а часто даже и не речного происхождения (имеются в виду озерные поймы, древние аккумулятивные равнины, как, например, прилегающие к рекам Волхову, Припяти, Оби и др.).

Террасы — уступы на склонах долины со ступенями обычно большой ширины. Различают террасы аллювиальные и эрозионные — ступени на склонах долины, образованные вследствие чередования на склонах полóго залегающих слоев пород различной сопротивляемости размыву и выветриванию.

Во Введении указывалось, что аллювиальные (аккумулятивные) террасы обычно рассматривались как древние поймы, вышедшие из зоны затопления в результате врезания потока. Имеются данные, указывающие, что аккумулятивные террасы часто имеют озерное происхождение и связаны не столько с врезанием потока, сколько с колебаниями уровней воды в нем в результате периодических изменений водоносности рек.

Руслом реки называется наиболее пониженная часть дна речной долины, выработанная потоком, по которой осуществляется перемещение основной части донных наносов. Русло характеризуется обычно извилистыми очертаниями в плане и наличием подвижных скоплений донных наносов, формирующих разнообразные русловые образования.

Бечевник — скопления материала крупных фракций вдоль берегов русла, образующиеся в результате подмыва потоком коренных пород, слагающих склоны долины.

Базальный слой. Крупный материал, попадающий в поток в результате подмыва коренных пород, слагающих склоны долины, и выпадающий в виде бечевника вдоль берегов русла, при плановых деформациях смещается вместе с руслом и образует слой крупных отложений в толще аллювия под дном русла. Имеет большое значение в развитии деформаций последнего, играя роль местного базиса эрозии. Базальный слой ограничивает врезание русла и способствует развитию плановых деформаций в случае, если он достигается дном потока. Нарушение базального слоя ведет к резкому усилению деформаций. Часто обнаруживается наличие нескольких горизонтов базальных слоев под дном русла.

Речной аллювий — толща отложений наносов, слагающих пойму и часто грунты дна потоков и распространяющаяся в глубь от поверхности дна долины на десятки и сотни метров. Большинство рек прокладывает свое русло в толще собственных аллювиальных отложений.

Подошва аллювия (плотик) — поверхность коренных пород, залегающих под толщей аллювия.

Фации аллювия — слои аллювия, образовавшиеся из одного и того же материала и в одинаковых условиях его накопления. Различают русловую фацию аллювия и пойменную. Русловая фация аллювия отличается большей крупностью, чем мелкозернистая пойменная, слагает русловые образования и фундамент поймы. Пойменная фация залегает в пойме поверх русловой (в том числе и на островах).

Русловую фацию подразделяют на стрежневую — наиболее крупные донные отложения вдоль полосы потока с наибольшими скоростями течения, прибереговую или прибрежных отмелей, фацию береговых валов (переход к пойме). На пойме, кроме собственно пойменной, выделяют старичную фацию — илистые отложения в руслах стариц и в пойменных озерках.

Отдельные элементы русла, морфологический облик которых связан с типами руслового процесса, рассматриваются в специальных, посвященных им главах (главы III—VI).

Таковы основные элементы речных долин, позволяющие характеризовать их в плане и в поперечном сечении в пределах

зоны деформаций речного русла (древнейших и современных). Речные долины, являющиеся завершающим звеном развития эрозионных процессов, звеном, в котором развиты преимущественно только процессы их переотложения, можно подразделить на две основные группы: 1) беспойменные долины и 2) пойменные долины (по терминологии А. С. Козменко, долины первого и второго типа).

Если в беспойменных долинах в деформациях русла принимают участие в основном крупные влекомые наносы, формирующие основные виды подвижных скоплений — гряд, а взвешенные наносы, не задерживаясь, выносятся потоком, то в пойменных долинах взвешенные наносы получают возможность переоткладываться, накапливаясь на пойме и вновь поступая в поток при размыве поймы в результате плановых деформаций русла. Процесс обмена наносами между поймой и руслом протекает непрерывно. Формирование поймы и ее последующая переработка длятся столетия. Обычно при неизменности природных условий водосбора все разрушенные формы скоплений наносов оказываются затем восстановленными в прежних или несколько измененных формах. Таким образом, обратимость деформаций (переотложение наносов) проявляется наиболее ярко.

Из приведенного краткого описания движения наносов в беспойменных и пойменных долинах видно, что эти звенья гидрографической сети могут быть названы зонами переотложения или транспорта наносов (чередование размыва, переноса и отложений наносов).

Приустьевые участки и дельты. В нижних частях пойменных долин обычно намечается третья область стока наносов — зона аккумуляции. Дело в том, что увеличение водоносности рек, а следовательно, и стока наносов сопровождается вместе с тем уменьшением уклонов и, несмотря на измельчение наносов, все большая их доля, ранее проходившая во взвешенном состоянии, начинает входить в состав донных наносов и перемещаться в форме сползающих их скоплений — очень крупных гряд, накопление которых формирует мощные донные отложения, крупные острова и дельты. Появляются многорукавные русла, т. е. наблюдается переход от меандрирования к иным формам русловых деформаций. Самое нижнее звено гидрографической сети — дельты и является обычно ярко выраженной областью аккумуляции, областью, в которой преобладают не переотложения, а однонаправленный процесс — накопления наносов на очень длительное время.

Тенденция к аккумуляции прежде всего проявляется в продвижении внешнего края дельты в море, характерном для многих речных дельт. Это продвижение идет, несмотря на то что гидрографическая сеть дельты претерпевает непрерывные и

относительно интенсивные переформирования, т. е. сопровождается одновременно переотложением наносов.

Дельты могут возникать не только при впадении реки в море, но и при впадении в озера и водохранилища, а также на участках местной аккумуляции наносов. Такие дельты называются внутренними.

В табл. 13 приводятся данные о годичном приросте внешнего морского края речных дельт.

Таблица 13

Река	Прирост длины реки (м/год) вследствие продвижения внешнего края дельты
Урал	82
Сырдарья	97
Кура	20—30
Миссисипи	80—350
Янцзы	60—83
Волга	94—370

В реальных условиях такое закономерное чередование звеньев гидрографической сети, как в рассмотренной выше схеме, а равно и чередование зон питания потока наносами, транспорта (переотложения) и аккумуляции может и не наблюдаться в связи с особенностями строения водосборов, изменением гидрологических условий, в частности, в связи с характером приточности. Однако в ней даются достаточно четкие признаки, позволяющие применить ее к конкретной гидрографической сети водосборов и наметить границы всех указанных зон (Попов, 1962, 1963).

в. Основные факторы руслового процесса

Все вышеизложенное достаточно отчетливо указывает на большую зависимость руслового процесса на данном участке реки от природных условий всего водосбора этого участка.

Н. Е. Кондратьевым (1959) предложена следующая схема, поясняющая место и роль природных условий водосбора (климатических, гидрологических и геоморфологических факторов) в развитии руслового процесса (рис. 7). В соответствии с этой схемой климатические условия бассейна реки (питание водотока) и геоморфологические факторы (строение бассейна — его топография и геология) обусловливают основные особенности стока воды: его объем, режим поступления, а следовательно, размеры и продолжительность воздействия на поверхность во-

досбора. Воздействие текущей воды на породы, слагающие бассейн, вызывает появление стока наносов. Этот сток осуществляется в форме переотложения наносов, приводящего к возникновению обратимых деформаций речных русел и пойм. Одновременно развиваются и однонаправленные необратимые деформации, прежде всего выражающиеся в сработке продольного профиля. Сток воды, определяя общий сток наносов, кроме того, определяет размеры и режим местных гидравлических воздействий. Деформации русел и пойм развиваются в условиях воздействия ограничивающих факторов, среди которых главнейшими являются геологические особенности строения речной долины и искусственно созданные воздействия. Эти воздействия вносят существенные видоизменения в ход деформаций, которые должны были бы развиваться при данном сочетании особенностей стока воды и наносов.

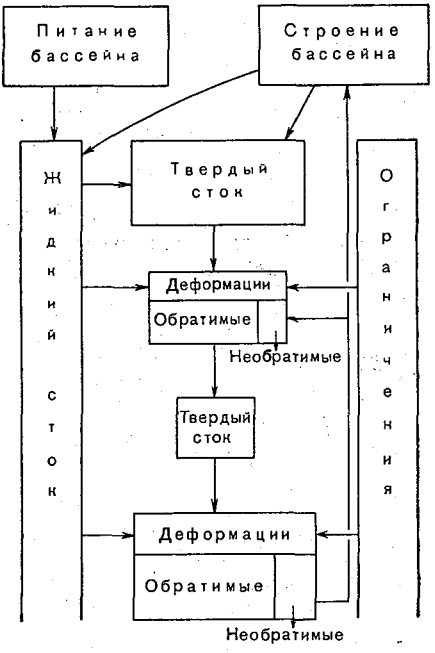


Рис. 7. Схема соотношения основных факторов руслового процесса (по Н. Е. Кондратьеву).

Необратимые деформации приводят к некоторым изменениям строения бассейна, являются рельефообразующими и через видоизменения рельефа в свою очередь воздействуют на характер стока воды и наносов. Это воздействие должно учитываться как практически значимое в случае, если анализируются периоды, исчисляемые в масштабах геологического времени.

Выделение стока воды и наносов в качестве ведущих факторов руслового процесса, вполне определяющих внешний облик речного русла и поймы, продолжает линию Лохтин—Россинский и Кузьмин, о сущности которой указывалось во введении.

При таком выделении, как указывает Кондратьев (1959), в полной мере соблюдается основное требование при установлении причинно-следственных связей — независимость факторов по отношению к исследуемому процессу.

Из гидравлических факторов сток воды полностью не зависит от руслового процесса, в равной мере как и ограничивающие условия.

В отношении стока наносов необходимо отметить следующее: взаимодействие потока и размываемого русла определяет расход наносов в пределах данного бесприточного участка. Однако русловой процесс — процесс переотложения наносов в пределах этого участка неизбежно видоизменяется под влиянием поступления наносов через его верховой створ, т. е. с предыдущего участка. Поэтому это поступление правомерно рассматривать как независимый фактор, как одну из причин особенностей развития руслового процесса на данном участке. Именно вследствие того, что поступление наносов через верховой створ не учитывалось, в ряде исследований по воспроизведению русловых форм в лаборатории оно не удавалось до тех пор, пока одновременно с подачей на модель воды не начали подавать и наносы. В частности, имеются в виду эксперименты с воссозданием в лабораторных условиях меандрирующего русла, долгое время не удававшиеся у нас и за рубежом.

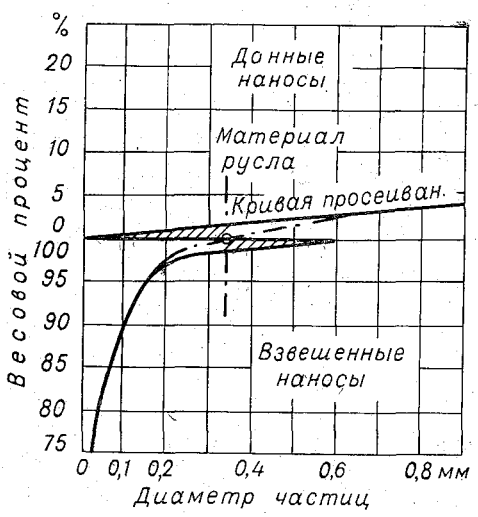


Рис. 8. Определение граничного диаметра частиц, разделяющего взвешенные и донные наносы в данном створе (по В. Крессеру).

Сток наносов осуществляется в виде перемещения донных и взвешенных наносов. О наличии этих двух категорий наносов свидетельствует обычно обнаруживаемое в речном аллювии двучленное его строение, побудившее выделить указанные выше две основные фации аллювия, обычно хорошо видные в разрезах речных пойм. В донных отложениях, т. е. в разрезах русловых образований, в частности, в грядах, побочнях, осередках и пляжах, обнаруживается, что основой этих аллювиальных скоплений также являются донные наносы. Относительно возможности разделения этих двух категорий наносов отметим следующее.

В. Крессер (Kresser, 1964) обращает внимание на следующее обстоятельство. Если кривую гранулометрического состава взвешенных наносов поместить под кривой гранулометрического состава донных отложений так, чтобы совместить при этом горизонтальную шкалу крупности частиц, то в составе донных отложений оказывается относительно небольшое количество (в процентном отношении) мелких частиц и основу их слагают

крупные частицы. В то же время в составе взвешенных наносов оказывается также очень небольшое количество крупных частиц. Если обе кривые гранулометрического состава, расположенные указанным образом, объединить соединительной вставкой (рис. 8), то оказывается, что точка пересечения этой вставкой горизонтальной оси (оси крупности наносов) может характеризовать диаметр частиц, разграничивающий обе категории наносов (на рис. 8 он составляет 0,34 мм).

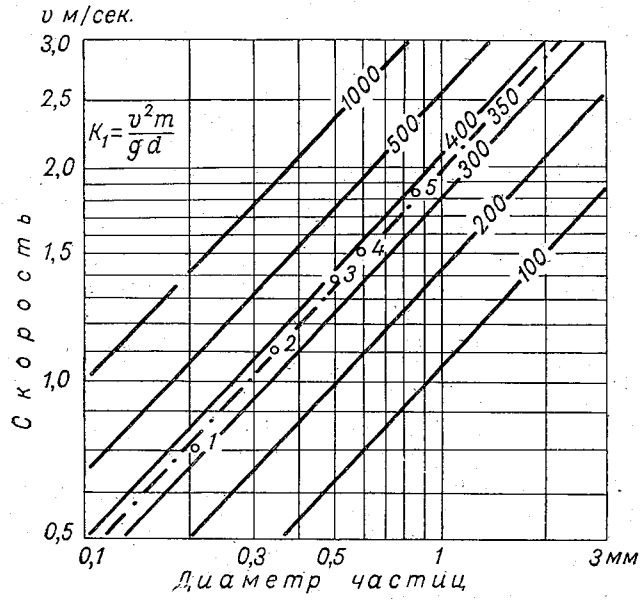


Рис. 9. График, предложенный В. Крессером для определения граничного диаметра частиц но данным о средней скорости течения, при $k=360$.

1 — Дунай у Ордова; *2* — Гайл у Раттендорфа; *3* — австрийский участок р. Ахе у Вента; *4* — Рейн у Бругга, *5* — Дунай выше Прессбурга.

Обобщение натурных материалов по разным рекам (Дунай у Ордова, Дунай выше Прессбурга, Рейн у Бругга, Ахе у Вента, Гайл у Раттендорфа) позволило Крессеру предложить формулу для определения граничного диаметра d от средней скорости течения v м/сек.

$$d=\frac{v^2}{gk}.$$

Здесь k — постоянный коэффициент, равный 360.

При этих условиях $d=0{,}28v^2$.

Коэффициент k может изменяться от 100 до 1000. Для определения d при разных k дается эмпирический график (рис. 9).

Легко видеть, что при разных скоростях течения d будет различным, т. е. соотношение взвешенных и донных наносов меняется по фазам водного режима, однако остается достаточно четким, особенно если учитывать стратиграфию донных отложений.

Необходимость деления наносов на донные и взвешенные обусловливается не только тем обстоятельством, что они идут на построение различных морфологических образований и указанными приемами разграничиваются достаточно четко, но главное тем, что эти категории наносов обладают различной формой движения — механизм их перемещения резко различен.

Как указывается Н. Е. Кондратьевым (1968), донные наносы приводятся в движение только силами, возникающими в придонном слое потока, и если и попадают в его толщу (иногда они достигают даже поверхности потока), то они быстро выпадают на дно, не встречая в потоке сил, способных поддерживать их во взвешенном состоянии сколько-нибудь длительное время. Поэтому и траектории донных частиц относительно короткие. Взвешенные же наносы поддерживаются в потоке во взвешенном состоянии длительное время и способны проходить отрезки пути, исчисляемые даже в десятках и сотнях километрах.

Таким образом, подходя к русловому процессу с морфологических позиций, деление наносов на взвешенные и донные крайне важно — оно позволяет понять структуру русловых образований. Однако это важно и с позиций учета суммарного стока наносов.

Действительно, путем перемещения русловых форм осуществляется основной расход донных наносов. Расход взвешенных наносов имеет значительно более сложную структуру, однако частично он связан и с расходом донных наносов.

Это объясняется тем, что взвешенные наносы, двигаясь по длинным извилистым траекториям, время от времени выпадают на дно, смешиваются с донными отложениями и оказываются включенными в состав русловых скоплений наносов. При очередном размыве этих скоплений взвешенные наносы вновь попадают в поток и продолжают в нем свое движение. Таким образом, благодаря размыву русловых форм скоплений осуществляется питание потока взвешенными наносами.

В силу того что длина пути взвешенной частицы $l_в$ за время с момента ее поступления в поток до ее очередного выпадения на дно обычно бывает во много (в десятки, сотни и тысячи) раз больше, чем соответствующая длина пути донной частицы $l_д$, расход взвешенных наносов $q_в$, полученный за счет питания потока наносами донных размывов, может во много раз превосходить расход этих наносов $q_д$ даже тогда, когда в со-

ставе отложений взвешенные наносы находятся в малом количестве, выраженном единицами процентов,

$$q_в = q_д \frac{l_в h_в}{l_д h_д}, \quad (1)$$

где $\frac{h_в}{h_д}$ — количественное соотношение взвешенных и донных наносов в составе русловых форм. Приведенная формула выведена Кондратьевым (1959) из условия равного времени пребывания в составе руслового скопления наносов донных и взвешенных частиц.

Глава II

ОБЩАЯ СХЕМА ТИПИЗАЦИИ РУСЛОВЫХ ФОРМ

После предварительных общих положений о сложных формах рассмотрим основы их типизации, разработанной в отделе русловых процессов ГГИ. В этой типизации, наиболее полной из существующих и выработанной на основе анализа натурных материалов, в частности, большого числа аэрофотоснимков, различные сложные формы рассматриваются, по сути дела, как модификации крупной ленточной гряды в русле реки, происходящие под влиянием особенностей основных факторов руслообразования — стока воды и наносов и под влиянием естественных или искусственно созданных ограничивающих свободное развитие процесса условий.

Схема типизации руслового процесса, разработанная в ГГИ, представлена в табл. 14. Подробные характеристики переформирований, свойственных каждому типу процесса, изложены в нижеследующих главах.

В заключение этого раздела необходимо отметить следующее.

Различные комбинации особенностей природных факторов руслового процесса, в первую очередь стока воды и наносов, приводят к тому, что морфологические и гидравлические характеристики, присущие данному типу процесса, могут меняться в значительных диапазонах. Однако все же можно отметить, что в общем намечается убывание уклонов потоков от ленточно-грядового типа к незавершенному меандрированию. Одновременно с этим можно отметить и убывание в том же направлении объемов, переносимых потоком донных наносов, и возрастание в процессах руслоформирования роли взвешенных наносов. Роль последних становится особенно большой при свободном меандрировании, проходящем в условиях интенсивного обмена между руслом и поймой.

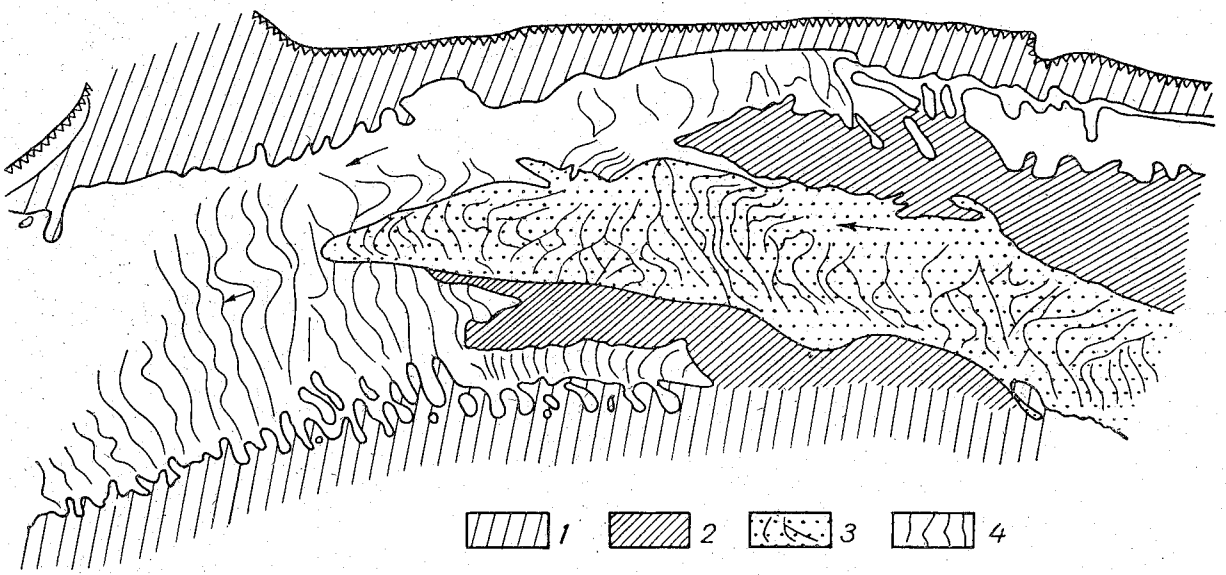


Рис. 10. Схема рельефа дна русла р. Ахтубы, составленная по аэрофотоснимку.

1 — пляжи, обсохшие со сглаженным микрорельефом, *2* — обсохшие участки причленившихся гряд, *3* — ленточная гряда, по поверхности которой перемещаются цепи небольших гряд, *4* — ряды небольших гряд, крупность которых в центральных и краевых частях потока различна.

1. ОСНОВНЫЕ ФОРМЫ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

Возможности выявления в руслах рек и на их поймах различных видов морфологических образований неизмеримо возросли с внедрением новой техники русловых исследований, в частности, в связи с эхолотированием и применением материалов аэрофотосъемки.

В работе автора (Попов, 1961) были собраны данные по грядам, опубликованные в различных источниках и относящиеся к 24 участкам преимущественно равнинных рек, причем данные эти не отличались большой полнотой. Однако уже в 1964 г. имелись массовые наблюдения над грядами с полноценными их характеристиками. Так, например, Б. Ф. Снищенко удалось собрать и обработать данные более чем по 15 тысячам гряд, измеренных на различных реках. Большой фактический материал дает анализ аэрофотоснимков с просвечивающим дном русла. Опытные проработки показали, что на равнинных реках с не слишком высокой мутностью воды участки с просвечивающим в межень дном часто составляют до 30% протяжения рек (Попов, 1962).

Все больше данных о грядах появляется и в зарубежной литературе. Появились и многочисленные материалы лабораторных исследований гряд также и у нас (Знаменская, 1968). Все эти материалы обеспечивают возможность детального анализа различных эрозионно-аккумулятивных образований в руслах и на поймах рек и являются достаточными для их типизации.

В качестве примера возможности обнаружения на аэрофотоснимках различных морфологических образований на рис. 10 приводится схема расположения гряд различной крупности в русле реки, составленная по аэрофотоснимкам.

Н. Е. Кондратьев все многообразие морфологических образований на равнинных реках подразделяет на две основные группы: 1) простые формы и 2) сложные формы.

Простые русловые формы (гряды). Перемещение песчаных гряд является наиболее распространенной формой транспорта донных наносов. Для возникновения этих гряд на песчаном дне достаточно, чтобы скорость течения в придонном слое достигла некоторой критической величины, при которой донные частицы теряют свою устойчивость. Эти скорости обычно составляют около 0,30 м/сек.

В отличие от более сложных морфологических образований на реках, для возникновения которых требуется сочетание ряда действующих природных факторов, все виды песчаных гряд могут быть объединены под общим названием простых русловых форм.

В грядах удается выделить следующие основные элементы (рис. 11).

Верховой откос — поверхность гряды, обращенная против течения, имеющая более пологий наклон, чем низовой откос. Наивысшие точки гряды образуют гребень, наинизшие — подвалье. В продольном профиле за высоту гряды принимается превышение гребня над подвальем: за длину — расстояние по горизонтали между гребнями двух смежных гряд.

Поток, обтекающий гряду, отрывается от ее гребня и образует в подвалье водоворотную зону, состоящую из одного или нескольких более или менее устойчивых вальцов (рис. 12).

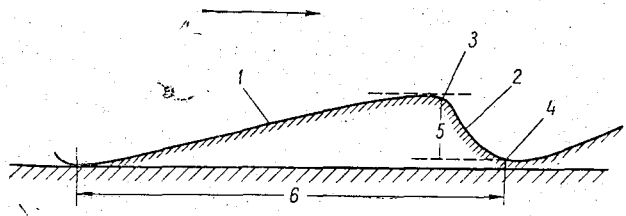


Рис. 11. Основные элементы гряды.

1 — лобовой откос, *2* — низовой откос, *3* — гребень, *4* — подвалье, *5* — высота гряды, *6* — длина гряды.

На пологом верховом откосе гряды, в области скоростей, совпадающих с направлением основного потока, происходит непрерывное перемещение донных частиц в сторону гребня. Достигнув гребня, песчаники скатываются в подвалье гряды, отлагаясь на крутом низовом откосе. Скорость движения воды у дна в подвалье, в зоне водоворота, имеет направление, противоположное общему течению потока (рис. 12). Здесь частицы наносов находятся или в покое, или при сильно развитом вальце перемещаются в сторону низового откоса выше лежащей гряды, на котором они и отлагаются.

В результате размыва верхового откоса гряды и отложения наносов на низовом ее откосе осуществляется перемещение всей гряды вниз по течению. При этом может иметь место частичный перенос наносов через зону подвалья на верховой откос ниже следующей гряды или даже через гряду. Если этим пренебречь, то для гряды, перемещающейся со скоростью c без изменения ее профиля, мгновенное значение расхода донных наносов на единицу ширины потока q через неподвижный створ mm_1 (рис. 12), в котором превышение поверхности гряды над наинизшей точкой подвалья равно z, имеет следующее выражение:

$$q = c(z - z_0), \qquad (2)$$

где z_0 — превышение над наинизшей точкой подвалья точки A, разделяющей два различно направленных потока наносов, один,

идущий в сторону гребня, т. е. вниз по течению, другой, идущий в сторону низового откоса выше расположенной гряды, т. е. вверх по течению.

Из формулы следует, что на участке, лежащем выше точки A, расход наносов возрастает по мере приближения к гребню. На

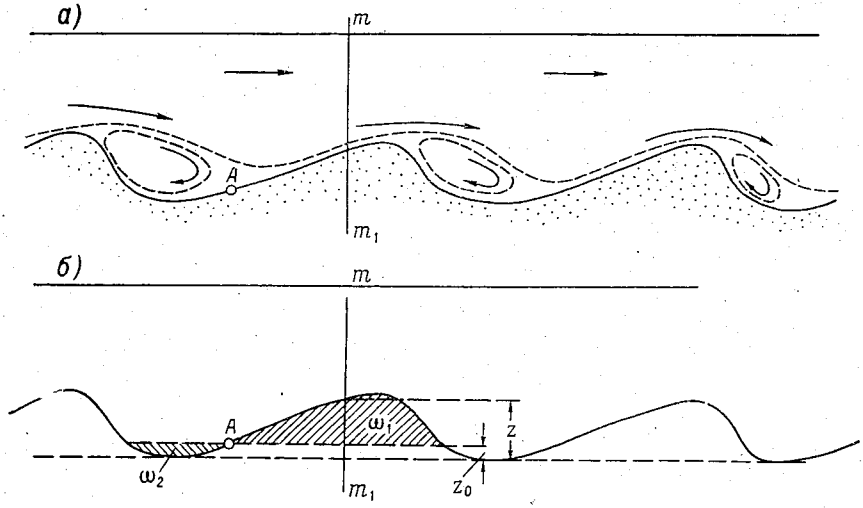


Рис. 12. Схема обтекания гряды ($а$) и вычисления расхода донных наносов ($б$).

участке подвалья ниже раздельной точки A расход станет отрицательным ($z<z_0$) и будет возрастать с приближением к наинизшей точке подвалья. Средний расход наносов за период гряды τ, т. е. за время перемещения гряды на всю ее длину, будет равен

$$\bar{q} = \frac{w_1 - w_2}{\tau}. \qquad (3)$$

Величины z_0 и w_2 в большинстве случаев настолько малы по сравнению с полной высотой гряды z и полным ее объемом w, что ими можно пренебречь, тогда

$$q = cz,$$

$$\bar{q} = \frac{w_1}{\tau}. \qquad (4)$$

На реках встречается множество различных по размерам и форме гряд и грядообразных образований.

Большие гряды имеют длину, во много раз превышающую глубину потока. Высота некоторых из этих гряд приближается, а иногда превышает среднюю глубину потока. В пределах таких гряд все гидравлические характеристики потока (глубина, сред-

няя на вертикали скорость течения, эпюра распределения скоростей течения по вертикали, характеристики турбулентности потока) претерпевают существенные изменения. Такой поток является неравномерным, что и определяет все особенности взаимодействия его с размываемым ложем.

Однако среди гряд, наблюдающихся в естественных потоках и воспроизводимых в лабораторных лотках, имеются такие, длина и высота которых мала по сравнению с размерами потока. Их возникновение не приводит к изменениям общих гидравлических характеристик потока в границах одной гряды. Обтекание потоком этих гряд сопровождается лишь возмущениями, охватывающими только придонную часть потока и лишь иногда распространяющимися на всю его толщу, т. е. явлениями макротурбулентности. Таким образом, малые гряды могут возникнуть в потоках, которые с гидравлической точки зрения должны быть отнесены к равномерным, турбулентным.

Приведенные выше соображения позволяют все многообразие песчаных гряд подразделить на две большие группы:

а) малые русловые формы, или микроформы, не связанные с характером режима движения потока и взаимосвязанные с макротурбулентными пульсациями;

б) более крупные формы, взаимосвязанные с неравномерным потоком, эти формы называют средними, или мезоформами.

Поскольку основной целью настоящей книги является исследование крупных форм речного русла, сведения о свойствах малых и средних форм ограничим нижеприводимым перечнем. Подробнее эти свойства рассмотрены в книге Знаменской (1968).

Сложные формы, основные свойства. Русловой процесс развивается в условиях закономерной внутригодовой смены расходов воды и при определенном объеме наносов, поступающих в течение года на этот участок с его водосбора. Таким образом, русловой процесс на участке большого протяжения связан с транспортом наносов, выраженным их годовым стоком. Если данный участок не способен в существующем состоянии пропустить весь поступающий в него годовой объем наносов, начнется морфологическая его перестройка и изменение транспортирующей способности потока. Эта перестройка будет происходить до тех пор, пока транспортирующая способность рассматриваемого участка реки не станет соответствовать годовому поступлению наносов. Морфологическая перестройка русла на таком участке может оказывать влияние на смежные участки реки и, следовательно, вызовет некоторое перераспределение стока наносов по ее длине. Однако такое перераспределение лишь в незначительной степени может повлиять на эрозионные процессы в верховых звеньях сети (на ее водосборе), поставляющих наносы на рассматриваемый участок.

Закономерный характер внутригодовых изменений стока

Основные свойства русловых форм

Малые формы (микроформы)	Средние формы (мезоформы)	Крупные формы (макроформы)
Массовое распространение в руслах рек, несоизмеримы с размерами русла	Одиночные гряды, соизмеримые с размером потока	Определяют внешний облик русла и поймы реки
Определяют степень шероховатости дна	Определяют вид русла	Непосредственно обусловлены характером сочетания основных факторов руслового процесса стока воды и ограничивающих условий. Эти сочетания определяют тип руслового процесса. Характерны не только сезонные, но и многолетние циклы переформирований
Возникновение связано с наличием турбулентности	Связаны с осредненным полем скоростей	
Определяют потери энергии потоком	Обладают значительной инерционностью	
Выражают расход донных наносов	Сезонность развития (связь с водным режимом)	
Быстро изменяются вслед за изменением гидравлической обстановки в потоке		

воды и наносов обусловливает появление также внутригодовой цикличности в развитии руслового процесса. Последовательные изменения транспорта наносов во времени и пространстве приводят к созданию своеобразных морфологических образований, выражающих весь ход изменений руслового процесса в целом и являющихся своего рода звеньями, из которых состоит русло реки. Эти звенья назовем сложными формами, или речными макроформами.

Так как макроформы отображают в своем развитии весь ход руслового процесса в целом, в них проявляются специфические качественные особенности. Основная причина качественного различия между сложными и средними формами заключается в том, что последние развиваются в условиях установившегося движения воды и отображают расход наносов, в то время как сложные формы развиваются в условиях внутригодовой смены

Основные особенности типов руслового

Тип руслового процесса	Основные виды деформаций речного русла	Пойменный процесс и его роль в руслообразовании	Особенности стока донных наносов
Ленточногрядовый	Сползание крупных одиночных гряд, занимающих всю ширину русла. Высота гряд меняется по сезонам года. Плановые деформации русла не характерны	Отсутствует	Высокая транспортирующая способность потока, относительно высокие расходы донных наносов
А. Развитие ленточногрядового типа руслового			
Побочневый	В половодье сползание крупных песчаных, перекошенных в плане гряд. В межень прибереговые, наиболее возвышенные их части обсыхают, образуя неподвижные в этот период побочни и слабоизвилистое русло, начинается небольшой размыв берегов на участках между побочнями. Размыв берегов ликвидируется в половодье наползающими побочнями	Отсутствует	Относительно замедленный транспорт донных наносов, приводящий к перекосу гряд
Ограниченное меандрирование	Сползание относительно слабовыраженных излучин при сохранении ими форм и размеров. Отсутствие сползания гряд-перекатов. Побочни превращаются в участки выпуклых берегов, перемещаются только вместе с излучиной	Появляется пойменный процесс. Ширина поймы равна поясу меандрирования. Пойма полностью перерабатывается при сползании излучин	Еще более замедленный транспорт относительно небольших объемов донных наносов относительно мелких фракций

Таблица 14

процесса и определяющих его факторов

Роль взвешенных наносов	Особенности гидрографа	Роль ограничивающих условий	Особенности распределения уклонов по длине потоков
При постоянном обмене взвешенными наносами между потоком и его дном вследствие движения гряд, отсутствие крупных скоплений этих наносов	Существует при любых типах водного режима, в том числе и при отсутствии выраженных фаз годового стока. Особенности гидрографа сказываются на размерах гряд и их сезонных изменениях	Благоприятствуют развитию процесса	Значительные уклоны потока
процесса с переходом к меандрированию			
При постоянном обмене взвешенными наносами между потоком и его дном вследствие движения гряд, отсутствие крупных скоплений этих наносов	Образование побочней требует выраженной межени	Благоприятствуют развитию процесса	Меньшие, чем в предыдущем случае
Участвуют в формировании преимущественно отдаленных от русла участков поймы	Процесс развивается в условиях наличия фаз годового стока. Особенности половодья определяют интенсивность пойменного процесса	Один из главнейших факторов, определяющих тип процесса	Выполаживание уклонов по сравнению с предыдущими типами руслового процесса

Тип руслового процесса	Основные виды деформаций речного русла	Пойменный процесс и его роль в руслообразовании	Особенности стока донных наносов
Свободное меандрирование	Разворот S-образных отрезков русла, образованных двумя смежными излучинами, вокруг точек, близких к перегибу. Последовательные изменения формы, степени выраженности, развитие асимметрии излучин, образование петель русла, раздвоение плесов. Завершение цикла плановых деформаций прорывом перешейка петли вследствие непосредственного сближения противоположных его берегов	Интенсивно развит. В ходе плановых деформаций образуются обширные поймы, значительно более широкие, чем пояс меандрирования, способный смещаться при прорывах петель. Образование береговых валов на выпуклых берегах и их серий (вееров перемещения русла), обусловленных неравномерным развитием излучины в плане. Интенсивный обмен наносами между поймой, сложенной двумя фациями аллювия—русловой в основании (нижние слои) и пойменной более мелкозернистой (верхние слои), образованной наилком. Последний образуется по всей ширине поймы	Относительно небольшой, преимущественно мелких фракций. Большие изъятия на намыв берегов и местное поступление от размыва русловой фации в подмываемых берегах. Развитие многих видов подвижных скоплений наносов разных размеров. Резкие изменения стока донных наносов при прорывах петель
Незавершенное меандрирование	То же, что при свободном меандрировании, но завершение цикла развития излучин образованием спрямляющего протока, постепенно принимающего весь расход воды, и отмирание (занесение и заиление) прежнего главного русла. Появление спрямляющего протока в зависимости от	То же, но еще более развитый. Велика роль размывов поверхности поймы, обычно более узкой, чем при свободном меандрировании	То же; неравномерность стока по длине реки связана с развитием спрямлений, идущих постепенно

Роль взвешенных наносов	Особенности гидрографа	Роль ограничивающих условий	Особенности распределения уклонов по длине потоков
Повышенный сток взвешенных наносов. Неравномерное их поступление в поток по длине реки в связи с размывом пойменной фации аллювия. Большие изъятия на наилок	Хорошо выраженное половодье, обеспечивающее неравномерный размыв берегов, оборудование вееров перемещения русла и интенсивный обмен наносами между поймой и руслом	Процесс развивается в условиях отсутствия ограничивающих факторов	Небольшие уклоны потока. Резкие изменения их после прорыва петель. Выравнивание продольных уклонов в половодье и неравномерное распределение по длине в межень
Относительно небольшой сток взвешенных наносов, образующих сравнительно небольшой наилок из-за хорошей проточности поймы	Высокие половодья обусловливают хорошую затопляемость поймы — обязательного условия развития этого типа процесса	То же	Небольшие уклоны и меньшие их изменения при спрямлениях

Тип руслового процесса	Основные виды деформаций речного русла	Пойменный процесс и его роль в русло-образовании	Особенности стока донных наносов
	затопляемости пойм возможно на разных стадиях развития излучин. В спрямлениях часто появление побочневого типа и переход к меандрированию		
	Б. Развитие ленточногрядового типа с пере		
Осередковый тип	Движение по распластанному руслу расчлененных крупных гряд или их рядов. Наиболее возвышенные части их в межень обсыхают, образуя осередки. Зарастая и накапливая отложения, осередки могут превращаться в острова. Протоки между ними часто начинают меандрировать, что обусловливает возможность смещения островов-осередков не только вдоль по реке, но и в поперечном к ней направлении	Островные поймы и относительно неразвитые пойменные массивы вдоль берегов русла. Возможно образование мощного наилка и появление высоких островов	Большие объемы переносимых потоком донных наносов крупных фракций. Тенденция к их аккумуляции

расходов воды и отображают все разнообразие характеристик стока воды и наносов. Поэтому по сравнению со средними формами их строение отличается большей сложностью и существует большее число разновидностей сложных форм.

Для сложных форм характерна внутригодовая смена находящихся в их пределах активных простых форм. Средние формы, соответствующие гидравлическим условиям половодья, наиболее крупны по размерам; в период межени они прекращают свое развитие, сохраняясь как унаследованные, или разрушаются. Они существенно влияют на развитие наблюдающихся в этот период простых форм.

Большие внутригодовые колебания уровня способствуют образованию относительно малоподвижного элемента сложной формы — поймы, которую можно рассматривать как периодически действующее речное русло, т. е. объект, непосредственно отражающий русловой процесс.

С образованием пойм неразрывно связана новая форма

Роль взвешенных наносов	Особенности гидрографа	Роль ограничивающих условий	Особенности распределения уклонов по длине потоков
ходом к русловой многорукавности			
Возможно интенсивное осаждение взвешенных наносов, но быстрое их возвращение в поток при интенсивных плановых деформациях островов	При отсутствии длительной межени большая подвижность осередков, переход к блужданию русла и протоков при выраженной межени, образование из осередков островов	Особого значения не имеют	Участки резкого уменьшения уклонов потока по сравнению с вышележащими, но сохраняющие большие падения, частые изменения не только продольных, но и поперечных уклонов

транспортирования наносов, выражающаяся в том, что в период затопления поймы на ней откладываются наносы, главным образом взвешенные, в виде наилка, которые затем в результате плановых деформаций русла и сопутствующих им подмывов берегов вновь возвращаются в поток.

Обмен наносами между руслом и поймой носит циклический характер, поскольку можно говорить, в частности, о средней продолжительности пребывания твердой частицы в составе пойменных отложений, которая находится в них с момента ее осаждения в пойме до момента возвращения в поток.

Общие циклы развития сложных форм по продолжительности намного превышают годичные циклы их деформаций и не имеют столь же строгой периодичности. Эти положения особенно ярко проявляются в ходе развития сложной формы, представленной излучиной, о чем подробнее будет сказано ниже.

На большинстве рек, находящихся в естественном состоянии, создались сложные формы, соответствующие среднему

многолетнему режиму стока воды и наносов. Их деформации носят ярко выраженный обратимый характер. Такое состояние реки может быть названо динамическим равновесием. Однако в результате несоответствия твердого стока местным сложным формам (в результате циклических изменений стока, тектонических движений, регулирования стока и др.) возможно его перераспределение по длине реки. Подобное явление встречается достаточно часто.

Несоответствие твердого стока местным сложным формам может быть связано с тем, что продолжительность цикла обмена наносами между руслом и поймой окажется большой и соизмеримой со сроками изменения поступления наносов от их первоисточников (из верхних звеньев гидрографической сети). В этих условиях даже на реках, существующих длительное время, появляются участки, на которых, кроме обратимых, происходят необратимые, однонаправленные деформации.

На реках с ненарушенным водным режимом величина необратимых деформаций невелика по сравнению с обратимыми, но тем не менее однонаправленный процесс может оказать влияние на общий характер руслового процесса. Таким образом, в реках могут возникать участки значительного протяжения с различной направленностью и характером руслового процесса. Кроме указанного, на различия в характере руслового процесса существенное влияние оказывают и местные ограничивающие условия.

Особенно резкие нарушения динамического равновесия происходят в реках с зарегулированным водным режимом, вызванным созданием водохранилищ, способных внести коренные изменения в ход стока воды и наносов. В результате нарушения прежнего водного режима русло и пойма реки претерпевают коренную перестройку, при которой могут возникнуть не только количественные изменения характеристик сложных форм, но и смена одних типов форм другими, качественно отличными.

2. ВЫВОДЫ

Итак, основными исходными положениями гидролого-морфологической теории, или, как ее предпочитает называть Н. Е. Кондратьев, гидроморфологической теории, являются следующие.

1. Существуют два вида деформаций поверхности суши, вызываемых движущейся водой — необратимые, однонаправленные, вековые деформации и обратимые (знакопеременные или компенсирующиеся) деформации, представляющие собой переотложение наносов, транспортируемых потоком. Размеры обратимых деформаций несоизмеримо велики по сравнению с необратимыми, к тому же они имеют как внутригодовые, так и годичные или продолжающиеся ряд лет циклы. По этим причи-

нам обратимые деформации имеют большое практическое значение.

2. Деформации речных русел представляют собой способ транспортирования потоком наносов, выражающийся в переотложении речного аллювия. В верхних звеньях гидрографической сети происходит однонаправленный процесс эрозии — процесс выноса наносов, являющийся первоисточником их поступления в русловой поток. Таким образом, каждая река получает определенное количество наносов, поступающих в нее с водосбора, и вынуждена их транспортировать к водоприемнику.

3. Количество этих наносов, их гранулометрический состав и режим перемещения определяются основными природными особенностями водосбора, среди которых главнейшими являются водный режим, сток наносов и ограничивающие условия, под которыми понимаются особенности геологического строения речных долин, препятствующие развитию русловых деформаций.

4. Транспорт наносов (их переотложение), а следовательно и деформации речных русел и пойм, обычно бывает дискретным, т. е. осуществляется в виде перемещения определенных морфологических образований. Виды этих образований и особенности их деформаций определяются особенностями природных условий, в которых осуществляется транспорт наносов.

5. В транспорте наносов участвуют две основные категории — донные и взвешенные наносы. Они идут на построение различных морфологических образований и обладают разным механизмом движения. Основные русловые образования сложены донными наносами, в пойменных образованиях резко возрастает роль взвешенных наносов. Вместе с тем расходы взвешенных наносов в значительной мере определяются движением донных наносов. Поэтому донные наносы необходимо изучать и исследовать как для оценки руслового процесса, так и для общего стока наносов, хотя в основной своей части он состоит из взвешенных наносов.

6. Среди русловых образований следует различать микро-, мезо- и макроформы. Первые две категории морфологических образований обусловлены только гидравликой потока, макроформы же отражают особенности комплекса природных условий всего водосбора. Подход к изучению этих форм должен быть различным — в первых категориях форм (микро- и мезоформах) должен преобладать гидродинамический подход, при изучении макроформ — комплексный гидроморфологический подход.

7. Возможность типизации основных факторов руслообразования обусловливает и возможность типизации русловых деформаций. Поскольку различные морфологические образования обладают и различными закономерностями деформаций, обнаружение определенных морфологических структур одновременно характеризует и русловой процесс.

Глава III

ЛЕНТОЧНОГРЯДОВЫЙ И ПОБОЧНЕВЫЙ ТИПЫ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

Одной из простейших форм транспортирования потоком донных наносов, создающей определенный внешний облик речного русла, является перемещение по руслу средних форм — ленточных гряд (рис. 13). Эта форма перемещения донных наносов обнаружена по аэрофотоснимкам с просвечивающим дном речного русла на достаточно большом числе рек и на участках большого протяжения, что и дает основание для ее выделения в самостоятельный тип руслового процесса (рис. 14).

Под ленточной грядой понимается крупное песчаное грядообразное скопление наносов, занимающее всю ширину русла. При ленточногрядовом типе руслового процесса подобные песчаные гряды сохраняют свою целостность и в период половодья и в межень, несколько меняя в соответствии с водностью периода только свои размеры и скорость сползания.

При побочневом типе процесса формировавшаяся в период половодья ленточная гряда в межень существенно видоизменяется. Перемещение такой гряды в половодье обычно осуществляется таким образом, что гребень гряды оказывается перекошенным в плане и гряды занимают относительно друг друга положение, напоминающее шахматный порядок. Поэтому, в отличие от чисто ленточногрядового движения донных наносов, при котором одиночные гряды закономерно сменяют друг друга по длине рек, в данном случае оказывается возможным выделить как бы две системы гряд — правобережные и левобережные. В межень каждая из гряд, формировавшихся в половодье, приостанавливает свое движение и переформировывается. Прибереговая, наиболее возвышенная часть гряды, освобождаясь от воды, консервируется и превращается в побочень, часть же гряды, остающаяся затопленной в течение всей межени, постепенно срабатывается и образует гребень переката. При последующем половодье вся перекошенная ленточная гряда вновь приходит в движение и начинает сползать как целостное образование.

Из приведенного описания следует, что каждый перекат при побочневом типе процесса представляет собой подводную часть той же гряды, которая сформировала побочень. Подвалье этой гряды является плёсовой лощиной. Таким образом, распространенное представление о перекате как об образовании, состоящем из двух побочней и гряды между ними, в данном случае не соответствует структурным особенностям перемещения донных наносов. Так называемый верховой побочень, представляющий собой часть выше расположенной гряды, к тому же

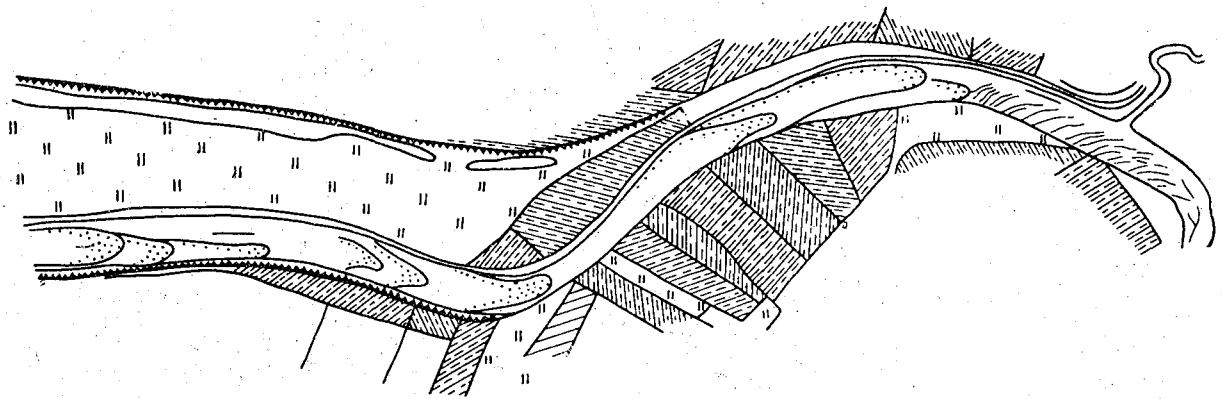


Рис. 13. Ленточные гряды в русле реки.

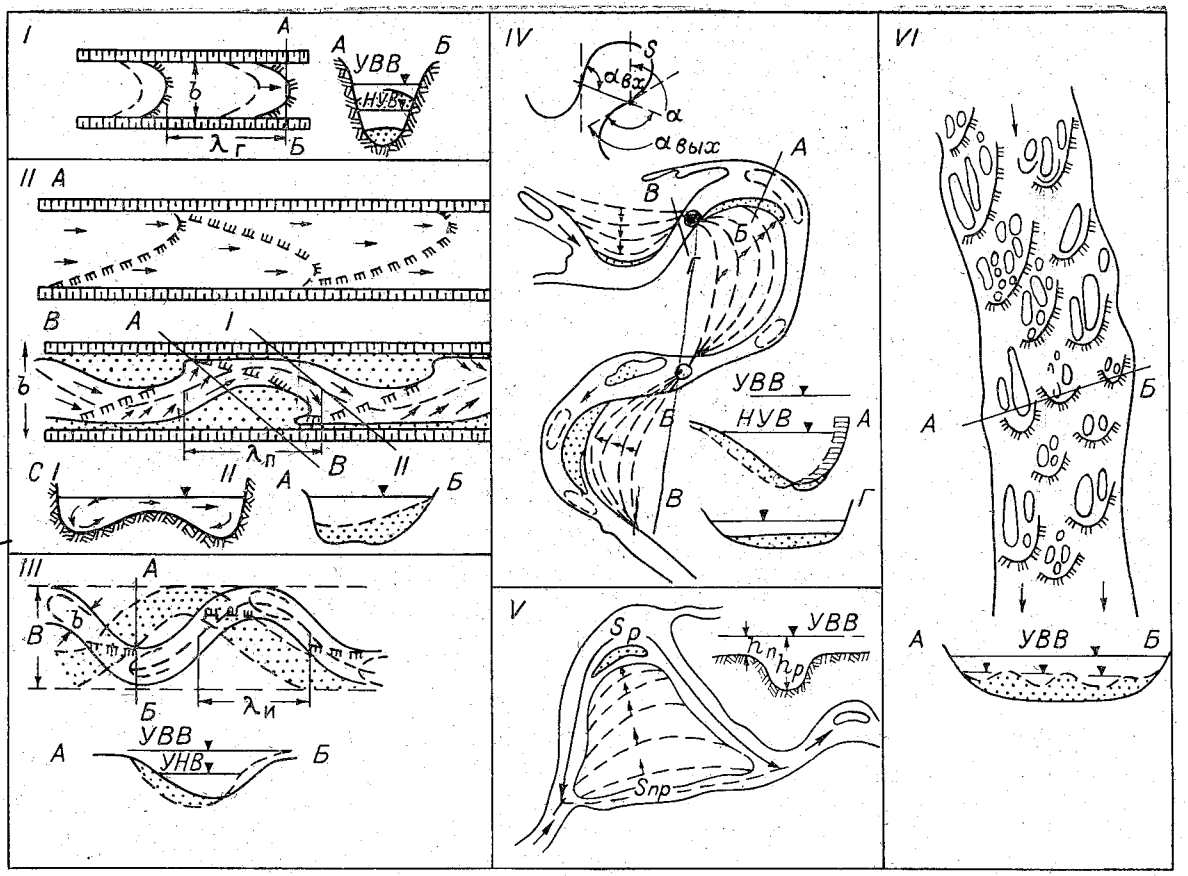


Рис. 14. Схема речного русла при различных типах руслового процесса.

I — ленточногрядовый тип, *II* — побочневый; *A* — половодье, *B* — межень, *C* — схема течений в сечении *I—II*, *А—Б* — поперечное сечение русла на перекате; *III* — ограниченное меандрирование, *IV* — свободное меандрирование, *V* — незавершенное меандрирование, *VI* — осередковый тип руслового процесса. Измерители, см. гл. VII.

двигающийся вдоль противоположного берега, не имеет непосредственного отношения к гребню рассматриваемого переката.

Перемещение одиночных ленточных гряд или перекошенных ленточных гряд с образованием в межень побочней происходит в условиях, когда общие плановые деформации русла отсутствуют или незначительны и, следовательно, отсутствует и обмен наносами между поймой и руслом. Строго говоря, на реках с указанными формами перемещения наносов поймы не образуются. Они могут существовать только как реликтовые (остаточные) образования. В случае, если поток способен подмывать берега и образовывать излучины, ленточные гряды причленяются к берегам и прекращают свое движение, формируя пляжи выпуклого берега.

При общности в происхождении одиночных и перекошенных ленточных гряд имеются и существенные различия между этими формами транспорта донных наносов, приводящие к различиям в строении речного русла и структуры потока. Поэтому целесообразно оба описанных способа транспортирования донных наносов рассматривать раздельно и выделить ленточногрядовый и побочневый типы руслового процесса как в значительной мере самостоятельные.

1. ЛЕНТОЧНОГРЯДОВЫЙ ТИП РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

Основные переформирования русла, как указывалось, выражаются в сползании по нему крупных одиночных песчаных гряд, занимающих всю ширину русла (рис. 13). Плановые деформации русла при этом не происходят. Скорость сползания этих гряд, названных ленточными, нередко достигает 200—300 м/год. По мере сползания гряд в любом заданном створе происходит периодическое изменение отметок дна. Повышение отметок дна в каком-либо створе происходит в случае, когда на него надвигается низовая часть гряды, имеющая обычно достаточно крутой откос. После прохождения створа гребнем гряды отметки дна начинают понижаться. Это понижение наблюдается до момента надвижения на створ подвалья выше расположенной гряды. Так как верховой откос гряды бывает значительно более пологим, чем низовой, то повышение отметок дна в результате наползания гряды идет относительно быстрее, чем их понижение.

Высота гряд, а следовательно, и колебания отметок дна могут выражаться в метрах, причем наибольших размеров гряды достигают при больших половодьях. В межень высота ленточных гряд по сравнению с той, которая была в половодье, уменьшается. В зависимости от условий протекания потока и особенностей донных наносов, состава и их крупности ленточные гряды, созданные в период половодья, в межень могут полностью

срабатываться и донные наносы начинают перемещаться в виде рядов, более мелких по размерам, но могут сохраняться в межень как реликтовое и относительно неподвижное образование. При резких спадах уровня ленточные гряды могут образовывать также одиночные осередки. Механизм переформирования ленточных гряд — их сползания, сработки или увеличения в размерах — различен в разные фазы водного режима. Сползание ленточной гряды при высоких половодьях может осуществляться как смещение целостного морфологического образования. В межень оно может происходить и за счет отложения на низовом откосе гряды наносов, приносимых более мелкими песчаными грядами, движущимися по поверхности ленточных, что и приводит к возможности сползания крупных ленточных гряд не только в половодье, но и в межень, когда перемещение гряды как целостного скопления наносов фактически не происходит.

Вопрос о наличии систем различных по величине гряд и связях в перемещении этих систем исследован еще слабо. Достаточно сказать, что представления о наличии в потоке одновременно нескольких порядков гряд появились, как указывалось ранее, только после применения эхолотирования и производства аэрофотоснимков в крупных масштабах, т. е. сравнительно недавно. Однако представляется достаточно убедительной концепция, по которой одновременное нахождение в потоке гряд различных порядков следует объяснять тем, что более крупные их формы по отношению к более мелким в данный момент водного режима являются реликтовыми и эти крупные формы сползают или изменяют свое строение лишь за счет перемещения по ним более мелких форм. Гидравлическая структура потока при ленточногрядовом типе руслового процесса мало отличается от описанной для плоских гряд.

По перемещению ленточных гряд можно оценить расход донных наносов. Приемы его расчета описаны в гл. II.

Отличительные признаки для опознавания ленточногрядового типа руслового процесса на местности, на карте или по аэрофотоснимку таковы: 1) наличие условий, ограничивающих плановые деформации речного русла (стеснение потока склонами долины, обнаруживаемое по отсутствию поймы, явных следов подмыва берегов русла); 2) при просвечивающем дне (на местности или на аэрофотоснимке) хорошо заметны крупные гряды, по форме напоминающие языки, занимающие всю ширину русла и не приуроченные к определенным его очертаниям. На их поверхности могут быть вторичные гряды разных порядков. Так как длина ленточных гряд часто составляет несколько ширин русла, то для обнаружения гребня этой гряды необходимо просмотреть участки рек длиной, во всяком случае более десятков ширин русла.

2. ПОБОЧНЕВЫЙ ТИП РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

Побочневый тип руслового процесса, основные черты которого были охарактеризованы в начале этой главы, представляет собой более сложно протекающий транспорт наносов. Можно предполагать, что этот тип процесса возникает в условиях, когда поток оказывается неспособным перемещать донные наносы в форме одиночных ленточных гряд, т. е. либо при более обильном питании потока донными наносами, либо в условиях, когда их транспорт замедляется (например, вследствие выполаживания продольных уклонов потока).

Побочневый тип руслового процесса впервые был четко определен в работе К. И. Россинского и И. А. Кузьмина (1947).

Напомним, что побочни представляют собой частный случай перекошенных ленточных гряд, занимающих всю ширину русла и имеющих перекошенный в плане гребень. Схема перемещения этих гряд показана на рис. 14 (схема *А*). При спаде уровня обнажается наиболее высокая часть гряды, выдвинутая вперед и создающая собственно побочень, хорошо видный не только на аэрофотоснимке, но и на любых картах с изображением изобат. Скорости сползания побочней колеблются от десятка до сотен метров в год.

Если при ленточногрядовом типе руслового процесса существенная перестройка скоростного поля потока в плане от половодья к межени не наблюдается, то при побочневом типе процесса общая структура потока в эти периоды резко различна. В половодье она близка к наблюдающейся при наличии одиночных ленточных гряд, и лишь динамическая ось потока характерна слабой извилистостью. В межень поток, обтекая неподвижные обсохшие побочни, отличается хорошо выраженной извилистостью. Картина скоростей в период межени резко меняется. Течение потока приобретает характер переливания из одного плёса в другой через перекат — гребень перекошенной гряды. Вода, сходящая с гребня переката, подходит к береговой линии в плёсе под углом, приближающимся к прямому (рис. 14). Встретив препятствие со стороны берега, русла струи потока опускаются ко дну, совершив поворот вокруг горизонтальной оси, параллельной берегу, снова выходят на поверхность на ниже следующем перекате. Таким образом, по длине извилистого потока происходит последовательное чередование однослойного движения воды на перекате и двухслойного на плёсе.

Поток, переливающийся в межень через гребень переката, размывает его и переносит размытый материал в плёсовую лощину. Восстановление материала, размытого на гребне переката, осуществляется действием очередного половодья, когда происходит размыв плёса и вынос материала на гребень переката.

Таким образом, помимо перемещения всего тела побочня, механизм которого можно рассматривать как аналогичный механизму перемещения плоской гряды, проанализированному в гл. II, происходит еще перемещение некоторых масс, обусловленное указанными деформациями и накладывающееся на движение всего побочня в целом (рис. 15). Расход донных наносов в этом случае будет складываться из расхода, обусловленного движением всего побочня, и расхода деформаций. Выражение для суммарного расхода можно получить на основе следующих соображений. В единицу времени через некоторое поперечное сечение проходят две массы наносов — одна, входящая в состав тела побочня, другая, относящаяся к составу перемещающихся в ходе деформаций наносов. Обозначим площади поперечного

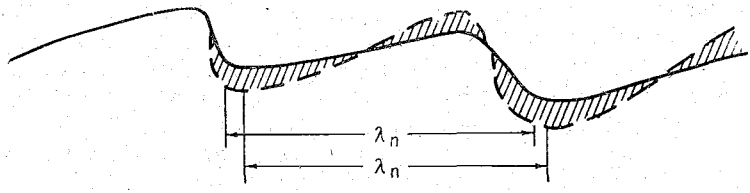


Рис. 15. Схема определения объема перемещаемых грядой донных наносов. Точки — центры тяжести заштрихованной фигуры, представляющей собой деформации объема $w_д/B$.

сечения этих объемов соответственно $\omega_п$ и $\omega_д$, а скорости перемещения $c_п$ и $c_д$, тогда

$$q = \omega_п c_п + \omega_д c_д. \qquad (5)$$

При осреднении расхода за достаточно длительный период площади, входящие в выражение (5), можно представить как средние площади поперечного сечения побочня и поперечного сечения объема деформаций. Длина проекций обеих фигур на продольную вертикальную плоскость будет, очевидно, одинакова и равна длине побочня (расстояние между смежными точками) $\lambda_п$.

Следовательно,

$$\omega_п = \frac{w_п}{\lambda_п} \quad \text{и} \quad \omega_д = \frac{w_д}{\lambda_п},$$

где $w_п$ и $w_д$ — соответственно объемы побочня и объемы перемещения в ходе деформаций. В то же время скорость $c_д$ можно выразить как длину $\lambda_п$, на которую перемещаются деформирующиеся массы за один цикл (при одномодальном гидрографе это будет один год) $\tau_д$.

Таким образом, окончательное выражение для среднего расхода за некоторый длительный период можно написать в виде

$$q_{ср} = \frac{w_п c_п}{\lambda_п} + \frac{w_д}{\tau_д}. \qquad (6)$$

Для среднегодового расхода $\tau_д$ нужно принять равной единице и тогда

$$q_{ср} = \frac{w_п c_п}{\lambda_п} + w_д. \qquad (7)$$

Все величины, входящие в это выражение, могут быть определены путем натурных измерений. Величина $\lambda_п$ определяется по плану меженного русла, $\tau_д$ при одномодальном гидрографе равна одному году. Скорость движения побочня можно определить на основе сопоставления топографических съемок русла с горизонталями или изобатами дна за разные годы. Объемы $w_п$ и $w_д$ могут быть определены при соответствующей постановке промеров. Для оценки объема перемещения $w_п$ промеры следует производить в период наибольшего развития ленточной гряды, т. е. в начале спада половодья, когда плёсовая ложбина размыта на небольшую глубину, а гребень переката достигает наивысшей отметки. Совместив все поперечные профили по осевой линии потока, как это показано на рис. 16, можно провести нижнюю огибающую линию *a—b—c—d—e*, ограничивающую область перемещения донных наносов от области неподвижных отложений. Средние отметки, взятые для всех поперечных профилей по точкам, отстоящим на равном расстоянии от осевой линии потока, дадут верхнюю линию *a—h—g—f—e*, характеризующую положение осредненной поверхности побочня. Вся масса отложений, заключенная между этими двумя линиями, перемещается вниз по течению со средней скоростью $c_п$.

На рис. 16 *б* для разгрузки чертежа и облегчения его чтения нанесены не все 20 профилей, показанные на плане (рис. 16 *а*), а лишь первые десять. Ненанесенные 10 профилей имеют подобные очертания, но противоположно ориентированы относительно оси потока, поскольку участок охватывает два плёса, расположенные у противоположных берегов. Положение верхней и нижней кривых показано с учетом всех 20 профилей.

Итак, если площадь, ограниченную кривой *a—b—c—d—e—f—g—h*, обозначить через F, то $w_п = F\lambda_п$ и, следовательно,

$$q_{ср} = F c_п + \frac{w_д}{\tau_д}.$$

Для оценки величины $w_д$ необходимо промеры повторить в период наибольшего разрушения гребня переката и наибольшего занесения плёса, т. е. в предпаводочный период.

Сопоставляя эти промерные профили с ранее полученными, можно вычислить объем размыва переката или объем занесения плёса. Эти величины в идеальном случае должны быть равны, и каждая из них, взятая в отдельности, и представляет собой объем деформаций $w_д$.

При более строгой оценке величину $w_д$, вычисленную по формуле (5) или (7), нельзя считать расходом донных наносов, поскольку объемы $w_п$ и $w_д$ всегда содержат некоторое количество мелких фракций, которые, освободившись из тела гряды и попав в поток, перемещаются в нем как взвешенные наносы и

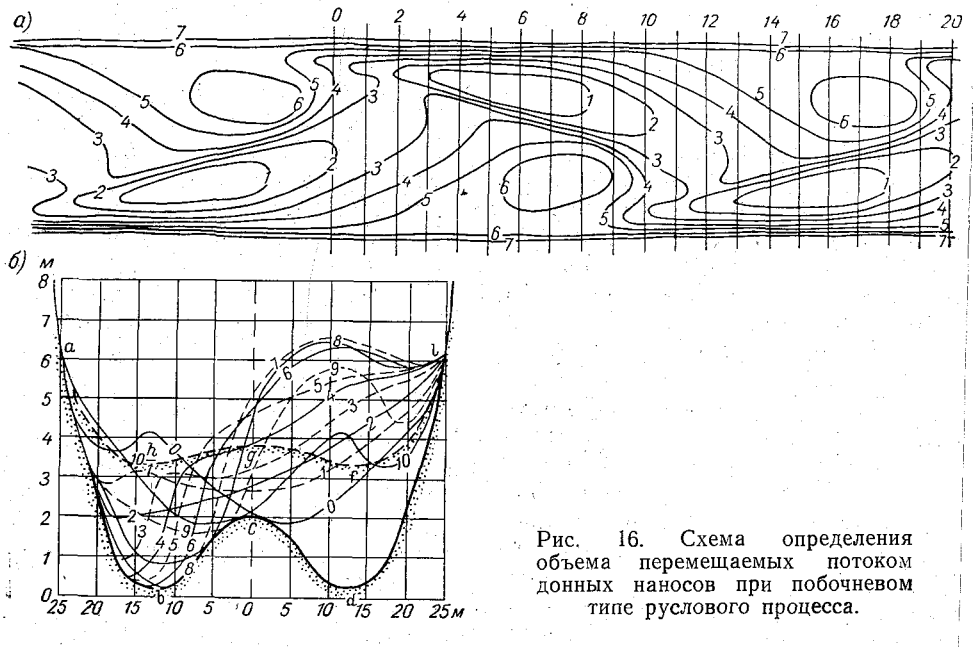


Рис. 16. Схема определения объема перемещаемых потоком донных наносов при побочневом типе руслового процесса.

оседают не в подвалье гряд и не в плёсовых ложбинах данной гряды, а далеко за ее пределами. Поэтому расход собственно донных наносов будет находиться в таком же отношении к $q_{ср}$, в каком находится в донных отложениях количество крупных фракций, движущихся как донные наносы, и количество мелких фракций, способных двигаться как взвешенные. Вследствие всего этого величину $q_{ср}$ правильнее называть расходом донных отложений.

При побочневом типе руслового процесса расход взвешенных наносов связан с развитием песчаных гряд. Наиболее мелкие частицы, находящиеся в донных отложениях, при размыве этих отложений переходят во взвешенное состояние, перено-

сятся потоком на большое расстояние $l_в$, зависящее от гидравлической крупности частиц и от гидравлических характеристик потока, и затем, выпадая на дно, снова смешиваются с донными отложениями.

Зависимость (1) открывает принципиальную возможность определить расход взвешенных наносов по расходу донных, вычисленному по формуле (5) или (7). Однако на пути реализации этой возможности еще имеется ряд трудностей. Прежде всего мало изучен вопрос о длинах путей, проходимых взвешенными наносами ($l_в$). Кроме того, зависимость (1) справедлива при неизменности условий русловых деформаций на участках большого протяжения и неизменности состава донных отложений. Оба эти условия в натуре не выдерживаются, а следовательно, для применения зависимости (1) к рекам требуется дальнейшее ее развитие.

Дальнейшее развитие ленточногрядового и побочневого типов руслового процесса в случае изменения особенностей транспорта наносов может идти по двум основным направлениям. При повышенном количестве донных наносов, которые должен переносить поток, ленточногрядовый и побочневый типы руслового процесса сменяются типом процесса, получившим название осередковый. При осередковом типе руслового процесса характерно широкое, распластанное русло с движущимися по нему сложными системами ленточных гряд, которые при обсыхании в период межени образуют многочисленные, распространенные по всей ширине реки осередки, при благоприятных условиях формирующие острова и образующие многорукавное русло. Подобная многорукавность, образованная подвижными скоплениями наносов в русле реки, может быть названа русловой, в отличие от многорукавности, образующейся при расчленении поймы, происходящем во время ее затопления.

Если поток имеет возможность перемещать большую массу поступающих наносов с достаточной интенсивностью, осередковый тип руслового процесса переходит в блуждание русла, т. е. в относительно беспорядочное сползание сложных систем очень подвижных гряд.

Подробнее деформации русла при осередковом типе процесса рассмотрены в гл. VI.

Другой линией развития ленточногрядового и побочневого типов руслового процесса является переход к различным формам меандрирования. Обязательным условием для развития этих типов процесса является высокое содержание в расходе наносов взвешенных фракций, возможность построения пойм в пределах дна речной долины (ослабленное влияние ограничивающих факторов) и наличие хорошо выраженной сезонности в стоке воды и наносов.

Приведенные описания ленточногрядового и побочневого типов руслового процесса дают основание сделать следующие основные выводы об особенностях этих типов процесса.

1. Все деформации ограничиваются областью речного русла и сводятся к сползанию вниз по течению одиночных ленточных гряд или перекошенных гряд, образующих побочни, и сезонным намывом гребней этих гряд (перекатов) и размывом их подвалий (плёсов).

2. Отсутствуют плановые деформации русла. Берега не размываются и не участвуют в обмене наносами с потоком. Отсутствие плановых смещений приводит и к отсутствию современных пойм при процессах подобных типов.

3. Взвешенные наносы поступают в поток из донных отложений и не образуют собственных скоплений.

4. Неразмываемость берегов или компенсация их размыва наползанием побочня является обязательным условием ленточногрядового и побочневого типов руслового процесса. Поэтому чисто побочневый тип руслового процесса наблюдается в естественных условиях относительно редко. Он встречается обычно на участках рек, стесненных склонами своих долин или в сочетании с другими типами руслового процесса. Он возникает также в руслах с искусственно закрепленными берегами и в каналах.

Глава IV

ОГРАНИЧЕННОЕ МЕАНДРИРОВАНИЕ

При этом типе процесса наблюдается систематическое сползание слабовыраженных излучин при сохранении ими своих плановых очертаний (форм и размеров), что позволяет потоку наиболее просто осуществлять обмен наносами между поймой и руслом.

Пойма представлена перемываемыми при сползании излучин обособленными массивами, чередующимися по берегам реки. Ширина поймы равна ширине пояса меандрирования — она заключена между линиями, проведенными через вершины левосторонних и правосторонних излучин. Ограниченное меандрирование обычно развивается в условиях стеснения русла склонами долин, уступами древних террас или древними, устойчивыми береговыми валами. Скорость сползания излучин на средних и крупных реках часто составляет 5—15 м/год, а иногда и более.

Процесс сползания излучин впервые был обнаружен Л. Фаргом. Однако Фарг, как, впрочем, и другие исследователи вплоть до недавнего времени, считал явление сползания универсальным законом развития любых излучин, в том числе и резко меняющих в ходе плановых деформаций свои размеры и формы.

Кроме того, они не связывали процесс сползания с влиянием ограничивающих условий. Анализ аэрофотоснимков и сопоставление карт различных лет съемки показали, что сползание излучин является лишь частным случаем процесса меандрирования.

От рассмотренного выше руслового процесса побочневого типа ограниченное меандрирование внешне отличается большей извилистостью потока, четко прослеживаемой не только в межень, но и в период половодья, строгой приуроченностью побочней к участкам выпуклых берегов русла и их перемещением (сползанием) толька вместе с перемещениями всей излучины (рис. 14 *III*).

Теория руслового процесса в современном ее состоянии не дает исчерпывающего объяснения возникновению тех или иных плановых очертаний русла. Однако не вызывает сомнения, что прямолинейное течение в размываемом русле в определенных

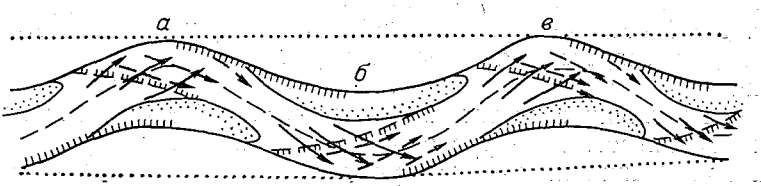


Рис. 17. Русло ограниченно меандрирующей реки.

гидравлических условиях оказывается неустойчивым. Это значит, что искривления в русле, возникающие по тем или иным случайным причинам, дальнейшим воздействием потока не выравниваются, а, наоборот, увеличиваются. Однако возникающие искривления русла не могут развиваться бесконечно. Одновременно с тенденциями к образованию извилин возникают предпосылки к их спрямлению. В реальной реке происходит постоянное противодействие этих двух тенденций и чередование их преобладания.

При ограниченном меандрировании эти две тенденции уравновешиваются и образовавшиеся излучины, не меняя своих форм и размеров, перемещаются вниз по течению. В связи с образованием извилин возникают пространства, затопляемые в половодье, но настолько удаленные от стрежневой части потока, что скорости течения на них оказываются недостаточными для перемещения донных наносов. Эти области становятся зонами оседания наносов и именно таким путем возникают поймы. На рис. 17, изображающем общее морфологическое строение русла, образующиеся массивы поймы ограничены линией *а — б — в*.

Русло реки при ограниченном меандрировании по своему строению сходно с руслом рек побочневого типа. Также имеются

перекошенные гряды или побочни, сползающие вниз по течению, и также осуществляются сезонные деформации плёсов и перекатов. В межень перекаты частично размываются, а плёсовые лощины заносятся, в половодье перекаты и плёсы восстанавливаются.

Поле скоростей потока также сходно с тем, которое свойственно побочневому типу руслового процесса, и отличается от него главным образом размерами деталей. Водоворотная зона, возникающая в подвалье гряды, охватывает при ограниченном меандрировании почти всю ширину русла и образует ту форму движения, которая в гидродинамических исследованиях получила название поперечной циркуляции на повороте. Развитию этой циркуляции способствует и отклоняющее воздействие берега, особенно сильно сказывающееся на вогнутых его участках, расположенных несколько ниже точки наибольшей кривизны русла. Движение здесь происходит по схеме, рассмотренной на рис. 14. Здесь сказывается наибольшее размывающее действие потока, образуется наибольшая глубина и подмывается берег реки.

При наличии сходства в строении скоростного поля потока при побочневом типе руслового процесса и при ограниченном меандрировании имеются и принципиальные различия. Они заключаются в том, что при побочневом типе извилистость потока проявляется только в межень, и при свойственных этому периоду малых расходах происходит отражение потока от берега в районе плёсовой лощины одновременно с заполнением ее наносами, поступающими с гребня переката. При ограниченном меандрировании основной поток бывает искривлен и в половодье, когда он наиболее богат удельной кинетической энергией. В этот период происходит наиболее четко выраженное отражение потока от берега, которое в этом случае связано с размывом плёсовых лощин. В период же межени при пониженных уровнях и уменьшении скоростей потока кинетическая составляющая энергии в плёсах убывает и поворот потока происходит с преимущественным влиянием сил тяжести по схеме, близкой к схеме вихря, при котором скорости течения нарастают в направлении к центру кривизны, т. е. от вогнутого берега к выпуклому.

Впервые закономерности в расположении плёсов в пределах излучины были исследованы Фаргом (1908 г.). Им было сформулировано шесть «эмпирических законов», в современной отечественной литературе обычно называемых «правилами» Фарга. Они таковы.

I. Перекат и плёс сдвинуты соответственно вниз по отношению к точке перегиба и к вершине кривой.

II. Плёс тем глубже, чем более отчетливо выражена кривизна в вершине кривой.

III. Для получения наилучшей глубины длина кривой не должна быть ни слишком мала, ни слишком велика.

IV. При одинаковых длинах средняя глубина бьефа тем больше, чем больше внешний угол, образуемый двумя касательными, проведенными на концах кривой.

V. Продольный профиль дна будет плавным лишь в том случае, если кривизна кривой изменяется непрерывно. Каждое резкое изменение кривизны создает и резкое изменение глубины.

VI. Если кривизна изменяется непрерывно, то угол наклона касательной и кривой кривизны определяет собою и уклон дна.

Эти эмпирические правила впоследствии были распространены на все типы меандрирования (см. ниже). Однако они были установлены Фаргом на примере р. Гаронны — реки с выправленным руслом и закрепленными берегами — и справедливы только для случаев ограниченного меандрирования, когда плановые очертания русла близки к синусоиде.

Подмыв части вогнутого берега, расположенной несколько ниже точки наибольшей кривизны русла (рис. 14), и приводит к сползанию вниз по течению всей излучины, при котором разрушаются верховые участки пойменных массивов и одновременно происходит наращивание низовых участков этих массивов в результате отложения здесь наносов. При таком развитии пойм низовые, более молодые участки пойменных массивов имеют меньшую высоту, чем размываемые верховые. Последние ограничены со стороны русла четко выраженной бровкой, отсутствующей в низовых частях массивов.

Связь расхода наносов с русловыми деформациями в этом случае осложнена наличием обмена наносами между поймой и руслом, отсутствующего при побочневом процессе.

1. В отличие от ленточногрядового и побочневого типов руслового процесса, деформации захватывают не только русло реки, но в результате его плановых смещений распространяются и на пойму. Возникает процесс обмена наносами между руслом и поймой, не наблюдавшийся при первых двух типах процесса.

2. Плановые деформации русла осуществляются в виде сползания относительно слабовыраженных излучин вниз по течению без существенного изменения ими своих размеров и форм (см. гл. VIII).

3. Участки с ограниченным меандрированием большей частью располагались там, где склоны речной долины оказывали ограничивающее влияние на развитие плановых деформаций, вследствие чего ширина пояса меандрирования обычно равна ширине дна долины. Однако это, по-видимому, не исключает возможности развития русла по схеме ограниченного меандрирования и на участках с широким дном долины при соответствующей комбинации элементов баланса наносов.

4. Так как наиболее благоприятные условия для отложения взвешенных наносов имеют место в наиболее удаленных от русла местах, то правомерно ожидать, что при ограниченном меандрировании должны образовываться поймы, наклонные к руслу. Этому же должны способствовать сползание и обвалы склонов долины, непосредственно ограничивающие внешний контур поймы.

Глава V

СВОБОДНОЕ И НЕЗАВЕРШЕННОЕ МЕАНДРИРОВАНИЕ

1. СВОБОДНОЕ МЕАНДРИРОВАНИЕ

а. Главные отличительные особенности процесса

На многих реках на участках, где склоны речных долин не ограничивают свободного перемещения речного русла по их дну, наблюдаются значительно более развитые и усложненные формы речных излучин, чем описанные для случая ограниченного меандрирования, когда русло реки даже на участках значительного протяжения представляло собой в плане кривую, близкую к синусоиде.

Образование этих сложных излучин, которое можно рассматривать как дальнейшее усложнение эволюции руслового процесса, можно назвать свободным меандрированием (рис. 14*IV* и рис. 18).

Наиболее характерной особенностью свободного меандрирования, резко отличающей его от всех рассмотренных типов процесса, является цикличность развития излучин, заключающаяся в переходе их от формы, в плане близкой к синусоиде, к петлеобразным очертаниям, и завершение процесса плановых деформаций прорывом перешейка между двумя смежными излучинами и отмиранием отторженной части русла. После прорыва перешейка возникает новая излучина, повторяющая прежний цикл развития. Вторая особенность свободного меандрирования заключается в том, что в результате плановых переформирований русла наблюдается смещение не только отдельных излучин, но и всего пояса меандрирования, вследствие чего река может занимать различное положение по отношению к оси своей долины, например, на отдельных участках может располагаться вдоль средней части ее дна, прижиматься к ее склонам, пересекать долину под некоторым углом. На крупных реках русло под влиянием кориолисовых сил может занимать устойчивое положение, прижимаясь к правому берегу. Река может непосредственно обтекать выступы склонов речной долины также

под влиянием местных тектонических движений. В подобных случаях поток, подмывая склоны долины, образует меандры, врезанные вершинами в эти склоны, сложенные коренными породами. Поэтому врезанные участки излучин характерны устойчивостью своего положения в плане. Однако это не исключает возможностей прорыва перешейка таких излучин, отхода реки вследствие этого от склона долины и последующего приближения к нему на смежном участке вследствие развития сме-

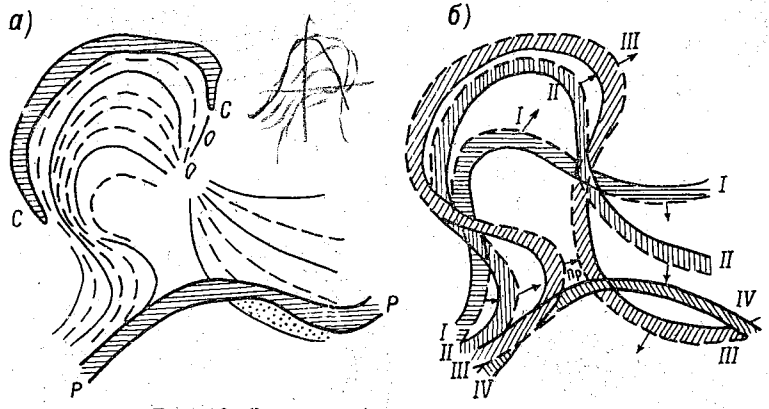


Рис. 18. Схема свободного меандрирования.

жных излучин или нового цикла развития спрямления. Это приводит к тому, что склоны долины при свободном меандрировании в плане представляют собой серии иногда перекрещивающихся полуокружностей (цирков, яров).

б. Развитие излучин при свободном меандрировании

В стадии относительно спрямленного русла, по форме близкого к синусоиде, излучины русла имеют тенденцию сползать согласно схеме ограниченного меандрирования. При достижении углами разворота излучин величины обычно более 120—150° сползание их сменяется разворотом вокруг точек, близких к перегибу русла, в результате чего излучина принимает округлые очертания, часто асимметричные, и превращается в петлю русла.

На рис. 19 показаны последовательные стадии развития излучины при свободном меандрировании. Если при ограниченном меандрировании в пределах излучин располагается только один плёс (рис. 19), то при свободном меандрировании по мере развития излучины происходит как бы его раздвоение, а в последующем — образование в пределах излучины двух или нескольких разобщенных плёсов.

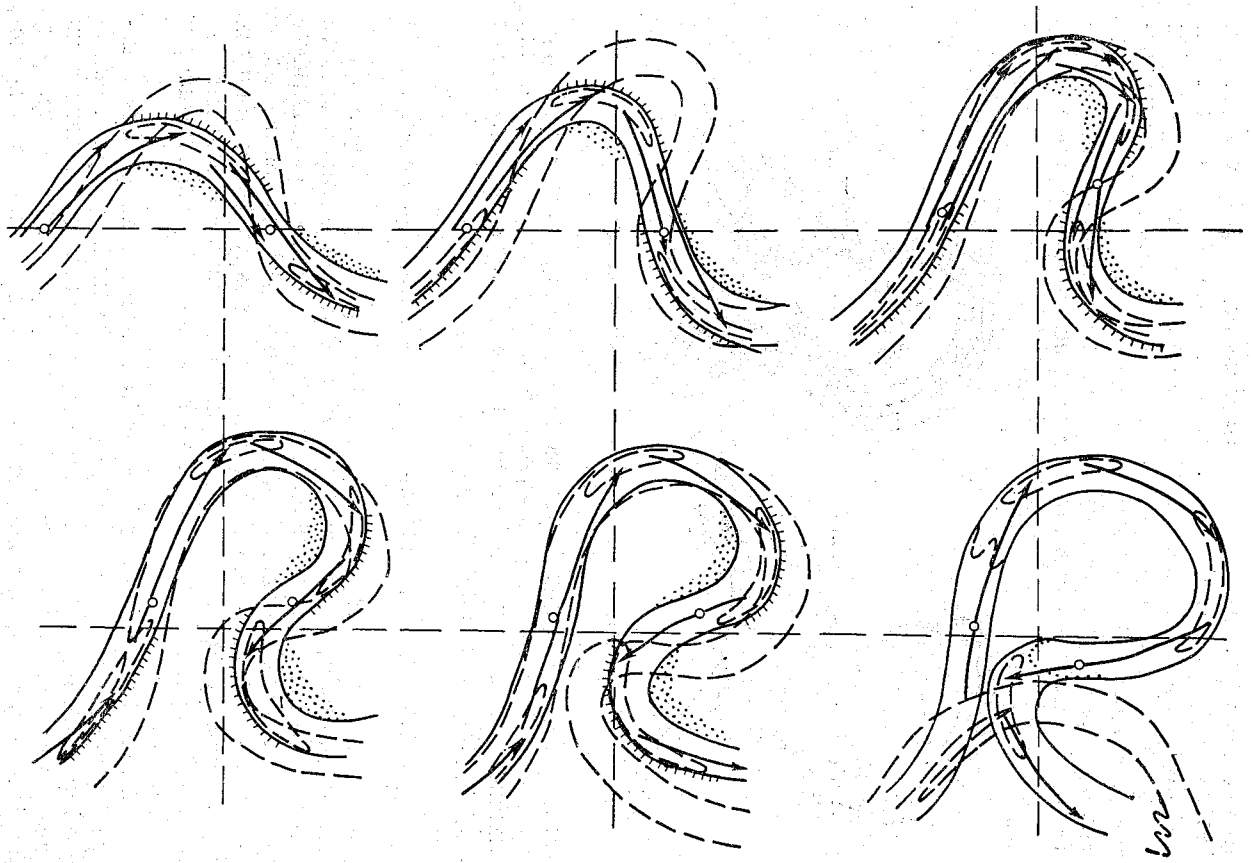


Рис. 19. Последовательный ход развития излучины при свободном меандрировании, по Н. Е. Кондратьеву.

Так же как при ограниченном меандрировании, плёсы располагаются несколько ниже вершины излучины и подмыв берегов на участках плёса бывает на этих участках бо́льшим, чем на следующих. При ограниченном меандрировании этот подмыв приводил к сползанию излучин, при свободном меандрировании с момента раздвоения плёса происходит расширение излучины и разворот верхового и низового ее участков вокруг точек перегиба. Асимметрия излучин связана с тем, что обычно один из плёсов оказывается наиболее развитым и, следовательно, на его участке происходят наибольшие плановые деформации русла.

«Правила» Фарга, приведенные выше, в случае свободного меандрирования применимы только для реки в начальной

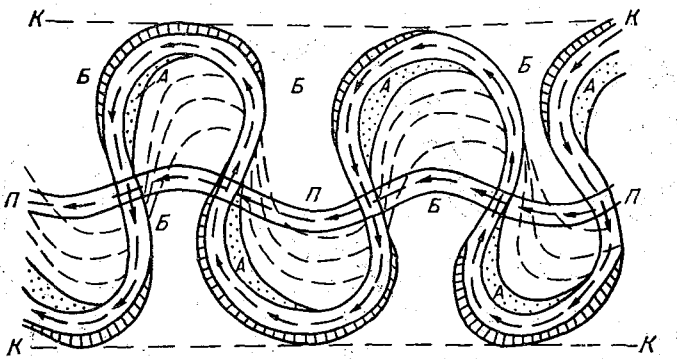


Рис. 20. Схемы развития излучин, по Берто. Пунктир — промежуточные положения оси русла.

стадии развития русла, когда имеют место одиночные плёсы. Закономерности расположения плёсов при других стадиях развития свободно меандрирующих излучин оказываются значительно усложненными и еще подлежащими исследованию. Можно только констатировать, что наличие сложных систем плёсов в пределах одной излучины, наблюдавшихся в случае поздних стадий свободного меандрирования, объяснить наличием циркуляционных течений нельзя. Существенную помощь в решении этих задач, по-видимому, должно принести использование, может быть, незаслуженно игнорируемой многими исследователями теории отражения или удара, в частности, развиваемой в работах Г. Гарбрехта 1953 г. и описанной в монографии ГГИ «Русловой процесс».

Наличие фиксированных точек (участков), возникающих при развороте излучин, можно проследить еще по схемам меандрирования, данным Берто (Щукин, 1934) и Де Геером (De Geer, 1912). Схема Берто помещена на рис. 20. Однако на наличие этих точек должного внимания обращено не было. Так

как последующие исследователи имели возможность пользоваться материалами съемок за не слишком длительные пери-

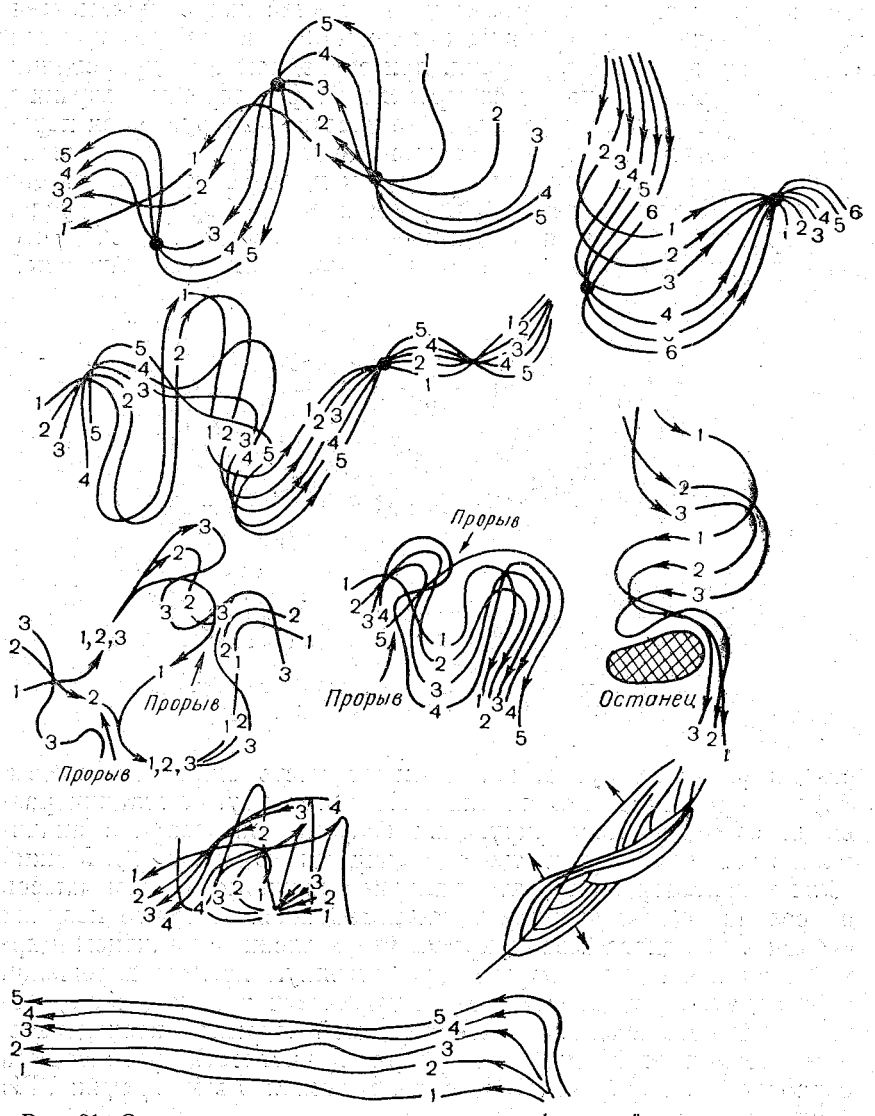


Рис. 21. Схемы различных видов плановых деформаций, полученные при анализе рельефа пойм по аэрофотоснимкам.

оды времени и часто по относительно коротким участкам, то составилось мнение, что излучины на всех стадиях своего развития сползают.

Вообще вопрос о развитии свободно меандрирующих излучин в поздних стадиях развития процесса исследован сколько-нибудь определенно лишь в последнее время, когда появилась возможность восстанавливать ход плановых деформаций речного русла за очень длительные периоды — полные циклы его развития — на основе дешифрирования рельефа поверхности поймы по аэрофотоснимкам. Именно по схемам плановых деформаций, полученным таким путем, было установлено прекращение явления сползания русла при развитии свободного меандрирования и смена его разворотом отрезков русла вокруг точек, близких к его перегибу.

На рис. 21 показаны различные схемы плановых переформирований речного русла при свободном меандрировании, на которых хорошо прослеживаются как наиболее устойчивые, так и наиболее сильно деформируемые участки русла, возникновение асимметрии излучин в поздних стадиях их развития, явления прорывов перешейков петель, изменение темпов перемещения русла в плане в послепрорывные периоды его развития, образование стариц. Под влиянием местных причин процесс в натурных условиях развивается сложнее, чем в описанном выше «чистом» случае свободного меандрирования. В частности, в ходе его развития наблюдается иногда объединение двух смежных излучин русла в одну более крупную, происходящее вследствие прорыва перешейков петель, расчленения крупных петель на более мелкие и изменение направления плановых деформаций на обратное вследствие тех же прорывов петель на выше лежащем участке и др.

Закономерности свободного меандрирования в количественном выражении рассматриваются ниже.

в. Основные морфологические элементы излучин, особенности их деформаций

Охарактеризуем подробнее основные морфологические элементы излучины при свободном меандрировании. Основными ее элементами, так же как и при сползающих побочнях или ограниченном меандрировании, являются следующие.

В русле реки располагается крупная песчаная, перекошенная в плане гряда. Наиболее развитая и высокая ее часть, так же как при ограниченном меандрировании, находится на выпуклом берегу русла, пониженная часть тянется вверх по реке и пересекает русло, располагаясь несколько ниже точки его перегиба. Наиболее возвышенная ее часть и образует собой неподвижный относительно очертаний русла в данное время несползающий побочень, который лучше называть пляжем. Затопленный в межень гребень гряды образует перекат, а ее подвалье — плёсовую лощину. При последующем расчленении

этой плёсовой ложбины, происходящем по мере развития излучины, смежные ложбины разделяются повышениями дна, уже не являющимися грядами. Развитие пляжа — расположенной на выпуклом берегу излучены наиболее высокой части гряды — определяется перемещением вогнутого берега. При его отступании гряда получает возможность расширяться и ее гребень как бы следит за перемещением бровки вогнутого берега. Так как подмыв этой бровки идет неравномерно, в зависимости от величины половодья и особенностей меженного режима, то поверхность пляжа на выпуклом берегу обычно представляет собой серии вытянутых вдоль реки гряд, положение которых в общем соответствует прежним положениям гребня большой гряды, перемещающегося по мере размыва вогнутого берега. Так как низовая часть гряды, образующей пляж, выпуклая вниз по течению, то между ее внешним к реке краем и линией берега образуется залив, называемый затоном.

Относительно механизма и даже форм размыва вогнутого берега русла в излучине существует еще много неясностей, и этот процесс еще подлежит детальному изучению.

Существуют неясности, например, в отношении роли циркуляционных течений в размыве русла, о чем подробнее будет сказано ниже.

Не прослежен еще и сам процесс размыва. Обычно считается, что подмыв берегов обусловлен течениями в главном русле и достигает максимума во время, близкое к прохождению пика половодья. Вместе с тем имеются натурные данные о том, что на ряде рек наибольшие разрушения берегов бывают на спаде половодья, при сливе воды с поймы, т. е. вызваны не главными течениями в русле. Известны также случаи, когда и в межень разрушения вогнутого берега оказываются весьма значительными.

Обнаруживается, что на ряде рек размыв идет в форме образования на линии вогнутого берега сначала полуцирков (вогнутых по отношению к реке участков), а затем размыва разделяющих их мысов. На рис. 22 приведены схемы течений в таком полуцирке, полученные А. Н. Ляпиным при исследовании им участка р. Оби у г. Барнаула. Эти схемы еще раз подтверждают сложность структуры потока и еще подлежат увязке с обычно принятыми схемами течений на повороте русла. Образование описанных полуцирков, т. е. фестончатый размыв вогнутого берега излучины, можно связать как с образованием определенных гидродинамических структур в главном потоке, так и с влиянием грядового рельефа поверхности поймы на пойменные течения, в частности, с тем обстоятельством, что при сливе воды с поймы наиболее интенсивные пойменные течения возникают по ложбинам между грядами, а мысы между полуцирками образуются самими грядами, выходящими к реке ста-

рыми береговыми валами. На участках, где в ходе меандрирования ложбины и гряды оказываются открытыми к реке (веер перемещения русла срезан рекой), эти обстоятельства могут оказаться решающими.

Материал, поступающий от подмыва вогнутого берега, частично может переноситься на ниже расположенную выпуклую часть того же берега, частично он может перемещаться в поперечном к руслу направлении и откладываться в низовой части

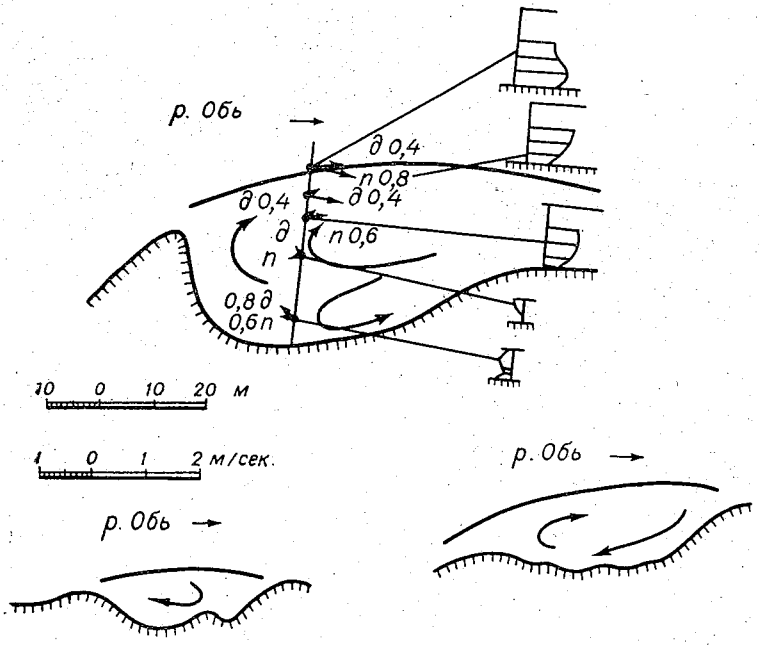


Рис. 22. Схемы течений в полуцирках, образованных при размыве вогнутого берега р. Оби у г. Барнаула.

д — донные скорости, п — поверхностные.

противоположного берега. Перемещаясь в виде более мелких, чем пляж, гряд, этот материал намывает гребень верховой части, следующей вниз по течению крупной перекошенной гряды. Это приводит к образованию в низовой оконечности пляжа обычно узкой, вытянутой вниз по течению песчаной косы, удлиняющей затон. При большом объеме поступления материала от подмыва вогнутого участка берега или при благоприятных условиях его отложения эти косы вытягиваются далеко вниз по течению, нередко заходя даже на участок нижеследующего вогнутого берега, формируя очень длинный затон (рис. 23). Ширина этого затона связана с темпом перемещения вогнутого

берега. Чем быстрее он перемещается в сторону от реки, тем обычно шире бывает затон, т. е. тем дальше острый гребень косы от бровки берега русла, вдоль которого он вытягивается вниз по течению.

Вместе с тем при быстром перемещении подмываемого берега широким оказывается не только затон, но и сам пляж и

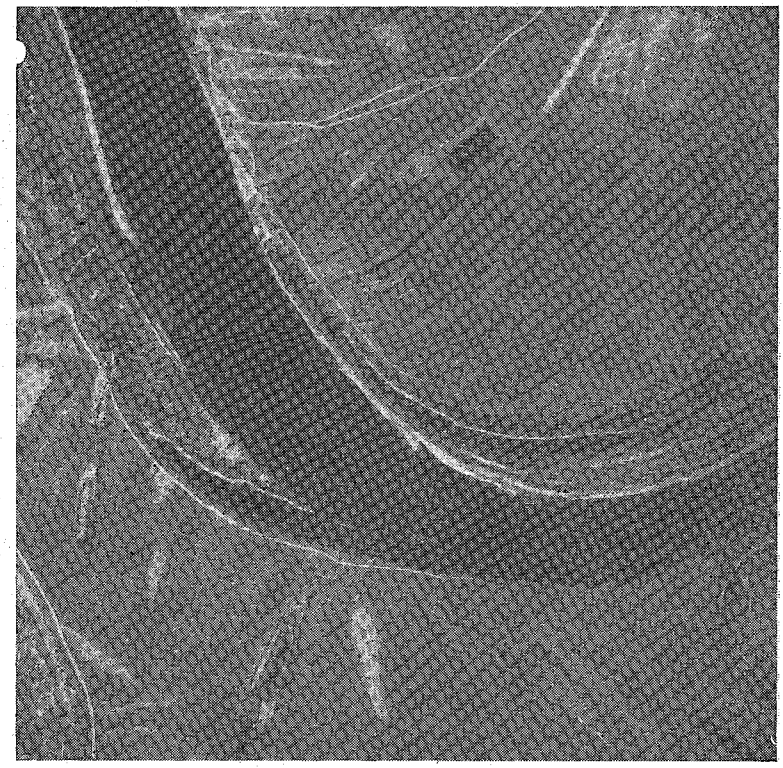


Рис. 23. Затоны, образовавшиеся в ходе свободного меандрирования.

его низовая коса. Это особенно хорошо бывает заметно на участках спрямлений, образовавшихся после прорыва излучины, в результате сближения вершин двух смежных петель русла. После прорыва вследствие резкого изменения углов подхода потока к сформировавшемуся спрямлению берег, встречающий течение, получает возможность быстро размываться, а на противоположном берегу при достаточном расходе донных наносов образуется обширный пляж, по форме в плане напоминающий запятую. При малом расходе донных наносов возможно местное расширение русла на подобном участке.

Таким образом, в отличие от ограниченного меандрирования, при свободном развитии излучин, кроме непосредственного перемещения крупной перекошенной гряды, образующей перекат, происходящего вслед за перемещением берегов русла, наблюдается как бы вторичный процесс изменения форм этой гряды. Он обусловлен приближением к ее низовой оконечности вторичных более мелких песчаных гряд, образующихся из продуктов подмыва противоположного вогнутого берега и сползающих под углом к руслу.

Уже на спаде половодья и тем более в межень в русле реки появляется множество небольших гряд, следующих вдоль внешней окраины крупной перекошенной гряды, образующей перекат. При спаде уровня прибереговые части гряд, следующие нередко цепями, обсыхают, создавая характерные фестончатые очертания внешнего края пляжа, хорошо видные в межень при низких уровнях (см. рис. 10).

Из приведенного описания развития излучины и переката следует, что гребень его (гребень перекошенный крупной гряды) с развитием излучины разворачивается вместе с ней, при этом средняя часть переката, расположенная близко к точке перегиба русла, остается относительно неподвижной, а перемещаются концевые (прибереговые) его части, все дальше отходя от касательной к точке перегиба, плёсовые ложбины все более сближаются и заходят одна за другую. Поэтому перекат от нормального в начальной стадии развития излучины в последующем становится косым или «дурным». Так как излучина в ходе своего развития становится асимметричной, то один из ее участков, прилегающих к точке перегиба, может длительное время сохранять прямолинейные очертания и, следовательно, приведенная выше схема изменения гребня переката в плане относится к участкам, на которых разворот русла происходит наиболее сильно.

Наряду с однонаправленными в течение цикла развития излучины плановыми смещениями гребня переката происходят ежегодные, но уже обратимые изменения высотного положения его гребня. В начале подъема половодья начинается намыв гребня переката. Он заканчивается на спаде половодья и сменяется сработкой гребня переката (и, следовательно, увеличением глубин на нем), наблюдающейся во время спада и межени.

Намыв переката происходит за счет материала, поступающего на него из выше расположенного плёса, который в этот период (подъем и часть спада) углубляется, освобождаясь от материала, сносимого в него с выше лежащего переката в период размыва последнего. Кроме того, из плёсов во время половодья выносится материал, поступающий в них вследствие подмыва вогнутых берегов русла, который, как указывалось

выше, достигает на участках плёса наибольших величин.

В общем, можно считать, что намыв и последующий размыв гребня переката в среднем балансируются и глубины на перекате после прохода половодья восстанавливаются примерно такими же, какие существовали до начала половодья. Однако поскольку ход отметок дна на перекате, в общем, повторяет ход уровней (на плёсе их ход обратен ходу уровней воды), то особенности хода уровней в данном году или в течение ряда лет могут вносить существенные коррективы в ход изменения глубин на перекате, что может привести к тому, что они могут не

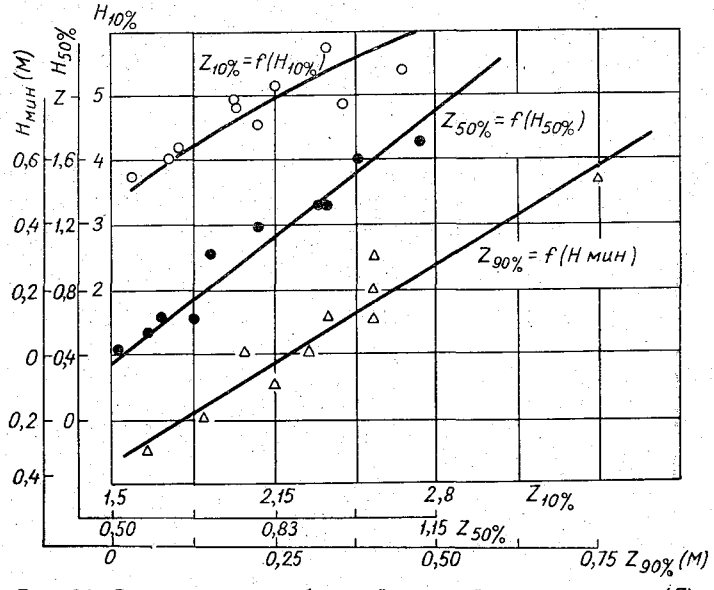


Рис. 24. Связь между наибольшей высотой дна перекатов (Z) и высотой уровня воды (H) в реке, по В. В. Федорову.

достигнуть отметок, имевших место до начала половодья, или превысить их.

Несмотря на то что вопрос о связи глубин на перекатах с отметками уровня воды имеет длительную историю и полученные связи широко используются для нужд обеспечения речного транспорта, в общем виде он еще не решен и подлежит дальнейшему изучению. Решение этого вопроса, по-видимому, затруднялось тем, что при анализе связей уровней воды и глубин на перекате далеко не в полной мере учитывались особенности русловых деформаций — тип руслового процесса.

Видимо, поэтому получались многозначные связи, что затрудняло общее решение вопроса.

Тесная связь транспорта наносов с водным режимом приво-

дит также к тому, что в связи с наличием цикличности в ходе водности реки могут наблюдаться и циклические изменения в отметках дна плёсов и перекатов, охватывающие уже не один, а ряд лет, т. е. могут наблюдаться однонаправленные в течение ряда лет тенденции в ходе отметок дна плёсов и перекатов.

Изменения отметок дна перекатов за навигационный период приведены в табл. 7. Известны также и значительно большие величины изменения дна на перекатах, чем показанные в табл. 7. Например, для некоторых перекатов на Дону отмечены колебания отметок дна до 3,5 м, на Волге до 5 м, на р. Куре до 7 м. Даже на такой небольшой реке, как Полометь (Валдайская возвышенность), обнаружены колебания отметок дна до 0,7—1,0 м.

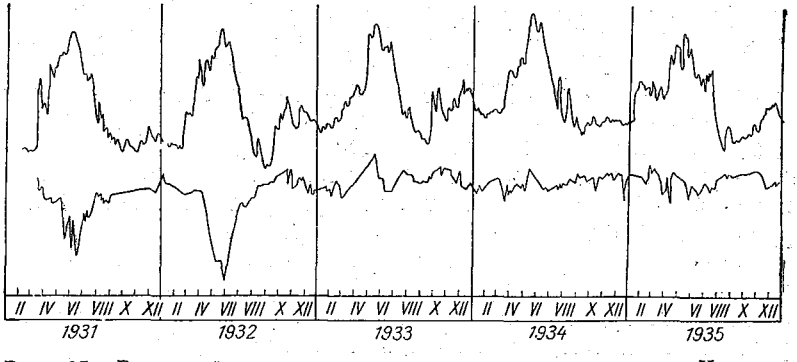


Рис. 25. Взаимный ход отметок дна и уровня воды р. Куры — Сабир-Абад.

Данные о колебаниях отметок дна русла приведены по относительно небольшому числу рек, к тому же не только свободно меандрирующих. Однако порядок возможных колебаний дна они показывают достаточно наглядно.

На рис. 24 приведена связь между наибольшей высотой дна перекатов (Z) и высотой уровня воды (H) на опорном посту, по В. В. Федорову. Высота дна здесь выражена в превышениях над условной плоскостью. График показывает наличие неодинаковой по характеру связи не только для разных перекатов, но и для уровней различной обеспеченности.

На рис. 25 приведен взаимный ход отметок дна и уровня воды реки за несколько лет подряд по изменениям в одном створе. Хорошо заметны периоды с параллельным ходом отметок дна и уровня воды, свойственным перекату. Вместе с тем обращает на себя внимание, что в некоторые годы он нарушается и русло реки в створе измерений ведет себя как плёсовый участок. В данном случае это объясняется тем, что в связи

с закреплением берегов русла на его извилинах, ранее свободно меандрировавших, развился процесс побочневого типа и створ попеременно оказывается то на участке гребня сползающей крупной гряды, т. е. на перекате (параллельный ход), то в подвалье этой гряды и, следовательно, на плёсовом участке, когда ход отметок дна по отношению к ходу уровня оказывается обратным. На свободно меандрирующей реке, на которой местоположение плёсов и перекатов в пределах излучины фиксировано, такая картина не наблюдается.

Пример этот приведен для того, чтобы показать, какое большое значение имеет выявление типа руслового процесса при установлении связи хода отметок дна и уровней воды, как и вообще различного рода морфометрических и гидрологических зависимостей.

Важным морфологическим элементом свободно меандрирующей излучины является береговой вал, сопровождающий русло реки вдоль выпуклого берега излучины. Процесс его образования описывается при рассмотрении вопросов формирования речной поймы. Здесь только отметим, что значение береговых валов заключается в том, что процесс их образования — это процесс формирования новых участков пойменного массива. Кроме того, береговые валы играют большую роль в связях потоков в русле и на пойме, возникающих в период ее затопления, в значительной мере определяют гидравлические сопротивления ее поверхности и способствуют возникновению местных пойменных течений. Как будет показано ниже, интерес к береговым валам определяется и тем, что по их положению можно восстанавливать прежние положения речного русла и, следовательно, схему развития излучины на очень длительные, вековые периоды.

2. НЕЗАВЕРШЕННОЕ МЕАНДРИРОВАНИЕ

а. Ход руслового процесса

На реках с малой величиной образуемого при осаждении взвешенных наносов наилка или при его неустойчивости (большая разница в крупности взвешенных и донных наносов) поймы оказываются низкими и на них наблюдаются значительные глубины затопления. В этих условиях развитие излучин приобретает специфические черты. В подобной обстановке излучина вначале развивается по схеме, описанной для свободного меандрирования, но впоследствии темп ее развития замедляется, а затем полностью прекращается вследствие образования спрямляющего протока, до того как излучина пройдет полный цикл плановых деформаций. Таким образом, разрушение перешейка петли в результате непосредственного сближения вершин двух смежных излучин в этом случае не наблюдается (рис. 26).

Образование спрямляющего протока приводит к разветвлению реки на два рукава. По мере развития спрямляющего протока в него начинает поступать все большая часть расхода воды и он превращается в главное русло, в то время как старое главное русло постепенно отмирает. Этим и завершается цикл раз-



Рис. 26. Русло реки при незавершенном меандрировании.

вития излучины при незавершенном меандрировании. Следующий цикл повторяет предыдущий.

Таким образом, при незавершенном меандрировании наряду с чисто русловым процессом особое развитие получает пойменный процесс — размыв поверхности поймы в перешейке излучины, приводящий к образованию спрямляющих протоков. В зависимости от степени затопляемости поймы и размываемости

слагающих ее грунтов образование спрямляющего протока может наблюдаться при прохождении излучиной различных стадий. На некоторых участках спрямление возникает непосредственно вдоль первого от реки берегового вала и ведет к отчленению пляжа уже на очень ранних стадиях развития излучины, когда ее форма близка к синусоиде. В других случаях спрямление происходит по ложбинам, существующим на пойме между береговыми валами, и в результате его отчленяется серия ближайших к реке их рядов. Наконец, спрямления могут возникать в притеррасной части поймы по линии, соединяющей вершины двух расположенных рядом излучин, или вести к отчленению целой серии излучин на участке большого протяжения.

Развитие спрямляющего протока обычно идет не слишком быстро. Так, например, на р. Оке прослежены спрямления, разрабатывавшиеся в течение 50—60 лет. На р. Оби в районе г. Барнаула, на р. Волге ниже г. Волгограда спрямления до перехода в них основной части расхода воды развивались 25—30 лет, на р. Иртыше известны спрямления, развившиеся в течение 5—10 лет.

б. Пойменная многорукавность

Интенсивное развитие процесса незавершенного меандрирования создает благоприятные условия для расчленения поймы целыми сериями протоков, в результате чего и русло и пойма реки приобретают специфический внешний облик. Это дает основание выделить такой тип руслового процесса в самостоятельный, назвав его пойменной многорукавностью. В случае пойменной многорукавности, кроме протоков, образованных расчленением излучин главного русла, образуются также так называемые вторичные протоки, развитие которых не имеет прямой связи с деформациями в главном русле реки. Примером такого хода развития пойм может служить образование ериков на Волго-Ахтубинской пойме, образование густой сети протоков в поймах рек Оби, Иртыша, Лены и некоторых других.

При значительном сходстве этих вторичных протоков в главных руслах этих рек развиваются русловые процессы самого различного типа. Так, в главном русле р. Волги на участке Волгоград — Астрахань хорошо выражено незавершенное меандрирование, имеются участки с чисто побочневым типом процесса, реже с осередковым типом процесса. На р. Оби распространен осередковый тип руслового процесса, на р. Иртыше — свободное меандрирование, на р. Лене — осередковый тип процесса (островная многорукавность).

Таким образом, можно утверждать, что на реках с хорошо развитой поймой иногда создаются условия, способные существенно изменить тип речной поймы, который должен был бы

создаться в соответствии с типом плановых переформирований, происходящих в главном русле. Это дает основание выделить этот вторичный процесс как самостоятельный. Такое рассмотрение имеет значение для гидролого-морфологического анализа руслового процесса, так как помогает детально анализировать процессы образования сложных развитых пойм и их взаимоотношение с русловым процессом, развивающимся в главном русле реки (рис. 27).

Образование вторичных пойменных протоков может быть обусловлено различными факторами, причем иногда близко, иногда отдаленно, а иногда вовсе не связано с русловым процессом в главном русле. В условиях свободного и незавершенного меандрирования на хорошо затапливаемых поймах, в пониженной притеррасной их части обеспечивается возможность возникновения так называемых притеррасных речек. В ходе их развития могут возникнуть крупные длинные протоки, спрямляющие не одну, как при незавершенном меандрировании, а сразу несколько излучин русла. Эти вторичные протоки могут в дальнейшем конкурировать с главным

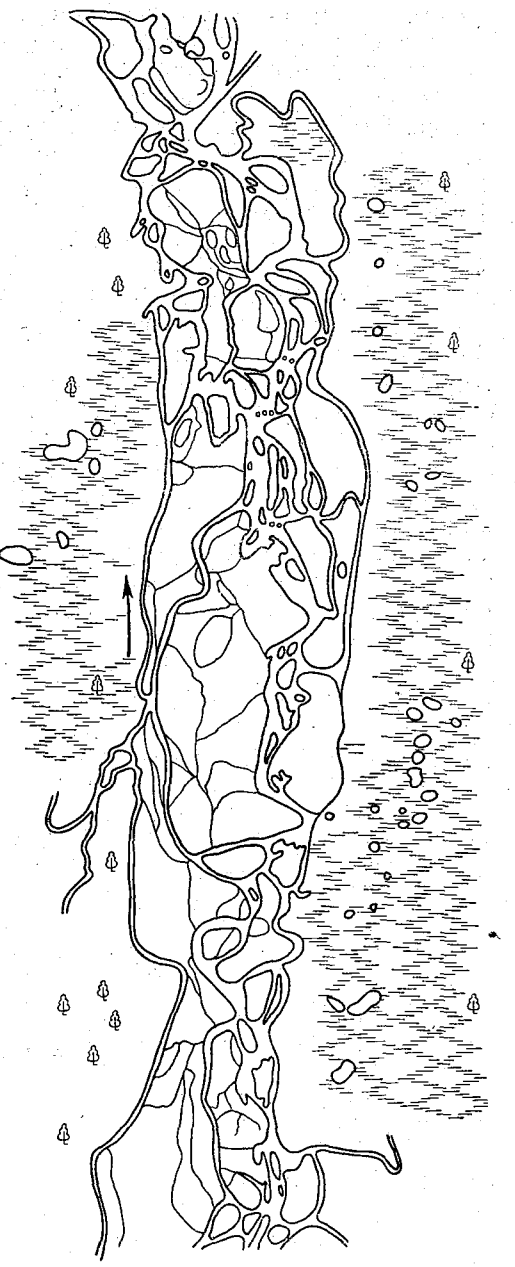


Рис. 27. Пример реки с пойменной многорукавностью.

руслом и, отвлекая все большие расходы воды, превратиться в главное русло, как это имеет место, например, на р. Иртыше на многих участках выше г. Павлодара и ниже его до г. Омска.

Особо следует выделить вторичные протоки, возникающие вследствие сосредоточенного поступления на пойму непосредственно с водосбора потоков, способных разрабатывать на ее поверхности собственные русла. Русловой процесс в подобных пойменных протоках будет определяться не только особенностями стока воды и наносов, формирующимися под влиянием образующего их водосбора, но также и особенностями рельефа поймы, созданного деформациями главного русла. Последние в подобных случаях играют роль ограничивающего фактора. Например, создавшийся в ходе плановых деформаций гривистый рельеф поймы, в частности наличие резко выраженных систем вееров перемещения русла, в значительной мере определяет направление этих вторичных протоков. В зависимости от особенностей комбинаций всех этих факторов во вторичных руслах может возникнуть и различный русловой процесс даже в пределах данного бесприточного участка поймы.

Расчленение поймы вторичными протоками может быть обусловлено факторами, связанными с изменением условий транспорта наносов на главной реке и ее притоках, состав и формы воздействия которых описывались во введении при рассмотрении характера переформирований русла в условиях регулирования стока, например, в зоне переменного подпора крупных водохранилищ, на участках нижнего бьефа и на притоках, впадающих в эти новообразовавшиеся зоны. При этом появление пойменной многорукавности может быть обусловлено как неравномерно развивающимися по площади поймы аккумулятивными процессами, усложняющими рельеф ее поверхности, так и непосредственным размывом вследствие повышения скорости пойменных течений, например, из-за разрушения базиса эрозии.

При анализе пойменной многорукавности, особенно при наличии значительных протоков, важно оценить их влияние на главное русло. Отход от главного русла протока обычно приводит к непропорциональному перераспределению стока воды и наносов. Из главного русла в проток отвлекается часть наносов, транспортируемых потоком, причем не всегда в соответствии с расходом воды, забираемым этим протоком, и в нем создаются морфологические образования иные, чем на участках выше такого ответвления. Факт подобного несоответствия расходов воды и наносов хорошо известен по поведению отводящих каналов. В зависимости от уклонов этих наносов, углов входа в них может поступать основная часть стока наносов. Методика расчета таких явлений достаточно известна и на ней останавливаться не будем. Равным образом впадение протоков вызывает

увеличение объема наносов, транспортировавшихся рекой выше устья протока, а следовательно, и изменение особенностей строения морфологических образований в главном русле.

Влияние на вторичные протоки главного русла выражается в основном в том, что общие его плановые деформации меняют местоположение входных и выходных участков вторичных проток. Кроме того, интенсивное движение крупных гряд в главном русле нередко ведет к перекрытию входов и выходов из протоков. Подобное явление особенно ярко обнаруживается, например, на р. Абакане, на приустьевом ее участке. Здесь движущиеся по главному левому протоку крутые одиночные гряды, занимающие почти всю ширину русла, периодически перекрывают входы и выходы из протоков вплоть до полного прекращения в них движения воды. При дальнейшем сползании гряды концевые участки протоков вновь открываются и в них возобновляется течение воды. Все это ведет к непрерывному сложному перераспределению стока воды и наносов в рукавах и протоках и возникновению в них разнообразных типов руслового процесса.

Эти обстоятельства заставляют уделять при морфологическом анализе большое внимание местам ответвления от главного русла и впадения в него протоков, а также детально анализировать морфологические образования по участкам выше, ниже и между узлами разветвления и слияния русла и протока. Насколько существенно меняется в этих случаях морфологическое строение русла, видно на примере участков р. Волги, прилегающих к о. Сарпинский, образованному ответвлением Куропаткинской воложки (участок Волгоград—Красноармейск). Куропаткинская воложка является спрямлением вынужденного поворота р. Волги у Красноармейска. Ее образование привело к отвлечению из главного русла весьма значительных объемов наносов (рис. 28), в связи с чем в главном русле существуют лишь относительно слаборазвитые сползающие побочни, образующие перекаты: Купоросный, Бекетовский и Отрадненские. С 1913 по 1940 г. первый из них сместился примерно на 3 км, второй — на 5,5 км, а третий — на 2,5 км. При этом поддержание этих сползающих перекатов и побочней в значительной мере обусловлено значительным поступлением наносов в результате подмыва правого склона долины р. Волги и наблюдающихся на нем обвалов. Смещение правого берега реки (узкая пойма) составляет 10 м/год. В то же время участок выше начала Куропаткинской воложки отличается существованием на нем обширных скоплений наносов, образующих острова Спорный и Денежный, которые представляют собой сильно разросшиеся и ныне отторженные сползающие побочни. Сползание их идет с меньшими скоростями. Так, о. Денежный с 1913 по 1952 г. сместился вниз по течению примерно на 1 км.

По Куропаткинской воложке движутся значительные массы песков. При этом, по-видимому, именно из-за обилия поступающего в нее материала сползающие побочни причленились к берегу и на этом протоке развивается процесс меандрирования. С 1913 по 1940 г. перемещение берега русла в результате его намыва составило 1,2 км, т. е. происходило со скоростью

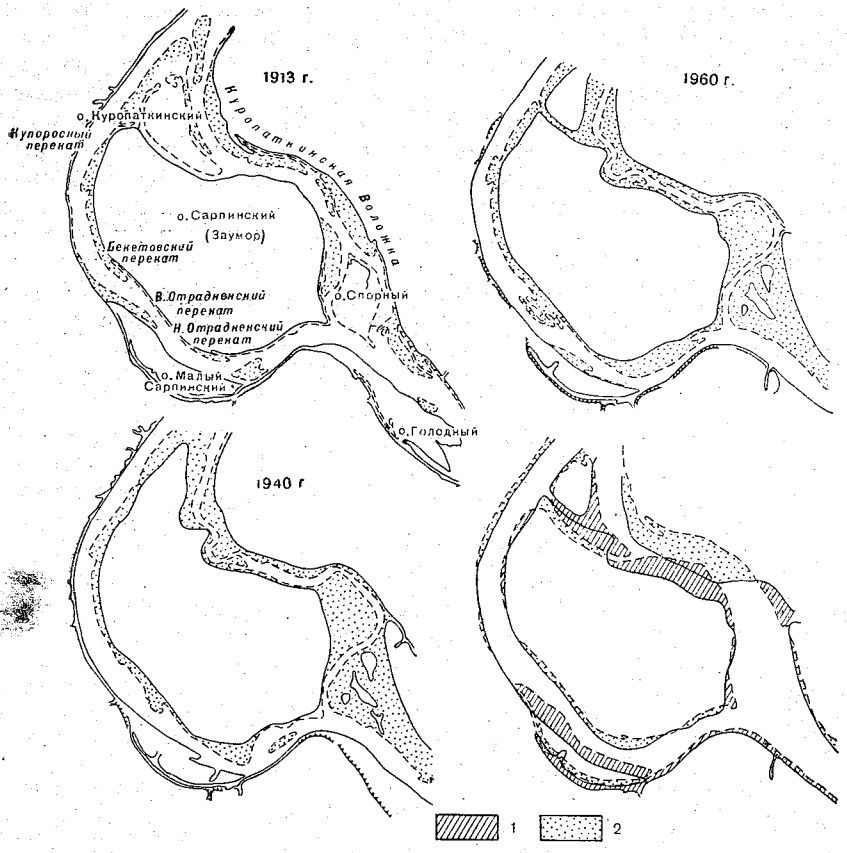


Рис. 28. Схема переформирования берегов русла р. Волги.

1 — размыв, *2* — намыв.

35—40 м/год. Теми же величинами характеризуется и размыв берегов. В результате обильного поступления наносов в воложку приверх о. Сарпинский интенсивно намывался. Аккумулятивный процесс наблюдался и в нижней части воложки, где произошло объединение осередков и небольших побочней в два крупных побочня — левобережный и правобережный — и русло стало однорукавным и S-образно изогнутым. Намыв здесь происходил со скоростью 20—30 м/год на участке длиной 1 км.

Несмотря на явное преобладание объемов наносов, транспортируемых по Куропаткинской воложке, по сравнению с их объемом, перемещаемым по главному руслу, в воложку отвлекается примерно только 25% расхода воды р. Волги. Ниже впадения Куропаткинской воложки в главном русле р. Волги вновь появляются крупные песчаные скопления наносов, образующие Поповицкие перекаты и др.

Относительно общих условий формирования пойменной многорукавности можно отметить следующее. Как указывалось выше, фактором, благоприятствующим появлению незавершенного меандрирования, является хорошая затапливаемость пойм, их относительно небольшая высота и отсутствие развитой фации пойменного аллювия или ее неустойчивости. В случае пойменной многорукавности имеют место те же факторы, но они отличаются известной спецификой. Так, например, кроме большой затопляемости поймы, на участках рек с пойменной многорукавностью обычно имеют место весьма продолжительные затопления. Последнее обстоятельство может привести к тому, что наилок может достигать значительных величин и пойменная фация аллювия окажется лучше развитой, чем при незавершенном меандрировании. Однако она оказывается легко размываемой, и крупность слагающих ее частиц резко отличается от крупности частиц, образующих русловую фацию, т. е. на участке реки с пойменной многорукавностью крупность взвешенных наносов резко отличается от крупности донных.

Глава VI

ОСЕРЕДКОВЫЙ ТИП РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

При описании ленточногрядового типа руслового процесса указывалось, что крупные формы, возникающие при переходе к побочневому типу процесса, ограниченному, свободному и незавершенному меандрированию, представляют собой как бы одну линию эволюции грядового движения наносов, происходящей под влиянием изменения основных внешних факторов руслового процесса — стока воды и наносов и ограничивающих условий. Было показано, как при этих изменениях менялся и характер грядового движения, появлялись обсыхающие и прекращающие сползание гряды — побочни, происходило причленение их к берегам, вызывающее искривление русла в плане и появление меандрирования.

Другую линию развития грядового движения наносов представляет собой переход от ленточногрядового движения наносов к так называемому осередковому типу руслового процесса. Переход этот совершается обычно непосредственно в случае, если поток оказывается вынужденным переносить большое

количество донных наносов, например, вследствие резкого уменьшения уклонов свободной водной поверхности вдоль потока, повышенного поступления донных наносов, увеличения их крупности и т. д.

В этих случаях реки образуют широкое распластанное русло, по которому сползают уже не одиночные гряды, занимающие всю его ширину, а обычно системы крупных разобщенных гряд, иногда перемещающихся относительно беспорядочно, иногда образующих ряды или цепи гряд. Таким образом, при осередковом типе процесса по ширине русла располагается не одна, а несколько крупных гряд (рис. 14, 29).

Обсыхание перекошенной ленточной гряды в межень при побочневом типе процесса приводило к образованию неподвиж-

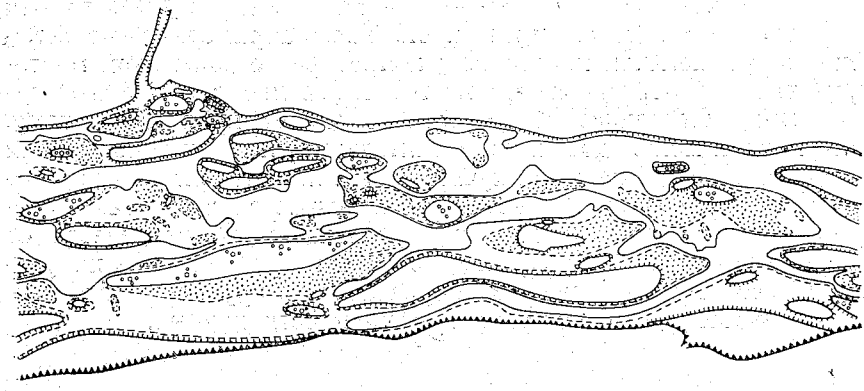


Рис. 29. Осередковый тип руслового процесса.

ного в этот период приберегового скопления наносов и затопленной оказывалась только удаленная от берега часть гряды, в которой сосредоточивались основные деформации русла при низких уровнях. При обсыхании правильной ленточной гряды образовывался одиночный осередок. При осередковом же типе руслового процесса обсыхание гряд в межень приводит к образованию в русле множества осередков, располагающихся и у берегов, и в средней его части. Обсохшие части прибереговых гряд образуют типичные побочни, однако, в отличие от побочневого типа руслового процесса, эти побочни располагаются относительно беспорядочно, не образуя морфологических пар. В центральной части русла располагаются осередки характерных каплевидных форм. Последние можно наблюдать в тех случаях, когда гряды отличаются относительно большой подвижностью, т. е., например, на реках с повышенной меженью. В тех же случаях, когда на реке имеет место длительная пониженная межень, формы гряд значительно усложняются. В этих условиях в период межени в русле обычно начинается

движение более мелких гряд, чем образующие осередок. Накопление их и приводит к усложнению очертаний осередков — появлению развитых ухвостий, кос, причленившихся песчаных гряд и т. п. Кроме того, в условиях длительной межени обнажавшаяся из-под воды и обсохшая поверхность осередков получает возможность интенсивно зарастать и закрепляться. Это создает благоприятные условия для усиленного отложения наносов на поверхности осередков при прохождении очередного половодья, в том числе и взвешенных. Подобные усиленные отложения наносов, слой которых за одно половодье может выражаться в десятках сантиметров, также усложняют формы плановых очертаний и рельеф поверхности осередков, вплоть до придания им общего наклона вниз по реке. Это вуалирует первоначальную форму создавшей их гряды.

Таким образом, в условиях руслового процесса осередкового типа часто создаются благоприятные предпосылки к превращению осередков в острова. При этом протоки, образовавшиеся между такими островами, могут начать развиваться по различным схемам. В одних из них, обладающих повышенными подвижностью и стоком донных наносов, может развиться русловой процесс по схеме ленточногрядового или побочневого, в других начнет развиваться процесс меандрирования, приводящий к образованию крупного побочня — пляжа на одном из берегов острова (протока) и размыв противоположного ее берега (берега соседнего острова или поймы). В конечном итоге произойдет существенное усложнение осередкового типа процесса и образование многорукавного русла. В подобном случае к такому разветвленному руслу правомерно применять термин «русловая многорукавность», в отличие от «многорукавности пойменной», возникающей при описанном выше незавершенном меандрировании (гл. V), когда нередко появлялись длинные пойменные протоки. Термин «русловая многорукавность» подчеркивает, что имеет место образование островов из подвижных крупных скоплений наносов — сползающих ленточных гряд. Гидравлическая схема потока в условиях руслового процесса осередкового типа, естественно, оказывается сильно усложненной. При наличии множества осередков поток разбивается на отдельные, часто несхожие фрагменты. Появляются относительно короткие зоны местного подпора, обусловленные осередками-островами, свальные течения, участки с ярко выраженной циркуляцией, со сходящимися и расходящимися циркуляционными винтами и т. д.

Все это приводит и к большому разнообразию видов деформаций осередков-островов. Обычно приверх осередков подвергается размыву в тех случаях, когда осередок-остров не создает существенного подпора на выше расположенном участке реки, а расходы наносов в потоке относительно невелики. В этих условиях наносы откладываются преимущественно в нижней

части осередка, образуя развитое ухвостье, что создает каплевидную форму осередка-острова, обращенную широкой частью вверх по течению. Одним из факторов, создающих благоприятные условия для отложения наносов в ухвостье осередка-острова, является возникновение циркуляционных течений в протоках, отметающих часть наносов к середине реки (и оконечности острова). По мере роста осередок-остров создает все больший местный подпор на участке приверха, и здесь происходит усиленное отложение наносов. В связи с этим транзитный расход наносов уменьшается и ухвостье острова может даже начать размываться. Усиленный намыв приверха может наблюдаться и в начальных стадиях развития осередка при наличии в потоке высокого стока донных наносов и крупногрядового его движения. Наползая на приверх, эти гряды будут способствовать его разрастанию. Из приведенного описания хода развития речного русла при осередковом типе руслового процесса следует, что и в этом случае основной чертой процесса является движение по руслу крупных песчаных гряд. Основной признак — наличие широкого распластанного русла. Учитывая модификацию гряд в различных природных условиях, при детальном изучении этого типа руслового процесса, т. е. при выявлении схем развития отдельных протоков и оценке характера будущих переформирований, необходимо прибегать к фрагментированию, стремясь выявлять схемы развития этих отдельных протоков, в которых возможны деформации, происходящие по резко различным типам. Наиболее часто осередковый тип руслового процесса встречается на участках выхода реки из гор. На подобных участках в результате обычно резкого изменения продольных уклонов потока наблюдается резкое увеличение доли транспортируемых потоком донных наносов. Это происходит вследствие того, что часть наносов, проходившая на выше расположенном участке с большими уклонами во взвешенном состоянии, при уменьшении уклонов переходит в состояние донного влечения.

Осередковый тип руслового процесса может развиться и на приустьевых участках рек, также характерных повышенным количеством и подвижностью наносов (вследствие их измельчения при перемещении вниз по течению реки).

Повышенный транспорт донных наносов может быть обусловлен и местными источниками поступления наносов (впадения притоков, несущих большое количество донных наносов, участки интенсивного подмыва склонов долины, приводящего к оползням и обвалам, и т. п.). В этих случаях также может возникнуть осередковый тип руслового процесса. Однако если на выходах реки из гор или на приустьевых участках протяженность реки с осередковым типом руслового процесса может достигать сотен километров (особенно в первом случае), то мест-

ные источники поступления донных наносов обусловливают появление осередков только на коротких участках, резко выделяющихся на фоне типа руслового процесса, развитого на большом протяжении данной реки.

При установлении причин образования осередков на исследуемом участке реки и выявлении местных источников питания потока наносами следует иметь в виду, что состав отложений наносов на осередке, существование которого не обусловлено наличием местного источника питания, не должен существенно отличаться от состава донных отложений, распространенных на данном практически бесприточном участке реки. На осередках, образовавшихся в результате выноса наносов из крупного притока или в результате поступления в поток материала от местных обрушений склонов долины, состав отложений, во всяком случае нижних их слоев, образующих как бы фундамент осередка, должен быть сходным с составом и крупностью частиц, поступающих от местных источников питания, и может резко отличаться от распространенного на участке большого протяжения. При изучении осередков следует учитывать, что иногда они могут образоваться вследствие скопления наносов у местных препятствий, образующихся, например, вследствие захламленности русла, что особенно часто можно наблюдать на сплавных реках. В этих случаях осередки могут оказаться распространенными даже на участках большого протяжения, но их существование будет определяться не свойственной этому типу руслового процесса комбинацией особенностей стока воды и наносов, а только влиянием ограничивающих факторов, роль которых в данном случае играют местные естественные или искусственно созданные препятствия в русле реки.

Укажем на общий характер влияния особенностей строения речной долины (ограничивающих факторов) на развитие осередков-островов.

В случаях когда резкое изменение уклонов потока, как одно из обязательных условий развития руслового процесса осередкового типа, происходит без существенного расширения долины, т. е. наблюдается только перелом наклона ее дна, в русле создаются обычно длинные и относительно высокие острова-осередки, сложенные крупными наносами. При значительном расширении долины эти образования оказываются более распластанными и многочисленными и сложены они более мелкозернистыми отложениями, во всяком случае с поверхности, т. е. имеет место развитая пойменная фация аллювия — результат осаждения на островах взвешенных наносов.

Как следует из приведенного выше описания развития осередков, при этом типе процесса можно выделить два вида многорукавности.

1. Русловая многорукавность осередкового

типа, при которой крупные формы представлены подвижными, преимущественно сползающими крутыми грядами, образующими осередки, со слабо закрепленной поверхностью, т. е. при которой подвижные осередки существуют как конечная форма развития транспорта донных наносов. Подобные образования чаще всего встречаются на участках выхода реки из гор, т. е. они свойственны полугорным рекам с длинной волной половодья и частыми паводками или наличием в течение года ряда волн крупных подъемов уровня. Осередки в этих случаях сложены относительно крупным русловым аллювием, взвешенные наносы проходят транзитом, так как подобные участки все же сохраняют значительные уклоны и подвижность наносов.

2. Русловая многорукавность островного типа характерна наличием островов, представляющих собой результат разрастания осередков, возникновением сложных их переформирований, обусловливающих не только сползание островов, но и их регрессивные перемещения (вверх по течению). (Подробнее о типах островов и видах их деформаций см. в гл. IX.) При русловой многорукавности островного типа в зависимости от характера строения речной долины могут существовать как широкие округлые и низкие острова, так и длинные высокие, иногда перестающие затапливаться даже в половодье. Часто наблюдается развитие мощной пойменной фации аллювия — отложений взвешенных наносов. При детальном анализе процесса необходимо прибегать к фрагментированию, исследуя тип русловых переформирований каждого протока, поскольку он может быть весьма различным. При этом следует пользоваться типизацией, описанной в главах III—VI. Кроме описанных разновидностей осередкового типа процесса, можно выделить блуждающие русла. При очень высокой подвижности донных наносов ленточногрядовый характер перемещения донных наносов приобретает настолько беспорядочный вид и русловые образования формируются настолько интенсивно, что русло реки начинает блуждать в пределах дна долины, распластывается, приобретает несколько динамических осей и эти динамические оси потока изменяют свое положение не только от сезона к сезону, как это имеет место при всех выделенных выше типах руслового процесса, но даже в пределах суток. При этом отдельные протоки, а иногда и все русло реки в плане способно смещаться на сотни метров за одно половодье или крупный паводок.

О скорости подмыва берегов дают представление следующие цифры: на р. Амударье в районе Ходжейли при относительно низких уровнях весной смещение берега в плане может достигать 1 м/сутки, при проходе высоких паводков — 10—15 м/сутки, а зимой и осенью при относительно низких уровнях — 4 м/сутки. Длина участков, на которых наблюдается подобное смещение берегов, колеблется от 0,5—1,0 до 8—10 км.

Однако размыв берегов редко продолжается несколько лет подряд. Переформирования русла вызывают частые перемещения динамических осей потока, и зоны размыва могут быстро перемещаться на другой берег и на другие участки, а на прежних местах размыва может происходить намыв.

Существенные, но всегда четко морфологически выраженные переформирования русла происходят на горных реках, способных перемещать в короткие сроки обширные галечные отмели и иногда в течение суток коренным образом видоизменить строение русла.

Наконец, высшей степенью подвижности обладают селевые потоки, несущие огромную массу обломочного материала без четко выраженных морфологических образований. Хотя русловой процесс на горных реках (в том числе и селевых потоков) исследован еще недостаточно, можно предполагать, что наблюдающиеся на них переформирования являются развитием и модификацией руслового процесса осередкового типа, существенно осложненного рядом привходящих местных факторов. Так, например, известно, что на горных реках могут перемещаться на большие расстояния и даже обкатываться крупные валуны диаметром порядка 1 м и более в условиях, когда наблюдающиеся на реке скорости течения явно недостаточны для этого. По-видимому, причиной перемещения столь крупных камней является подмыв грунта под ними и перекатывание валуна в образовавшееся таким путем местное понижение дна. Подобное явление, очевидно, возможно только в условиях больших скоростей течения и подвижности донных отложений.

Глава VII

ИЗМЕРИТЕЛИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА И ОСНОВНЫЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ И ГИДРОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ

1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ ОБ ИЗМЕРИТЕЛЯХ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

Для использования предложенной в главах III—VI типизации руслового процесса в целях развития методов расчета и прогноза русловых переформирований необходимо получение определенных количественных измерителей, с помощью которых можно было бы выразить морфологические закономерности руслового процесса того или иного типа. Это открывает возможности для выявления взаимосвязей между развитием отдельных элементов речного русла, для установления их связей с определяющими факторами и обеспечивает возможности инженерного применения гидролого-морфологического анализа.

Во введении кратко рассматривалась сущность морфометрических (связи между отдельными элементами русла) и гидроморфологических (связи элементов русла с определяющими русловой процесс гидрологическими факторами) зависимостей. Указывалось, что подробный их обзор дан в монографии «Русловой процесс», изд. 1959 г. Были также охарактеризованы основные недостатки подобных разработок.

Система измерителей, используемая в этих зависимостях, в конечном итоге ограничивается шириной и глубиной русла. Чрезвычайно грубо оцениваются плановые очертания. Практически их характеристика ограничивается определением радиуса кривизны — параметра, строгого применительно к короткому участку и становящегося весьма грубым для оценки целостного морфологического образования, например, такого распространенного, как речная излучина. Исключение представляют, пожалуй, только некоторые разработки, учитывающие шаг излучин [Леопольд и Вольман (Leopold, Volmann 1957), Дьюри (Dury, 1960) и др.].

При всем этом существующие морфометрические зависимости позволяют оценивать значения измерителей только в пространстве, не характеризуя изменения их во времени, если не считать попыток Дьюри использовать гидроморфологические зависимости в палеогидрографических целях. Особенно плохо обстоит дело с характеристикой изменений во времени плановых очертаний речного русла. Признавая полезность и практическое значение существующих разработок в области создания морфометрических и гидроморфологических зависимостей и возможность решать с их помощью ряд инженерных задач, все же нельзя не видеть их несоответствия нуждам гидролого-морфологического анализа и ограниченности для характеристики основных закономерностей деформаций русел и пойм при различных типах руслового процесса.

Из предлагаемой типизации руслового процесса легко видеть, что в ее основе, по сути дела, лежит исследование особенностей развития грядового движения наносов в различных природных условиях. В любой из рассмотренных крупных форм гряда присутствует в качестве ее неотъемлемого элемента. При ленточногрядовом, побочневом и осередковом типах процесса крупные сползающие песчаные гряды целиком определяют внешний облик речного русла. При разновидностях меандрирования по тем же причинам имеют место крупные остановившиеся песчаные гряды, части которых формируют уже не побочни, а также относительно неподвижные пляжи — надводные части этих гряд. По этой причине весьма важно для оценки особенностей деформаций русла располагать характеристиками грядового движения и прежде всего морфометрическими характеристиками гряд: их шагом (длиной), высотой скоростью дви-

жения (сползания). Именно эти характеристики необходимо знать для оценки изменений глубин русла реки, определяемых движениями гряд. Знание морфометрии гряд, непосредственно связанной с основными факторами руслового процесса, позволяет получать количественные зависимости между размерами гряд и определяющими их факторами, что очень важно прежде всего для целей прогнозов руслового процесса. При различных разновидностях меандрирования, кроме характеристик крупных гряд-перекатов, расположенных в точках перегиба русла в излучинах, важно иметь показатели формы и, следовательно, степени развитости излучин и темпов их плановых переформирований — таких измерителей, которые позволяли бы удобно охарактеризовать всю форму в целом, например, используя для этого углы разворота излучин и др.

Ниже характеризуется система измерителей, позволяющих анализировать основные закономерности деформаций речного русла и выявлять их связи с определяющими факторами. Одновременно даются первые результаты применения этой системы измерителей к натурным рекам.

При разработке системы измерителей руслового процесса особое внимание уделялось обеспечению простоты и определенности получения их количественных значений, возможности их определения по широко распространенным и легко доступным материалам, возможности выявления с их помощью плановых деформаций русла, поскольку именно они оказываются освещенными в существующих разработках наиболее слабо. Наконец, как упоминалось выше, измерители должны характеризовать в наиболее компактной форме целостные морфологические образования — крупные формы русел.

2. ЛЕНТОЧНОГРЯДОВЫЙ ТИП РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

Для получения количественных измерителей, с помощью которых можно было бы охарактеризовать основные особенности переформирования, свойственные ленточногрядовому типу процесса, достаточно знать (см. рис. 14) следующее.

Шаг гряд ($\lambda_г$) — расстояние по средней линии русла между гребнями двух следующих друг за другом гряд. Шаг гряд зависит от крупности реки (характеристик ее водоносности), от размеров стока донных наносов, их крупности (гранулометрического состава), от уклонов потока и тесно связанной с ними извилистости речного русла.

На реках, в которых ленточные гряды, создающиеся в период половодья, сохраняются в межень как реликтовые (остаточные) образования, существенной разницы между шагом гряд в половодье и межень ожидать нельзя, поэтому возможно измерение его по съемкам, произведенным в межень.

Относительный шаг гряд ($\lambda_г/b$) — отношение шага гряд к ширине русла (b); является удобным показателем для сопоставления данных измерений по рекам различной крупности.

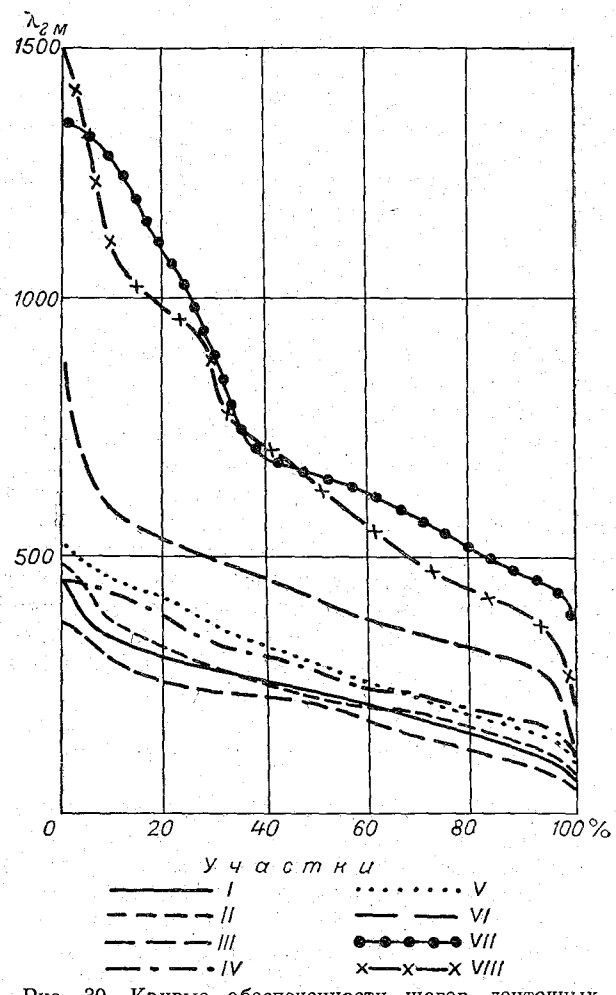


Рис. 30. Кривые обеспеченности шагов ленточных гряд для бесприточных участков.

I—VIII — кривые, соответствующие бесприточным участкам в порядке нарастающей водности реки от *I* к *VIII* участку.

Скорость сползания гряды ($c_г$) — скорость смещения гребня гряды по течению реки; определяется в результате натурных наблюдений или может быть рассчитана гидравлически.

Приведенные измерители, являясь плановыми характеристиками, могут быть легко получены по аэрофотоснимкам или по данным крупномасштабных съемок и позволяют выяснить главные морфологические особенности, свойственные рассматриваемому типу процесса, а также их связи с основными факторами процесса. Легкость их определения позволяет получить с помощью обработки аэрофотоснимков и карт массовый материал, пригодный для надежного статистического обобщения.

Для инженерного использования важной характеристикой является высота гряды, определяющая размах колебаний отметок дна, обусловленный в основном, как указывалось, разме-

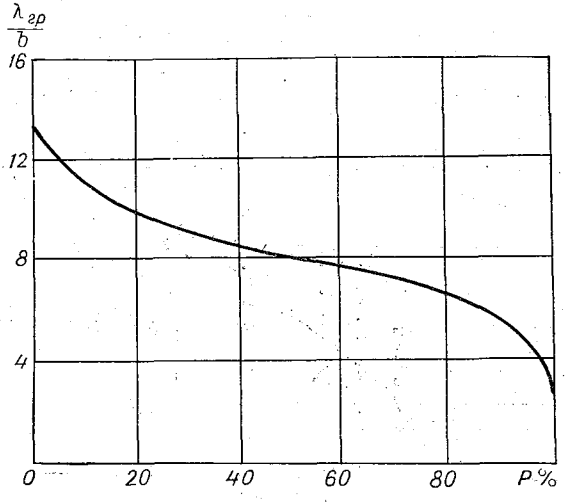


Рис. 31. Кривая обеспеченности относительных шагов гряд.

рами проходящих через данный створ гряд. Высота гряды может быть определена либо по специальным натурным наблюдениям в разные фазы водного режима, или гидравлическим расчетом.

Если использовать при этом данные о шагах гряд, получение которых не составляет труда и возможно камеральным путем, то точность расчета можно существенно повысить.

Количественные значения перечисленных выше измерителей получены на примере р. Оки, по длине которой на 8 бесприточных участках протяжением 276 км измерено 430 гряд (рис. 30 и 31). В этом случае оказалось, что шаг гряд представляет собой достаточно устойчивую величину по длине бесприточных участков. Примерно в среднем (в 50% случаев) шаг гряд оказался равным 8 ширинам русла, в 25% случаев — 9,4 и в 95% случаев — 6,8 при крайних значениях 13 и 2.

В среднем по всем бесприточным участкам изменчивость шагов гряд может быть оценена коэффициентом вариации 0,37 при крайних его значениях 0,30 и 0,50.

Связь шагов гряд с величиной реки оказывается достаточно отчетливой, особенно если крупность реки оценивать шириной русла (рис. 32). При оценке крупности реки с помощью расхода воды возникает вопрос о «руслоформирующем расходе, т. е. расходе, создающем основные морфологические образования в русле реки, определяющие его внешний облик. При таком определении «руслоформирующего» расхода воды очевидно, что

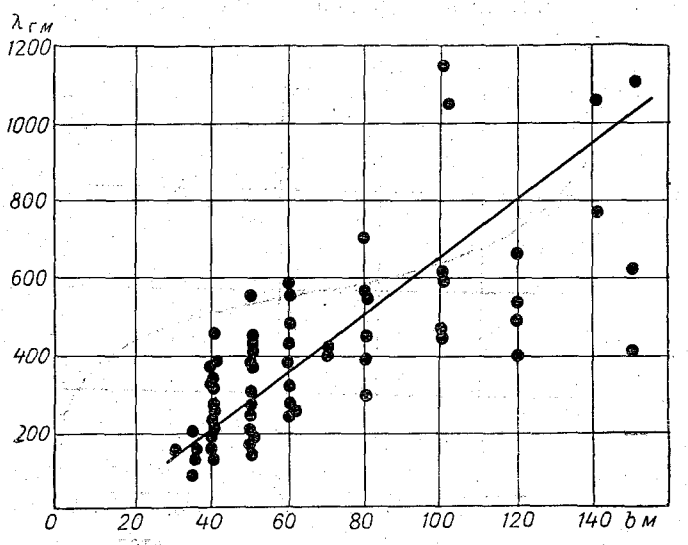


Рис. 32. Связь шагов гряд с извилистостью русла.

он будет различным при разных типах руслового процесса, т. е. при разных типах макроформ.

При ленточногрядовом типе руслового процесса оптимальные условия для развития гряд создаются в половодье, когда в основном устанавливаются часто сохраняющиеся и в межень шаги гряд. Так как процесс формирования ленточных гряд обладает известной инерционностью, то следует искать связь шагов гряд не с наибольшими расходами, а с расходами определенной обеспеченности в году. В рассмотренном случае (р. Ока) хорошая связь получилась при использовании данных о среднем максимальном расходе половодья, который на исследованных участках р. Оки примерно соответствует отметкам выхода воды на пойму (рис. 33). Вообще при установлении подобных связей следует иметь в виду, что на реках с устойчивым от года к году внутригодовым распределением стока, т. е. при наличии

мало изменяющихся соотношений между периодами различной водности, для указанной связи можно использовать среднего-

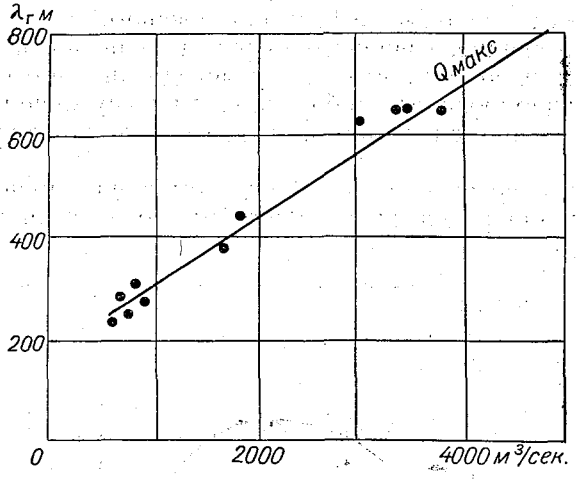


Рис. 33. Связь шагов ленточных гряд со средним максимальным расходом.

довые и даже среднемесячные расходы и с их помощью оценить шаги гряд на участке, на котором они непосредственно не выяв-

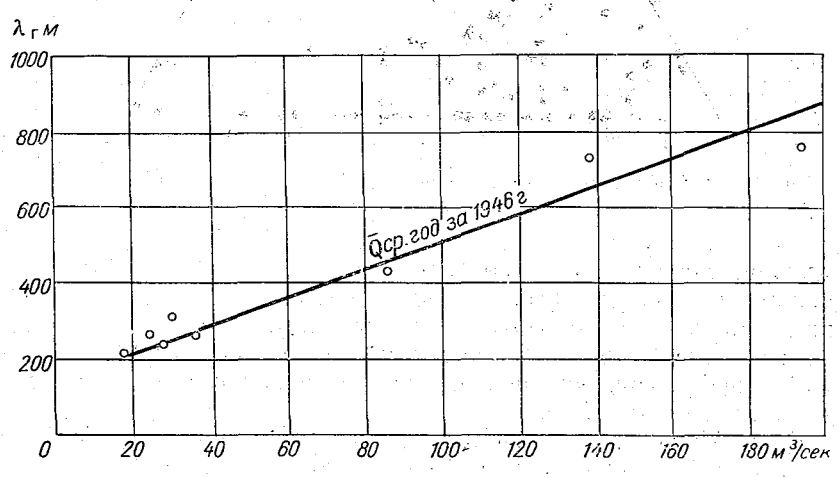


Рис. 34. Связь шагов ленточных гряд со средним годовым расходом.

лены из-за отсутствия материалов, но где имеются основания предполагать, что они существуют. Связь шагов гряд со средним годовым расходом для р. Оки показана на рис. 34.

Известные искажения в распределении шагов ленточных гряд по длине реки вносят морфометрические особенности речных русел, прежде всего их извилистость. Так как при данном типе процесса плановые деформации речного русла не характерны, то, очевидно, извилистость русла, если она имеет место, обусловлена либо тем, что она унаследована потоком (река раньше меандрировала), либо наличием вынужденных поворотов в связи с обтеканием потоком массивов трудноразмываемых пород.

При ленточногрядовом и побочневом типах процесса повороты русла для развития гряд играют роль ограничивающего

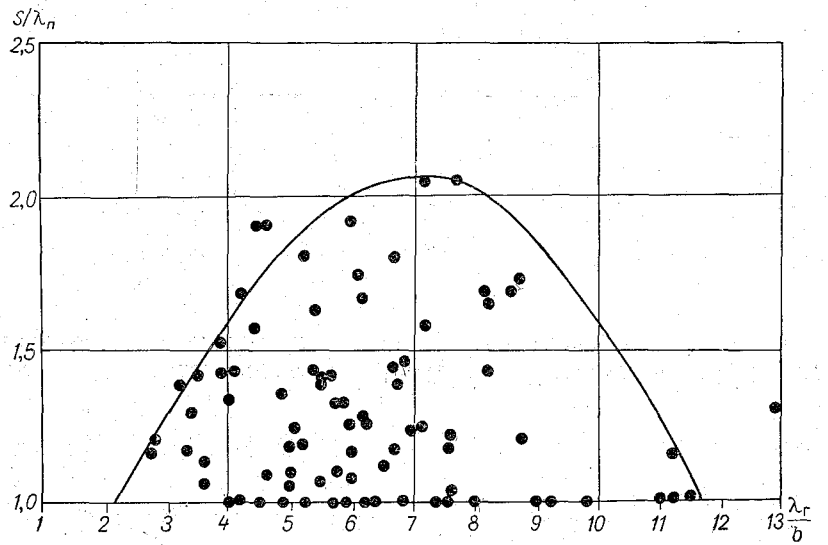


Рис. 35. Распределение шагов ленточных гряд при разной степени извилистого русла.

фактора. На участке крутого поворота русла вследствие создающихся здесь местных особенностей протекания потока (см. ниже) движение и развитие гряд прекращается и они подвергаются систематическому размыву, благодаря которому положение гребня гряды в пределах поворота оказывается фиксированным в пространстве.

На примере р. Оки обнаружено, что на хорошо выраженных излучинах (в данном случае они являются унаследованными и создались в процессе ранее наблюдавшегося меандрирования) ленточные гряды не обнаруживаются (рис. 35). С уменьшением степени выраженности излучин диапазон изменения шагов гряд возрастает. Если степень выраженности излучин охарактеризовать отношением длины излучин между точками перегиба русла

(S) к шагу излучин ($\lambda_и$), т. е. измерителем $\frac{S}{\lambda_и}$, то между этим показателем и шагом ленточных гряд создаются такие отношения:

$$\frac{S}{\lambda_и} > 2 \text{ гряды отсутствуют,}$$

$$\frac{S}{\lambda_и} = 2\lambda_г = 6 \div 8 \text{ ширин русла,}$$

$$\frac{S}{\lambda_и} = 1{,}5\lambda_г = 3{,}8 \div 10{,}5 \text{ ширин русла}$$

$\frac{S}{\lambda_и} = 1$ (прямое русло); $\lambda_г$ колеблется от 2 до 12 ширин русла.

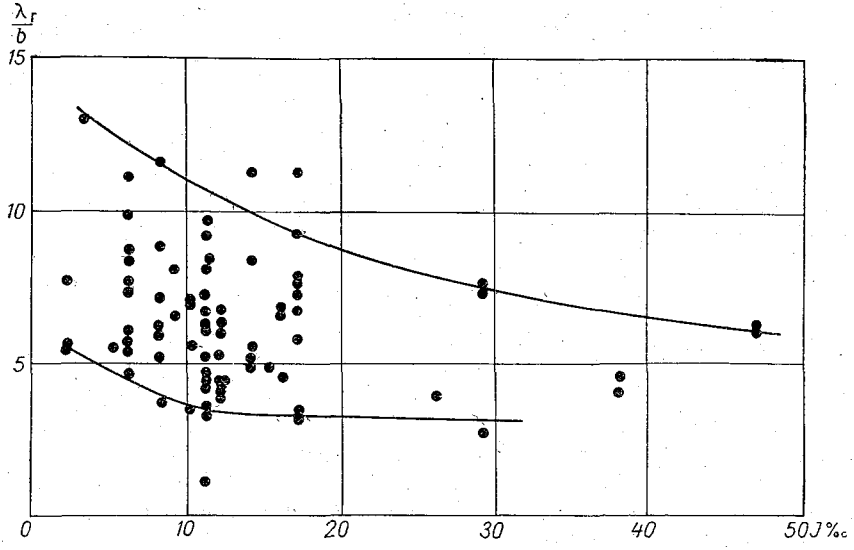


Рис. 36. Связь шагов ленточных гряд с уклоном свободной водной поверхности.

На прямых участках $\left(\frac{S}{\lambda_и} = 1\right)$ значительный диапазон шагов гряд обусловлен влиянием уже других факторов, в первую очередь уклонов и крупности донных отложений. Наличные материалы позволили оценить в самом общем и приближенном виде только характер влияния уклона на шаг ленточных гряд. Судя, правда, по очень приближенной связи (рис. 36), с увеличением уклона шаг гряд уменьшается. По данным лабораторных

экспериментов, связь уклона потока с шагом гряд должна быть более сложной и в значительной мере обусловливаться составом грунта.

3. ПОБОЧНЕВЫЙ ТИП

Основными измерителями руслового процесса побочневого типа рекомендуются следующие.

Шаг побочня ($\lambda_п$) — расстояние между двумя смежными точками перегиба средней линии русла меженного потока. Такой способ определения шага побочня идентичен определению шага ленточных гряд (см. рис. 14).

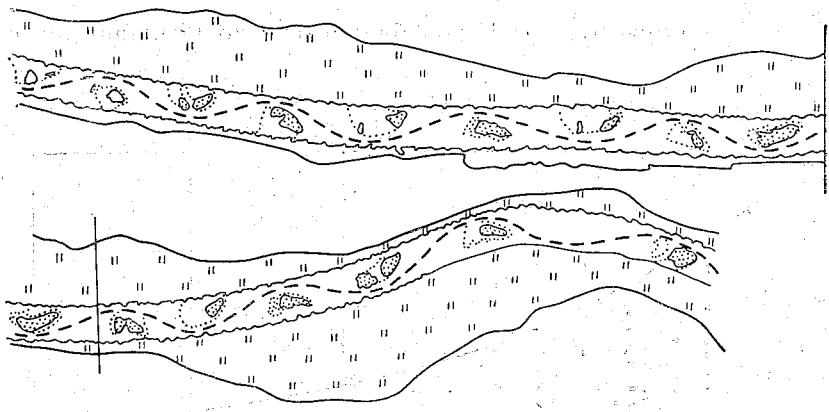


Рис. 37. Участок р. Вислы с укрепленными берегами и отторженными побочнями.

Относительный шаг побочня — отношение шага побочня к ширине русла между бровками его берегов (b) при затопленных побочнях (см. рис. 12).

Средняя скорость перемещения побочня — скорость сползания гребня гряды, образующей побочень, по течению реки ($c_п$).

Кроме этих основных измерителей, можно предложить и ряд других, уточняющих особенности деформаций при побочневом типе процесса, в частности измерители, требующиеся для оценки расхода донных наносов, т. е. величины $w_п$, $w_д$, F, $q_{ср}$, входящие в формулы (5) и (7).

Если для измерения ленточных гряд требуется наличие аэрофотосъемки или производство специального продольного эхолотирования, то измерители побочневого типа руслового процесса могут быть определены по лоцманским картам или любым крупномасштабным съемкам речного русла с изобатами или горизонталями дна. Изобаты или горизонтали достаточно хорошо очер-

чивают формы побочней и уточнению подлежит обычно только местоположение непоказываемого на плане гребня гряды (переката).

Величины измерителей побочневого типа руслового процесса были определены на примере рек Оки и Вислы.

На р. Висле побочневый тип руслового процесса прослеживается в наиболее явном виде, поскольку на всем протяжении участков измерения русло реки характеризуется очень небольшой извилистостью, а берега русла укреплены, вследствие чего плановые деформации не происходят. Своеобразием этого участка является широкое распространение отторженных побочней, что связано со стеснением потока системами струенаправляющих дамб.

Вид участка р. Вислы, где производились измерения, показан на рис. 37. Средний годовой расход составляет 1010 м³/сек., средний уклон — 0,173‰, грунты дна — мелкий песок.

На р. Оке участки с побочнями непосредственно сменяют участок с ленточногрядовым типом руслового процесса. Появление побочней совпадает со значительным увеличением водности реки (примерно на $^1/_3$ среднегодовой нормы стока) вследствие впадения крупного притока (р. Угры). Участки с побочнями обнаружены в характерных условиях очень слабо выраженными плановыми деформациями, а именно, при ограниченном меандрировании и на участках спрямленных петель русла.

Общая характеристика участков с побочневым типом процесса, обнаруженным на р. Оке, дана в табл. 15.

Кривые обеспеченности относительных шагов побочней на реках Висле и Оке приведены на рис. 38.

Таблица 15

Характеристика участков р. Оки с побочнями

Границы участка	Характер плановых очертаний русла	Длина участка, км	Средний годовой расход		Уклон, ‰	Число побочней
			воды, м³/сек.	наносов, кг/сек.		
р. Угра—р. Протва	Слабоизвилистое	126	296	46	0,05	29
р. Протва—Москва-река	„	127	382	46	0,07	32
Москва-река—р. Проня	Спрямленное в ходе меандрирования	235	480	36	0,035	25
с. Рубецкое—р. Мокша	Слабоизвилистое	100	720	35	0,05	8
с. Нарышкино—с. Окшово	Спрямленное русло	39	860	35	0,04	11
с. Окшово—с. Новая Азовка	То же	48	905	34	0,08	5

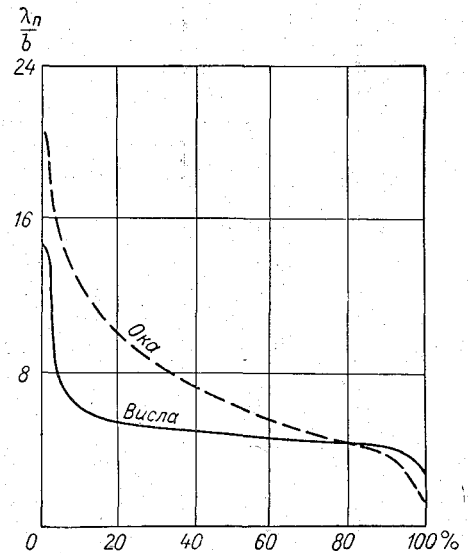


Рис. 38. Кривые обеспеченности относительных шагов побочней рек Оки и Вислы.

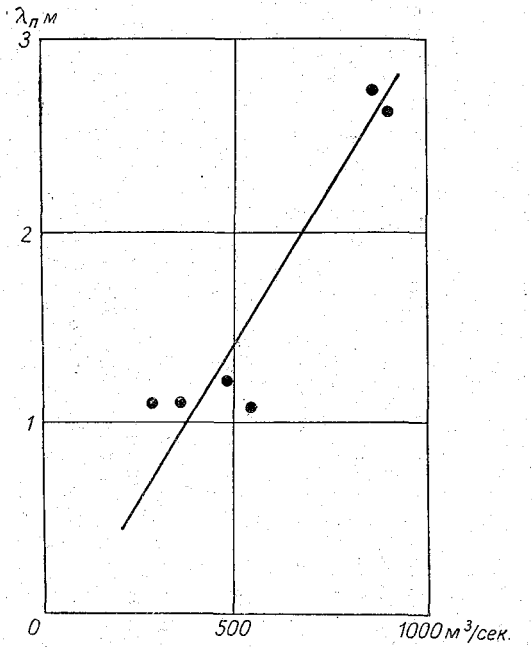


Рис. 39. Связь шагов побочней на р. Оке со средними годовыми расходами воды.

Данные измерений по участкам рек Вислы и Оки показывают следующее.

1. Относительные шаги ленточных гряд и побочней весьма близки между собой, что подтверждает общность происхождения этих морфологических образований. Слабая извилистость русла и закрепленные берега р. Вислы способствуют большой устойчивости шагов побочней но длине реки. Коэффициент вариации шагов побочней C_v на р. Висле оказался равным 0,32. С увеличением извилистости русла изменчивость шагов побочней увеличивается до $C_v=0{,}58$. Она больше, чем изменчивость шагов ленточных гряд на этой реке. Кривые обеспеченности

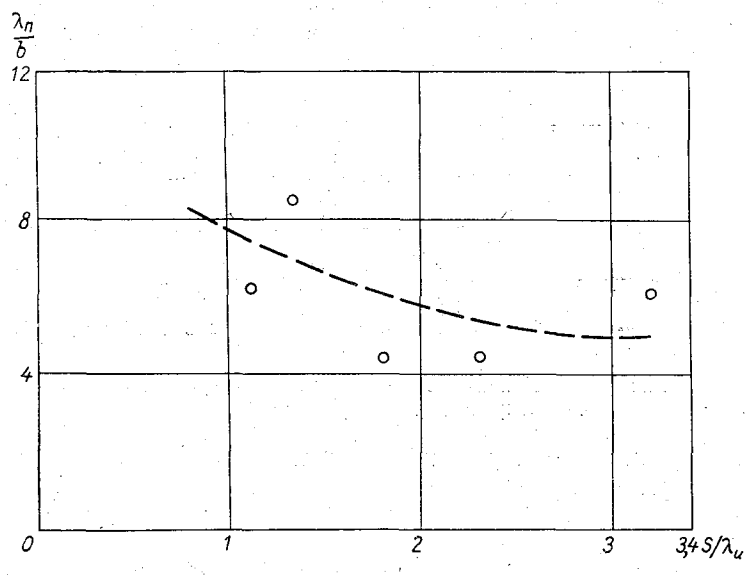


Рис. 40. Зависимость шага побочней от извилистости русла.

относительных шагов побочней отличаются большей асимметричностью, чем ленточных гряд, что также показывает на устойчивость этого измерителя по сравнению с ленточными грядами.

2. Относительный шаг побочней на р. Висле оказался несколько меньшим, чем на р. Оке, что связано с бо́льшим расходом донных наносов на р. Висле и их бо́льшей крупностью.

3. Так же как для ленточных гряд, обнаруживается достаточно отчетливая связь шагов побочней с водностью реки (рис. 39) и зависимость шага побочня от степени извилистости русла (рис. 40). На этих рисунках каждая точка связи отражает средние значения величин по бесприточным участкам, т. е. определена на основе десятков измерений.

Данные о скорости сползания побочней, полученные по материалам разных авторов, приведены в табл. 5. Из данных табл. 5 следует, что даже на смежных участках (р. Волга) скорость сползания побочней может быть весьма различной.

4. ОГРАНИЧЕННОЕ МЕАНДРИРОВАНИЕ

Рассмотренные выше основные особенности переформирований речного русла и поймы при ограниченном меандрировании можно выразить с помощью следующих измерителей (см. рис. 14).

Шаг излучин ($\lambda_и$) — расстояние по прямой между смежными точками перегиба средней линии русла излучины. Так же как и шаг гряд (ленточных или побочней), шаг излучины в то

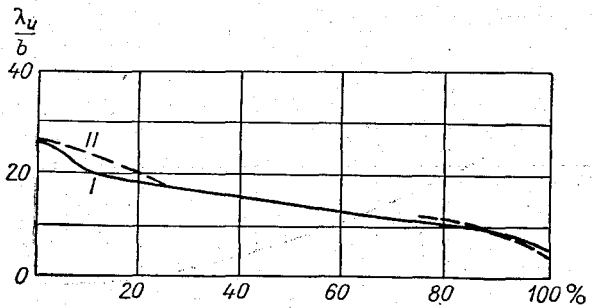


Рис. 41. Кривая обеспеченности относительных шагов излучин рек Оки (*II*) и Иртыша (*I*).

же время характеризует и расстояние между имеющимися в русле при ограниченном меандрировании грядами (перекатами), и величина его непосредственно связана прежде всего с крупностью реки.

Относительный шаг излучины ($\lambda_и/b$) — отношение шага излучины к средней ширине русла между бровками меженных берегов на участке, ограниченном точками смежных перегибов русла.

Степень развитости излучин можно выразить несколькими способами, например отношением ширины пояса меандрирования B (расстояния между линиями, проведенными через вершины противоположно направленных излучин) к ширине русла b или с помощью отношения длины излучины по средней линии русла между точками смежных перегибов S и шагом излучины $\lambda_и$, т. е. $\frac{S}{\lambda_и}$. Развитость излучины можно также характеризовать углами входа ($\alpha_{вх}$) и выхода ($\alpha_{вых}$) излучин, представляющими собой углы, образованные касательными в точке перегибов соответственно в верховой и низовой частях излучины, и прямой линией, соединяющей эти точки пе-

региба и выражающей шаг излучины, а также суммарным углом α — углом разворота, равным $\alpha = \alpha_{вх} + \alpha_{вых}$ (см. рис. 14 *IV*).

Углы входа и выхода позволяют оценить степень асимметрии излучины. Значения этих измерителей получены на примерах рек Оки и Иртыша (табл. 16). Участки с ограниченным меандрированием на реках Оке и Иртыше располагаются в местах сужений долины. При определении величин измерителей вынужденные изгибы русла, вызванные обтеканием меандр долины, в расчет не принимались.

Таблица 16

Основные характеристики участков рек Оки и Иртыша с ограниченным меандрированием

Границы участка	Длина участка, км	Средний годовой расход воды, м³/сек.	Средний годовой расход взвешенных наносов, кг/сек.	Уклон свободной водной поверхности, ‰	Число измеренных излучин
р. Ока					
р. Угра—р. Протва . .	126	296	46	0,005	15
р. Протва—Москва-река	127	382	46	0,007	8
с. Рубецкое—р. Мокша	100	720	35	0,005	8
р. Иртыш					
р. Курчум—р. Нарым	126	372	—	0,021	19
р. Нарым—р. Бухтарма	90	380	—	0,038	25

Изменчивость относительного шага излучин в обоих случаях оценивается коэффициентом вариации 0,33 (примерно такой же, как для ленточных гряд).

Обращает на себя внимание симметричность кривых обеспеченности относительных шагов излучин (рис. 41).

Соотношения шага излучин с шириной русла на реках Оке и Иртыше оказались очень близкими (табл. 17).

Таблица 17

Обеспеченность и значения относительных шагов ограниченно меандрирующих излучин на участках рек Иртыша и Оки

Река	Обеспеченность, %			Наименьший шаг	Наибольший шаг
	25	50	75		
Ока	18	14	11	6	25
Иртыш	17	13	10	7	25

Относительный шаг ограниченно меандрирующих излучин на р. Оке примерно в 2—3 раза превышает шаг ленточных гряд и побочней, равный в среднем соответственно 8 и 6 ширинам русла.

Степень выраженности излучин, отличаясь большой устойчивостью по длине рек Оки и Иртыша, очень близка для этих рек. Кривые обеспеченности параметра $S/\lambda_и$ для указанных рек практически совпадают (рис. 42), величина $S/\lambda_и$ колеблется в пределах от 1,2 до 2,0, в среднем равна 1,4. Параметр B/b также показывает большую устойчивость форм излучин, изменяясь в пределах 2,5—3,2.

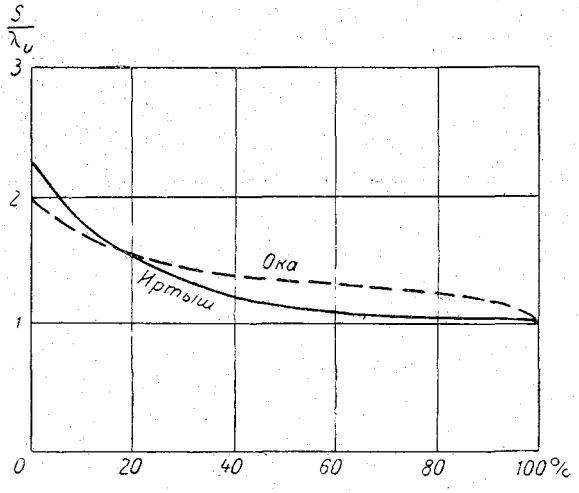


Рис. 42. Кривые обеспеченности степени выраженности ограниченно меандрирующих излучин рек Оки и Иртыша.

Весьма близкими оказались и значения углов входа и выхода излучин и между собой, и для рассматриваемых рек. По отдельным участкам они изменялись в пределах от 40 до 60° при наибольшей разнице для отдельных излучин, равной 4°.

Для участка р. Оки с. Рубецкое — р. Мокша удалось оценить изменчивость формы излучин во времени, сопоставив съемки русла за 1879, 1926 и 1946 гг. (табл. 18). Обнаруживается исключительная устойчивость формы излучин, хотя между съемками прошло 67 лет.

Те относительно небольшие изменения в форме излучин, которые имеют место на рассматриваемом участке р. Оки, связаны главным образом с тем, что на фоне ограниченного меандрирования наблюдается побочневый тип процесса, вследствие чего сползающие побочни обусловливают небольшие местные изме-

Таблица 18

Изменение во времени параметров ограниченного меандрирования на участке р. Оки с. Рубецкое — р. Мокша

№ излучины	$\frac{\lambda_и}{b}$			$\frac{S}{\lambda_и}$			$\alpha_{вх}$			$\alpha_{вых}$		
	1879	1926	1946	1879	1926	1946	1879	1926	1946	1879	1926	1946
1	7,7	7,0	7,4	1,02	1,02	1,02	15	15	15	35	35	35
2	—	—	—	1,25	1,25	1,25	78	78	78	82	82	82
3	6,5	6,5	6,5	1,16	1,16	1,16	55	55	55	35	35	35
4	5,5	5,1	4,2	1,02	1,08	1,02	50	45	45	22	25	30
5	7,2	5,2	5,5	1,12	1,3	1,08	35	25	25	50	55	50
6	5,0	5,1	6,1	1,02	1,08	1,01	30	35	35	25	35	20
7	6,0	7,1	6,5	1,03	1,09	1,02	20	20	20	25	35	25
8	4,5	6,4	4,4	1,5	1,5	1,2	50	52	48	75	80	80

нения береговой линии в пределах каждой излучины. Наибольшие подвижные скопления наносов отмечаются на излучинах № 5—8 (табл. 18), на которых наблюдаются и наибольшие разницы в значении одних и тех же параметров за разные годы.

Устойчивость форм и размеров излучин при ограниченном меандрировании дает основание считать, что при этом типе процесса каких-либо однонаправленных тенденций в развитии русла нет и оно находится обычно в состоянии, близком к динамическому равновесию.

Кроме перечисленных выше, можно получить характеристики плановых смещений и объемов деформаций, происходящих при сползании излучин, пользуясь системой показателей, рекомендуемых для свободного меандрирования (см. ниже).

5. СВОБОДНОЕ МЕАНДРИРОВАНИЕ

а. Основные измерители процесса

Для количественной характеристики основных закономерностей общих деформаций русла, свойственных свободному меандрированию, можно рекомендовать в основном те же измерители, что и для ограниченного меандрирования, а также ввести ряд дополнительных (см. рис. 14).

Шаг излучин ($\lambda_и$) — расстояние по прямой между смежными точками перегиба средней линии русла излучины. Этот измеритель, показывая расстояние между двумя крупными грядами — перекатами, расположенными в пределах одной излучины, сохраняет преемственность с подобным измерителем, предложенным для руслового процесса побочневого типа и

ограниченного меандрирования. Вследствие более сложного хода плановых деформаций русла шаг свободно меандрирующей излучины отличается значительно меньшей устойчивостью по длине реки, чем шаг ограниченно меандрирующей излучины, сползающей без существенных изменений своих форм и размеров. Однако благодаря тому, что деформации свободно меандрирующей излучины выражаются в развороте русла вокруг точек, близких к его перегибу, местоположение этих точек длительное время оставалось довольно устойчивым, а следовательно, и расстояние между ними по прямой — шаг излучины — сохраняется, хотя ее очертания меняются весьма значительно.

Относительный шаг излучины $\left(\frac{\lambda_и}{b}\right)$ — отношение ее шага к средней ширине русла на участке между точками его перегиба.

Степень развитости излучины $\left(\frac{S}{\lambda_и}\right)$ — отношение длины средней линии русла между точками перегиба (S) к шагу излучины ($\lambda_и$).

Угол входа излучины ($\alpha_{вх}$) и угол выхода ($\alpha_{вых}$) — углы, образованные касательной в точке перегиба и прямой, соединяющей смежные точки перегиба, располагающиеся соответственно в верховой и низовой частях излучины.

Угол разворота излучины (α) — сумма углов входа и выхода излучины $\alpha = \alpha_{вх} + \alpha_{вых}$.

Угол сопряжения излучин (β) — разность углов выхода предыдущей излучины и входа излучины, непосредственно следующей за ней вниз по течению, $\beta = \alpha_{выхI} - \alpha_{вхII}$.

Угловая скорость разворота излучины — изменение угла разворота во времени $\frac{\Delta\alpha}{\Delta t}$. Может быть определена раздельно для оценки скорости разворота верховой и низовой частей излучины, т. е. вычисляются соответственно величины $\frac{\Delta\alpha_{вх}}{\Delta t}$ и $\frac{\Delta\alpha_{вых}}{\Delta t}$.

Площадь размыва ($f_р$) и намыва ($f_н$) берегов — площадь, заключенная между двумя разновременными положениями бровок подмываемых и намываемых берегов одной и той же излучины, имеет обычно полулунную форму.

Длина фронта размыва ($l_р$) и намыва ($l_н$) — длина линии, проведенной по бровке берега между смежными точками пересечения линий бровок берегов, соответствующих их положению на двух разновременных съемках.

Средняя скорость планового смещения излучин ($c_и$), вычисляемая отдельно для участков размыва и намыва берегов, — скорость перемещения в плане фронта размыва

(намыва) за период между двумя съемками или средняя годовая, которая вычисляется как частное от деления площади размыва (намыва) на длину фронта размыва (намыва), отнесенное к периоду между съемками, $c_и = \frac{f_р^{(н)}}{l_р^{(н)}\tau}$, где τ — период.

Наибольшая скорость планового смещения излучины (c) — наибольшее расстояние между фронтами размыва (намыва), полученными при наложении разновременных съемок русла, измеряемое по линии, перпендикулярной к начальному положению фронта размыва (намыва), отнесенное к периоду между съемками.

Объем береговых переформирований соответственно размыва $\dot{w}_р$ и намыва $w_н$ получается как произведение площади размыва (намыва) на высоту берега между его бровкой и средней из наибольших глубин плёса на участке фронта размыва (намыва). Вычисляется за период и за год.

Н. Е. Кондратьев (1968) получил аналитическое выражение осевой линии излучины. Как считает Н. Е. Кондратьев, осевая линия при свободном меандрировании должна обладать следующими свойствами. Она ограничивается двумя точками перегиба и в границах между ними имеет однозначную кривизну, возрастающую к средней части кривой. Кривизна достигает максимума не обязательно в ее середине. Угол разворота (α) может меняться от нуля до величины, большей, чем две прямых. Кривая может быть асимметричной относительно перпендикуляра к прямой линии шага, делящего его пополам. Расстояние до точки наибольшего удаления от линии шага (y_m) должно рассматриваться как независимый параметр.

Кривая, удовлетворяющая этим условиям, определяется тремя безразмерными параметрами: α, $\frac{y_m}{\lambda}$, ε. Уравнение ее в натуральной системе координат таково:

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{a}{s}\sin \pi S - \frac{b}{s}\sin 3\pi S.$$

Здесь S — полная длина кривой между точками перегиба; s — независимая переменная, выражающая в относительных величинах длину кривой от ее начала.

В прямоугольной системе координат с учетом возможной асимметрии эта кривая имеет следующее параметрическое выражение:

$$y = K\sum_n \cos \gamma_п; \qquad x = K\sum_n \sin \gamma_п + K\varepsilon \sum_n \cos \gamma_п,$$

где K — масштабный параметр, а

$$\gamma_{\text{п}} = \left[aA(n\,\Delta S) + \frac{a}{2} B(n\,\Delta s) \right].$$

Значения функций $A\ (n\ \Delta S)$ и $B\ (n\ \Delta s)$ определяются по таблице, а коэффициент a находится подбором.

б. Главнейшие морфометрические и гидроморфологические зависимости

Рассмотрим некоторые морфометрические и гидроморфологические закономерности, обнаруженные в результате получения значений перечисленных выше измерителей свободного меандрирования на массовом материале. С этой целью был обработан картографический материал по 15 участкам разных рек в диапазоне средних годовых расходов от 210 до 3000 м³/сек.

Подробные характеристики этих участков см. в работе Попова (1964).

Статистическая обработка этого материала позволяет сделать следующие основные выводы о морфометрических и гидроморфологических зависимостях, свойственных свободному меандрированию.

1. Величины шагов излучин на бесприточном участке отличаются бóльшей изменчивостью, чем при ограниченном меандрировании. При свободном меандрировании на шаг излучин оказывают существенное влияние явления прорывов излучин, объединения двух смежных излучин в одну, расчленение излучин на две и более и т. п. Вместе с тем для отдельно взятой излучины шаг ее оказывается величиной, достаточно устойчивой по причинам, указанным ранее, и является измерителем, вполне пригодным для установления его связей с размером реки.

Коэффициенты вариации шагов излучин по 15 рассмотренным бесприточным участкам колеблются от 0,26 до 0,51, в среднем составляя 0,36. На участках ограниченного меандрирования коэффициенты вариации были близки к этому среднему, но ни в одном случае не превышали 0,33. Небольшие значения коэффициентов вариации шагов излучин соответствуют участкам, находящимся в начальной стадии свободного меандрирования, чем и объясняется близость в этом случае коэффициентов вариации шагов свободно и ограниченно меандрирующих излучин.

2. Случаи резкого отклонения величин шагов излучин от средних значений встречаются сравнительно редко. В среднем такие случаи составляют менее $^1/_4$ числа всех случаев. Как видно на рис. 43 очень большие значения шагов излучин (объединение двух смежных петель русла в одну и др.) имеют место в 10—18% всех случаев (резкий перелом кривых обеспеченности шагов

излучин в верхней их части). Очень малые шаги (перелом кривой в нижней части) встречаются значительно реже, в 1—4% от общего числа случаев.

3. Значения шагов излучин при свободном меандрировании оказались в общем меньшими, чем при ограниченном меандрировании, составив в 50% случаев величины порядка 6—11 ширин русла, т. е. очень близкие к относительным шагам гряд и побочней. При ограниченном меандрировании они составляли 13—14 ширин русла.

4. В пределах данного бесприточного участка степень выраженности излучин обычно оказывается близкой, т. е. они находятся примерно в одинаковой стадии развития. Об этом свидетельствует ход кривых обеспеченности измерителя, выражающего степень развитости излучин. Он близок к ходу кривых обеспеченности шагов излучин. Резко преувеличенные по сравнению со средними значениями величины $\frac{S}{\lambda_и}$ встречаются большей частью в 15—20% всех случаев, а часто только в 10—12% случаев, преуменьшенные — в 2—4%.

Это дает основание предположить, что переход излучин из одной стадии развития к другой происходит по длине данного бесприточного участка более или менее одновременно. По-видимому, спрямление одной петли русла нередко способствует ускорению этого процесса на смежных петлях.

В 50% случаев по всем рассмотренным участкам длина излучин составила 1,6 их шага, колеблясь от 1,25 до 1,7 шага. Наибольшие измеренные величины $\frac{S}{\lambda_и}$ оказались равными 4, т. е. длина излучины составила в этом случае 4 ее шага.

5. При наличии описанных выше общих тенденций в развитии форм излучин отмечается групповой характер их распределения по длине реки, что можно проследить по графику, построенному для р. Иртыша (рис. 44). Подобное же распределение характерно и для других участков свободно меандрирующих рек.

Анализируя рис. 44, можно видеть, что отдельные группы, обычно насчитывающие 3—5 излучин, разделяются относительно прямыми участками. Длина прямых участков равна обычно длине 2—3 смежных излучин.

6. Существенной разницы в степени выраженности излучин, предшествующих наиболее четко выраженным петлям и находящихся на выходе из них, не обнаруживается. Однако при большой разнице в развитости излучин те из них, которые находятся на подходе к хорошо оформившейся петле русла меньше отличаются от нее, чем излучины, расположенные ниже этой петли. В случае, когда смежные излучины находятся примерно в одной

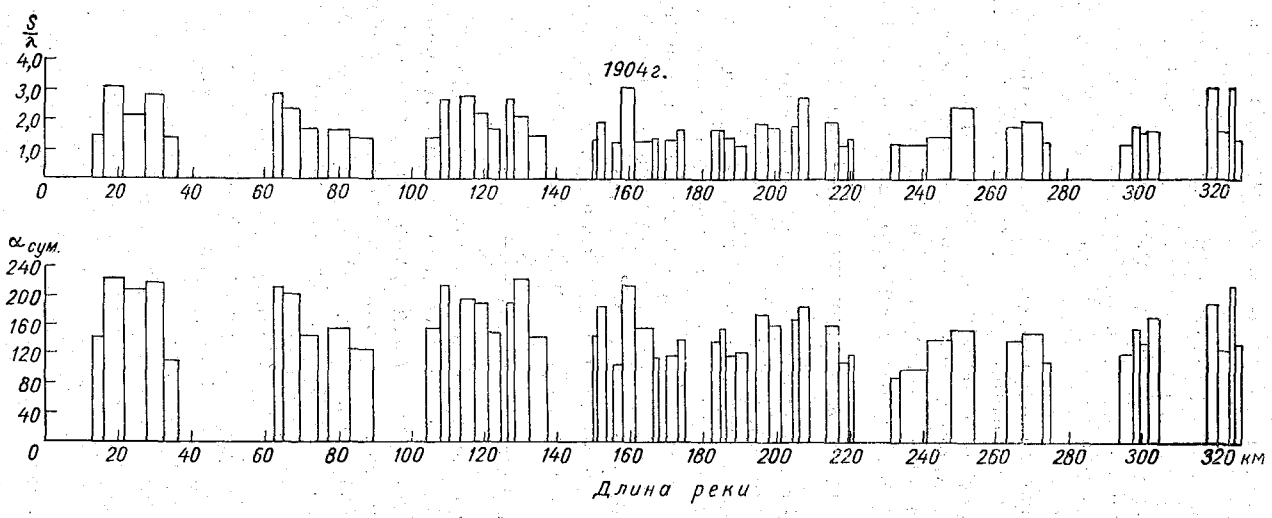


Рис. 44. Графики распределения степени выраженности излучин по длине р. Иртыша.

стадии развития, не верховая, а низовая излучина будет меньше отличаться от относительно лучше выраженной.

Это устанавливается на основе сопоставления хода кривых обеспеченности параметра $K = \frac{S_1}{\lambda_1} : \frac{S_2}{\lambda_2}$, где $\frac{S_1}{\lambda_1}$ и $\frac{S_2}{\lambda_2}$ характеризуют степень выраженности излучин, находящихся соответственно выше и ниже наиболее выраженной (рис. 45). Поскольку

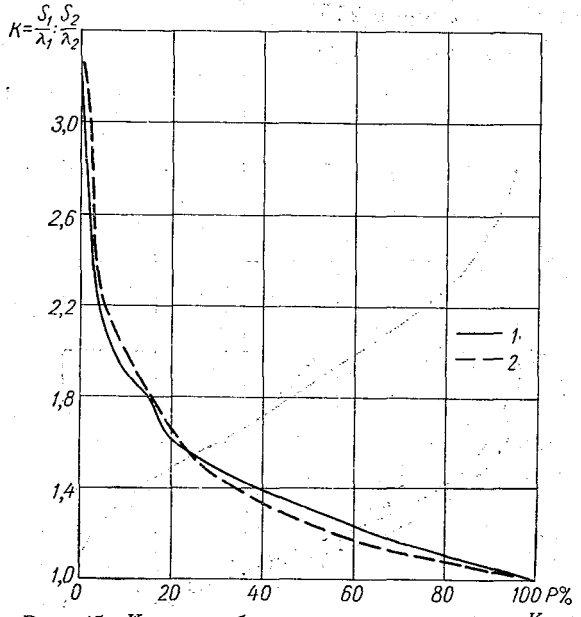


Рис. 45. Кривые обеспеченности параметра $K = \frac{S_1}{\lambda_1} : \frac{S_2}{\lambda_2}$.

1 — соотношения хорошо выраженной излучины с менее выраженной, находящейся выше ее, *2* — то же с ниже расположенной излучиной.

$S/\lambda_и$ хорошо выраженной излучины всегда больше, чем K, последний вычислялся всегда так, чтобы в знаменателе отношения $\frac{S_1}{\lambda_1} : \frac{S_2}{\lambda_2}$ всегда были меньше значения S/λ. Заметим, что большие значения K всегда свидетельствуют о наличии в паре смежных излучин одной сильно развитой, а небольшие значения K соответствуют излучинам, близким по своей развитости. Затем случаи, когда $\frac{S_1}{\lambda_1} < \frac{S_2}{\lambda_2}$, т. е. хорошо развитая излучина следует за выраженной слабее, и случаи, когда $\frac{S_1}{\lambda_1} > \frac{S_2}{\lambda_2}$ или хорошо выраженная излучина предшествует менее выраженной,

были разделены, а для каждого из них построены кривые обеспеченности соответствующих величин K.

7. Углы разворота излучин (α) отличаются значительно большим разнообразием, чем другие рассмотренные выше измерители свободного меандрирования. Об этом свидетельствуют обычно выпуклые кривые обеспеченности этого измерителя. В 50% всех рассмотренных случаев углы разворота составили 130° при крайнем значении 245°.

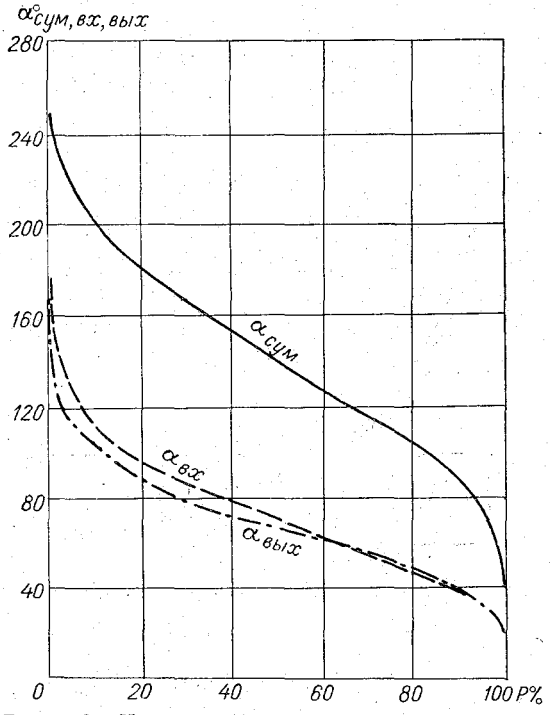


Рис. 46. Кривые обеспеченности углов входа и выхода и разворота излучин.

8. В ранних стадиях развития свободно меандрирующая излучина, так же как и при ограниченном меандрировании, симметрична. Это наблюдается при $\alpha_{вх}$ и $\alpha_{вых}$, меньших 60°, т. е. при углах разворота, меньших 120° (рис. 46). При углах разворота, больших 120°, излучина приобретает асимметричные очертания, т. е. углы входа и выхода начинают существенно различаться. Эта разница особенно значительна при углах разворота, больших 200° (разница более 15°), а при углах разворота, больших 240°, наибольшие разности углов входа и выхода составили 30°. Наибольшие значения обычно имеют углы входа (рис. 46), которые оказались равными 175°, а углы выхода — 170°.

Таким образом, на исследованных реках асимметрия излучин появляется после достижения ими определенных стадий развития и увеличивается к конечным стадиям развития излучин — образованию петли в предпрорывном состоянии.

9. В ходе развития излучин соотношение между углами разворота и измерителем S/λ не остается постоянным (рис. 47). На рис. 47 видно, что по мере возрастания степени выраженности излучин, связь между углами разворота и показателями этой выраженности ухудшается, особенно после достижения углами

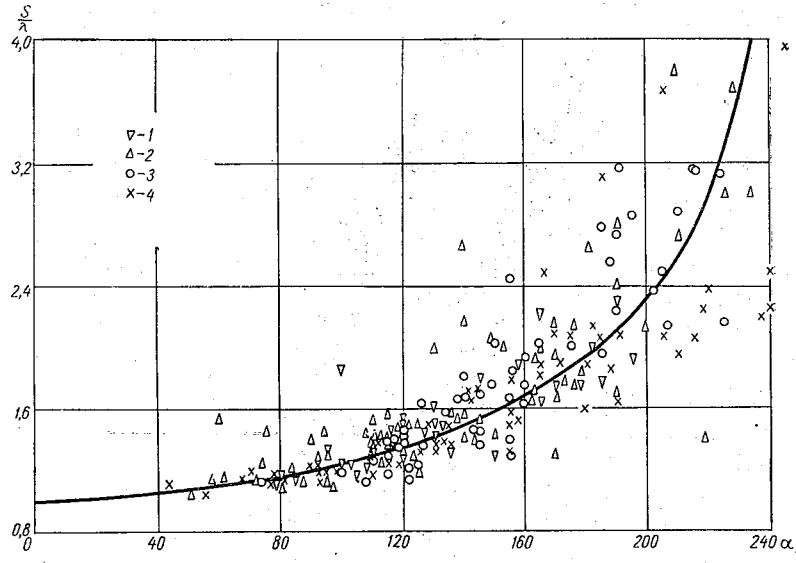


Рис. 47. Связь углов разворота свободно меандрирующих излучин со степенью их выраженности.

1 — р. Обь, *2* — р. Ока, *3* — р. Иртыш, участок г. Павлодар — с. Урлютюб, *4* — Иртыш, участок оз. Зайсан — г. Усть-Каменогорск.

разворота 180° (перелом кривой). При углах разворота, больших 180°, удлинение русла при формировании излучины происходит интенсивнее, чем увеличение углов, т. е. излучины начинают сильно вытягиваться, принимая нередко пальцеобразные очертания.

10. Между шагами излучин и показателями крупности реки (например, средними годовыми расходами воды Q, шириной реки b и площадью водосбора F) существует достаточно тесная связь, которую можно выразить уравнениями:

$$\lambda_и = aQ^m,$$

$$\lambda_и = a_1 b^{m_1},$$

$$\lambda_и = a_2 F^{m_2}.$$

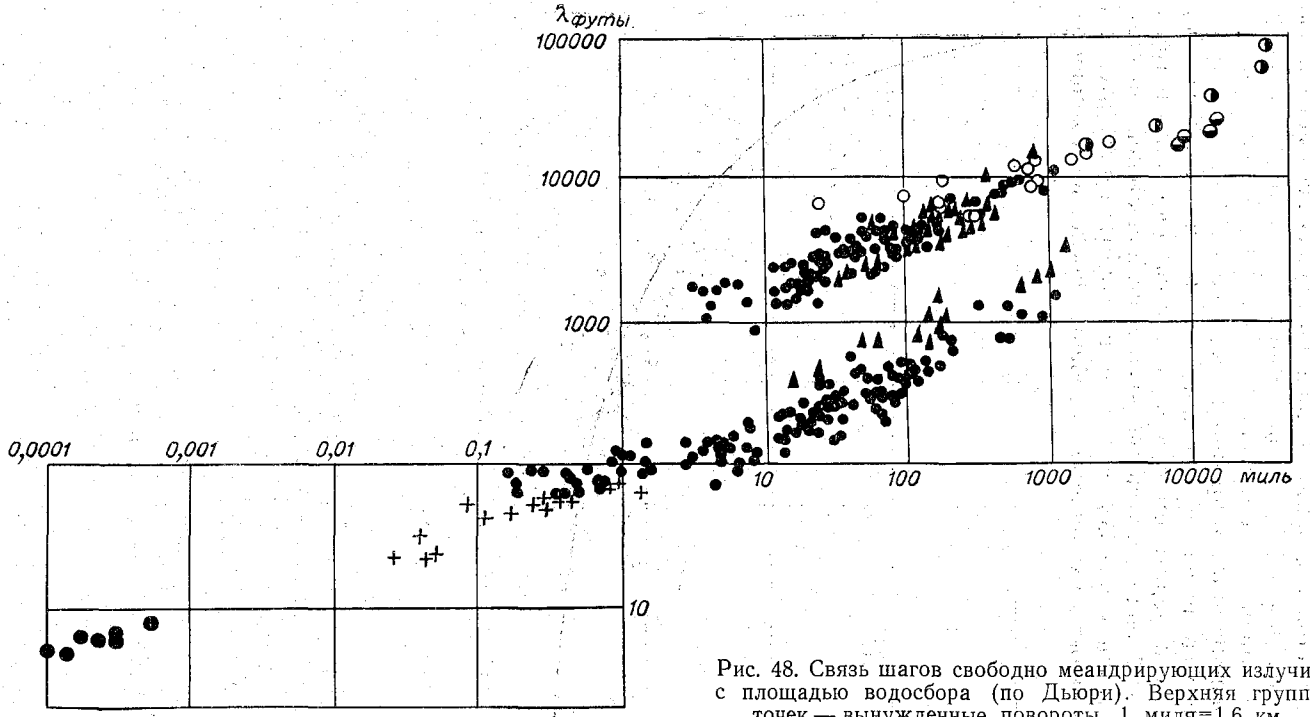


Рис. 48. Связь шагов свободно меандрирующих излучин с площадью водосбора (по Дьюри). Верхняя группа точек — вынужденные повороты. 1 миля=1,6 км.

На рис. 48 дана связь шагов свободно меандрирующих излучин с площадями водосбора по данным Дьюри (Dury, 1954).

При построении подобных связей важно исключить из них все вынужденные изгибы русла, т. е. случаи обтекания потоком склонов долины, и принимать в расчет только действительно свободно развивающиеся излучины. Использование данных о вынужденных изгибах приводит обычно к смещению кривых влево, что видно на кривой Дьюри (рис. 48) и Леопольда и

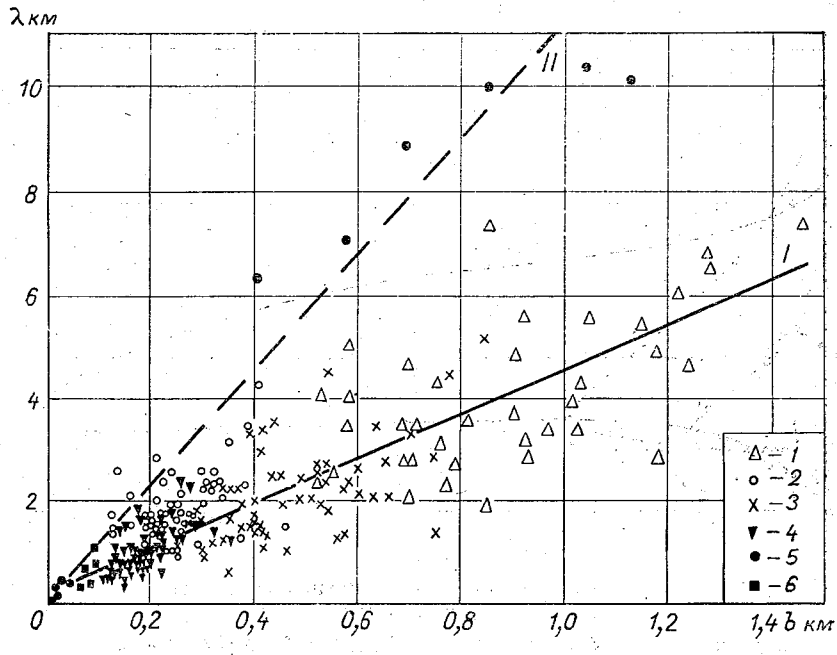


Рис. 49. Связь свободно меандрирующих излучин с шириной русла.

I — по отечественным данным, *II* — по данным Леопольда и Вольмана; *1* — р. Обь, *2* — р. Ока, *3* — р. Иртыш на участке г. Павлодар — с. Урлютюб, *4* — р. Иртыш на участке оз. Зайсан — г. Усть-Каменогорск, *5* — данные Леопольда и Вольмана, *6* — шаги ленточных гряд и побочней.

Вольмана (рис. 49). В последнем случае строгой типизации излучин не проводилось и кривая связи $\lambda_и = f(b)$ оказалась лежащей левее кривой, построенной для свободно меандрирующих излучин. Следует отметить, что связи шагов гряд, побочней, ограниченно и свободно меандрирующих излучин, как это видно на рис. 49, ложатся на одну кривую, что еще раз подтверждает общность характеризуемых ими морфологических образований.

11. Каких-либо хорошо выявляющихся связей между степенью выраженности излучин и шириной русла обнаружить не удалось. Можно лишь отметить, что с увеличением степени

развитости излучин значения ширин русла в пределах данной излучины становятся более устойчивыми. Наиболее изменчива ширина русла в стадии спрямления, когда на участках реки, формирующихся после осуществления прорыва перешейка петли, ширина русла часто оказывается преувеличенной вследствие интенсивного смещения вогнутого берега в связи с резким изменением направления течения и возможного отставания намыва выпуклого берега, наблюдающегося обычно при относительно невысоком расходе донных наносов.

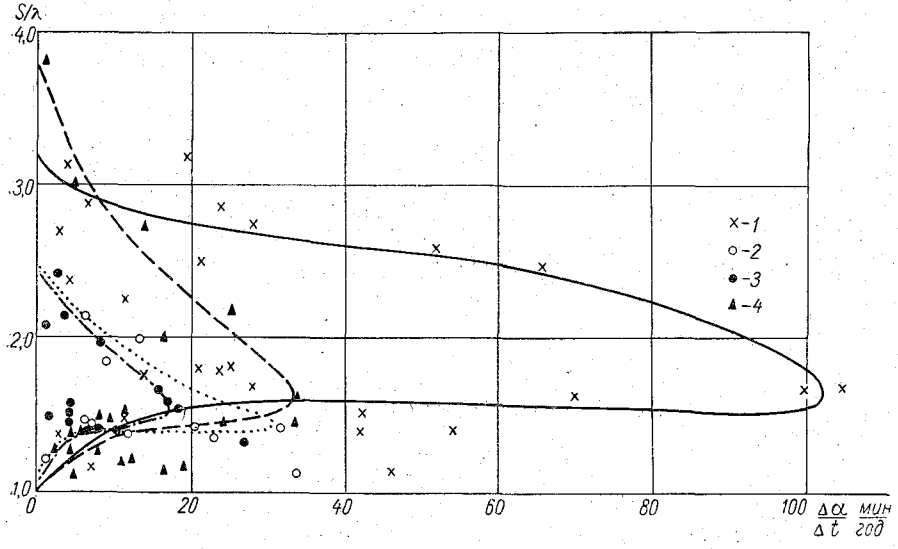


Рис. 50. Связь скорости разворота свободно меандрирующих излучин со степенью их развитости.

1 — р. Иртыш на участке г. Павлодар — с. Урлютюб, *2* — р. Ока между г. Рязанью и впаданием р. Прони, *3* — р. Ока между р. Проней и с. Юшта, *4* — р. Ока между селами Юшта и Рубецкое.

12. В начальных стадиях развития излучин до значений $\frac{S}{\lambda_и} = 1{,}5 \div 1{,}6$ имеется тенденция к нарастанию скорости плановых деформаций излучин, характеризуемой величиной $\Delta\alpha/\Delta t$, т. е. угловой скоростью разворота излучин.

При дальнейшем увеличении степени выраженности излучин скорость их плановых деформаций постепенно уменьшается. Эти закономерности достаточно отчетливо прослеживаются по графику на рис. 50. На этом графике видно, что по всем четырем исследованным бесприточным участкам рек Оки, Иртыша (*1—4*) точки скоростей плановых деформаций в начальных стадиях развития излучин ложатся на одну кривую. Большие различия

в скоростях плановых деформаций излучин обнаруживаются на более поздних стадиях их развития при значениях $\frac{S}{\lambda_и} > 1{,}5 \div 1{,}6$.

Указанный факт возрастания скорости плановых деформаций в начальных стадиях развития свободно меандрирующих излучин и ее убывание к более поздним стадиям развития подтверждается и анализом кривых обеспеченности углов разворота (α) и степени выраженности излучин $\left(\frac{S}{\lambda_и}\right)$.

Излучины с относительно малыми значениями этих измерителей встречаются достаточно редко (1—4% от общего числа случаев). Это может быть связано прежде всего с тем, что эту стадию развития излучины проходят быстро. То обстоятельство, что петли русла встречаются чаще (15—20%), показывает, что

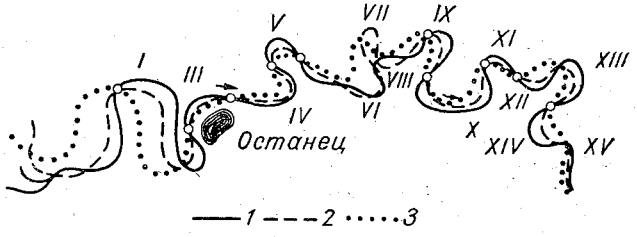


Рис. 51. Три последовательные положения русла р. Оки, восстановленные по аэрофотоснимкам.

1 — современное положение, *2* — промежуточное, *3* — исходное. Римскими цифрами показаны порядковые номера излучин (петель), кружками — центры вращения S-образных извилин.

в этой стадии развития излучины находятся более длительное время. Так как процесс их развития завершается прорывом перешейка петли, то наиболее частыми оказываются излучины, находящиеся в средней стадии развития (75—80% всех случаев).

Уменьшение скорости деформаций к конечной стадии развития излучин обнаруживается и при сопоставлении длин реки по съемкам разных лет.

На рис. 51 показаны три последовательных положения русла р. Оки, восстановленные на основе дешифрирования рельефа поймы по аэрофотоснимкам, т. е. по положению береговых валов — грив на пойме. От исходного положения к современному русло реки удлинилось в 1,4 раза от 38 до 52 км или на 14 км. Однако это удлинение шло неравномерно. В начальной стадии развития извилистости, т. е. от исходного положения русла к среднему, удлинение составило 9 км, а в более позднюю стадию при переходе от среднего положения, к более извилистому современному удлинение было значительно меньшим — только 5 км, т. е. темп деформаций снизился. При определении длин

участки, спрямленные в результате прорыва петель, не учитывались.

О скорости развития излучин дают наглядное представление характеристики планового смещения их берегов. В табл. 1, 2, 4, помещены данные о скорости плановых деформаций бровок подмываемых берегов, полученные путем сопоставления съемок разных лет. Как следует из данных табл. 4, наибольшие смещения вогнутых берегов русла вследствие их подмыва за год в пределах излучин на участках рек со средними годовыми расходами

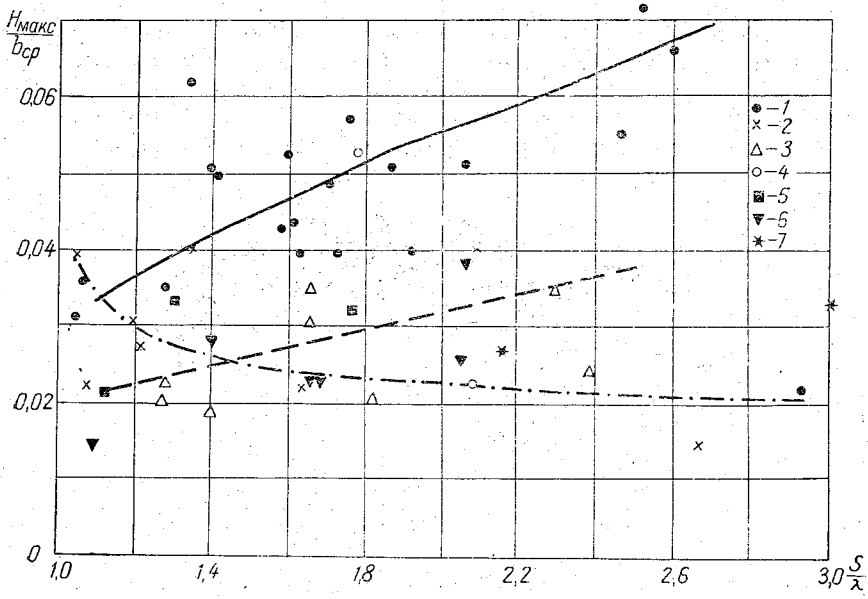


Рис. 52. Зависимость $\frac{H}{b}=f\left(\frac{S}{\lambda}\right)$ для излучин разных типов.

Свободное меандрирование; *1* — одноплёсовые, *2* — двухплёсовые, *3* — многоплёсовые; вынужденные излучины: *4* — одноплёсовые, *5* — двуплёсовые, *6* — многоплёсовые, *7* — незавершенное меандрирование.

воды от 480 до 4720 м³/сек. при свободном и незавершенном меандрировании колеблются в пределах от 6 до 50 м/год при среднем значении 17 м/год. Явной зависимости между скоростью смещения бровки берега и величиной потока не прослеживается, поскольку существенным фактором являются особенности грунтов берегов и уклоны свободной водной поверхности.

Наибольшее на участке намыва плавное смещение бровки берегов в результате их намыва (в результате формирования нового берегового вала) в среднем составило примерно ту же величину, что и плановое их смещение в результате подмыва вогнутых берегов, а именно 18 м/год при крайних значениях от 5 до 50 м/год.

Средние значения смещения бровок берегов на участке фронта размыва и намыва меньше указанных величин наибольших на этих участках смещений в 3—5 и даже 10 раз, составляя в среднем по всем участкам соответственно 5,3 и 4,8 м/год при крайних значениях для размыва 1,2 и 16 м/год и для намыва 1,6 и 21 м/год.

Из приведенных цифр видно, насколько важно для размещения сооружений на берегах рек выделить участки размыва и намыва берегов и определить створ наибольших деформаций.

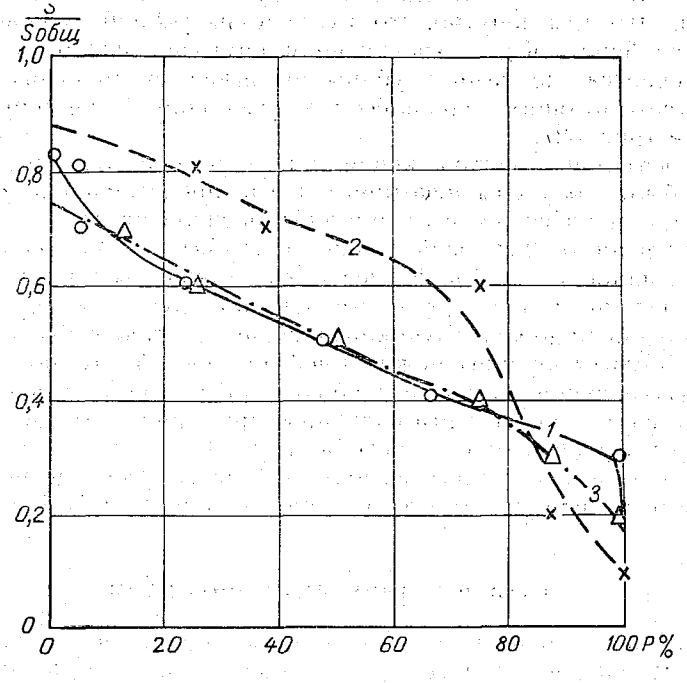


Рис. 53. Кривые обеспеченности $\frac{S}{S_{общ}}$ для одноплёсовых (*1*), двухплёсовых (*2*) и многоплёсовых (*3*) излучин.

13. Кроме исследований развития плановых очертаний излучин при свободном меандрировании, был выяснен также вопрос об изменениях глубин плёса в ходе свободного меандрирования. Подробно он изложен в статье Э. А. Кондитеровой и автора (1966), а здесь приводятся некоторые общие выводы. Было обнаружено, что в ряде случаев излучины сохраняют один плёс до поздних стадий своего развития ($S/\lambda > 1{,}5 \div 1{,}6$), что находится в полном соответствии с выводами о вытягивании излучин в ходе свободного меандрирования (см. п. 11). Для этих

случаев оказывается, что относительная глубина плёса $\frac{H_{max}}{b}$ увеличивается от ранних стадий излучин к более поздним (до S/λ около 3,0). Наряду с этим существуют излучины с нормальным ходом развития, т. е. раздвоением плёсов в ходе появления асимметрии. Для многоплёсовых излучин обнаруживается, что существенных изменений в глубинах плёсов в ходе развития излучин не обнаруживается, что эти глубины оказываются относительно меньшими, чем у одноплёсовых излучин, и что с увеличением числа плёсов глубины их могут даже несколько уменьшаться. Отметим попутно, что в случае вынужденных поворотов русла глубина плёса с увеличением крутизны поворота также увеличивается, но сами глубины оказываются меньшими, чем у соответствующих одноплёсовых свободно меандрирующих излучин (рис. 52).

Относительно расположения плёса в пределах излучины также были получены некоторые новые представления. В 50% случаев одноплёсовых излучин плёс располагается в их середине (считая от верховой точки перегиба). У многоплёсовых излучин наиболее глубокий плёс может также быть на середине длины излучины между точками перегиба русла. У двухплёсовых излучин наиболее глубокий плёс может также быть на середине длины излучины между точками перегиба русла. У двухплёсовых излучин наиболее глубокий плёс в 50% случаев располагается в низовой части излучины, примерно на 0,6 ее длины, считая от верховой точки перегиба (рис. 53).

Так как все указанные выводы получены пока еще на ограниченном материале, их следует рассматривать как предварительные.

6. НЕЗАВЕРШЕННОЕ МЕАНДРИРОВАНИЕ

Степень незавершенности меандрирования можно охарактеризовать отношением длины спрямляющего протока ($S_{пр}$) по прямой, проведенной через точки его начала и конца, к длине главного русла по его средней линии ($S_р$), т. е. показателем $K = \frac{S_{пр}}{S_р}$.

Степень затопляемости поймы можно выразить отношением глубины затопления поймы ($h_п$) к глубине русла при затопленной пойме ($h_р$), т. е. $\frac{h_п}{h_р}$.

Легко видеть, что при отношении $\frac{S_{пр}}{S_р} = 1$ длины спрямляющего протока и главного русла близки и, следовательно, образование спрямляющего протока происходит в начальной стадии

развития излучин. При значениях $\frac{S_{пр}}{S_р}$, близких к 0, очевидно, длина главного русла много больше длины спрямляющего протока и его образование произошло на очень поздних стадиях развития излучин.

Уменьшение отношения $\frac{h_п}{h_р}$ от минимального значения к 0, очевидно, показывает соответственно и уменьшение затопляемости поймы. Связь между этими измерителями (рис. 54) не-

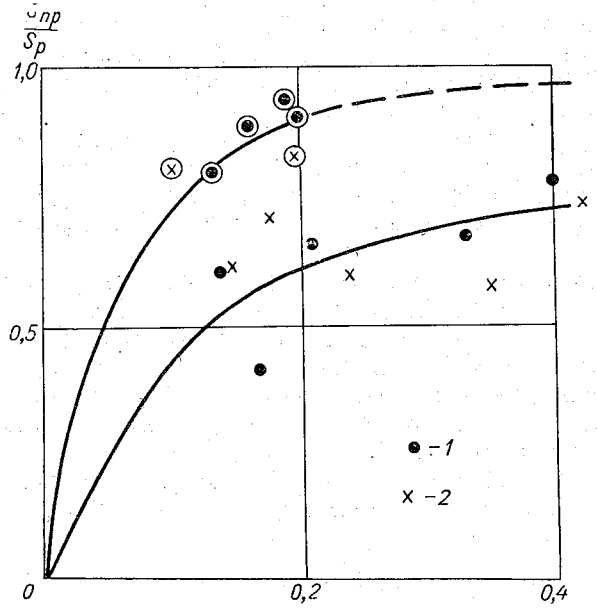


Рис. 54. Связь затопляемости пойм со степенью незавершенности меандрирования.

1 — р. Иртыш, *2* — р. Обь.

завершенного меандрирования показывает, что с увеличением степени затопляемости поймы образование спрямляющего протока возможно на все более ранних стадиях развития излучины. При этом, если по реке проходит достаточно высокий расход донных наносов, и поток имеет возможность строить побочни и образовывать обширные пляжи, то их отторжение может происходить при значительно меньшей затопляемости пойм, чем отторжение прирусловых их участков за первыми от реки береговыми валами. Об этом свидетельствует наличие самостоятельной кривой $\frac{S_{пр}}{S_р} = f\left(\frac{h_п}{h_р}\right)$, показанной на рис. 54. Каждая точка представляет собой среднее значение показателя незавер-

шенности на данном бесприточном участке, т. е. определена на основе множества измерений.

Ниже приведены основные выводы об особенностях развития излучин при незавершенном меандрировании, полученные на основе статистического анализа измерителей этого процесса, которые принимаются такими же как и при свободном меандрировании.

1. Шаги излучины по длине бесприточных участков при незавершенном меандрировании меняются меньше, чем при свободном меандрировании. Так, если при свободном меандрировании коэффициент вариации шагов излучин колебался от 0,26 до 0,51, то на участках незавершенного меандрирования шаг $\lambda_и$ составил 0,26—0,32. Если при свободном меандрировании шаг излучин менялся по длине бесприточных участков в 3—4 раза, то при незавершенном меандрировании только в 2 раза.

2. Шаги излучин с незавершенным меандрированием оказываются несколько большими, чем при свободном меандрировании, отклоняясь на кривых связи шагов с размерами потока влево.

3. На большинстве рассмотренных участков углы входа при незавершенном меандрировании оказались бóльшими, чем углы выхода, в то время как при свободном меандрировании на бóльшей части излучин бóльшими были углы выхода.

4. По всем рассмотренным участкам степень выраженности излучин ($S/\lambda_и$) не превышала 1,6 в среднем по участку и 3,95 для отдельных излучин.

5. Скорость разворота излучин (скорость плановых деформаций) резко уменьшается после того, как спрямление превращается в главное русло.

7. ОСЕРЕДКОВЫЙ ТИП

При осередковом типе процесса, характерном развитием в протоках разных типов процесса, следует использовать измерители, предложенные для этих типов. Для характеристики распространенности осередков и островов можно использовать соотношения их площадей к площади поверхности русла между бровками меженных берегов и число островов на единицу длины.

Глава VIII

СООТНОШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ БАЛАНСА НАНОСОВ ПРИ РАЗНЫХ ТИПАХ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

Для каждого типа руслового процесса характерны свои соотношения элементов баланса наносов. Принципы составления таких балансов подробно рассмотрены в работе автора (Попов. 1962).

Баланс наносов в среднем многолетнем разрезе на бесприточном участке с ленточногрядовым типом руслового процесса в условиях динамического равновесия складывается следующим образом. Взвешенные наносы проходят подобный участок транзитом и обмен их с донными отложениями носит только сезонный характер — на подъеме половодья часть донных наносов может переходить во взвесь, на спаде имеет место переход взвешенных наносов в донные. Таким образом, происходят сезонные изменения в составе донных наносов, формирующих гряды. Поймы на участках с ленточногрядовым типом руслового процесса, как указывалось, обычно отсутствуют, так как нет плановых перемещений русла, они могут иметь место лишь как унаследованное морфологическое образование. Поэтому местных источников поступления наносов в поток на подобных участках не имеется. При этих условиях баланс взвешенных наносов можно представить в виде

$$R'_{в} = R''_{в} + \Delta w_{р}, \tag{8}$$

где $R'_{в}$ — принос взвешенных наносов через верховой створ участка; $R''_{в}$ — вынос наносов за пределы участка; $\Delta w_{р}$ — разность между объемами взвешивания и осаждения наносов в русле реки в течение года, которая берется алгебраически.

Источниками поступления донных наносов на участок также в условиях динамического равновесия может быть только надвижение на этот участок с предыдущего сползающих гряд.

Уравнение баланса донных наносов на бесприточном участке будет

$$R'_{д} = R''_{д} + \Delta w_{р}, \tag{9}$$

где $R'_{д}$ — количество донных наносов, поступающих через верховой створ участка; $R''_{д}$ — количество донных наносов, выносимых за пределы участка; $\Delta w_{р}$ — разность между количеством осаждающихся и взмываемых в течение года наносов, которая также берется алгебраически.

Суммарное уравнение баланса наносов имеет вид

$$R'_{в} + R'_{д} = R''_{в} + R''_{д}. \tag{10}$$

В уравнении для взвешенных и донных наносов в условиях динамического равновесия (в среднем многолетнем разрезе) величина $\Delta w_{р}$ должна быть равна нулю. В суммарном уравнении она равна нулю при всех условиях.

Составляющие баланса, характеризующие взвешенные наносы, могут быть получены на основе гидрометрических данных, а донные наносы рассчитаны по формулам и приемам, описанным для побочневого процесса.

Наличие определенных тенденций в развитии русла (врезание, аккумуляция) в основном сказывается на соотношениях между взвешенными и донными наносами, устанавливающимися в ходе обмена ими между потоком и движущимися по нему грядами. Появление тенденций к врезанию (увеличение средних скоростей потока) должно приводить к относительному увеличению количества переносимых потоком взвешенных наносов и к обеднению состава донных отложений этой категорией наносов. При явлениях аккумуляции правомерно ожидать обогащения состава наносов гряд мелкими частицами при относительном осветлении потока.

Таким образом, указанные тенденции могут быть определены по отношению, выраженному в приведенных уравнениях величиной $\Delta\omega_р$. Практически о наличии этих тенденций можно судить по составу наносов, формирующих гряды. Укрупнение состава наносов гряд свидетельствует о тенденции врезания, обогащение взвешенными наносами — о тенденции к аккумуляции. При резких изменениях условий протекания потока во времени или по длине реки морфологическим признаком перехода к врезанию может служить появление более подвижных и мелких форм, а к аккумуляции — появление побочневого типа процесса, т. е. систем крупных гряд.

В тех случаях, когда врезание существует уже длительное время и факторы руслового процесса не показывают односторонних изменений в своем ходе, признаком его является наличие хорошо выраженных гряд, подвалье которых проникает ниже общей нижней границы движения наносов (см. рис. 17).

Наконец, об общих тенденциях в развитии руслового процесса можно судить по характеру напластования аллювия (см. гл. IX).

Использование деформаций ленточных гряд или вторичных гряд для оценки расходов донных наносов возможно по приемам и формулам, описанным в гл. III.

В отношении общего баланса наносов на участках русла с побочневым типом процесса остаются справедливыми положения, высказанные по этому вопросу применительно к ленточным грядам.

Баланс наносов речного участка при ограниченном меандрировании можно представить в следующем виде. Если при ленточногрядовом и побочневом типах процесса все переформирования сосредоточивались в русле реки, то при ограниченном меандрировании они захватывают и пойму. Поэтому к тем составляющим баланса наносов, которые описывались для двух первых типов процесса следует добавить дополнительные члены, учитывающие переформирование пойм. К ним принадлежат на бесприточном участке поступление наносов за счет подмыва потоком и обрушения прирусловых участков толщи пойменных

отложений, слагающих берега русла ($w'_б$), поступление наносов от размыва поверхности поймы при ее затоплении вне зоны береговых переформирований ($w'_п$) расходования наносов на намыв берегов русла в ходе его плановых перемещений ($w''_б$), на отложения на поверхности поймы вне зоны береговых деформаций ($w''_п$).

Так как толща аллювия, слагающего поймы двучленна — с поверхности залегает его пойменная фация, а в основании — русловая, то элементы баланса наносов можно подразделить на две составляющие — поступление и расходование взвешенных наносов и поступление и расходование донных наносов.

Это дает возможность составить уравнение баланса наносов раздельно для взвешенных и донных.

Для взвешенных наносов

$$R'_в + w'_{б\,(в)} + w'_{п\,(в)} = R''_в + w''_{б\,(в)} + w''_{п\,(в)} + \Delta w''_р. \qquad (11)$$

При рассмотрении баланса за относительно небольшие периоды (до нескольких лет) отложениями взвешенных наносов на свеженамытых участках берега можно пренебречь, так как толща отложений будет в основном сложена только донными наносами, а взвешенные отложиться еще не успеют. Кроме того, в условиях динамического равновесия $\Delta w_р = 0$. Тогда уравнение баланса взвешенных наносов в условиях ограниченного меандрирования будет

$$R'_в + w'_{б\,(в)} + w'_{п\,(в)} = R''_в + w''_{п\,(в)}. \qquad (12)$$

Для донных наносов уравнение их баланса при ограниченном меандрировании можно представить в виде

$$R'_д + w'_{б\,(д)} + w'_{п\,(д)} = R''_д + w''_{б\,(д)} + w''_{п\,(д)} \pm \Delta w_р. \qquad (13)$$

Так как $\Delta w_р = 0$, а размыва и выноса донных наносов на пойме в условиях динамического равновесия ожидать нельзя, то уравнение упрощается

$$R'_д + w'_{б\,(д)} = R''_д + w''_{б\,(д)}. \qquad (14)$$

Суммарное уравнение при условии всех перечисленных выше упрощений будет

$$\left(R'_в + R'_д\right) + \left(w'_{б\,(в)} + w'_{б\,(д)}\right) + w'_{п\,(в)} = \\ = \left(R''_в + R''_д\right) + \left(w''_{б\,(д)} + w''_{п\,(д)}\right). \qquad (15)$$

Для расчета по этим уравнениям требуется: использование данных гидрометрических наблюдений для учета объема взвешенных наносов в потоке $R'_в$, выделение активной зоны

движения наносов для оценки величины $R'_д$, например, на основе графических методов, изложенных при описании побочневого типа процесса, расчленение объемов материала, поступающего и расходуемого потоком при подмыве и намыве берегов ($w'_{б\,(в)}$ и $w'_{б\,(д)}$; $w''_{б\,(в)}$ и $w''_{б\,(д)}$) на основе данных о гранулометрическом составе отложений в пойме и берегах. Для оценки размывов и намывов поверхности поймы $w'_п$ и $w''_п$ требуется постановка специальных наблюдений за формированием наилка и размывом поверхности поймы.

В условиях свободного меандрирования транспорт взвешенных и донных наносов приобретает особенно сложные формы, прежде всего потому, что наряду с собственно русловым процессом появляется интенсивно развивающийся пойменный процесс — переотложения наносов на пойме вне зоны береговых переформирований. Поэтому необходимо применение уравнения (13) и недопустимо игнорирование отдельных его членов, как это имело место при ограниченном меандрировании.

Рассмотрим особенности отдельных составляющих баланса наносов при свободном меандрировании.

В объемах размыва берегов ($w_б$) содержатся и приход наносов от размыва русловой фации аллювия ($w'_{б\,(д)}$), т. е. донных наносов, и поступление продуктов размыва пойменной фации — взвешенных наносов ($w'_{б\,(в)}$). При этом доля последних может составлять значительно больше половины суммарного объема размыва. При размыве поверхности поймы ($w'_п$) при свободном меандрировании в основном в поток будут поступать продукты отложившейся на поверхности поймы пойменной фации — взвешенных наносов ($w'_{п\,(в)}$), однако при наличии глубоких размывов на пойме возможно и поступление в поток продуктов размыва залегающей в ее основании русловой фации — донных наносов ($w'_{п\,(д)}$). Благодаря обычно большой ширине поймы на участках, где возможен длительный застой на ней воды, вынос наносов с поймы в русло может быть незначительным.

Следует также иметь в виду, что при свободном меандрировании поступление в реку наносов от размыва поверхности поймы часто будет иметь сосредоточенный характер — они будут приноситься потоками, возникающими при спаде уровня, по пониженным участкам, обычно находящимся в основании излучин — в притеррасной части поймы, а также через прорывы береговых валов.

Так как при свободном меандрировании наблюдается цикличность развития излучин и завершающим этапом развития являются прорывы перешейков петель, приводящие к спрямлению русла и, следовательно, к значительным местным увели-

чениям уклонов и скоростей течения, то правомерно ожидать частое чередование участков, на которых преобладает взвешивание донных наносов, и участков, на которых наблюдается преобладание осаждения взвешенных наносов, т. е. переход их в донные. Поэтому учет члена $\Delta w_р$, выражающего разность между объемами взмыва и осаждения наносов, приобретает особое значение.

Отложения наилка вне зоны плановых деформаций ($w''_п$), очевидно, будут идти за счет изъятия из потока взвешенных наносов. Однако в условиях хорошо затопляемых пойм и при наличии высоких береговых валов, нарастание которых ведет к активизации руслового потока благодаря все большему его сосредоточению в русле, возможны случаи выноса донных наносов на поверхность поймы. Эти выносы обычно наблюдаются на вогнутых берегах русла. По форме они представляют собой длинные песчаные косы, далеко, иногда на несколько сот метров, проникающие в глубь поймы и формирующие вторичные гривы на пойме, перекрывающие старые береговые валы, образующие основной рельеф поймы.

Все вышеизложенное показывает, что в условиях свободного меандрирования возможны самые различные комбинации как между составляющими суммарный баланс наносов, так и в соотношениях взвешенных и донных наносов. Так, например, можно ожидать, что при наличии динамического равновесия в балансе донных наносов, баланс взвешенных наносов может обнаруживать различные тенденции. При этом должны быть часты случаи, когда благодаря широкой пойме возможны крупные изъятия взвешенных наносов на формирование наилка без существенного морфологического эффекта.

Структура уравнения баланса наносов на участках с незавершенным меандрированием остается в основном такой же, как при свободном меандрировании, однако появляются некоторые дополнительные особенности процесса переотложения наносов. При незавершенном меандрировании особое значение приобретают составляющие, характеризующие переотложение наносов на пойме, в частности, существенно возрастает роль в балансе наносов составляющей, характеризующей размыв поверхности поймы ($w'_п$); более вероятным становится то, что от размыва поверхности поймы в поток могут поступать не только взвешенные, но и донные наносы (размыв русловой фации пойменного аллювия).

Кроме того, при составлении уравнения баланса наносов для участка с незавершенным меандрированием следует учитывать на ранних стадиях развития процесса принос наносов спрямляющими протоками, а на поздних стадиях возможность аккумуляции наносов в отчленившихся староречьях, обычно посте-

пенно заносящихся ими. Поэтому в приходной части уравнения баланса наносов, кроме члена уравнения, учитывающего размыв поверхности поймы течениями, возникающими при ее затоплении ($\omega_п'$), следует ввести дополнительный член, учитывающий наличие сосредоточенного круглогодичного выноса наносов в главное русло по спрямляющим протокам. В расходной части баланса наносов следует учесть дополнительным членом количество наносов, расходуемых на занесение староречий.

При оценке поступления наносов из спрямляющих протоков следует иметь в виду, что развивающееся спрямление в зависимости от стадии, в которой оно находится, может развиваться по-разному. В начальных стадиях развития спрямления и при его большой длине оно может развиваться по схеме свободного меандрирования. При дальнейшей разработке спрямления протока возможен переход к другому типу процесса, в частности к относительному выпрямлению русла и появлению в нем ленточногрядового или побочневого типа процесса или русловой многорукавности — сползания осередков.

В соответствии с этим объем поступления наносов из спрямляющего протока в главное русло может колебаться во времени и по длине протока вследствие различного характера переотложения в нем наносов.

При осередковом типе руслового процесса также оказывается необходимым использовать полное уравнение баланса для случаев русловой многорукавности островного типа и уравнение, предложенное для ленточногрядового типа процесса при наличии в русле только подвижных осередков.

Глава IX

РЕЧНЫЕ ПОЙМЫ

1. ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЙМ

Исследование современного речного аллювия вскрывает и многие закономерности формирования речного русла. При изучении современного аллювия пойм, т. е. отложений наносов, происшедших в условиях современного климата, а следовательно, современной водоносности рек, стока наносов и современного руслового процесса, обнаруживается двучленность состава толщи, слагающей эти поймы. Эта двучленность пойменного аллювия выражается в том, что нижние слои пойменных массивов обычно оказываются сложенными относительно крупнозернистым материалом, представленным косослоистыми песками с галькой, по составу и крупности такими же, как современные донные отложения в русле реки, а верхние слои представлены значительно более мелкозернистым материалом, со-

стоящим из залегающих горизонтально, тонкими слоями тонкозернистых глинистых или пылеватых песков, супесей, суглинков, по составу и крупности таких же, как взвешенные наносы, транспортируемые потоком.

Различия в составе крупности и характере залегания нижних и верхних слоев пойменной толщи непосредственно связаны с различиями условий осадконакопления.

Нижний горизонт пойменной толщи, образующий как бы фундамент пойм, является результатом накопления наносов, перемещающихся по дну русла. То обстоятельство, что эти отложения обнаруживаются под верхней тонкозернистой толщей по всей ширине поймы, показывает, что они могли накопиться только в процессе плановых деформаций русла.

Верхние горизонты поймы, сложенные мелкозернистым материалом, представляют собой отложения взвешенных наносов в период затопления поймы при малых скоростях течения. С этим связаны и мелкозернистость материала и наличие тонких слоев и их, в общем, горизонтальное залегание.

Совокупность горных пород (аллювиальных отложений), имеющих одинаковые условия образования, порядок напластования и состав, называют фацией. Указанные две основные толщи пойменных отложений имеют все признаки, позволяющие рассматривать их как самостоятельные фации. Поэтому нижние слои поймы, сложенные относительно крупным материалом, характерные косослойностью и образовавшиеся в результате накопления донных отложений, называют русловой фацией речного аллювия.

Русловую фацию аллювия подразделяют на отложения, образовавшиеся в результате смещения в плане стрежневой полосы потока (стрежневая фация), с наиболее крупными частицами, фацию береговых отмелей (побочней и пляжей) с меньшей крупностью частиц и фацию береговых валов наиболее мелкозернистую. Верхние слои поймы, сложенные тонкозернистым материалом, накопившимся в результате отложения взвешенных наносов в период затопления поймы, называют пойменной фацией аллювия.

Легко видеть, что изучение всей толщи речного аллювия, образовавшейся при различных климатических, а иногда и резко отличных орографических условиях, далеко не всегда обнаруживает закономерности осадконакопления и их связи с определяющими факторами.

Наиболее развитые и сложные поймы образуются при свободном меандрировании, когда наряду с деформациями отдельных излучин наблюдаются длительное время однонаправленные смещения всего пояса меандрирования. В этих условиях происходит непрерывное изменение в соотношении ширины левобережной и правобережной пойм. При ограниченном

меандрировании соотношение ширины левобережной и правобережной пойм остаются довольно устойчивыми вследствие того, что излучины закономерно сползают вниз по течению без существенного изменения своих форм и размеров.

Если на участках с ленточногрядовым, побочневым или осередковым типами руслового процесса, для которых несвойственны общие плановые деформации русла, нередко можно встретить широкие затапливаемые пространства, то анализ слагающих их толщ показывает, что они не являются современной поймой. Они представляют собой реликтовые, остаточные образования от тех периодов, когда река имела возможность осуществлять плановые деформации, или имеют озерное происхождение.

2. ФОРМИРОВАНИЕ РУСЛОВОЙ ФАЦИИ АЛЛЮВИЯ

Рост поймы в плане осуществляется в основном в результате образования береговых валов. Основой берегового вала, его фундаментом, является часть гребня крупной гряды в русле реки и формирующийся пляж на выпуклом берегу.

Освободившись от воды после спада половодья, гребень может зарастать растительностью. При его затоплении в последующее половодье растительность создает особо благоприятные условия для отложения в полосе, занятой ею, наносов. Это приводит к нарастанию гребня в высоту. Постепенно он превращается в обычно четко оформленный береговой вал. Гребень берегового вала может достигнуть высоты подъема уровня воды в половодье.

Сведения о том, насколько велика роль растительности в закреплении и усилении осаждения наносов, собраны в работе автора (1956).

Отложения наносов на поверхности берегового вала при его затоплении приводит к тому, что в разрезе обнаруживается хорошо выраженная слоистость. При высоких половодьях на поверхности берегового вала откладываются наибольшие по толщине слои наносов и наибольшей крупности. В годы, когда половодья оказываются настолько низкими, что береговой вал не затопляется, на его поверхности может образоваться дернина, которая в последующем окажется погребенной нод слоем наносов, откладывающихся при более высоких половодьях. Погребенная дернина достаточно часто и четко обнаруживается в разрезах береговых валов. Высота половодий сказывается и на окраске слоев отложений. В разрезе берегового вала обычно обнаруживается чередование темных и светлых слоев отложений. Темные слои — это гумифицированные отложения, образовавшиеся в условиях слабого затопления, светлые слои соответствуют периодам с большим затоплением поймы.

При наличии чередования слоев разной крупности, связанной с различной высотой половодий и паводков, все же имеется тенденция к уменьшению крупности отложений наносов, слагающих береговой вал от его подножия к вершине, поскольку в основе берегового вала залегает русловой аллювий, а по мере роста вала в высоту на его поверхности могут отлагаться лишь все более мелкие наносы. Когда эта тенденция не обнаруживается, можно заключить, что влияние высоты вала на крупность отложений слабее, чем высота половодий. Подобное явление наблюдается при низких поймах, т. е. в случаях обычно небольших расходов взвешенных наносов, большой неравномерности стока и при быстрых плановых деформациях русла.

Толщина слоев отложений, слагающих береговой вал, колеблется от миллиметров до 20—30 см и более.

Натурные наблюдения за формированием отложений на пойме немногочисленны, и данные о них встречаются в литературе достаточно редко. Сводка их имеется в работе автора (1956).

Г. А. Трегубов (1959) следующим образом оценивает скорость нарастания береговых валов р. Амура по наблюдениям за два сезона (1954 и 1955 гг.). Нарастание берегового вала, поросшего кустами густотой 0,6—07, за эти два сезона составило 74 см, или 37 см/год. На исследуемом участке наименьшая толщина наилка составила 7 см/год, наибольшая — 65 см/год. На участках с редкими зарослями толщина годичных отложений не превышала 20 см.

При одновершинном половодье толщина наилка, отложенного им, должна быть примерно равна толщине слоев в разрезе берегового вала. В случае же наличия нескольких пиков подъема уровня воды, приводящих к размывам, число слоев в разрезе берегового вала будет соответствовать числу этих пиков.

О том, какие выводы можно сделать при анализе толщи аллювия в разрезе береговых валов, дают представление следующие примеры.

В разрезе берегового вала р. Поломети у с. Яжелбицы (рис. 55) обнаруживается, что слои, залегающие ниже 74 см от поверхности вала, отличаются более темной окраской, тонкой слоистостью и в общем меньшей крупностью, что, кстати сказать, идет в разрез с положением об уменьшении крупности отложений от подножия берегового вала к его вершине.

Существование различий в этих двух основных слоях разреза берегозого вала дает основание предположить, что на реке имели место изменения либо в ее водоносности, либо в условиях развития руслового процесса в связи с местными воздействиями.

Оказалось, что с 80-х годов XIX в. и до 1917 г. на исследуемом участке и на притоках реки впадающих в непосредст-

венной близости от него, производилась выборка валунов, находившихся в большом количестве в русле реки, для строительства шоссе Москва—Петербург. Они представляли собой отличную отмостку; деформации русла на этом участке были ничтожными. Снятие этой отмостки привело к усилению руслового процесса, о чем можно судить не только по крупности отложений в валах, но и по ряду других явлений, например по интенсивному наползанию на поверхность поймы песчаных масс, распро-

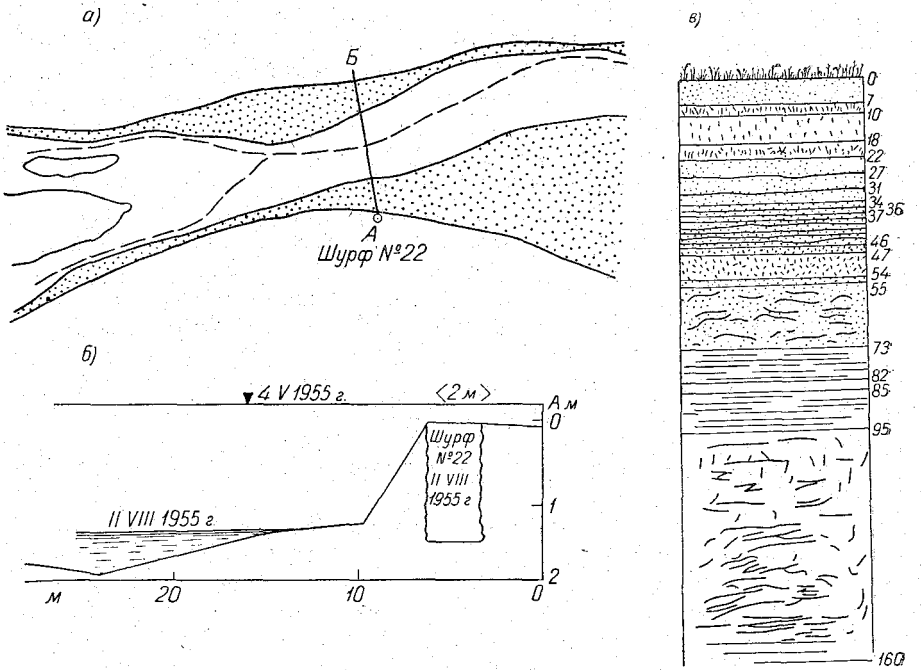


Рис. 55. Разрез берегового вала р. Поломети у д. Яжелбицы.
а — план участка, *б* — поперечный профиль русла, *в* — разрез берегового вала.

страняющихся далеко в глубь нее и портящих сенокосные угодья и огороды, а также по ранее не наблюдавшимся деформациям у мостов.

Таким образом, увеличение крупности отложений от подножия к поверхности вала в данном случае следует связать прежде всего с интенсификацией руслового процесса под влиянием искусственных воздействий.

Обращает на себя внимание и другое различие слоев. В верхней толще для отметок от 0 до 74 см часто встречается погребенная дернина, в то время как в нижней части пойменной толщи ее нет. На этом основании можно было бы предпо-

ложить, что в период образования верхней части пойменной толщи, половодья стали более неравномерными и затопления поймы происходили не каждый год. Однако уменьшение затопляемости поймы может быть обусловлено и ее ростом в высоту, в связи с чем только высокие половодья способны вызывать затопление. Установленный выше факт активизации руслового процесса указывает, что в данном случае именно нарастание поймы в высоту и является ведущим фактором.

Более светлые тона отложений в верхней части берегового вала соответствуют представлению о том, что эти слои образовались в условиях больших затоплений.

Если попытаться оценить срок формирования каждого слоя, обнаруженного в разрезе берегового вала, то оказывается следующее.

Начало образования верхних слоев поймы (выше отметки 74 см от ее поверхности) можно датировать 1880 г. (начало выборки валунов). Тогда на образование этой толщи на момент обследования (1955 г.) ушло 75 лет. В пределах этой части толщи (до отметки 74 см) обнаружено 17 слоев. Следовательно, можно было бы предположить, что на образование каждого из них требуется 4—5 лет. Однако известно, что пойма затопляется не ежегодно и, судя по частоте больших половодий, можно предположить, что каждый из этих слоев действительно является годичным, но характеризует не все половодья, а лишь те, при которых происходило затопление поймы. Их было за этот период 17.

О. Г. Грабовская (1940) использовала для оценки векового хода уровней половодий р. Мологи данные об отметках кровли аллювиальных толщ разного возраста. Обнаружилось, что толща древнего аллювия, представленная тонкозернистыми песками, распространяется до отметки 95—96 м абс. Последующая предсовременная толща аллювия, представленная структурными глинистыми отложениями, распространяется до отметки 92 м абс., а современная толща аллювия — до отметки 93 м абс. Отсюда делается вывод, что высота половодий от начала развития реки сначала снизилась с отметок 96 до 92 м абс., т. е. на 3—4 м, а затем повысилась до отметок 93 м абс., т. е. на 1 м. Эти колебания отметок высоких вод могли быть связаны как с общим изменением водоносности рек бассейна, так и с перестройкой руслового процесса. В частности, снижение уровня в первый период могло быть связано и с уменьшением водоносности рек и с врезанием ее русла или с нарастанием пойм в высоту. Повышение же, по-видимому, преимущественно связано с увеличением водности периода (периодические колебания водоносности), а возможно и с аккумулятивными процессами в районах местных базисов эрозии. Выяснение этих вопросов требует дополнительных исследований.

3. ОБРАЗОВАНИЕ ВЕЕРОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РУСЛА, ИХ СВОЙСТВА

По мере нарастания берегового вала в высоту создаются условия, благоприятные для образования второго ряда береговых валов, так как за этот период противоположный подмываемый вогнутый берег смещается в сторону от реки и гребень поперечной гряды в русле, следуя за ним, может изменить свое положение и послужить основой для формирования нового берегового вала. Из-за различных высот и продолжительности половодий смещение вогнутого берега идет неравномерно. Это способствует образованию серий валов различной ширины — веера перемещения русла.

В результате описанного процесса образуются серии береговых валов, получившие название вееров перемещения русла, так как части их в плане напоминают развернутый веер. В действительности ряды валов в пределах данной излучины в плане представляют собой серии дугообразных грив, разделенных ложбинами и сходящихся в концевых участках излучины (к точкам перегиба русла в плане). Серии продолжающих формироваться береговых валов изогнуты параллельно краю выпуклого берега реки. В результате отчленения петли русла такая серия как бы консервируется, так как прежнее главное русло отмирает и поток устремляется в новое русло. Поэтому на подобных участках валы оказываются ориентированными по отношению к реке самым различным образом. При этом новые серии береговых валов могут в связи с изменением условий протекания потока после спрямления образовываться на более низких высотных плоскостях. Вследствие этого вся поверхность оказывается состоящей из отдельных разновысотных систем вееров перемещения русла. Можно приближенно считать, что на данном бесприточном участке каждая одновысотная серия валов характерна примерно одинаковым возрастом.

Время, требующееся на формирование каждого ряда береговых валов, различно для разных рек. Оно зависит от характера их режима, состава крупности и режима поступления транспортируемых потоком наносов.

Обнаружены случаи, когда береговой вал формируется ежегодно (реки Чулым, Или и др.), и случаи, когда на формирование одного берегового вала требуется 50—60 лет (р. Тавда). На многих реках новые береговые валы образуются в течение полутора-двух десятков лет (р. Ока).

Итак, повсеместно распространенный гривистый микрорельеф пойм меандрирующих рек, представленный сложными системами дугообразно выгнутых грив и понижений между ними, рассматривается (вслед за И. С. Щукиным и Е. В. Шанцером) как результат основных плановых деформаций речного русла. При этом дугообразно выгнутые гривы являются не чем

иным, как отошедшими в глубь поймы при смещении русла береговыми валами (рис. 56).

Предположения об эоловом происхождении грив (В. Р. Вильямс), воздействии эрозии на затопленной пойме (Б. Б. Полынов, Н. И. Маккавеев) или совместном воздействии эрозионных и аккумулятивных процессов, вызываемых местными течениями

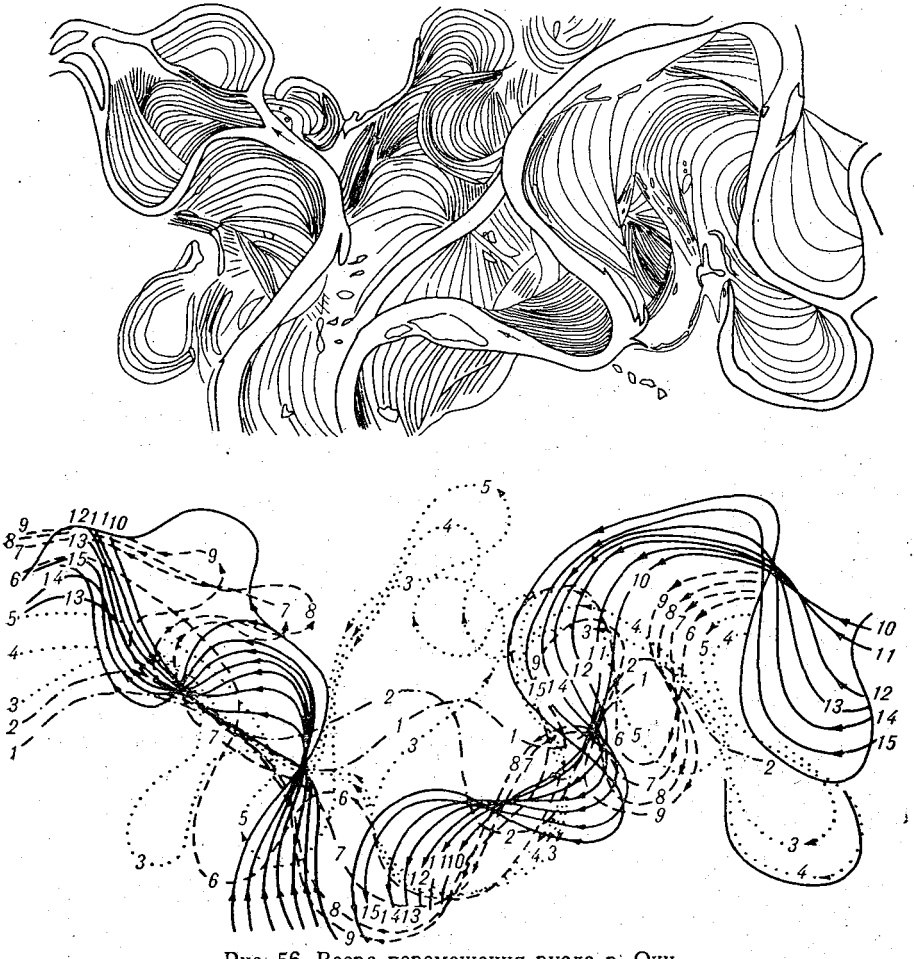


Рис. 56. Веера перемещения русла р. Оки.

на поймах (Л. С. Берг), не могут быть обоснованы массовыми материалами. Появление этих предположений связано главным образом с тем, что исследователи, не располагая соответствующими подробными материалами, имели дело с очень ограниченными участками реки, обычно в пределах 1—2 смежных

излучин. Просмотр материалов аэрофотосъемки, как известно, отличающийся большой детальностью изображений и позволяющей одним взглядом охватывать участки большого протяжения, показывает чрезвычайную сложность во взаимной ориентировке групп вееров грив и их несовпадение как с преобладающим направлением вееров, так и с возможным положением динамических осей потока или местных течений на затопленной пойме в разные фазы этого затопления.

Стереофотограмметрические измерения свидетельствуют о разновысотности поверхностей отдельных групп вееров, т. е. о наличии на первый взгляд беспорядочной ступенчатости поверхности поймы, с превышениями отдельных плоскостей над другими, выражающимися в десятках сантиметров и даже в метрах. При этом обнаруживается, что плоскости современных вееров валов примерно одновысотны и расположены ниже более древних их систем.

Уже одни эти обстоятельства отвергают предположение о чисто эоловом или чисто эрозионном происхождении гривистого микрорельефа речных пойм. Не согласуются эти представления и с данными о строении речного аллювия. На грядах обнаруживается обычно более крупный материал, чем в ложбинах между ними, что противоречит предположению об эрозионном происхождении ложбин. В поперечном разрезе валов четко выявляется слоистость отложений, изогнутость слоев параллельно поверхности вала; отмечается в общем хорошее соответствие между толщиной, составом и крупностью отдельных слоев, слагающих вал, с высотой половодий. В то же время можно отметить общее уменьшение крупности отложений от подошвы вала к его вершине.

Следует отметить, что положение об эоловом или эрозионном происхождении гряд не объясняет достаточно надежно установленный факт двучленности современного аллювия, его разделения на русловую и пойменную фации. Необъяснимым при принятии этих точек зрения остается и наличие гривистого рельефа на новообразующихся участках поймы с хорошо развитой дерниной.

Все эти обстоятельства приводят к выводу о том, что первооснова гривистого рельефа пойм создается в ходе плановых деформаций речного русла, а эоловые, эрозионные и эрозионно-аккумулятивные процессы это явления вторичного порядка, которые, правда, в ряде случаев способны существенно нарушить строение этого рельефа, но редко могут коренным образом видоизменить его.

Если гривы на пойме являются прежними береговыми валами, то положение каждой из них обрисовывает прежний контур берега русла.

Таким путем удается получать схемы плановых деформаций русла не только в полосе современного пояса меандрирования, но и за периоды существования предшествующих поясов меандрирования в несколько тысячелетий. По этим схемам выясняются участки поймы, которые неоднократно подвергались переработке, участки, существующие длительное время без существенных плановых деформаций (вследствие отхода от них пояса меандрирования), выясняются границы современной поймы. Все это может иметь значение в археологии для объяснения причин, по которым стоянки на пойме оказались в непосредственной близости от реки или может помочь обнаружению новых стоянок.

Определение сроков переформирования речного русла, схему которого можно получить по аэрофотоснимкам, возможно путем определения сроков формирования современных береговых валов. Принятие сроков формирования одного берегового вала в качестве единицы времени формирования поймы обусловлено следующим.

При свободном меандрировании, когда плановые деформации происходят в виде разворота S-образной извилины русла вокруг фиксированной в пространстве точки, находящейся в центре этой фигуры, береговой вал формируется одновременно по всему контуру выпуклого берега и, следовательно, расстояние между двумя смежными валами будет показывать пути, пройденные любой точкой русла за одно и то же время.

Приняв отдельный береговой вал за индикатор времени формирования поймы, прежде всего следует выяснить вопрос о том, в какой мере размеры валов и расстояния между смежными береговыми валами разнятся по площади поймы.

Есть реки, на которых каждый береговой вал формируется за одно половодье. В этих случаях правомерно ожидать, что объем тела вала и расстояние между валами, отражающее скорость смещения вогнутого берега реки, зависят от размеров каждого половодья и должны значительно варьировать по площади поймы. Однако чаще береговой вал формируется в течение нескольких лет и даже десятилетий и, следовательно, его размеры и расстояние между ними отражают интегральные характеристики водности периодов. В этих случаях правомерно ожидать, что в среднем размеры валов и расстояние между ними должны относительно мало меняться по площади поймы.

Среднюю ширину вала можно определить, подсчитав число валов, приходящихся на единицу длины линии, проведенной на плане (аэрофотоснимке). Учитывая, что гребни дугообразно изогнуты и сходятся в концевых частях, измерения следует приурочить к одним и тем же участкам вееров, например производить их по линии наибольших расстояний между гребнями. Такие определения должны быть выполнены по профилям,

пересекающим пойму, с тем чтобы учесть частоту гребней в современных и в древних системах береговых валов. Это дает возможность распространения сроков формирования современных валов на прошлые периоды. Измерения частоты валов должны вестись по практически бесприточным участкам рек.

Измерение частоты валов по пойме позволяет не только уверенно распространять данные о сроках формирования современных валов на большие площади поймы вглубь от реки, но также решать целый ряд других важных вопросов.

Например, на этой основе можно выделить участки поймы, сформировавшиеся в условиях примерно одинаковой водоносности (участки с одинаковой частотой валов), проследить порядок смены и длительность многоводных и маловодных периодов, судить об относительной интенсивности плановых деформаций речного русла на разных участках реки и даже на смежных реках.

Подойти к определению сроков формирования одного берегового вала можно исходя из следующих соображений.

Образование нового берегового вала всегда связано с перемещением (размывом) противоположного вогнутого берега. Поэтому ширина берегового вала примерно равна величине смещения подмываемого противоположного берега. Лишь на участках прорывов излучин эта взаимосвязь может нарушаться, но затем быстро восстанавливаться.

Скорость перемещения берегов русла можно определить на основании сопоставления карт разных лет съемки. При таком сопоставлении надежнее всего определить скорость смещения обычно хорошо выраженных подмываемых вогнутых берегов, поскольку контуры намываемых берегов (гребень берегового вала) на картах обычно не показываются. Определив наибольшую ширину берегового вала по аэрофотоснимкам и зная наибольшую скорость смещения берегов, измеренную по картам, можно вычислить и срок формирования берегового вала и любых участков поймы между смежными береговыми валами.

Возраст современного берегового вала может быть определен также по величине годичного наилка. Зная примерно толщину слоя наносов, откладываемых за половодье на вершине современного берегового вала, можно, определив высоту вала, оценить и примерный срок его формирования.

О сроке формирования современного берегового вала можно приближенно судить по возрасту произрастающей на нем древесной растительности. Растительность на береговом валу, очевидно, могла появиться только после того, как сформировался фундамент этого вала — причленившаяся к берегу песчаная гряда. Поэтому возраст дерева, произрастающего на валу, определенный, например, по его срезу, примерно соответствует возрасту самого берегового вала.

Приуроченность древесной растительности именно к валам, а не ложбинам между ними особенно хорошо прослеживается на снимках облесенных пойм, на которых всегда видны дугообразно изогнутые аллейки. Следует отметить, что аэрофотоснимок также позволяет оценивать бонитет древесных пород по размеру крон и высоте деревьев, определяемой стереофотограмметрическим путем.

Определение сроков формирования всей поймы может вызвать известные затруднения, так как для этого надо быть уверенным в том, что русло в процессе меандрирования не переходило несколько раз от одного берега к другому, т. е. не происходила неоднократная переработка всей поймы.

В случаях когда ширина современного пояса меандрирования меньше ширины дна долины, занятого поймой, выяснение числа смен полос меандрирования возможно. Выше указывалось, что в этих случаях поверхность поймы оказывается состоящей из нескольких высотных ступеней. При этом плоскость поверхности современных сегментов поймы (систем вееров валов) в пределах данного бесприточного участка примерно одинакова. Эти обстоятельства позволяют предположить наличие связи между высотными плоскостями поймы и поясами меандрирования, а именно — каждому поясу меандрирования соответствуют определенные высоты поверхности рядов вееров береговых валов. Смена положения пояса меандрирования обычно приводит и к изменению высотного положения указанных поверхностей. Тогда, очевидно, число высотных ступеней на пойме соответствует числу смен пояса меандрирования. Можно предположить, что и в пределах одного пояса меандрирования русло могло несколько раз перемещаться от одной его границы к другой. Однако это маловероятно, поскольку цикл развития излучин заканчивается прорывами их перешейков, и именно эти прорывы чаще всего обусловливают смещение всего пояса и образование более низко расположенных систем новых вееров. Для большей надежности расчета все же рекомендуется вести подсчет числа валов по наиболее хорошо выраженным излучинам с единообразным рисунком веера в пределах огибаемых рекой участков поймы внутри этих излучин.

Следовательно, определив по числу гребней срок формирования одного пояса меандрирования (современного) и зная по крупности рисунка старых вееров, что эти сроки можно распространить и на них, можно вычислить общие сроки формирования поймы. Если крупность рисунка новых и старых вееров одинакова, то очевидно, что эти веера формировались в условиях примерно одинаковой водоносности и, следовательно, ширина различных поясов меандрирования не должна была бы сильно разниться друг от друга. В этих случаях общая продолжительность периода формирования исследуемого массива поймы

определится путем умножения периода формирования современного пояса меандрирования на число высотных ступеней на пойме.

Приведем фактические примеры.

Восстановление прежних положений речного русла по аэрофотоснимкам было, например, произведено на р. Оке на участке длиной 70—80 км выше г. Касимова. По этому же участку, кроме аэрофотоснимков, имелись лоцманские карты съемки 1879 и 1926 гг.

Общая ширина поймы (ее участка с отчетливо видными следами меандрирования) составляла 8—9 км. Четко выделялась современная полоса меандрирования шириной около 2 км. Она составляла на разных участках от 5—6 и до 8—9 ширин русла.

В пределах участка располагалось пять хорошо выраженных петель русла, сопровождавшихся серповидными старицами. Подсчет частоты береговых валов производился по 25 новым и старым веерам береговых валов. Он показал, что в среднем на 1 см на снимке приходится 16 валов при наибольшем их числе 18 и наименьшем 13. Столь небольшая разница в частоте валов в разных частях поймы показывает, что она формировалась в условиях примерно одинаковой водоносности. Средняя ширина берегового вала составила 18 м. При средней (из наибольших в вершине излучин) скорости плановых деформаций, определенной по сопоставлению лоцманских карт, 1,3 м/год на формирование одного вала требуется 14 лет. Средняя высота береговых валов над меженью по данным стереофотограмметрических измерений составила около 3 м. Если принять продолжительность формирования берегового вала по данным о плановых деформациях 14 лет, то ежегодный наилок должен составить в среднем 21 см/год. По фактическим данным о наилке, правда весьма скудным и разрозненным, годичная величина его на вершине современного вала равна 6 см/год. Учитывая, что в конечной стадии развития берегового вала на его вершину попадают только наиболее мелкие наносы и толщина наилка уменьшается по сравнению с тем, который мог откладываться в начальных стадиях развития вала, когда часто наилок составляет десятки сантиметров, а также учитывая, что в многоводные годы толщина наилка может значительно превосходить указанные 6 см/год, среднюю цифру нарастания берегового вала (21 см в год) можно считать приемлемой.

В современной полосе меандрирования, ширина которой составляет примерно 2 км, находится 110 валов, следовательно, она формировалась около 1500 лет.

Поскольку ширина пояса меандрирования на много меньше общей ширины поймы, то интересно попытаться определить возраст поймы. Стереофотограмметрические измерения показывают наличие в ее пределах пяти высотных ступеней, что, как ука-

зывалось, может свидетельствовать о пятикратной смене положения пояса меандрирования. Так как частота валов по всей ширине поймы одинакова, то, следовательно, данные о сроках формирования современного пояса меандрирования правомерно распространить на прошлое время. Тогда срок формирования современной поймы будет 7500 лет. Эта цифра близка к той, которую дает Е. В. Шанцер по накоплению аллювия, оценивая срок существования современной поймы равнинных рек ЕТС величиной 8000 лет.

Продолжительность существования одного пояса меандрирования 1500 лет очень близка к длительности циклов хода водности 1800 лет, обнаруженных А. В. Шнитниковым.

Со времен В. В. Докучаева обычно отмечают, что с увеличением реки отношение между шириной русла и шириной поймы уменьшается (Н. И. Маккавеев, 1955).

Зарубежные исследователи, например Р. Бэтс, считают, что отношение средней ширины русла к ширине пояса меандр составляет для рек с шириной русла до 30 м 1 : 16, до 300 м 1 : 12 и до 1000 м 1 : 11, т. е. диапазоны изменений по этим данным оказываются значительно меньшими.

Подобный вопрос нельзя решать без учета типов плановых деформаций и вопроса об унаследованности пойм. Так, например, для участков рек с ограниченным меандрированием отношение ширины пояса меандрирования к ширине русла ни в одном случае не превысило 4. При свободном меандрировании в зависимости от стадии его развития эта величина колеблется от 2 до 20, а при незавершенном меандрировании не превысила 10. Для таких малых рек, как Лохвица, Слепород, Сула и др., с соотношениями 1 : 375, 1 : 300, 1 : 85, очевидно, что в расчет принималась не современная пойма, а ширина дна долины, т. е. не учитывалось наличие унаследованных пойм.

4. ФОРМИРОВАНИЕ ПОЙМЕННОЙ ФАЦИИ АЛЛЮВИЯ

Во время затопления поймы транспортируемые потоком наносы получают возможность проникать из русла на пойму. Скорости течения на пойме вследствие мелководья пойменного потока и значительных сопротивлений, обусловленных наличием развитой растительности и сложного рельефа ее поверхности, по мере удаления от русла резко убывают; вынесенные на пойму наносы получают возможность отлагаться на ее поверхности. В непосредственной близости от русла отлагаются наиболее крупные наносы, образующие обычно наиболее мощный слой отложений. В глубь поймы могут проникать только взвешенные наносы. По мере отдаления от русла они будут образовывать все менее мощный и более мелкозернистый слой отложений, получивший название «наилок». Накапливающиеся слои

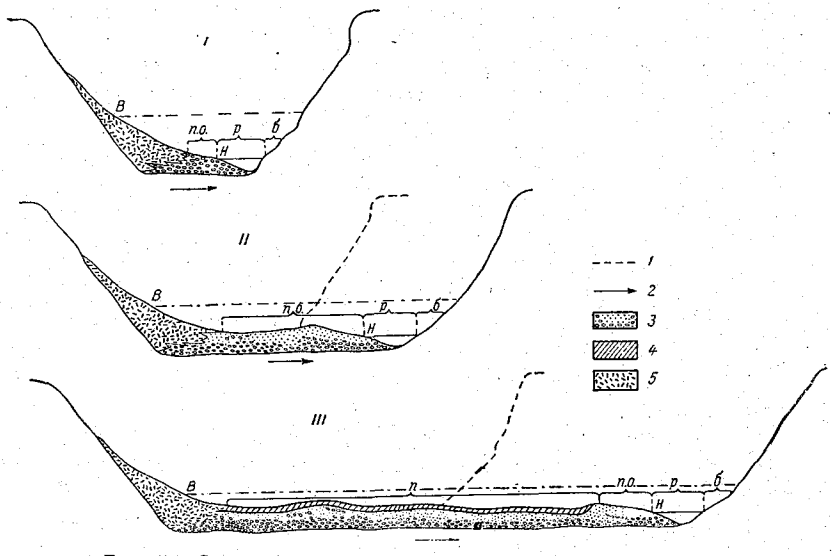


Рис. 57. Схема формирования русла (по Шанцеру Е. В.).

I, II, III — последовательные стадии развития поперечного профиля долины; *1* — положение подмываемого берега в предыдущую фазу, *2* — направление смещения русла, *3* — русловой аллювий; *4* — пойменный аллювий, *5* — склоновые отложения, *Н* — уровень меженных вод, *В* — уровень высоких вод, *р* — русло, *б* — бечевник, *по* — прирусловая отмель, *п* — пойма.

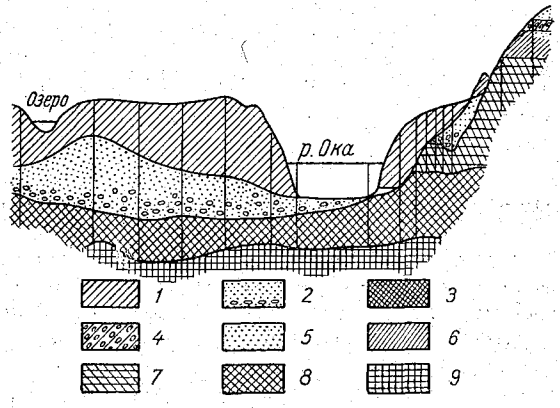


Рис. 58. Поперечный разрез долины и русла р. Оки в верхнем течении (по А. И. Москвитинову, 1934).

1 — пойменная фация (суглинки и супеси), *2* — пески с галькой, *3* — делювий, *4* — морена, *5* — пески чистые, *6* — суглинки делювогляциальные, *7* — упинская толща, *8* — малевно-мураевская толща, *9* — озерно-хованская толща.

наилка образуют пойменную фацию аллювия, залегающую поверх русловой, которая, как указывалось, и создает гривистый рельеф поймы, слагаясь из причленяющихся друг к другу береговых валов (рис. 57—59).

Так как на первом от реки береговом валу при затоплении поймы будут откладываться в основном крупные наносы, то собственно пойменная фация аллювия начинает формироваться в некотором отдалении от реки. Вместе с тем сам береговой вал, как указывалось, сложен наносами в общем более мелкими, чем донные отложения, поскольку по мере его роста в высоту на него могут попадать все более мелкие наносы.

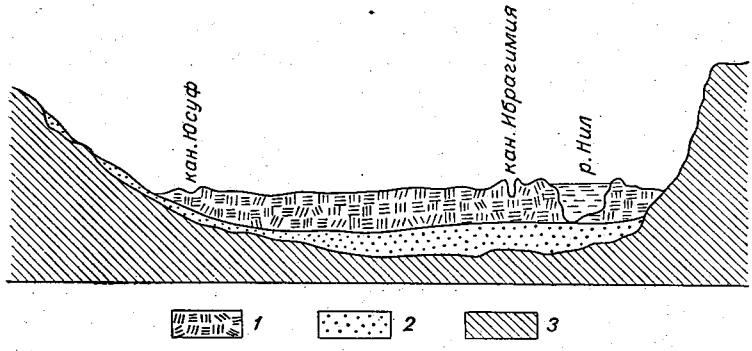


Рис. 59. Поперечный разрез долины р. Нила.
1 — ил, *2* — песок, *3* — коренные породы.

Поэтому отложения береговых валов, во всяком случае в толще, залегающей между уровнем, соответствующим отметкам поверхности пляжей (побочней) и отметкой первого от реки берегового вала, нередко рассматривают как самостоятельную фацию, называя ее фацией береговых валов.

Вследствие того что пойменная фация аллювия, сложенная в основном взвешенными наносами, залегает поверх русловой фации (собственно русловой фации и фации береговых валов), имеющей гривистую поверхность, то ее толща в разрезе поймы в общем повторяет рельеф поверхности русловой фации, выклиниваясь вблизи первого от реки берегового вала и в притеррасной части поймы. На реках с несовпадением динамических осей потока на пойме с рисунком вееров перемещения русла и особенно на реках с высокими расходами взвешенных наносов благодаря наличию мощных отложений наилка первичный гравистый, как бы гофрированный рельеф поймы может оказаться выровненным.

Убывание толщи отложений пойменной фации от русла к притеррасной части поймы приводит (при наличии широких пойм, т. е. в условиях свободного меандрирования) к тому, что

и поверхность поймы (гривистая или с выровненной поверхностью) оказывается наклонной в том же направлении, т. е. от русла к притеррасной части поймы. Это явление обусловлено, кроме того, спрямлением потока на излучине в период затопления поймы.

Такое строение поймы в условиях свободного меандрирования дает основание выделить в этом случае три основные части поймы: 1) наиболее возвышенную прирусловую пойму, 2) относительно пониженную и залегающую более или менее горизонтально центральную пойму и 3) наиболее низкую притерассную часть поймы. Выше уже указывалось, что поверхность поймы при свободном меандрировании оказывается покрытой веерами перемещения русла, характерными разновысотностью, вследствие чего пойма оказывается представленной сериями замкнутых разновысотных площадок, иногда имеющих сложные плановые очертания. Поэтому указанное деление пойм оказывается достаточно условным. Кроме того, его следует применять преимущественно к участкам свободного меандрирования и нельзя считать универсальным законом, как это делает В. Р. Вильямс.

На неразвитых поймах (ограниченное меандрирование) при глубоком их затоплении, большом количестве и значительной подвижности наносов (повышение скорости, мелкозернистый состав наносов) наиболее благоприятные условия отложений наносов создаются не у берегов русла, а в краевых частях поймы. Поэтому она может оказаться наклонной к руслу. Этому же способствуют и выносы делювия со склонов речной долины, играющие большую роль в связи с небольшой шириной поймы.

В литературе можно встретить указание о том, что на участках сужений долины, т. е. в условиях ограниченного меандрирования, или на участках с врезающимся руслом образуются так называемые обвалованные поймы, т. е. поймы, характерные наличием уклона их поверхности от русла к склонам долины. Подобные случаи, по-видимому, могут иметь место, когда в условиях ограниченного меандрирования и при больших затоплениях поймы сильно активизируется русловой процесс и в верхних частях излучин взмывается и выносится на прибрежную поверхность поймы большое количество наносов, придающих пойме наклон и вниз по течению и по ее ширине.

Этот вопрос подробнее рассматривается ниже.

Обвалованные поймы свойственны и условиям, когда река протекает среди унаследованных пойм при достаточно интенсивном стоке донных наносов и небольшой ширине пояса ограниченного меандрирования (слаборазвитых излучинах).

Данные, характеризующие распределение наилка по ширине поймы, приведены в работе автора (1956). Эти данные позволяют сделать вывод о том, что по мере удаления от реки про-

центное содержание в наилке крупных наносов убывает, а мелких фракций возрастает.

А. Я. Бронзов указывает, что если у русла р. Мологи обнаруживался песок, то в притеррасной части поймы отложения были настолько тонкозернистыми и незначительными, что слой наилка, покрывший при затоплении поймы опавшие на нее листья, не скрывал рисунка прожилок на них.

Закономерное уменьшение крупности отложений наносов и толщины наилка по мере удаления от русла в глубь поймы обнаружено на многих реках (на пойме р. Десны в Орловской области и в районе г. Новгород-Северского, на р. Днепре в пределах Киевской области, на правобережье Нижнего Днепра и у Днепрогэса, на реках Кубани и Лабе, на Волге в среднем Заволжье, на реках Тоболе, Томи у Томска, на левобережье р. Кеть, на реках Лене, Тюньге, Сырдарье, Миссисипи и Миссури и т. д.).

Наилок на пойме отлагается неравномерным слоем. На вершинах береговых валов, расположенных в непосредственной близости от русла, наилок бывает очень тонким или вовсе не откладывается, а в ложбинах между этими валами откладывается более мощный наилок. По мере удаления в глубь поймы разница в толщине наилка на валах и в ложбинах уменьшается (при общем уменьшении и его слоя), причем иногда на валах наилок может оказаться даже бóльшим, чем в ложбинах. Это бывает, когда направление грив совпадает с направлением течения на пойме.

Как указывалось, на слабопроточных поймах с малыми уклонами и сложной системой вееров перемещения реки и при высоком содержании в потоке взвешенных наносов застой воды в ложбинах приводит к интенсивному их заносу, и гривистый рельеф поймы оказывается снивелированным, а иногда погребенным на значительную глубину под толщей пойменной фации аллювия.

5. ФАКТОРЫ, НАРУШАЮЩИЕ СТРОЕНИЕ ТОЛЩ ПОЙМЕННОГО АЛЛЮВИЯ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРОЕНИЯ РЕЛЬЕФА ПОЙМ

Некоторые исследователи утверждают, что имеет место не только закономерное уменьшение крупности отложений на пойме по ее ширине, но также и по длине излучины. Так, Н. И. Маккавеев отмечает, что в верховой части пойменного массива, огибаемого излучиной, мощность и крупность отложений больше, чем в низовой. Если в верховой части обычно откладываются пески, то в низовой обнаруживаются только накопления илов, т. е. разница в крупности значительная.

Связывается это с тем, что в подобных случаях верховая часть пойменного массива, встречая течения, интенсивно размывается, а низовая часть только намывается. При этом пески, поступающие в реку при подмыве ее берегов, взметываются вихревыми течениями, образующимися у яра при затоплении поймы, и выносятся на ее поверхность, где они и получают возможность отлагаться. Лишь мелкие частицы достигают края массива.

Убывание крупности отложений на огибаемых рекой пойменных массивах излучины вниз по течению, по-видимому, может иметь место на относительно слаборазвитых излучинах, т. е. при ограниченном меандрировании или в начальных стадиях свободного и незавершенного меандрирования. Надо отметить, что в этих случаях выносы песка на поверхность поймы могут быть настолько значительны, что появляется грядовое движение и наползающие гряды могут создавать вторичный рельеф поверхности, не связанный с формированием береговых валов.

При развитых свободно меандрирующих излучинах описанная закономерность может и не наблюдаться ввиду сложности систем течений на пойме, создающихся при этом типе руслового процесса.

Надо отметить также, что появление песчаных гряд на поверхности поймы обычно свидетельствует об интенсификации руслового процесса как в результате искусственных мероприятий, например, снятия отмостки при добыче валунов и гравия из русла реки или разрушения местных базисов эрозии, так и в результате естественных процессов — сработки того же местного базиса — или в результате появления сильно наросших береговых валов, способствующих сосредоточению потока в русле в период половодья.

При подобных явлениях ориентировка созданных наползающими грядами образований, похожих на валы, может быть весьма различной и обусловливается направлениями течений на затопленной пойме, наличием местных препятствий и эоловыми воздействиями, которые могут оказаться весьма существенными. Например, на берегах главного русла Волги в пределах Волго-Ахтубинской поймы обнаруживаются участки с береговыми валами высотой над меженью 10—15 м, обычная высота их 4—6 м при высоте подъема наивысшего уровня около 7—8 м. Подобные участки никогда не затопляются и не затоплялись в период половодья, и, очевидно, что они создались при участии эоловых воздействий, хотя их основой бесспорно служили обычные береговые валы, создавшиеся в ходе меандрирования русла реки.

На рис. 60 показаны продольные профили дюны на берегу Куропаткинской воложки р. Волги у протока Бакалда (Волго-Ахтубинская пойма). На этом рисунке видно, что отметки по-

верхности дюны в результате перевевания песков изменяются до 30—50 см за год.

Г. А. Трегубов приводит следующие данные скорости накопления наносов в результате надува.

За два сезона наблюдений 1954—1955 гг. по четырем измерениям высота дюн на р. Амуре поднялась на 74 см при минимуме 15 см и максимуме 130 см. При ветровом надуве густые заросли полнотой 1,0 накапливают песок узким гребнем, располагающимся на 2—9 м вглубь от края полосы зарослей. За-

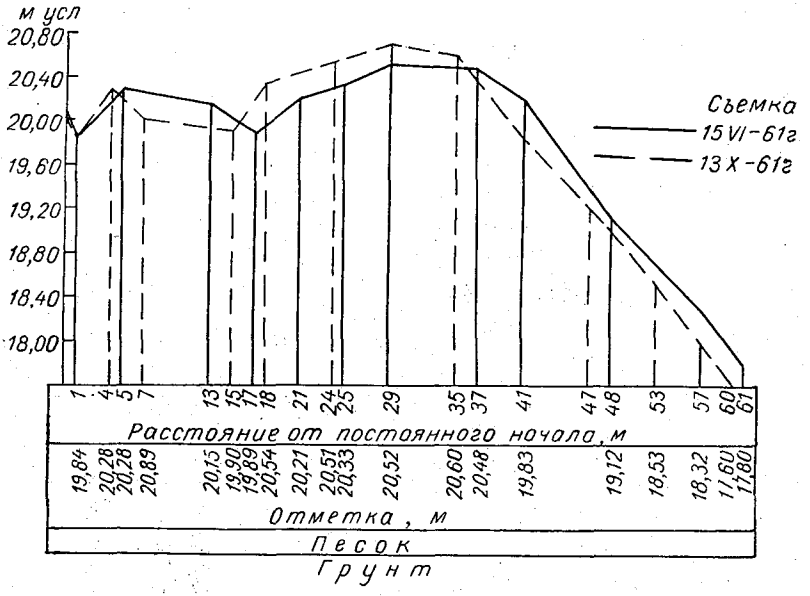


Рис. 60. Изменение профиля дюны на берегу Куропаткинской воложки р. Волги у протока Бакалда; съемки сделаны в июле и октябре 1961 г. Волжской ГМО.

росли с полнотой 0,4—0,5 м способствуют образованию пологовершинной невысокой дюны шириной больше, чем полоса зарослей. При еще более редких зарослях годовой слой отложений не превышает 20 см и зона их больше ширины зарослей в 5—7 раз.

Зимние отложения песка на льду рек Амура и Зеи по направлению господствующих западных и северо-западных ветров оказались следующими (табл. 19).

Летние ветры ураганной силы могут вызывать суточные отложения, в несколько раз превышающие приведенные в таблице и достигающие десятков сантиметров. Так, на р. Зее у с. Даниловки отложения поверх снега, надутого ветром, песка после бури 16/IV 1954 г. составили около 20 см.


1
2
3

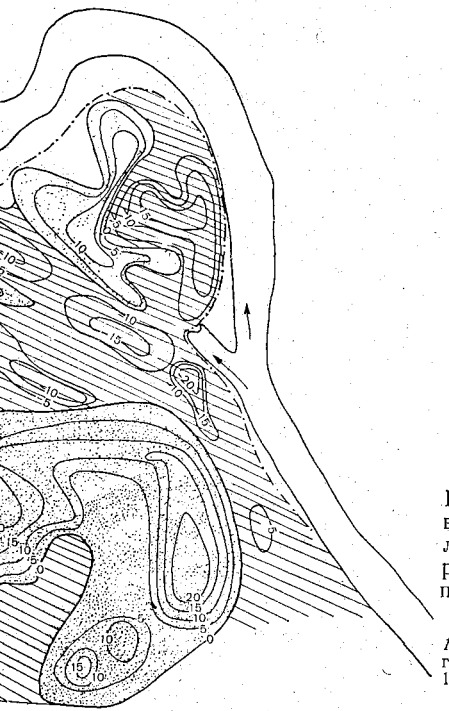


Рис. 61. Деформации поверхности поймы р. Поломети в районе с. Заречье (в см) за одно половодье (нивелировки 1957 и 1958 гг.).

1 — *намыв*, *2* — *размыв*, *3* — граница не затоплявшихся в 1959 г. приречных участков поймы.

Таблица 19

Расстояние от берега	0—100	100—250	250—500	500—700	700—1000
Высота надува, см. .	4,3	3,4	1,2	0,25	0,15
Объем, м³/га	430	340	120	25	15

Приведенные данные показывают, что в условиях засушливых районов с обилием песчаных отложений вблизи рек влияние эоловых воздействий на рельеф поверхности поймы может быть очень существенным, однако считать их ведущими при всех условиях нельзя.

Рельеф поймы нарушается также размывами ее поверхности. При затопляемости поймы на большую глубину на поверхности возникают эрозионные борозды, появляются размытые водой ямы. При сливе воды могут оказаться промытыми концевые участки ложбин между валами, а иногда промывы в самих береговых валах. Иногда обнаруживаются следы выпахивания поверхности поймы льдинами при ледоходе, срезания ими вершин береговых валов. На пойме р. Оки Е. В. Шанцером (1951) обнаружены рулоны дерна, свернутые при ледоходе. Все это создает благоприятные условия для образования новых протоков на пойме и спрямления излучин, т. е. может возникнуть описанный ранее процесс незавершенного меандрирования.

На рис. 61 показаны результаты аккумулятивных и эрозионных процессов, полученные на основании детальных съемок рельефа участка поймы р. Поломети в районе с. Заречье, по данным наблюдений русловой станции ВНИГЛ и Ленгипроводхоза. Надо иметь в виду, что на исследованном участке реки произошла активизация руслового процесса, приведшая к прорыву береговых валов и выносу на пойму песка.

6. СВЯЗЬ СОВРЕМЕННОГО АЛЛЮВИЯ С ФАКТОРАМИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИМИ ЕГО НАКОПЛЕНИЕ

Общая мощность толщи современного аллювия тесно связана с амплитудой колебаний уровня воды, но также зависит и от ряда других факторов, описываемых ниже.

Считается, что нормальная мощность речного аллювия определяется разницей отметок высоких половодий и наиболее глубоких плёсов.

Так, на участке Волги от Тетюшевой до Камышина наибольшая глубина плёсов в межень составляет 19 м, а подъем наивысших уровней над меженью — 13,5—15,4 м. Следовательно, нормальная толща аллювия равна 32,5—34,4 м.

Нижняя Тунгуска в низовьях имеет наибольшие глубины

порядка 35—80 м, подъем наивысших уровней составляет 22—30 м, а мощность аллювия — 60—70 и 110 м и т. д.

Н. И. Маккавеев (1955) считает, что средняя высота прирусловых песков (пляжей и побочней — И. П.) равна около $^1/_3$ средней амплитуды колебания уровня, а в прирусловой части поймы (современных береговых валов — И. П.) — примерно средней высоте половодий. Средняя высота половодий на р. Днепре примерно в 2 раза меньше, чем на р. Нижней Каме. В соответствии с этим и высота поймы р. Нижней Камы оказывается в 2 раза большей, чем высота поймы р. Днепра. В строгом соответствии с уменьшением высоты половодий р. Волги на участке Волгоград—Астрахань уменьшается и высота поймы реки. У Волгограда она составляет 8—10 м, у Ленинска — 6—6,5 м, у Астрахани — примерно 3 м.

По Е. В. Шанцеру (1951), на р. Березине в среднем ее течении подъем уровня половодья составляет 2,5—3 м, высота поймы — 1,5—2,5 м. На р. Днепре средняя высота половодий равна 3,5—4,0 м, поймы — около 3,0 м. На р. Волге у Тетюшей эти величины соответственно равны 11 и 8—10 м, в низовьях Нижней Тунгуски — 22—30 и 20 м.

Из этих примеров видна близость высот поймы и половодий. Неполное их соответствие обусловливается рядом факторов, среди которых, нарушающих нормальную мощность аллювия, прежде всего надо назвать следующие:

а) интенсивность плановых деформаций речного русла, зависящая от выработанных потоком в результате его многовековой деятельности уклонов дна речной долины;

в) состав, крупность и режим поступления транспортируемых потоком наносов;

в) наличие условий, ограничивающих плановые деформации русла.

Все это основные факторы руслового процесса.

При интенсивных плановых деформациях русла, носящих циклический характер (свободное, незавершенное меандрирование), и наличии сужений речной долины, не препятствующих развитию полных циклов развития излучин, но ограничивающих длительное однонаправленное смещение русла, поток имеет возможность неоднократно перемывать всю современную пойму.

Например, на участках сужений долины р. Волги ширина ее поймы редко превышает ширину пояса меандрирования. При темпах отложения современного наилка примерно 15 см/год высота современной поймы за период ее существования, насчитывающий около 8 тысяч лет, должна была бы нарасти на 1200 м. Фактически же высота составляет 8—10 м, причем мощность нойменной фации равна примерно 3 м. Следовательно, за этот период русло должно было много раз перемещаться от одного склона долины к другому и поток неоднократно полностью пе-

ремывал бы пойму. Вычислить на основе данных о высоте поймы и годичного наилка число смещений русла от одного склона долины к другому было бы неправомерно, поскольку на высоту поймы оказывают влияние и другие факторы. Так, например, тектоника, кориолисовы силы способны длительное время удерживать поток у одного из берегов. При этом скорость смещений зависит от водности периодов. Кроме того, в ходе развития излучин возможно появление спрямлений, так же длительное время удерживающих русло у одного из берегов. По этим причинам число перемещений русла по дну долины может оказаться многим меньше, чем вычисленное подобным образом. Действительно, пойма с мощностью наилка 3 м при темпе нарастания наилка 15 см/год должна была бы сформироваться за 20 лет. Вместе с тем при скорости плановых деформаций на рассматриваемом участке Волги порядка 10 м/год за 20 лет излучины сместятся только примерно на $^1/_3$ ширины русла, т. е., очевидно, не пройдут полного цикла их развития.

В сужениях долин, расположенных выше участков развития свободного и даже ограниченного меандрирования, накоплений аллювия может вообще не наблюдаться.

Некоторые исследователи считают, что тектонические движения значительно влияют на мощность речного аллювия и высоту пойм. Так, Г. И. Горецкий (1948), исследовавший р. Чусовую, обнаружил, что высота ее поймы увеличивается вниз по течению в 2 раза, составляя в начале среднего течения 2 м, а в конце нижнего — 5,5 м, при этом на нижнем участке мощность аллювия примерно в 2 раза превышает нормальную.

Наряду с этим увеличиваются вниз по течению реки и ее уклоны. По отметкам подошвы аллювия можно предположить, что в верхнем течении снижение продольного профиля за 20 тысяч лет составило около 5 см за столетие, а в нижнем — 15 см за столетие при общем снижении базиса эрозии на 2,4 м. В связи с этим русло оказалось переуглубленным и, следовательно, мощность аллювия преувеличенной по сравнению с нормальной.

Не отрицая возможности влияния тектонических движений на мощность аллювия и высоту пойм, следует все же отметить, что годичные величины снижения или повышения продольного профиля, происходящие в результате тектонических движений, оказываются много меньшими, чем величины отложений наносов. Так, на р. Чусовой годичный наилок в несколько десятков раз превышает величину сработки продольного профиля за столетие.

Поэтому прав Е. В. Шанцер (1951), указывающий: «Никогда река не бывает врезана в пойму, пойма наросла, а не река углубилась».

При оценке нормальной мощности аллювия, необходимой для выявления влияния на его накопление тектонических движений, крайне важно, во-первых, установить нижнюю границу современного аллювия и, во-вторых, иметь в виду, что высота современных половодий связана с ним только для периодов действительно устойчивой водоносности рек. В противном случае, т. е. при рассмотрении всей толщи аллювия и ориентировки только на современную высоту половодий, можно получить выводы, ничего общего с действительностью не имеющие.

Как показали исследования А. В. Шнитникова (1957), в период после окончания великого оледенения, т. е. за последние 8—10 тысяч лет, имели место 4 цикла изменения водоносности с продолжительностью каждого цикла порядка 1800 лет. Хотя общего существенного уменьшения или увеличения водоносности рек за этот период не произошло, условия накопления аллювия в период повышений и понижений водоносности не могли быть равноценными и, следовательно, «нормальная» толща аллювия для этих условий должна быть различной.

С типом водного режима и режима стока наносов тесно связана не только мощность аллювия, но и его сортировка.

Так, для рек с высоким половодьем и длительной устойчивой меженью характерна не только большая мощность, но и хорошая сортировка руслового аллювия. При резком уменьшении скоростей течения в межень появляется возможность осаждения на дно русла взвешенных наносов — явление так называемого сезонного заиления. Это ведет к появлению в толще руслового аллювия прослоек иловатых фракций.

При глубоких затоплениях поймы правомерно ожидать большого разнообразия в крупности наносов, слагающих пойменную фацию аллювия.

В затонах и старицах благодаря длительному застою воды при спаде половодья могут образовываться мощные глинистые отложения — отстой самых мелких частиц. Подобные отложения встречающиеся обычно в виде линз, называются старичной фацией аллювия. При низких половодьях на пойму могут выноситься только наиболее мелкие частицы, и состав пойменной фации должен быть более однородным.

Временные потоки и пересыхающие реки отличаются слабым развитием русловой фации аллювия и наличием мощных слоев пойменной фации. Развито сезонное затопление, и поэтому в русловом аллювии обычны линзы и прослойки глинистых песков, супесей и суглинков, напоминающих старичную фацию.

Поскольку сток наносов определяется не только водным режимом, но также геологией и топографией водосбора, приведенные закономерности накопления и сортировки речного аллювия в значительной мере зависят от однородности этих особенностей водосборов. Пестрота этих условий особенно велика

на малых водосборах, поэтому и описанные выше закономерности строения аллювиальных толщ здесь могут оказаться наиболее сильно нарушенными.

На малых водосборах оказывается велико и влияние делювиальных выносов, способных существенно влиять на строение пойм, изменяя даже их общий наклон к руслу.

Большое значение для формирования пойм на реках разной величины имеют происходящие на них болотообразовательные процессы. Они способны существенно менять рельеф поверхности, придавать пойме наклон к руслу, формировать в толще аллювия прослойки ископаемого торфа и т. д.

Велико и влияние на рельеф поймы вечной мерзлоты. Термокарстовые явления способны приводить к образованию на пойме местных понижений и озер, не обусловленных ходом руслового процесса, способствовать отчленению отдельных участков поймы и образованию островов, а также появлению длинных пойменных протоков. Так, например, наблюдающийся на многих реках Средней Сибири процесс отчленения участков поймы, сопровождающийся образованием характерных островов типа «кораблик», связан большей частью с явлениями термокарста.

Об этом достаточно уверенно можно судить потому, что плановые деформации русла на подобных участках, несмотря на большую извилистость реки и наличие правильных унаследованных современным потоком меандр, ничтожны. На это указывает наличие мощного бечевника, сложенного нередко траповыми, отшлифованными льдом плитами, препятствующими плановым деформациям русла. Русловой процесс здесь обычно сводится только к сползанию крупных галечных отмелей (р. Марха).

7. ТИПИЗАЦИЯ РЕЧНЫХ ПОЙМ

а. Основные предпосылки к типизации пойм

Из приведенного в предыдущих разделах материала о формировании речного аллювия видно, что следует различать два основных вида пойм: современные и унаследованные. Всякая пойма может образовываться только в результате плановых деформаций речного русла, т. е. при условии накопления русловой фации аллювия, образующей фундамент поймы. В современных поймах этот процесс продолжается, в то время как в унаследованных поймах он обычно не выражен и, следовательно, образования новых участков поймы не происходит. Однако, кроме плановых деформаций (накопления русловой фации аллювия), одновременно с ними происходит другой процесс — образование пойменной фации аллювия, приводящее

к росту пойм в высоту, и ее разрушение под воздействием пойменных течений. Возникающие при этом деформации поверхности поймы имеют место и в современных и в унаследованных поймах, поскольку последние продолжают затопляться при разливах рек.

Таким образом, современная пойма свойственна тем типам руслового процесса, при которых имеют место плановые деформации русла, либо в форме развития излучин (разновидности меандрирования), либо в виде образования островов или параллельных руслу грив, как например, бывает при побочневом типе руслового процесса. Очевидно, что при разных типах плановых деформаций русла будут создаваться и различные типы пойм, т. е. каждому типу плановых деформаций русла должен соответствовать и свой тип поймы.

Исходя из этих предпосылок следует попытаться выявить те особенности пойм, которые возникают при разных типах руслового процесса, т. е. создать типизацию пойм, увязанную с типами русловых деформаций. Это важно потому, что если бы такая типизация удалась, то можно было бы создать ограниченное число решений инженерных задач, возникающих при освоении пойм, тем более, что роль поймы при освоении рек неуклонно возрастает. Не говоря о давно практикующихся мелиоративных мероприятиях на поймах, мероприятиях, получающих все больший размах, в последние годы резко возросло строительство всевозможных коммуникаций через пойменные реки. Через поймы прокладывают мостовые переходы, газо- и нефтепроводы, кабельные линии связи, водоводы водозаборов самого различного назначения. На поймах строятся насосные станции и всевозможные другие сооружения. В последнее время участилось использование пойм под строительство промышленных сооружений и даже жилых кварталов.

Возникает потребность в знании пойменных процессов и в связи с необходимостью оценки деформаций пойм под воздействием регулирования стока, о чем уже упоминалось в начале книги.

Положение усугубляется тем, что, как показывают многочисленные случаи, речные поймы, веками существующие как устойчивые образования, способны разрушаться в короткие сроки в результате даже самых небольших воздействий на их поверхность. Известны многочисленные случаи, когда одно только нарушение дернового покрова поймы гусеницами тягачей приводило к образованию за одно половодье протоков шириной в сотни метров и длиной, измеряемой в километрах (р. Обь у Сургута и др.). Известны также случаи, когда незаконченная траншея трубопровода за одно половодье превратилась в протоку шириной до 400 м (р. Днепр ниже Киева), а также случаи, когда прорывы береговых валов вследствие неосторожной рас-

пашки вызывали выносы на пойму песков, заносящих участки длиной в сотни метров, слоем в 0,5—1,0 м (р. Пологметь).

При решении всех этих задач первостепенное значение приобретает оценка устойчивости поймы. Как будет видно из приведенного обзора типизаций пойм, этот вопрос в предшествующих работах или не затрагивался или оказывался слабоосвещенным. Это понятно, если учесть, что исследования гидравлики пойменного потока чрезвычайно скудны, а если такие материалы и имеются, то они ограничиваются обычно изучением потока на границе русло—пойма. Вместе с тем на поймах возникают сложные системы течений.

Таким образом, крайне необходим учет движущей силы пойменных деформаций — пойменных течений. В этом направлении предстоит еще сделать многое.

б. Предшествующие работы

Вопросами типизации пойм занимался ряд исследователей, в том числе Р. А. Еленевский (1936), В. Р. Вильямс (1949), Е. В. Шанцер (1951), Н. И. Маккавеев (1955) и др. Имеется также типизация пойм для нужд гидрографических исследований, изложенная в Наставлении (1949).

В. Р. Вильямс (1949), основываясь на оценке крупности аллювия, слагающего пойму, порядка его напластования и рельефа поверхности, выделяет два основных типа пойм.

К первому типу относятся поймы с ровной гладкой поверхностью, зернистым и в то же время глинистым составом аллювия. Во второй тип им выделяются поймы с гривистым рельефом поверхности, сложенные слоистыми песчаными грунтами.

Р. А. Еленевский (1936) указывал, что глинистые почвы отнюдь не всегда характерны отсутствием слоистости и ровной поверхностью; в равной мере слоистость и гривистый микрорельеф поверхности не всегда ссоответствуют песчаной пойме. Например, на реках Каме и Волге распространены гривистые поймы, сложенные глинисто-зернистыми отложениями, а на реках Припяти и Днепре — поймы с плоской ровной поверхностью, сложенные песчаными отложениями. Поймы рек Верхней Оки и Верхнего Дона при такой же поверхности сложены слоистыми глинистыми отложениями.

Р. А. Еленевский в основу своей типизации пойм кладет признаки, которые он называет геоморфологическими, а именно рельеф поверхности поймы, сложение и ее происхождение, считая, что эти признаки наиболее полно отражают специфические свойства аллювиального процесса, формирующегося под влиянием особенностей, в первую очередь рельефа и водного режима.

Схема типизации пойм, предложенная Еленевским (1936), показана на рис. 62.

Отдавая должное работе Еленевского по систематизации пойм, выполненной на широкой географической основе, Шанцер

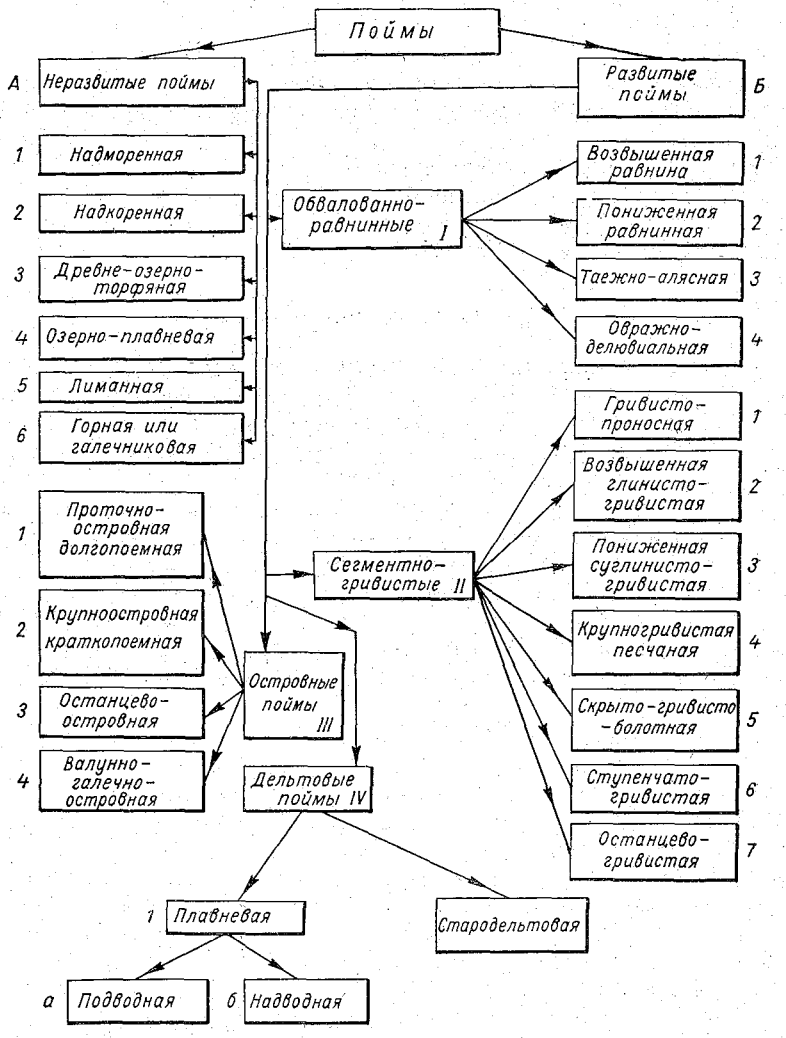


Рис. 62. Схема типизации пойм, по Р. А. Еленевскому.

(1951) отмечает, что основным ее дефектом является отсутствие связи процесса поймообразования с характером плановых деформаций русла, играющих ведущую роль в этом процессе.

В. Р. Вильямс и Р. А. Еленевский формирование пойм связывают только с осаждением взвешенных наносов в половодье и деятельностью последнего по формированию рельефа поверхности поймы, т. е. с образованием только пойменной фации аллювия, упуская из вида процессы образования русловой фации, лежащей в фундаменте любой поймы.

Надо также иметь в виду и следующее. Типизация пойм, выполненная Еленевским, охватывая виды и речных, и озерных пойм, не разграничивает и не обособливает их. Не разграничиваются также современные и древние поймы. Вместе с тем процесс накопления аллювия в речных и озерных условиях резко

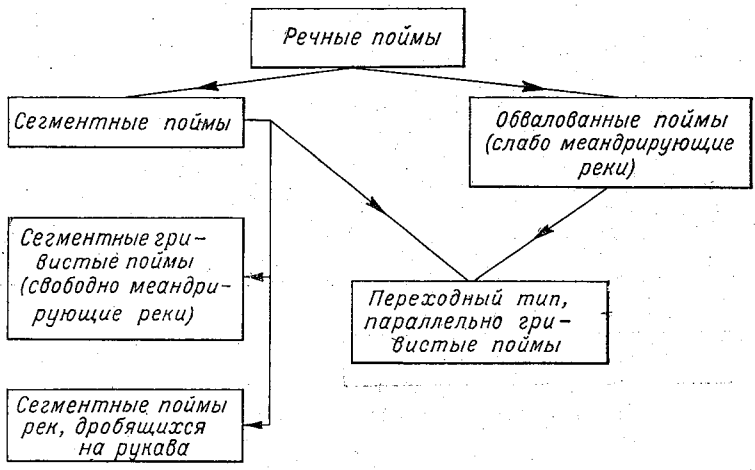


Рис. 63. Схема типизации пойм, по Е. В. Шанцеру.

различен, а выделение древних и современных пойм имеет первостепенное значение при выполнении гидролого-морфологического анализа, о чем неоднократно уже указывалось выше.

Типизация пойм, предложенная Шанцером, относится к современным поймам, и в основе ее лежит учет характера плановых деформаций речного русла (рис. 63).

Типизация пойм, предлагаемая Н. И. Маккавеевым, дана на рис. 64.

Поймы у впадения притоков по этой типизации отличаются от всех иной крупностью и порядком напластования слоев отложений, чем на участках, расположенных выше и ниже устья притока. Порядок напластования отложений на участках, расположенных у устьев протоков, зависит от соотношения сроков прохождения половодий и паводков на главной реке и на притоке и от соотношения крупности транспортируемых ими наносов.

Поймы в районах глубинной эрозии, по Маккавееву, отличаются малой шириной, редко превышающей ширину русла, крупным составом аллювия, в который нередко включены продукты разрушения склонов долины (коренных пород), плохой сортировкой аллювия по ширине поймы и слаборазвитым рельефом ее поверхности. Встречается он на участках речных долин, где русло реки часто оказывается врезанным в коренные породы и таким образом дно его залегает ниже подошвы аллювия. Дельтовые поймы Н. И. Маккавеев детально не рассматривает.

В классификации пойм Н. И. Маккавеев (вслед за Вильямсом и Еленевским) основным фактором образования пойм считает процесс накопления пойменной фации аллювия и эрозионные процессы возникающие при затоплениях. Вместе с тем он

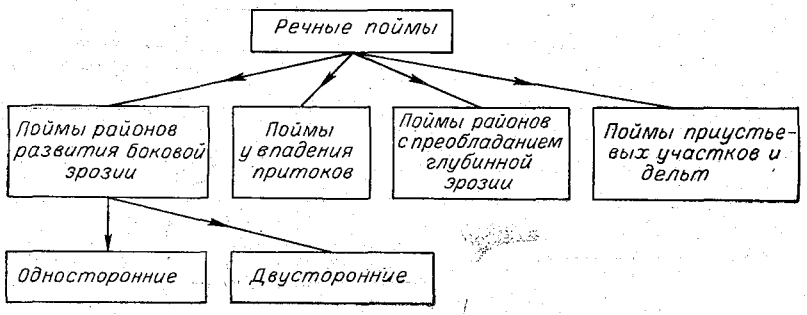


Рис. 64. Схема типизации пойм, по Н. И. Маккавееву.

делает попытку учесть влияние на формирование поймы плановых смещений русла, выделяя поймы районов развития боковой эрозии. Деление пойм в этих районах на односторонние и двусторонние не представляется удачным.

Н. И. Маккавеев связывает двустороннюю пойму со случаем, когда русло реки, приближаясь то к одному, то к другому склону долины, разделяет пойму на отдельные массивы. Каждый массив рассматривается как отдельная единица поймы. Однако этот случай не является единственным условием существования двусторонней поймы. Он может иметь место преимущественно в условиях ограниченного меандрирования. При свободном меандрировании ширина поймы может оказаться значительно большей, чем ширина пояса меандрирования. По сути дела, поймы, о которых пишет Н. И. Маккавеев, следовало бы назвать чередующимися.

Кроме того, при свободном меандрировании односторонняя пойма может быть этапом в развитии двусторонней поймы, но может быть устойчивым образованием, причем не только на меандрирующей реке. Например, наличие односторонней поймы

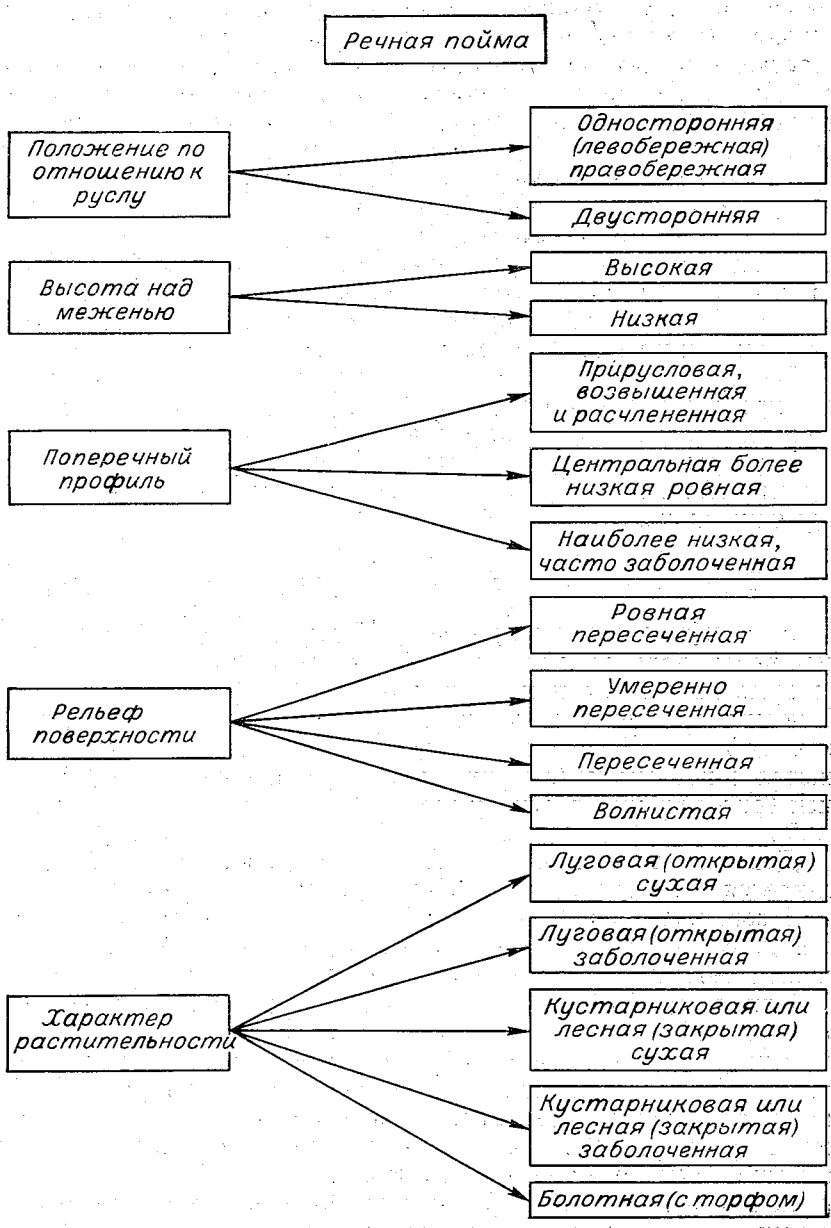


Рис. 65. Гидрографическая типизация пойм.

на р. Оке выше г. Касимова связано с тем, что русло, перемещаясь по дну долины, оказалось прижатым к правому ее склону. Однако, судя по тенденциям развития излучин на этом участке, уже намечается отход реки от правобережного склона и русло ее со временем должно занять центральное положение в пределах дна долины. Наряду с этим обширная левобережная пойма р. Волги, русло которой прижато к правому склону долины, занимает это положение очень длительное время и отхода ее от правого склона ожидать нельзя.

Типизация пойм, выполненная для нужд гидрографических исследований (рис. 65), которая, как упоминалось, имеет лишь служебное значение, учитывает только внешние признаки: положение по отношению к руслу, ширину, высоту, расчлененность поверхности и характер растительности.

Из приведенной сводки различных типизаций пойм видно, что предложение Шанцера наиболее тесно увязано с характером плановых деформаций русла.

В результате того, что удалось типизировать характер плановых деформаций русла, появляется возможность расширить эту типизацию.

в. Типизация пойм в связи с типами руслового процесса

Классификационные признаки. Итак, задача типизации речных пойм сводится к выявлению тех особенностей их строения, которые возникают при различных типах руслового процесса. Основные из этих особенностей обусловлены характером плановых деформаций русла, поэтому тип руслового процесса является основным классификационным признаком, который должен быть положен в основу выделения главнейших разновидностей пойм.

Действительно, при данном типе руслового процесса складывается и определенный характер плановых очертаний поймы, ее поверхности, систем, возникающих при ее затоплении течений и, следовательно, определенный тип эрозионно-аккумулятивной деятельности потока на затопленной пойме.

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. Например, свободное меандрирование может развиваться и в условиях очень хорошо выраженных половодий и при относительно слабовыраженных. Вследствие этого пойма может затапливаться и на значительную глубину и

ежегодно и на относительно малую глубину и неежегодно. При прочих равных условиях это должно привести к различной высоте поймы, различиям в ходе эрозионно-аккумулятивных процессов на ее поверхности и т. п. 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 вторичные факторы, не связанные непосредственно с русловым процессом, например, болотообразовательные процессы, карст и термокарст, делювиальные выносы и т. п.

Таким образом, кроме основных признаков, кладущихся 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.

Под совокупным воздействием типа руслового процесса, его факторов и природных факторов, не связанных с русловым процессом (болотообразование, делювиальные процессы, карст и термокарст и др.), образуются поймы с определенным морфологическим обликом, гидравлическими условиями и как результат их взаимодействия с определенным типом ее деформаций (плановых и высотных).

Структурные элементы поймы. Поскольку при различных разновидностях меандрирования в ходе плановых деформаций русла создаются обособленные друг от друга участки поймы, то появляется возможность выделить в пределах поймы ряд структурных элементов и представить пойму состоящей из отдельных массивов, которым свойственны общие и морфологические, и гидравлические особенности.

При ограниченном меандрировании подобные массивы представляют собой участки поймы, огибаемые одной излучиной русла, а с внешней стороны, ограниченные склонами террас или долины. При свободном и незавершенном меандрировании наряду с плановыми деформациями отдельной излучины наблюдается однонаправленное смещение по дну долины серии излучин, в результате чего река переходит от одного склона долины к другому, образуя обширные пойменные массивы, на которых в период затопления поймы могут возникать транзитные течения, спрямляющие серии излучин. В этом случае под пойменным массивом следует понимать участки поймы, с одной стороны ограниченные положением серии излучин русла, а с другой внешней границей поймы — склонами террас или самой

речной долины. При невыраженных долинах или в случаях, когда современная пойма сливается с унаследованной, за внешнюю границу пойменного массива можно принять границу распространения современных вееров перемещения русла или внешнюю границу самого удаленного от реки транзитного течения.

При пойменной многорукавности или при осередковом типе руслового процесса понятие пойменный массив менее четко. Но и в этом случае, по-видимому, целесообразно представить пойму, состоящей из отдельных структурных элементов, выделив участки расширений и сужений, участки с различной ориентировкой основных протоков, с различными по крупности пойменными островами и т. п., так как они могут отличаться друг от друга различным строением поймы, гидравлическими условиями при ее затоплении и как следствие различным характером деформаций.

При установлении границ пойменного массива важно иметь представление о схеме затопления поймы. При затоплении пойменного массива, по-видимому, следует различать три основные фазы.

Первая фаза — выход воды на пойму, который часто начинается с затопления пониженных низовых ее участков и через прорывы в обычно повышенной верховой части пойменного массива. В ходе затопления поймы верховые и низовые границы размыва постепенно сближаются и лишь после их слияния возникает общий транзитный поток.

Вторая фаза затопления поймы охватывает период существования этого транзитного потока.

Третья фаза — прекращение транзитного потока в результате снижения уровня воды при спаде половодья и образование вновь разобщенных затопленных участков, площадь которых постепенно уменьшается вследствие слива воды с поймы.

Как следует из приведенной схемы, до появления транзитного потока верховые и низовые места проникновения воды на пойму работают в противоположных направлениях, вода устремляется к центральной части поймы. После возникновения транзитного потока места входа воды на пойму в верховой и в низовой частях массива работают однонаправленно — через верховые участки вода поступает на пойму, через низовые — сливается с нее. С прекращением транзитного потока места входа воды на пойму начинают вновь работать разнонаправленно, т. е. вода сливается и через верховые, и через низовые участки.

Таким образом, в пределах пойменного массива существуют своего рода «водоразделы», лимитирующие возникновение и исчезновение спрямляющего транзитного потока а места входа и слива воды с поймы обычно носят сосредоточенный характер

и часто бывают представлены эрозионными образованиями, особенно четко выраженными в верховой части пойменного массива (прорывы в береговых валах или по ложбинам, когда старые береговые валы в результате меандрирования обрываются к реке).

Линия пойменного «водораздела» может быть очень сложной благодаря сложности рельефа поверхности поймы. Можно также представить себе случаи, когда она окажется невыраженной и водоразделом будет служить отметка поверхности воды в обширном пойменном понижении, которое может оказаться в центральной или притеррасной частях поймы.

Особенности деформаций поверхности поймы зависят от характера взаимодействия пойменных потоков с поверхностью поймы. Характер этого взаимодействия должен быть различным в разные фазы половодья (паводков). В начальные и конечные фазы подъема уровня зависимость пойменных течений от особенностей строения поверхности поймы должна проявляться особенно ярко. Направления течений в этот период подчиняются ориентировке основных аккумулятивных и эрозионных образований на пойме. При наибольших глубинах затопления эта зависимость ослабевает или даже исчезает вовсе, а направление и скорость течений будут определяться лишь разницей отметок уровня воды в начале и конце данного пойменного массива.

Основные типы пойм. Используя указанные выше признаки, можно выделить следующие типы пойм.

1. Поймы ограниченно меандрирующих рек. Это поймы простейшего типа, представляют собой обособленные, чередующиеся по длине реки массивы, повышенные в верховой части и пониженные в низовой, т. е. имеющие уклоны вдоль реки и несколько наклоненные к притеррасной части поймы (от русла). Сползание излучин, свойственное ограниченному меандрированию, приводит к полной переработке всего пойменного массива. Затопление этих массивов начинается в их низовой части. При максимальном затоплении устанавливаются параллельные оси долины течения. Динамическая ось потока в этот период близка к ее положению в межень и в общем совпадает со средней линией русла. Такое размещение пойменных течений обусловливает возникновение на ровной, или слабоволнистой (береговые валы вдоль русла) поверхности поймы эрозионных образований, ориентированных вдоль реки и наиболее разработанных в верховой части массивов (в низовой части обычно наблюдается отложение материала). В притеррасной, в общем несколько пониженной части, возможно возникновение течений с повышенной скоростью (рис. 66).

2. Поймы свободно меандрирующих рек. Они характерны значительно более сложным строением поверхности,

рельеф которой представлен разновысотными системами веров перемещения русла в виде дугообразных изогнутых валов и ложбин между ними, образованных в ходе плановых деформаций русла. Последние выражаются в постепенном развитии излучин, достигающих состояния петли. Прорыв перешейка такой петли и приводит к появлению обособленного участка

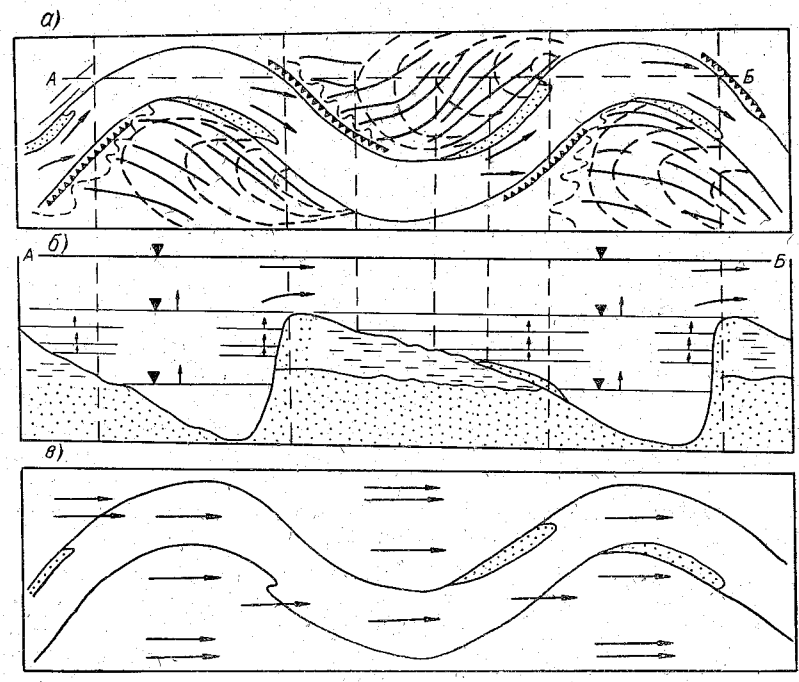


Рис. 66. Пойменные массивы при ограниченном меандрировании.

а — план участка; жирные линии — береговые валы, пунктир — последовательные положения границ затопления, устанавливающиеся при подъеме уровня воды (преобладает затопление пойменных массивов с их низовых частей); *б* — продольный профиль поймы по линии АБ (см. рис. *6б а*). Показаны положения уровня воды при его подъеме. В начальном периоде существования транзитного потока на пойме ощущается влияние на него рельефа поверхности поймы. При наибольшем затоплении это влияние ослабевает или полностью исчезает; *в* — течения при наибольшем затоплении. Они хорошо согласуются с общими очертаниями русла реки. В притеррасной части поймы могут возникать сосредоточенные течения.

поймы, огибаемого старицей (действующей, с водой или занесенной). Последующий повторяющийся цикл деформаций ведет к появлению новых систем веров.

Легко видеть, что сложный рельеф поверхности поймы, создающийся при свободном меандрировании обусловливает возникновение и сложных течений в период ее затопления и лишь при очень больших глубинах затопления влияние рельефа поймы на структуру пойменных течений может значительно ос-

лабевать или вовсе не проявляться. В этот период на пойме могут возникать и развиваться эрозионные и аккумулятивные образования, не связанные в своей ориентировке и по размерам с ориентировкой основного гривистого рельефа поймы (прорывы береговых валов, возникновение пойменных протоков и конусов их выноса, перерезающих систему вееров перемещения русла и т. п.) (рис. 67).

Таким образом, при оценке взаимодействия рельефа поймы и пойменного потока необходимо оценивать его применительно к каждой фазе затопления.

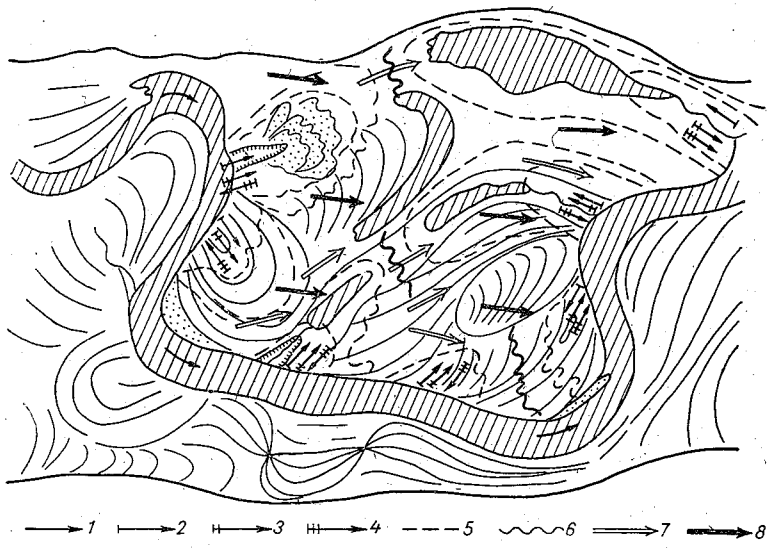


Рис. 67. Пойменный массив при свободном меандрировании.

1 — направление движения воды в местах ее входа и выхода с поймы; *2* — начало затопления; *3* — период существования транзитного потока; *4* — спад; *5* — границы затопления при подъеме уровня воды; *6* — границы встречи вод, поступающих с низовой и верховой частей пойменного массива (пойменные водоразделы); *7* — течения в начале установления транзитного потока, обтекание повышенных участков поймы; *8* — движение воды при наибольшем затоплении, влияние рельефа поймы ослабевает или полностью исчезает.

В первой и третьей фазах затопления большое влияние на пойменные течения оказывает гривистый рельеф поймы, т. е. валы и ложбины между ними, образующие каждый веер перемещения русла.

В начале второй фазы затопления, т. е. при возникновении транзитного потока, роль отдельных валов и ложбин ослабевает, но существенное влияние приобретают разновысотные их системы — веера перемещения русла. Именно благодаря им намечаются постоянные от года к году пути движения воды по пойме и образуются русла этих пойменных потоков, в межень

полностью высыхающих или сохраняющих воду обычно лишь в плёсах, т. е. отчлененных от русла реки.

При достижении уровнями воды на затопленной пойме наивысших отметок основное влияние на пойменный транзитный поток оказывает уже характер расположения в пределах речной долины всего пойменного массива.

Итак, на поймах свободно меандрирующих рек устанавливаются сложные системы течений и в соответствии с этим возникают разнообразные и далеко не всегда согласующиеся с рельефом их поверхности эрозионно-аккумулятивные образования.

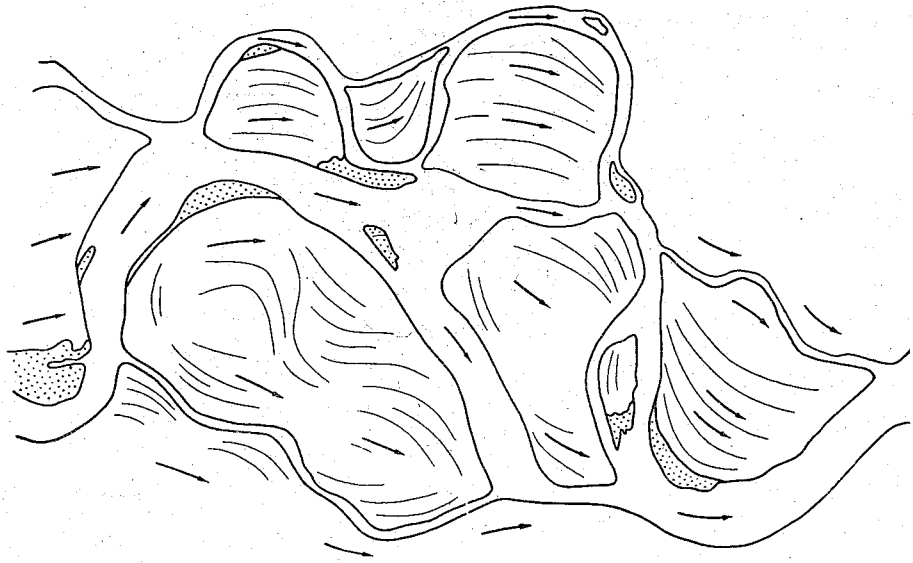


Рис. 68. Пойменный массив при незавершенном меандрировании. Течения на пойме согласуются с рельефом ее поверхности и направлением проток во все фазы развития транзитного потока.

3. Поймы рек с незавершенным меандрированием (рис. 68). При описании поймы свободно меандрирующих рек указывалось о существовании постоянных сосредоточенных потоков по затопленной пойме, образующихся при обтекании разновысотных сегментов поймы (вееров перемещения русла). Пойма рек при незавершенном меандрировании представляет собой дальнейшее развитие этих протоков, возникающих на участках с большой глубиной затопления поймы, которые превращаются в постоянно действующие (в половодье и межень) спрямления излучин. Однако поскольку при незавершенном меандрировании в пределах данного массива поймы структура ее рельефа менее сложна, чем при свободном меанд-

рировании, и обычно бывает представлена одним веером перемещения русла, то и структура пойменных течений оказывается менее сложной. По этой же причине направление спрямляющих протоков определяется не наличием разновысотных систем веров перемещения русла, а положением динамической оси транзитного потока в период наивысших уровней. Последнее может быть в известной мере обусловлено притеррасным понижением или направлением особенно крупных ложбин между валами, образующими данный сегмент поймы. Так как предшествующими исследованиями (Попов, 1964) было показано, что с увеличением степени затопляемости поймы спрямления происходят на все более ранних стадиях развития излучин, то можно предположить, что основным фактором, определяющим положение спрямления, все же является положение динамической оси потока, обусловленное общим характером расположения пойменного массива в пределах речной долины и по отношению к смежным выше- и нижерасположенным участкам реки.

Итак, при незавершенном меандрировании течения на пойме в общем значительно менее сложны, чем при свободном меандрировании. Основные деформации поймы выражаются в ее разрушении на подмываемых берегах излучин, в образовании новых участков на выпуклых берегах и в размывах поверхности, ведущих к появлению спрямляющих протоков. При этом указанные деформации развиваются длительное время однонаправленно — постепенно развиваются излучины и постепенно разрабатываются спрямляющие протоки. Последние в начальных стадиях развития меандрируют, образуя серии небольших излучин, в последующем расширяются, а затем вновь переходят к меандрированию, но уже в виде деформаций одной излучины, которая в дальнейшем повторяет весь цикл развития, и спрямляются. Старое же главное русло начинает постепенно заноситься, но еще длительное время может определять местные пойменные течения.

4. Поймы рек с русловым процессом типа пойменной многорукавности (рис. 69). На участках с поймой, еще более хорошо затопляемой, чем при незавершенном меандрировании, последнее может привести к появлению сложной системы протоков. Кроме того, возникают протоки, обусловленные местными течениями, образующимися сосредоточенным стоком воды через эрозионные образования, расчленяющие склоны долины. Вследствие этого сеть протоков еще более усложняется. В ходе деформаций протоков возможно занесение одних и возникновение других из них. Так, например, при перемещении по руслу крупных песчаных гряд они могут перекрывать начало меньших протоков, впадающих в главную. По мере сползания этих гряд возможно возобновление течения в этих меньших протоках.

Каждый из пойменных протоков может развиваться и деформироваться по разным схемам. На одних из них могут возникать разновидности меандрирования, на других побочневый тип процесса и т. п. При пойменной многорукавности пойменные массивы, по-видимому, следует выделять по правилам, указанным для свободного меандрирования, при этом ориентируясь на русла главных протоков. В целом на подобном участке основные течения обычно согласуются с направлением протоков и лишь при очень высоких половодьях могут возникнуть течения, направление которых не согласуется с направлением протоков и определяется общей ориентировкой русла в речной долине,

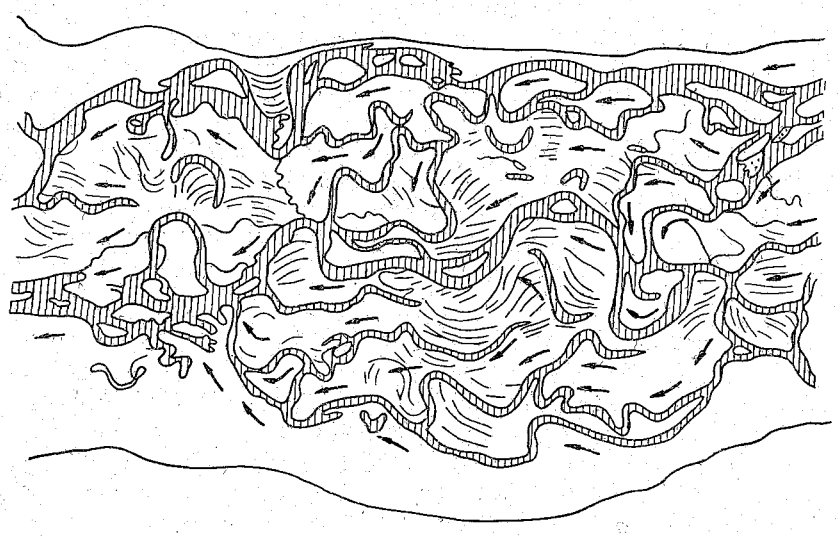


Рис. 69. Участок реки с пойменной многорукавностью. Течения на затопленной пойме хорошо согласуются с направлением протоков во все фазы половодья.

т. е. общими продольными и поперечными уклонами ее дна, а также течениями протоков реки или течениями, возникающими в местах выхода в долину реки сосредоточенного стока (по большим логам, оврагам и другим эрозионным образованиям, расчленяющим склоны долины).

Из сказанного следует, что при наличии пойменной многорукавности на пойме, при ее затоплении хотя и устанавливаются течения в общем согласованные с направлением основных протоков, т. е. так же как при незавершенном меандрировании, но схема таких течений значительно усложняется и оказывается изменчивой во времени вследствие возможности занесения и возобновления проток.

5. Поймы рек с осередковым типом руслового процесса. Пойма, создающаяся при русловом процессе осередкового типа (русловая многорукавность), по сути дела, представляет собой аккумулятивные русловые образования — осередки-острова (рис. 70). Они обладают различной степенью подвижности, среди них встречаются песчаные или галечные отмели с обнаженной поверхностью и неразвитой пойменной фацией аллювия и ежегодной большой подвижностью, а в других случаях острова с развитой пойменной фацией, задернованные или даже облесенные, сохраняющиеся от года к году, но претерпевающие большие переформирования при очень высоких половодьях, когда они, по сути дела, представляют собой также

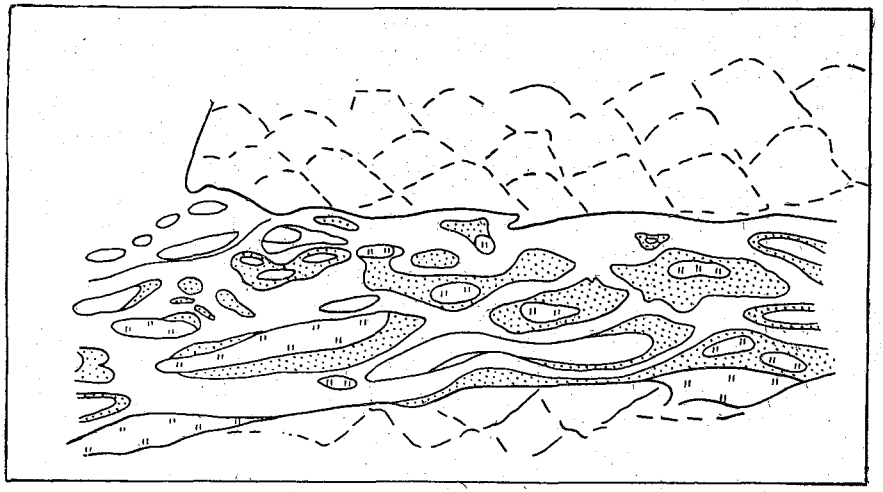


Рис. 70. Островная пойма, формирующаяся в ходе руслового процесса осередкового типа. Пунктиром показаны занесенные пойменные протоки.

подвижные русловые образования. На такой пойме постоянно происходящее перераспределение стока между протоками создает особенно большую неустойчивость пойменных течений и возможно резкое изменение их направлений. Как следствие, в этих случаях возможны и резкие внезапные переформирования всего островного пойменного массива, выражающиеся в полном исчезновении старых форм и появлении новых.

Разновидности типов пойм. В предыдущем разделе были выделены основные типы современных пойм, создавшиеся при русловом процессе разного типа.

Поскольку русловой процесс, как это следует из его гидролого-морфологической теории, определяется тремя основными факторами — особенностями водного режима, стока наносов и ограничивающими условиями (особенность геологического

строения речных долин), то и поймы, создающиеся в ходе развития руслового процесса различного типа оказываются также зависимыми от этих трех факторов.

Выше было показано, как видоизменяются поймы в результате изменений водного режима. Это особенно ярко видно на примере пойм рек со свободным и незавершенным меандрированием и с пойменной многорукавностью. При переходе от первого из этих типов к следующему основное воздействие оказывали увеличение глубины и длительности затопления поймы, т. е. особенности водного режима. Главные особенности пойм при ограниченном меандрировании обусловливаются влиянием ограничивающего фактора, препятствующего развитию свободных меандр.

При осередковом типе руслового процесса наряду с указанными выше факторами особенно ярко проступают особенности стока наносов, в частности, соотношения крупности взвешенных и донных наносов. Действительно, на реках с поймой, представляющей собой обнаженные, обычно галечниковые подвижные отмели, по-видимому, существует очень большая разница между крупностью донных и взвешенных наносов. Последние оказываются настолько подвижными, что не образуют пойменной фации аллювия.

По мере того как взвешенные наносы получают возможность осаждаться на пойме, т. е. уменьшается разница в крупности взвешенных и донных наносов, на обнаженных осередках появляется наилок, поверхность их оказывается закрепленной, возникает островная пойма, представленная русловыми островами. На участках с высокими половодьями и паводками и с большим количеством взвешенных наносов такие острова могут достигать большой высоты. В условиях, когда разница в крупности взвешенных и донных наносов оказывается еще менее значительной, создаются обширные поймы, свойственные уже другому типу руслового процесса — пойменной многорукавности. Так как в этом случае разница в крупности взвешенных и донных наносов еще значительна, поверхность поймы может размываться пойменными протоками, возникающими при ее затоплении, что ведет к крупным переформированиям сети протоков. При очень большой размываемости этой пойменной фации, по-видимому, возможен переход от пойменной многорукавности к русловому процессу осередкового типа. Это же обстоятельство, возможно, играет роль и в процессе незавершенного меандрирования.

Таким образом, намечается смыкание всех типов руслового процесса в единую замкнутую цепь, т. е. возможность последовательного перехода от одного типа руслового процесса к другим при соответствующих изменениях факторов руслообразования.

Состав наносов, транспортируемых потоком, сказывается и на образовании разновидностей пойм при ограниченном, свободном и незавершенном меандрировании.

При ограниченном меандрировании, когда переносимое потоком количество взвешенных наносов оказывается недостаточным для формирования пойменной фации, поймы оказываются в общем пониженными, но при этом имеют резко выраженную верховую часть пойменного массива и сильно пониженную низовую; имеются обычно достаточно отчетливые ряды береговых валов, ориентированных согласно с положением излучины, и мелкие эрозионные острова на ее поверхности. В случае же, когда имеются условия, благоприятные для формирования пойменной фации, разновысотность верховых и низовых частей пойменных массивов оказывается меньше, сами массивы в целом повышены, поверхность их выравнена и хорошо закреплена растительностью, при этом, если река образует слабовыраженные излучины, а следовательно, динамическая ось потока близка к ее положению в межень, то наилок откладывается в отдалении от русла, благодаря чему поверхность поймы может приобрести даже уклон к руслу реки.

В условиях свободного меандрирования при малом содержании в потоке взвешенных наносов создаются песчаные поймы с неразвитой пойменной фацией аллювия. При наличии значительного содержания взвешенных наносов формируются так называемые глинистые поймы, характерные двучленным аллювием с сильно развитой пойменной фацией.

Песчаные поймы подразделяются на ряд разновидностей.

Песчано-гривистые поймы характерны следующими основными свойствами. Русло подвержено интенсивным плановым деформациям, выражающимся в циклическом развитии излучин, достигающем состояния петель и завершающемся образованием стариц. Благодаря частым и интенсивным переформированиям излучин и в связи с этим перемещением не только их, но и всего пояса меандрирования общая поверхность поймы относительно одновысотна и нарушается только различно ориентированными системами грив и ложбин вееров перемещения русла.

Считается, что этому способствует и обычно бывающий на таких реках плавный подъем уровня и не слишком глубокое затопление.

Однако несмотря на это, основной рельеф поймы может нарушаться в результате возникновения течений на ее поверхности в период затопления и образования под их воздействием рытвин, глубоких промоин, захватывающих и старицы (возможно, они при этом и выпрямляются, образуя цепи вытянутых озер).

Продолжительность затопления таких пойм 10—30 дней.

Характерно близкое залегание уровня грунтовых вод, их выклинивание в ложбинах, что может приводить к заболачиванию последних.

В силу указанных особенностей песчаных пойм правомерно ожидать, что в период максимального затопления четко выраженные местные течения могут создаваться только в результате постепенной разработки поверхности поймы, например, в результате переливов потоков из стариц, озерок и т. п. Гривистый рельеф будет на пойменных течениях главным образом в период начала подъема и в конце спада. Этот тип пойм обычно встречается

на реках со слаборасчлененными, распаханными и имеющими песчаные покрытия водосборами. Такие поймы имеются на Днепре до Днепропетровска, Припяти, Среднем Днепре и на многих крупных и средних реках этого бассейна. Можно выделить и другие разновидности песчаных сегментно-гривистых пойм.

Ступенчато-гривистая пойма. Образование этой разновидности песчаных пойм связано, по-видимому, с появлением предпосылок к образованию надпойменной террасы (широкая долина с сосредоточением активной части потока в относительно узкой полосе), с увеличением объема взвешенных наносов, переносимых потоком, формирующих наилок, способствующий закреплению поверхности поймы, со снижением базиса, эрозии, например, в результате спрямления петель, снижением уровня воды в водоприемнике, сработкой намеченных гряд и т. п.

В этих условиях создаются две возрастные ступени — пониженная, молодая, гривистая с деятельным аллювием и глубоким залеганием грунтовых вод благодаря высокой фильтрации (зернистые почвы) и повышенная старая пойма с плоским сглаженным гривистым рельефом. Старая пойма обычно далеко отстоит от реки, часто имеет повышенную часть, обращенную к реке. Нередко покрыта лесом (особенно Сибирь). На ней эрозионно-аллювиальные процессы значительно ослаблены.

В этих условиях более вероятно появление сосредоточенных течений при максимальном разливе, в частности на границе высоких ступеней, отклонение течений при обтекании участков ступеней в плане имеющих выпуклые очертания. Такая пойма распространена в верхнем течении Печоры, Камы, Оби, Белой и других рек, особенно на севере.

Останцево-гривистая пойма. По мысли Еленевского, она представляет собой дальнейшую стадию развития ступенчатой поймы, обусловленную колебаниями базиса эрозии, ослаблением воздействия факторов, способствующих закреплению поверхности поймы, наконец, большой древностью существования речной долины. Р. А. Еленевский указывает, что в лесной зоне чаще встречаются ступенчатые поймы, в безлесной, более древней, останцево-гривистые.

Надо полагать, что отсутствие ступеней и переход к системе разновысотных плоскостей на поверхности поймы может быть связан и со смещениями пояса меандрирования, когда останцы представляют собой не остатки надпойменной террасы, а вышедшие из зоны плановых деформаций русла участки поймы, расположенные внутри отчленившихся староречий (петель русла). В этих условиях правомерно ожидать особенно сложных течений по пойме, включая и обратные, даже при наибольшем ее затоплении.

Таковы основные разновидности пойм, возникающие при свободном меандрировании и относительно малой роли в формировании поймы взвешенных наносов, т. е. в условиях, когда пойменная фация аллювия оказывается слаборазвитой.

Иные типы пойм возникают в ходе свободного меандрирования, когда взвешенные наносы способны формировать мощный наилок, развитую пойменную фацию аллювия. К ним принадлежат следующие разновидности пойм.

Возвышенно-глинисто-гривистая пойма. Сохраняя основные черты песчаных пойм, глинистые типы характерны обычно большей высотой (накопление наилка), относительным ослаблением плановых деформаций и деформаций поверхности поймы течениями, возникающими на ней в период затопления. Для возвышенно-глинисто-гривистой поймы характерна пониженная прирусловая часть, что, по-видимому, связано с плохими условиями осаждения здесь наилка, формирующего мощные отложения лишь вдали от оси потока. Такие поймы создаются обычно при длительном их затоплении и половодьях с ноздним максимумом (май, июнь).

Уровни грунтовых вод залегают глубоко (до 10 м и на гривах). Наблюдается разрыв с грунтовыми водами коренных берегов. Пониженная прирусловая часть поймы создает благоприятные условия для образования в период

затопления сосредоточенных течений вдоль русла. Вместе с тем возвышенная ступень поймы не способствует возникновению значительных течений в периферийных частях поймы из-за небольшей глубины затопления.

Пониженно-суглинистая пойма. Этот тип пойм связан как с укрупнением состава взвешенных наносов (образуют суглинки), так возможно и с уменьшением глубины продолжительности затопления поймы (10—30 дней). Р. А. Еленевский утверждает, что этот тип распространен больше, чем предыдущий.

При этом типе пойма понижена, прирусловая часть не выражена, зато имеется пониженная притеррасная, на которой возможен длительный застой воды, а в период половодья возникновение параллельных реке потоков.

Обычно пониженно-суглинистые поймы распространены на менее крупных реках, чем возвышенно-глинисто-гривистые.

При незавершенном меандрировании различные соотношения между донными и взвешенными наносами также приводят к образованию следующих разновидностей пойм.

Крупно-гривисто-песчаные поймы. В условиях, когда транспортируемые потоком взвешенные наносы не формируют мощной пойменной фации, так же как и при свободном меандрировании, формируются песчаные поймы, благодаря спрямлениям излучин носящие островной характер. Поверхность их неустойчивая, кустарниковая или древесная растительность обычно распространена только в виде бордюров вдоль русла.

Проточно-островная пойма, выделяемая Еленевским, соответствует переходу от незавершенного меандрирования к пойменной многорукавности. Для нее характерна уже значительно развитая пойменная фация. При этом появляется большое число вторичных протоков, которые в условиях неустойчивой поверхности крупно-гривисто-песчаных пойм (см. выше) не образуют столь постоянной сети из-за частых переформирований поверхности.

Что касается влияния соотношений взвешенных и донных наносов при других типах руслового процесса, то этот вопрос уже был рассмотрен выше.

Надо также отметить, что существует и ряд других факторов, оказывающих воздействие на особенности пойм. Так, Еленевский выделяет поймы: таежно-алласную (образующуюся в районах проявления термокарста), овражно-делювиальную и скрытно-гривистую (покрытую накоплениями торфа).

Легко видеть, что это лишь вторичные факторы, не связанные с русловым процессом. Однако они оказывают настолько существенное влияние на формы и свойства пойм, что могут вызвать их коренные изменения. Например, наличие делювиально-овражных выносов может придать пойме общий наклон к руслу и изменить порядок напластования аллювия. То же возможно и при наличии болотообразовательного процесса. Очевидно, эти факторы наиболее существенны на узких поймах, т. е. поймах ограниченно меандрирующих рек. Явление термокарста способно вызвать появление протоков на пойме, не обусловленных особенностями водного режима или соотношением взвешенных и донных наносов.

Рассматривая типы речных пойм, необходимо более подробно, чем это было сделано раньше, остановиться на поймах, которые могут быть названы унаследованными.

Под термином унаследованные поймы, как указывалось, следует понимать такие, происхождение которых обусловлено не работой современного потока. Такие поймы могли создаться в речных долинах, сформировавшихся в период сброса флювиогляциальных вод, причем часто они могут быть не речного, а озерного происхождения. Такие образования могут называться поймой современной реки только потому, что они представляют собой затапливаемую часть дна речной долины.

В качестве примера можно назвать пойму р. Волхова, достигающую ширины десятков километров, в то время как русло современной реки практически не деформируется в плане. Таковы и поймы Припяти, Нижней Волги,

Оки в пределах Мещерской низменности, Оби на участках многорукавного русла и другие, где общая ширина затапливаемой части дна долины также составляет десятки километров. В пределах этих участков современная пойма, т. е. созданная работой современного потока, занимает лишь небольшую часть затапливаемого дна долины.

Унаследованная пойма может быть и на узких участках речных долин, но с недеформирующим в плане руслом, т. е. может иметь небольшую ширину.

Таким образом, типы и размеры унаследованных пойм могут быть различными.

Р. А. Еленевский для случая отсутствия или слабого развития плановых деформаций выделяются две группы пойм. Первая из них названа неразвитой, вторая обвалованной.

К неразвитым поймам отнесены случаи, когда русло реки врезано в коренные, ледниковые или древне-озерно-аллювиальные породы, или в торфяники. Вследствие врезанности русла в плохо поддающиеся размыву породы плановые деформации его отсутствуют. Пойма имеет плоский нерасчлененный рельеф, слаборазвитую пойменную фацию аллювия, причем сосредоточенную в прирусловой части. Например, при протекании такой реки среди торфов небольшой слой современного аллювия обычно не перекрывает всего поперечника поймы и сосредоточен в прирусловой части. В период затопления такой поймы образующиеся на ней местные течения не производят значительных размывов. Такие поймы встречаются на малых и средних реках.

Выделяются следующие разновидности.

Надморенная пойма. Русло реки врезано в морену. Имеются небольшой береговой вал вдоль прямого русла, тонкий суглинистый наилок. Характерна для узких долин (например, р. Волги до устья Унжи).

Надкоренная пойма. Русло врезано в коренные породы. Поверхность ровная, но благодаря бурным половодьям испещрена многочисленными эрозионными рытвинами, ничего общего не имеющими с гривами и ложбинами, наблюдающимися на реках с плановыми деформациями.

Древне-озерно-торфяная пойма. Река протекает через озеровидные расширения, имеет малые уклоны, в низовьях часто подпружена. Имеется повышение поймы в прирусловой части (продольный вал вдоль русла). За этим повышением, образованным отложениями наилка, обычно следуют травяные болота, иногда перекрытые глинистым наилком. Рост торфа приводит к появлению незатапливаемых участков поймы. Наилок представлен тонкими глинистыми отложениями. Такие поймы обнаруживаются на реках Пише, Сереже, Дубне, Яхроме и др.

Озерно-плавневая пойма — подпруженная озером река с многочисленными протоками. Острова — низкие, тростниковые, округлые, зарастающие озерки. На островах имеются узкие прирусловые валики высотой 30—50 м, на неостровных участках русла их нет. Маломощный торф — результат вторичного заболачивания вследствие подъема уровня грунтовых вод. Общая поверхность поймы почти горизонтальная. Деформации протоков ничтожны.

Лиманная пойма образуется в результате отложения аллювия вдоль непостоянных путей стока талых вод на степных равнинах (кочующие лиманы). Они характерны тремя параллельными ступенями вдоль путей стока.

Из приведенных описаний видно, что все эти разновидности пойм представляют собой типичные унаследованные поймы. Термин «неразвитые» относится не к ширине поймы, а к слабому развитию на ней аллювиальных процессов (отсутствие русловой фации аллювия, слабый наилок, слабая эрозия поверхности).

Группа обвалованно равнинных пойм имеет следующие общие характеристики (по Р. А. Еленевскому).

Русло реки слабо деформируется в плане. Сильно развита пойменная фация, представленная глинистыми отложениями. Прирусловая пойма быстро

нарастает, вследствие чего оказывается повышенной до 3—5 м над пониженной притеррасной частью. Это повышение образует прибереговой обширный вал. Такие поймы широко распространены в лесной и степной зонах. В результате нарастания вала поток оказывается все более стесненным, вследствие чего активизируется и начинается вынос песчаных наносов на поверхность поймы.

Подтипы обвалованной поймы разнятся главным образом по ее высоте.

Возвышенно-равнинная пойма. Обычно наблюдается в сужениях долин и нередко достигает 6—10 м над меженью, часто распахана. Основание поймы сложено глинистыми отложениями, на поверхности часты выносы песков вследствие интенсификации руслового процесса. В притеррасной части часты выносы делювия. Затопление кратковременное, не более 10 дней. Такие поймы имеются на Верхней Оке, Верхнем Дону, Верхней Сухоне, Верхней Печоре.

Пониженно-равнинная пойма. Ее ширина достигает уже 10—15 км, высота над меженью 2—5 м. Притеррасная часть часто заболочена, рост торфов выводит участки поймы из зоны затопления. Иногда в притеррасной части имеются топи, заросли ольхи, иногда солончаки. Такие поймы обнаруживаются на р. Волхове, на участках рек Оки, Москвы, Клязьмы, Верхней Суры, Белой.

В низовьях рек Кавказа формируется сильно заболоченная обвалованная пойма (засоленные болота), которую Еленевский называет плавневым вариантом обвалованной поймы.

Как следует из приведенных описаний, обвалованные поймы Еленевского, по-видимому, также могут быть отнесены к унаследованным, но подвергающимся более интенсивному воздействию современного руслового процесса, приводящему к образованию прибереговой повышенной ее части (прибрежного вала). Можно также предположить, что образование прибереговой повышенной части может происходить на различных поймах, созданных современным русловым процессом, поскольку это проявление общей для всех рек закономерности отложения взвешенных наносов в пойме.

Кроме перечисленных типов, Еленевский выделяет группу пойм, формирование которых обусловлено не только работой реки, но и морскими влияниями. Это так называемые дельтовые поймы, отличающиеся островным характером. Наряду с крупными имеется большое число малых островов. Все они низменные, сложены тонким песком и имеют слаборазвитую пойменную фацию, представленную глинистым наилком.

По степени устойчивости островов выделяются стародельтовая пойма (верховья дельты, наиболее устойчивые острова), плавневая пойма — неустойчивые, низменные (0,5—1 м над меженью) острова, недавно вышедшие из-под уровня моря, характерные повышенными берегами в верховой части и пониженным ухвостьем, и подводная пойма — формирующиеся вдоль внешней морской окраины поймы подводные скопления наносов в виде песчаных затопленных отмелей.

Наконец, следует упомянуть о параллельно-гривистых поймах, выделяемых и Еленевским и Шанцером. Как указывалось ранее, происхождение этих пойм не вполне ясно. Р. А. Еленевский эти поймы называет гривисто-проносными. Они характеризуются следующими особенностями. Рельеф поверхности представлен рядами высоких параллельных прямолинейных гряд, русло реки также прямолинейно. Течения наблюдаются на всем поперечнике поймы и в ложбинах, вследствие этого возникают длинные узкие промывные озерки. Основная толща поймы сложена русловым аллювием, песками. Пойменная фация развита слабо и представлена супесями и суглинками. Нередко на гребнях валов она отсутствует. Е. В. Шанцер считает, что указанные гривы (валы) образуются в результате разрастания в длину побочней вдоль одного из берегов, которые, сливаясь, формируют общий береговой вал. Противоположный берег поэтому начинает размываться. Судя по приведенному описанию, подобный тип пойм должен был бы образовываться при русловом

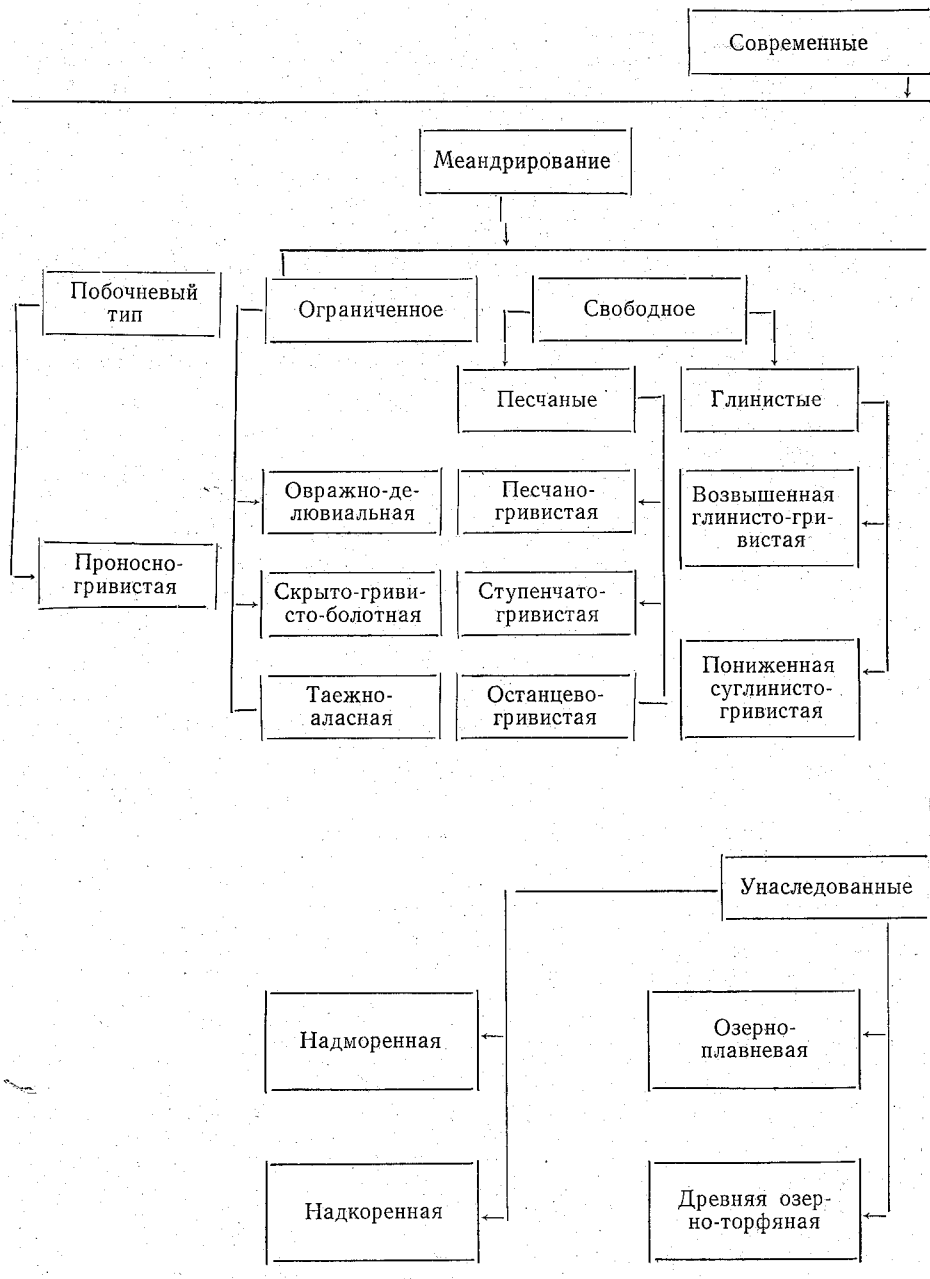
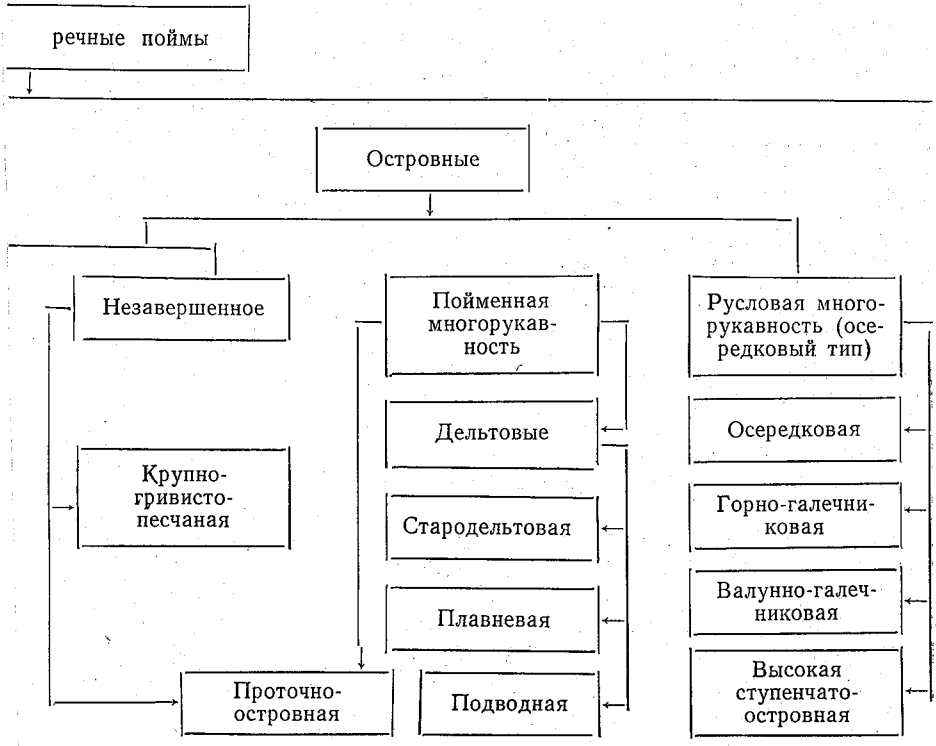
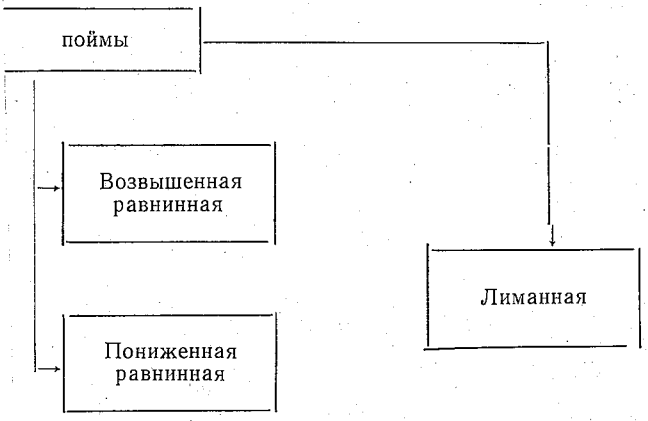


Рис. 71. Схема, показывающая связь разновидностей пойм, цесса, предложен





выделенных Р. А. Еленевским, с типами руслового проными ГГИ.

процессе побочневого типа. Однако остается не вполне ясным, почему валы формируются только у одного из берегов и почему происходит смещение прямолинейного русла параллельно самому себе.

Имеются попытки объяснить это смещение действием кориолисовых сил, наличием поворота долины в начале участка, а формирование вала из побочней наличием большого скопления наносов в начале участка. Охват всего поперечника поймы течениями при ее затоплении связывают с узостью долин на таких участках. В какой мере эти объяснения соответствуют наблюдаемому явлению, сказать трудно, и вопрос еще подлежит исследованию. Во всяком случае подобная пойма встречается обычно на крупных реках (участки р. Волги ниже Казани, от р. Унжи до р. Камы, нижняя Кама, средний и нижний Дон, Белая) и, действительно, на участках сужений долин, в условиях интенсивного транспорта донных наносов. Из сказанного следует, что отнести эту пойму к русловому процессу побочневого типа можно только очень условно.

Все описанные выше типы пойм систематизированы в виде графической схемы, помещенной на рис. 71, иллюстрирующей их связи с типами руслового процесса.

Итак, наличие обширных пойм на участках рек, в настоящее время не имеющих существенных плановых деформаций, объясняется тем, что эти поймы созданы не современным потоком, а являются унаследованными им от его прошлой деятельности при иных природных условиях. В частности, современные реки часто протекают через озеровидные расширения долин с дном, представленным древней озерной поймой. Иногда древняя пойма, сформировавшаяся потоком, более водоносным, чем современный, сложена и значительно более крупным древним аллювием, толща которого может играть роль ограничивающего фактора.

Выделение границ этих древних, унаследованных современной рекой пойм очень важно для гидролого-морфологического анализа руслового процесса и помогает выявить определяющие его факторы. Примеры подобного анализа приведены в работе автора (1956).

Под влиянием факторов, непосредственно не связанных с русловым процессом, перечисленные выше типы пойм могут существенно видоизменяться. В табл. 20 дан краткий перечень этих факторов и показан характер их воздействия на пойменный процесс.

8. О ТИПАХ ОСТРОВОВ

При проектировании гидротехнических и иных сооружений на многорукавных реках всегда важно оценить характер деформаций островов, на которых могут быть расположены эти сооружения или их части, например, устои мостов, мачты линий высоковольтных передач, насосные станции, водозаборы и сооружения воздушных и подводных трубопроводов и т. п.

Таблица 20

Схема, иллюстрирующая характер влияния на формирование пойм вторичных факторов

Пойма

Эоловые воздействия	Делювиальные выносы	Характер подошвы аллювия	Болотообразовательный процесс	Явления вечной мерзлоты	Горные условия	Дельтовые условия
Искажение первоначального рельефа поверхности пойм, например, гипертрофированная высота береговых валов, образование вторичных дюн и т. д.	Нарушение начального рельефа, его занесение, придание наклона к руслу в результате выхода на пойму конусов выноса и обвалов	При русле, залегающем несколько выше коренных пород или коренных отложений, создаются условия благоприятствующие развитию процесса меандрирования. При врезанных в них руслах невозможность существенных плановых деформаций. При наличии карста образование провальных форм на пойме, интенсивный водообмен с подземными водами	Нивелирование начального рельефа поймы при мохових, появление общего наклона ее поверхности к руслу. Потери возвратных вод	Образование провальных форм вследствие вытаивания вечной мерзлоты; появление озерков, протоков; отчленение от поймы островов. Слои мерзлоты препятствуют врезанию и способствуют преобладанию плановых деформаций	Образование ступенчатых подвижных многопроточных галечных пойм при высоких подъемах уровня воды. Образование возвышенной островной поймы (высота до 20 м) с ядром из крупных каменистых обломков	Быстрое переформирование обычной в этих условиях островной поймы. Появление подводных островов, постепенно превращающихся в надводные. Разнообразие типов пойм даже на небольших участках в зависимости от типа плановых деформаций. В верхних участках развито преимущественно незавершенное меандрирование, в низовьях — осередковый тип процесса. Большой сток донных наносов мелкозернистых фракций

Особенности строения и развития островов помогают выявлять тип руслового процесса, особенно в тех случаях, когда нет возможности осуществлять морфологический анализ для участков большого протяжения или требуется детально осветить переформирования короткого участка.

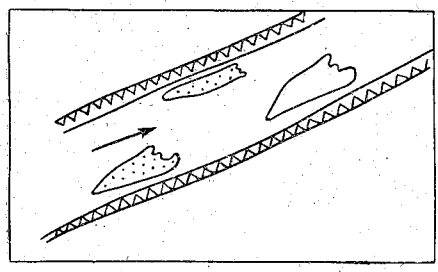
Из приведенной типизации руслового процесса и типизации речных пойм принципы и приемы определения характера деформаций островов выступают достаточно отчетливо. Однако для удобства использования этих данных при решении различных частных вопросов приводится сводка о типах островов и характере их деформаций с описанием присущих им внешних признаков. Наряду с переформированием нередко возникает ряд вторичных процессов, сказывающихся на ходе развития островов. К такого рода процессам следует отнести случаи заноса протоков между островами, ведущего к объединению островов в один крупный. Возможны также случаи расчленения островов. Все эти случаи особенно часты при русловом процессе осередкового типа. При этом же типе руслового процесса (правда редко) наблюдаются случаи отчленения ранее причленившихся к пойме островов, что скорее всего связано с перераспределением течений, вызванным деформациями смежных островов.

Схема основных типов речных островов

Русловые острова

Отторженные побочни (побочневый процесс)

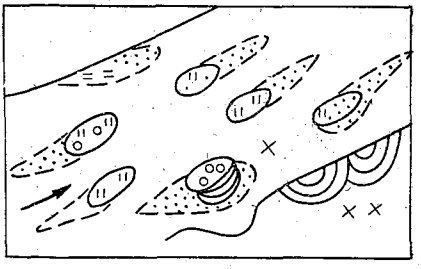
Сползающие, близкие к трехугольной форме, со слабозакрепленной поверхностью острова. Асимметричный поперечный профиль — береговая часть пониженная, обращенная к реке повышенная, низовая выше верховой. С увеличением возраста поверхность выравнивается. Поверхность острова ниже поймы. Слабый наилок. Отторженные побочни при осередковом типе процесса имеют более мелкозернистые отложения, чем острова-осередки. Отторжениям способствует большая устойчивость берегов, чередование половодий и паводков разной высоты, большие объемы переносимых потоком донных наносов. Могут быть и на малых и на больших реках (Волге, Оке, Висле и др.).



Острова-осередки (осередковый процесс)

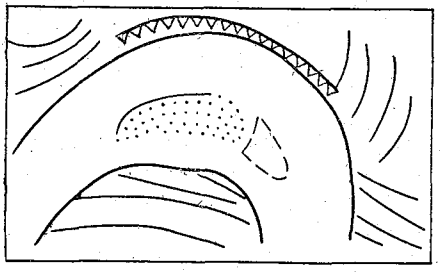
Сползающие или пятящиеся, каплевидной формы острова с развитыми соответственно движению приверхами и ухвостьями. Поверхность их ниже

поймы. Слабое развитие пойменной фации. Встречаются на участках выхода рек из гор, при большом объеме донных наносов, низкой межени, во время которой закрепляются растительностью. Образуются в результате разрастания крупных гряд-осередков. Узкие протоки у островов часто начинают меандрировать и на обращенной к берегу части острова образуется серия береговых валов (гривистый рельеф), остров смещается в сторону от реки и может вклиниться в пойму. Берег острова, обращенный к реке, обычно размывается. Вклинившиеся острова образуют на пойме характерный рельеф — дугообразные гривы, выходящие концами к реке.



Отторженные пляжи (свободное и незавершенное меандрирование)

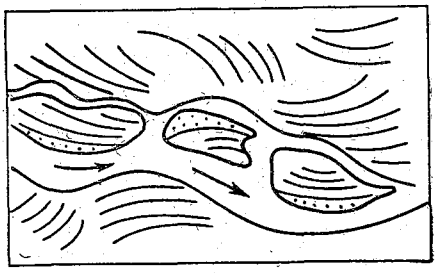
Серповидной формы малоподвижный остров, образованный в результате отчленения пляжа, свободно меандрирующей излучины. При наличии значительного перекоса водной поверхности в половодье иногда наблюдается отчленение низовой косы пляжа поперечным протоком из реки в затон. По мере разработки спрямляющего протока вогнутая часть острова размывается. Выпуклая часть, обращенная к главному руслу, может продолжать нарастать и смещаться в сторону вогнутого берега излучины. При переходе основной части потока в спрямление это смещение прекращается. В результате занесения староречья возможно причленение острова. Возможна его полная сработка.



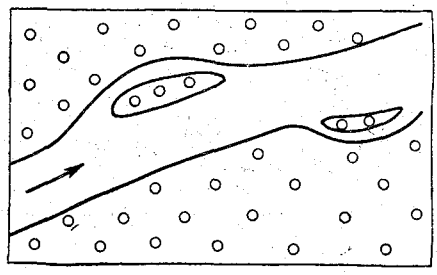
Пойменные острова

Промывные (незавершенное меандрирование)

Малоподвижные острова обычно полулунной формы с гривистым рельефом поверхности. Рисунок грив хорошо согласуется с их положением в основании излучины. Поверхность обычно наклонна к спрямлению русла, благодаря которому образовались острова. Порядок напластования аллювия такой же, как на пойме. Спрямления излучин происходят на разных стадиях развития, поэтому острова могут быть разных размеров. Спрямление, образующееся при высоких затоплениях поймы (низкие песчаные поймы) в результате промыва ее поверхности по ложбинам, развивается обычно десятилетиями. Наиболее интенсивный размыв острова идет со стороны спрямления. При переходе в него главной части расхода воды прежнее главное русло отмирает.



Острова вытаивания



Острова обычно удлиненной формы, одновысотны с поймой, часто поросшие лесом, без упорядоченной структуры рельефа. Порядок напластования аллювия такой же, как на пойме. Образуются путем отчленения участков поймы вследствие возникновения протоков по понижениям, создавшимся в результате неравномерного вытаивания вечномерзлых грунтов. В разработке протоков деятельное участие принимает ледоход. Могут причленяться к берегам.

При побочневом типе процесса и в случае образования островов путем отчленения пляжей, меандрирующих излучин, особенно вероятны процессы расчленения острова поперечными течениями, создающимися вследствие общего перекоса поверхности воды, наблюдающегося в половодье. Подобные явления встречаются и на островах-осередках, в местах относительного сужения пойм.

В особую группу следует отнести острова-останцы, т. е. острова, сложенные в основе коренными породами. Иногда они обусловлены обтеканием местного купола коренных пород, иногда отчленением меандр долины, иногда являются унаследованными. Подобные острова могут быть прикрыты речным аллювием. Для их определения особенно большое значение имеет изучение форм долинных меандр и геологических профилей речных долин. В особую группу следует выделить и острова, которые могут образоваться также вне связи с определенным типом современного руслового процесса, благодаря скоплениям наносов у случайных препятствий в русле реки (скопление валунов, топляки, сваи, затонувшие плавсредства, остатки различных сооружений на реке). В ходе своего развития они могут принять формы, близкие к описанным выше (см. схему основных типов речных островов). Выявление причин образования островов требует изучения их аллювия. Нарушения в факторах руслового процесса естественно сказываются на развитии островов и способны вызвать их существенную перестройку, а иногда даже полную сработку островов (в случае смещения базисов эрозии, прекращения или ослабления поступления наносов и т. п.) или их интенсивное разрастание и объединение. Подобные изменения особенно ярко проявляются при русловых процессах побочневого и осередкового типов, т. е. в условиях больших объемов донных наносов, переносимых потоком.

Глава X

МОРФОЛОГИЧЕСКИ ОДНОРОДНЫЕ УЧАСТКИ

1. ПРИНЦИПЫ ВЫДЕЛЕНИЯ УЧАСТКОВ

Если водный режим, сток наносов и ограничивающие условия сохраняют одинаковый характер на значительном протяжении реки, то правомерно ожидать, что крупные русловые формы в пределах такого участка будут однотипными. Это дает основание выделять на реках участки, в пределах которых тип крупных русловых форм, а следовательно, характер руслового процесса не претерпевает существенных изменений. Такие участки могут быть названы морфологически однородными.

Морфологически однородные участки можно выделять не только исходя из принципа включения в их пределы крупных русловых форм одного и того же типа, т. е. деформирующихся по одной схеме, но также из условия сохранения в их пределах величин измерителей этих форм. В последнем случае границы таких морфологически однородных участков обычно совпадают с границами практически бесприточных участков реки, если ограничивающие факторы и местные источники поступления наносов (например, подмыв склонов долины) на протяжении их не вносят изменений в ход развития русловых и пойменных деформаций. Под влиянием воздействия ограничивающих факторов или наличия местных источников поступления наносов ход развития крупных русловых форм может меняться и в пределах бесприточных участков рек.

Таким образом, при выделении морфологически однородных участков при соблюдении условия единообразия не только типов крупных форм русла, но и их размеров, анализ форм русла следует вести прежде всего по практически бесприточным участкам, а затем уже искать местные отличия этих форм в пределах протяжения реки между впадением притоков, существенно изменяющих водоносность исследуемой реки.

По этим причинам при выделении морфологически однородных участков после того как будут намечены границы, определяющие чередование руслового процесса различного типа (серий одинаковых по ходу своего развития крупных форм русла), следует более детально проанализировать особенности элементов макроформ — различных видов скоплений наносов в русле реки — перекатов, пляжей, побочней, элементов рельефа поймы, типов островов и т. д. В большинстве случаев они являются надежными показателями особенностей развития крупных форм русла данного типа. Анализ деталей строения крупных форм русла обеспечивается применением материалов аэрофотосъемки, дающих исключительно подробное изображение русла реки и рельефа пойм.

Руководствуясь описанием крупных форм речного русла, данным в главах III—VI, можно выделить основные типы морфологически однородных участков, перечисленные в табл. 14.

В дополнение к этим типам нужно учитывать дельтовые участки, внешние и внутренние дельты (естественного происхождения или искусственно созданные, например, в результате сооружеия водохранилищ).

2. ВОЗМОЖНЫЕ МЕСТНЫЕ РАЗЛИЧИЯ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА В ПРЕДЕЛАХ МОРФОЛОГИЧЕСКИ ОДНОРОДНЫХ УЧАСТКОВ

Указанные типы руслового процесса (морфологически однородных участков) не охватывают всего возможного разнообразия крупных форм русла, которые могут создаться под влиянием местных факторов руслового процесса, и предусматривают лишь наиболее распространенные на равнинных реках случаи.

При детальном анализе крупных форм русла с целью выделения морфологически однородных участков можно учесть следующие основные особенности развития руслового процесса.

При ленточногрядовом типе руслового процесса в пределах практически бесприточных участков можно выделить подучастки, на протяжении которых отмечается изменение шага гряд (уменьшение или увеличение), обусловленное местными особенностями протекания потока в связи с изменением по длине реки извилистости русла. В этом случае извилистость либо является результатом обтекания потоком извилин речной долины, либо (при наличии поймы) образовалась в условиях водоносности иной, чем современная и является, таким образом, унаследованной современным потоком.

Изменение шага излучин может быть обусловлено также изменениями по длине реки продольных уклонов и крупности донных отложений (например, в связи с наличием местных источников питания, подающих в поток наносы иной крупности, чем на выше лежащих участках, — подмыв склонов долины, овражные выносы и др.). Влияние основных из этих факторов подробно рассмотрено в главах II—VII.

При побочневом типе руслового процесса наряду с указанными выше признаками (гл. III) можно выделить подучастки с разной формой побочней (вытянутые, расширенные), с наличием частых случаев отторжений побочней (промывов в прибереговой части), связанных обычно с местными особенностями протекания потока и транспортирования донных наносов, с разной степенью закрепления поверхности побочней растительностью и т. д.

При ограниченном меандрировании (сползающих излучинах) можно выделить подучастки с разной степенью выраженности излучин, с разной степенью развитости пляжей

на выпуклых берегах излучин, со случаями их отторжения, с различными формами рельефа поверхности массивов поймы, огибаемой излучинами (характер общего наклона, различные образования на поверхности этих участков поймы — промывы, скопления наносов, следы береговых валов и т. п.), с разной степенью зарастаемости этих участков травяной, кустарниковой и древесной растительностью. Следует подчеркнуть, что при анализе русла и поймы, особенно на мелкомасштабных картах, участки с ограниченным меандрированием не следует смешивать со случаями, когда слабовыраженная извилистость обусловлена обтеканием потоком изгибов речной долины (например, на Днестре), или со случаями, когда слабая развитость излучин реки связана с прохождением руслом начальных стадий развития свободного или незавершенного меандрирования. Напомним, что при ограниченном меандрировании (сползающих излучинах) извилистость русла обычно не полностью совпадает с извилинами речной долины, что позволяет достаточно надежно выделить случаи, когда извилины русла связаны с вынужденным обтеканием потоком выступов склонов долины. От начальных стадий свободного и незавершенного меандрирования ограниченное (сползающие излучины) отличается тем, что в последнем случае общая ширина поймы мало отличается от ширины пояса меандрирования и гривистый рельеф ее поверхности не развит или полностью отсутствует. При свободном и незавершенном меандрировании этот гривистый рельеф поверхности поймы выражен обычно достаточно отчетливо и по границам его распространения легко определить внешние контуры поймы. Кроме того, на ней всегда присутствуют следы существования излучин в поздних стадиях развития как в виде веерообразно развернутых систем грив, так и в виде стариц и староречий.

Важно также учесть возможность существования на участке унаследованных форм русла и пойм. Так, например, на Верхней Оке, как указывалось выше, русло на ряде участков по своим плановым очертаниям напоминает ограниченно меандрирующее. Однако нигде не обнаруживается следов подмыва берегов, обычно хорошо задернованных, и главное, отсутствует четкая приуроченность различных форм скоплений наносов в русле реки к определенным его плановым очертаниям. Здесь можно встретить побочни, располагающиеся и на перегибах русла и у вогнутых, и у выпуклых берегов, что свидетельствует о подвижности этих образований во всяком случае много большей, чем скорость плановых деформаций берегов. Таким образом, этот признак позволяет обычно достаточно надежно судить о малой подвижности берегов русла и выделять случаи унаследованной извилистости.

При свободном меандрировании прежде всего можно попытаться выделить подучастки с разной степенью

развитости излучин (преобладание на участках не менее 3—5 излучин начальных стадий их развития, конечных стадий и т. п.), подучастки с разной степенью выраженности гривистого рельефа поймы, с особенно большим или малым числом стариц, и подучастки с особенностями формы излучин и формы стариц (подковообразные, серповидные, степенью их сохранности и т. д.). По форме излучины могут различаться степенью асимметричности плановых очертаний, может преобладать верховая или низовая асимметрия (наибольшие радиусы кривизны расположены соответственно в верховых или низовых частях излучин). На некоторых участках может наблюдаться тенденция к расчленению излучин русла на меньшие или объединение малых излучин в более крупные. Это случаи несоответствия современных условий протекания потока и транспорта наносов реки предшествовавшим, поэтому их выявление представляет существенный интерес.

Хорошо выраженные подковообразные старицы обычно свидетельствуют о недавнем отпадении петель русла, серповидные — о том, что концевые участки петли русла уже занесены наносами и т. д. Следует учесть соотношения между шириной пояса меандрирования и шириной поймы. Об особенностях протекания потока и, следовательно, деформаций русла может свидетельствовать и разная частота грив, образующих системы вееров перемещения речного русла.

В качестве признака для выделения подучастков можно использовать и особенности строения пляжей. Сильно развитые обнаженные высокие пляжи свидетельствуют о значительных количествах транспортируемых потоком донных наносов и благоприятных условиях их отложения.

Пляжи, сильно развитые в ширину и незаросшие, свидетельствуют об интенсивном продвижении противоположного вогнутого берега русла. Об этом же свидетельствуют и сильно отходящие от берега вытянутые низовые оконечности пляжей при сильно изогнутой серповидной форме этих кос (гл. V). Наличие на обнаженном пляже рядов зачаточных береговых валов в виде изогнутых параллельно выпуклому берегу песчаных гряд подчеркивает неравномерность быстрого размыва противоположного вогнутого берега. Хорошая зарастаемость пляжей (большая их задернованность, ряды кустарников) свидетельствует о не слишком большой интенсивности плановых деформаций русла в ходе развития излучин.

Узкие низовые оконечности пляжей, сильно продвинутые вниз по реке параллельно линии берегов и иногда заходящие даже на ниже расположенный вогнутый участок того же берега, обычно указывают на повышенный сток донных наносов на таком участке при относительно медленно развивающихся подмывах вогнутых берегов. Обнаженность этих кос (р. Иртыш) по-

казывает на особенно развитый транспорт донных наносов, задернованность (р. Ока и др.) — на то, что транспорт донных наносов идет относительно медленно или в короткие периоды. Особено четко выраженные системы береговых валов (высокие валы с глубокими ложбинами между ними) указывают на повышенный перенос донных наносов и незначительность наилка, а следовательно, на благоприятные условия для перемещения взвешенных наносов. Сглаженный гривистый рельеф дает основание предположить о благоприятных условиях отложения взвешенных наносов, наличии мощной пойменной фации аллювия и относительно небольшом объеме транспортируемых потоком донных наносов.

Наличие большого числа промывов в береговых валах (следов разрушения валов) обычно свидетельствует об изменении условий протекания потока, например, из-за разрастания валов в высоту, о повышении уровней высоких вод, разрушении отмостки, благоприятствующем врезанию потока, снижению базиса эрозии и т. д.

Можно также выделить участки с большим количеством останцевых образований. Это может свидетельствовать о неустойчивости склонов долин и террас, о характере связи руслового процесса с ограничивающими факторами. Иногда правомерно связать останцевые образования с явлениями вечной мерзлоты, которые могут обусловить как сохранение отдельных участков поймы и речных террас и склонов в ходе плановых деформаций, так и появление местных понижений их поверхности вследствие неравномерного вытаивания слоев многолетней мерзлоты (термокарст), приводящего к образованию протоков, островов и т. д. Следует обращать внимание и на карстовые явления на поверхности поймы (глинистый, химический карст), обусловливающие особенности развития эрозионных процессов на ее поверхности.

При незавершенном меандрировании перечисленные выше признаки также могут быть положены в основу выделения морфологически однородных подучастков. Однако главным остается выяснение стадий развития излучин, при которых начинают развиваться их спрямления (гл. VII, разд. 3), степень разработанности спрямлений на участке, степень затопляемости поймы, особенности развития морфологических образований в главном русле, у начала и конца спрямлений, тип руслового процесса в спрямлениях.

При осередковом типе руслового процесса следует учесть изменение степени развитости осередков-островов по длине реки (число, размеры, формы), зарастаемость поверхности, характер плановых и высотных деформаций, распространенность при осередковом процессе побочней, меандрирующих протоков и связанных с этим подмывов берегов поймы, ее

ширину, границы, характер рельефа. О значении этих признаков подробно указано в главах VI и IX. Встречаются случаи, когда в ходе сползания осередков-островов происходит их объединение в крупные острова и развивается процесс меандрирования или, наоборот, происходит процесс расчленения осередков-островов и переход к блуждающему руслу и т. д.

При пойменной многорукавности также можно выделить морфологические признаки, дающие основание для выделения подучастков. Можно учесть разную густоту вторичных протоков, попытаться выделить различия в причинах их появления (гл. VII), типы руслового процесса, развивающегося в них и т. д.

Выделяя морфологические однородные участки по внешним признакам, необходимо иметь в виду, что под влиянием множества местных факторов и их комбинаций на реках, могут возникать переходные разновидности крупных форм русла, возможно развитие руслового процесса смешанного типа, различные особенности деформаций описанных русловых форм. Так, например, довольно часто при незавершенном меандрировании или при свободном меандрировании в стадии спрямленного русла (стадии, непосредственно следующей за прорывом петель или даже серий петель) может одновременно с этими типами руслового процесса развиться движение ленточных гряд, побочневый или даже осередковый типы руслового процесса.

Иногда на реке наблюдается чередование крупных русловых форм разных типов, обычно связанное с влиянием местных факторов руслового процесса. В этом случае к морфологически однородным можно отнести такие участки, на которых наблюдается закономерное чередование макроформ разных типов. Так, например, к таким участкам можно отнести случаи, когда побочневый тип руслового процесса перемежается отдельными меандрирующими излучинами; или осередковый тип процесса сменяется участками побочневого типа или с разновидностями меандрирования. Наблюдаются случаи чередования по длине реки крупных русловых форм, развивающихся по схеме свободного меандрирования, с ограниченным или незавершенным или участками с врезанными меандрами. Это часто бывает на реках с широкими долинами в случаях, когда русло на участках значительного протяжения пересекает долину в поперечном направлении, затем река течет, прижимаясь к склону долины, потом вновь пересекает дно долины и течет у противоположного берега и т. д. Еще раз подчеркнем, что при гидролого-морфологическом анализе весьма важно выяснить, не являются ли исследуемые формы лишь унаследованными — реликтовыми и в настоящее время не развивающимися. Подробнее об этом говорилось в вводной части книги. При выделении морфологически однородных участков обязательно следует стремиться выяснять причины их су-

ществования, прежде всего имея в виду основные факторы руслообразования — сток воды, наносов и влияния ограничивающих условий. Поэтому при гидролого-морфологических исследованиях крайне важно привлечь данные о водном режиме, стоке наносов и геологических особенностях строения речных долин. Некоторые морфологически однородные участки возникают под влиянием хозяйственной деятельности. С этой точки зрения следует выделять участки, на которых развитие руслового процесса происходит в условиях зон выклинивания подпора и нижних бьефов сооружений (участки, на которых сказывается влияние измененного водного режима и стока наносов). Особо следует учесть влияние притоков, впадающих в эти зоны, так как изменение их базисов эрозии в связи с регулированием стока приводит к созданию новых условий питания главной реки наносами и, следовательно, к изменениям в ходе руслового процесса и на главной реке и на ее притоках (см. Введение).

На формирование русел и пойм оказывают влияние землечерпательные и русловыправительные работы, мостовые переходы, разработки строительных материалов в руслах рек и на поймах (добыча песка, гравия), осушительные и оросительные мероприятия на поймах и водосборе, агротехнические мероприятия, водозаборы и многие другие. Часть из них непосредственно воздействует на ход русловых и пойменных деформаций, часть оказывает косвенное влияние, воздействуя на сток воды и наносов.

Все это обусловливает необходимость при выделении морфологически однородных участков учитывать указанные выше факторы в полной мере. Из приведенных описаний типов руслового процесса и содержания этой главы видно, что выделение морфологически однородных участков возможно уже на ранних стадиях проектирования, так как это осуществляется на основе самых общедоступных и широко распространенных материалов — крупномасштабных топографических карт, лоцманских карт и особенно аэрофотоснимков, которые позволяют также с большей подробностью анализировать даже элементы отдельных крупных форм речного русла. Из гидрологических и геологических материалов обычно оказывается достаточно использовать опубликованные стандартные материалы, в частности, справочники, монографии, ежегодники и т. д. и реже архивные фондовые материалы. Правда непосредственных данных о русловом процессе в них обычно содержится очень мало, но различными косвенными показателями (при умелом использовании) можно оперировать достаточно удачно. Весьма полноценные данные для выделения морфологически однородных участков в условиях слабоизученных рек могут быть получены путем рекогносцировочных обследований, в частности, на основе морфологической съемки (гл. XIV).

3. ПРИМЕРЫ ВЫДЕЛЕНИЯ МОРФОЛОГИЧЕСКИ ОДНОРОДНЫХ УЧАСТКОВ

В качестве примера выделения морфологически однородных участков ниже помещаются их характеристики, полученные камеральным путем на основе перечисленных выше стандартных исходных материалов. Подробные данные для этих участков опубликованы в работах автора (1962, 1963).

р. Волга между Волгоградом и Астраханью. На первый взгляд кажется, что Волго-Ахтубинская пойма представляет собой сложный лабиринт протоков, образующих многочисленные, различных размеров и формы острова. Однако гидролого-морфологический анализ позволяет выделить, по крайней мере, четыре морфологически однородных участка (рис. 72) и установить роль различных групп протоков, т. е. детализировать русловой процесс не только для русла реки, но и на ее пойме.

Основные особенности гидрологической обстановки и морфометрии русла и поймы реки видны на рис. 72.

Можно отметить следующие факты.

Ширина русла сильно колеблется по длине реки и характерна чередованием длинных узких и коротких широких участков. Ниже с. Никольского выявляется переуглубленный участок русла. Отметки его дна оказываются лежащими примерно на 30 м ниже базиса эрозии (среднего уровня Каспийского моря). Между Волгоградом и с. Никольским уклоны свободной водной поверхности в общем остаются примерно одинаковыми в половодье и межень, а ниже с. Никольского и до г. Астрахани уклоны половодья превышают меженные. Это объясняется неизменностью уровня воды в устье реки при любом расходе и выявляет причину существования переуглубленного участка.

Высота правого склона долины с 20—30 м снижается к концу участка до 8—10 м. Закономерно снижается вниз по течению и высота поймы главного русла. В северной верхней части поймы она составляет 7—9 м, а низовой — 3—5 м. Высота поймы р. Ахтубы меньше, чем р. Волги. Поверхность центральной поймы ниже прирусловой. В северной части эта поверхность расположена на 5—6 м над меженью, в южной — на 2—2,5 м, т. е. ее отметки тоже убывают вдоль по реке. Отметки гребней пляжей и побочней в главном русле р. Волги не достигают отметок бровок пойменных берегов и лежат на 2—3 м выше меженного уровня. Таким образом, они являются относительно молодыми образованиями.

Ширина поймы убывает с 32 км у г. Волгограда до 12—15 км к с. Черному Яру и вновь увеличивается только ниже с. Верхне-Лебяжьего.

Вдоль рек Ахтубы и Волги, особенно четко в нижней половине участка, выявляются веера перемещения русла, хорошо со-

гласующиеся с его очертаниями. Характерной их особенностью на р. Волге является отсутствие полностью развернутых вееров, показывающее, что в пределах этого участка хорошо выраженных петель русла не образовывалось.

Рельеф поверхности центральных пойм сглаженный (значительный наилок), имеются только веера перемещения мелких протоков (ериков), выделяющиеся значительно более мелким рисунком.

На участках поймы, прилегающих к склонам долины (река на всем протяжении прижата к правому склону долины), обнаруживаются конусы овражных выносов. На многих участках река непосредственно подмывает склоны долины (преимущественно лёссовые отложения), образуя обширные волжские яры, т. е. имеются многочисленные местные первоисточники поступления наносов. Протоки, расчленяющие пойму, отчетливо разделяются на две основные группы — протоки собственно русла р. Волги и вторичные протоки, образовавшиеся при стекании вод по поверхности ноймы. Вторичные протоки представлены главным образом ериками — небольшими меандрирующими пойменными речками, отходящими от реки и текущими по межгривным ложбинам, вливаются нередко в отдаленные рукава р. Волги. Среди вторичных протоков выделяются так называемые прораны — результаты прорывов потоков через межрукавные участки. В их устьях нередки конусы выноса. Имеются озерки, представляющие собой старицы ериков, иногда старицы рукавов р. Волги. Часть озерков — ямы размыва, образующиеся при затоплении поймы.

Средние уровни высоких вод от начала участка и до с. Черного Яра повышаются на 85 см, а затем к Астрахани убывают на 5, 12 м. Вместе с тем благодаря потерям воды при затоплении поймы среднегодовой сток от Волгограда к с. Верхне-Лебяжьему (конец участка) убывает примерно на 2%, с 248,3 до 243,7 км^3/год. При этом на подъеме половодья среднемесячный сток у с. Верхне-Лебяжьего на 20—30% меньше, чем в начале участка, в период спада он больше на 11% в июне и на 31% в июле в связи с отдачей воды поймой. Осенью сток у с. Верхне-Лебяжьего вновь меньше, чем у г. Волгограда, затем возрастает при осенних паводках и вновь убывает в связи с потерями на ледообразование (декабрь, январь).

Данные о балансе наносов по участку приведены выше (стр. 27).

Состав донных наносов характерен мелкозернистостью, что и определяет при наличии значительных уклонов и, следовательно, скоростей течения (до 2 м/сек. в половодье) большую подвижность русловых образований. В русловых скоплениях преобладают частицы диаметром 0,25—0,05 мм, в пойменных — 0,05—0,005 мм. При этом замечается некоторое убывание по

длине участка крупности донных отложений (средний диаметр уменьшается с 0,4 до 0,17).

На фоне описанных выше морфологических и гидрологических условий в главном русле р. Волги развиваются следующие типы руслового процесса, причем границы морфологически однородных участков хорошо совпадают с описанными выше границами, разделяющими участки с разным характером основных факторов руслового процесса.

Участок Волгоград—Красноармейск (45 км) характерен развитием побочневого типа руслового процесса, сопровождающегося отторжениями побочней и превращением их в сползающие острова, смещающиеся вниз по течению со средней скоростью 170 м/год. Существование побочневого типа процесса связано с тем, что на протяжении всего участка русло реки непосредственно прижато к правому склону долины, что ограничивает возможность плановых деформаций русла. Вместе с тем начало участка совпадает с расширением долины и снижением уровня воды (на 1,6 м по сравнению с выше лежащим участком), что благоприятствует отложению наносов, способных формировать крупные скопления в русле. Отторжения их связаны с серией высоких половодий, прошедших на участке в 1914—1917, 1919, 1926, 1929 гг. Подъемы уровня воды достигали 9,3—9,7 м, обычные подъемы — 7—8 м. Они привели к усиленному поступлению наносов, вызвавшему объединение и разрастание побочней и последующие их отторжения. Одновременно со скоплениями наносов в русле имеет место усиленное отложение взвешенных наносов, приводящее к нарастанию поймы на значительную высоту (см. выше).

В конце участка имеется случай отторжения не только побочня, но и участка поймы на вынужденном изгибе реки, вызванном поворотом правого склона долины — образовался проток Куропатка, по которому так же, как и в главном русле движутся мощные побочни и начинается процесс меандрирования с образованием мелких излучин. В целом все перекаты являются сползающими побочнями.

Участок Красноармейск—Красный Яр (90 км). Влияние расширения долины значительно ослабевает и деформации русла приобретают более спокойный характер. Река получает возможность развиваться по схеме незавершенного меандрирования. Средний шаг излучин составляет 21 км, ширина пояса меандрирования 9 км, т. е. шаг излучин только в 2,5 раза больше ширины пояса меандрирования, а последняя лишь в 3 раза превышает ширину русла (3,3 км). Это показывает, что спрямления образуются на относительно ранних стадиях развития излучин, т. е. русловой процесс сохраняет еще значительную интенсивность. На фоне незавершенного меандрирования на прямолинейных участках, между излучинами, наблюдается

побочневый тип процесса также с часто отторженными побочнями. На подходе к вершинам излучин побочни превращаются в обширные пляжи, занимающие до $^2/_3$ ширины реки в межень

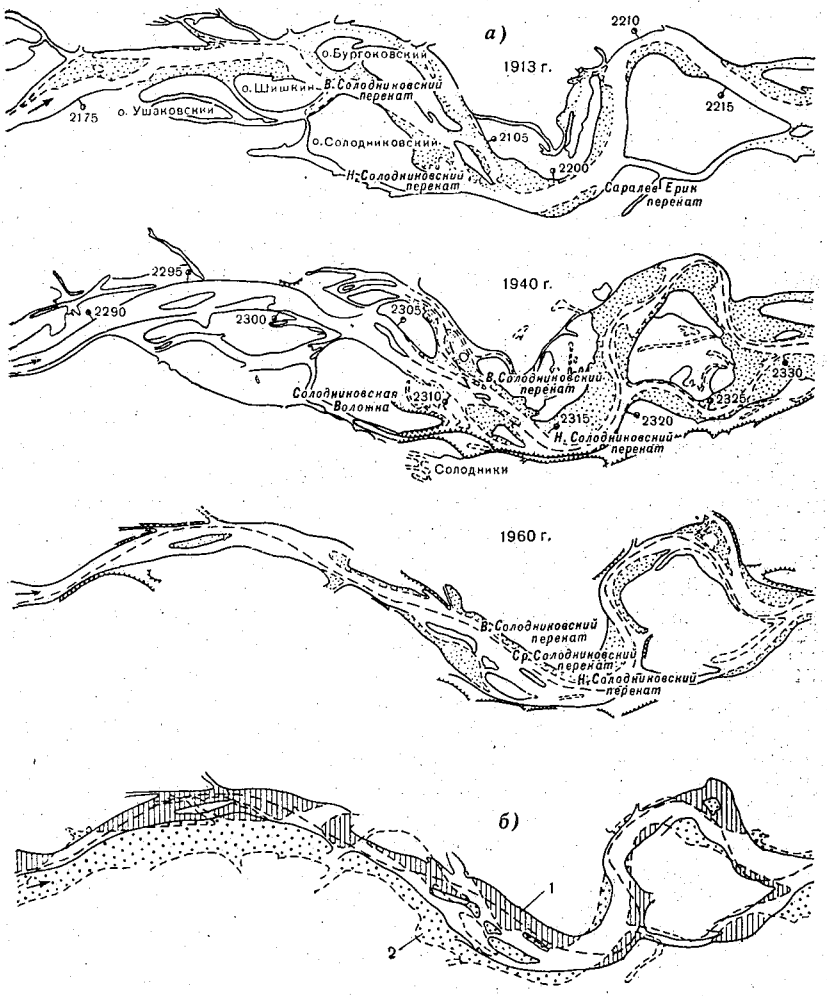


Рис. 73. Сопоставленные планы (*а*) и схема общих плановых деформаций берегов русла (*б*) на участке Солодниковских перекатов за период 1913—1940 гг.

1 — зоны размыва, *2* — зоны намыва.

(рис. 73). Это еще одно свидетельство о значительной интенсивности руслового процесса и транзитном характере движения наносов на предыдущем участке.

Участок Каменный Яр—Никольское (120 км). Меандрирование на участке (рис. 74) сменяется побочневым типом — развиты отторженные побочни и пляжи, создающие острова. Однако подвижность скоплений наносов уменьшается. Эти явления, видимо, связаны с некоторым увеличением уклонов водной поверхности (в начале участка они составляют 0,04‰, в конце — 0,08‰), а также с поступлением наносов со склонов яров при сужении унаследованной современным потоком долины (пойма имеет ширину до 12—15 км). Одновременно наблюдаются длинные протоки — результат размыва понижений притеррасной части поймы. Здесь расположены трудные в судоходном отношении узлы, например Соленский, с частыми и сложными перемещениями фарватера из одного протока в другой, с явлениями расчленения островов. Взвешенные наносы в значительной мере идут в транзит.

Участок Никольское — Астрахань (235 км). Здесь особенно четко сказывается стабилизующее влияние моря и наблюдается переуглубление русла. В связи с расширением долины (поймы) с 15 до 50 км проточность ее увеличивается и поток идет в русле реки менее сосредоточенно. Создаются благоприятные условия для ослабления транспорта донных наносов, и побочневый тип процесса сменяется вновь незавершенным меандрированием, причем на довольно поздних стадиях развития излучин. Благодаря этому в излучинах хорошо виден гривистый рельеф поймы. На пойме развиты длинные и многочисленные крупные и мелкие протоки. Побочни, по-прежнему отторженные, встречаются лишь на прямолинейных участках (рис. 75). Изучение гривистого рельефа поймы р. Ахтубы позволяет уточнить вопрос о ее происхождении. Как известно, по мнению Бэра, р. Ахтуба является древним руслом р. Волги. Однако веера ее перемещения имеют значительно меньшую крупность рисунка, чем р. Волги. Это дает основание предположить, что она является вторичным образованием, может быть и расположенным на месте древнего русла, но не сохранившим в рисунке поймы его следов. Возможно, что р. Ахтуба образовалась только вдоль притеррасного понижения волжской поймы.

р. Ока от с. Хомуты. 1. В верхней части р. Оки от с. Хомуты до устья р. Угры на протяжении 275 км распространен ленточно-грядовый тип руслового процесса. По аэрофотоснимкам, сделанным в межень, обнаружено 430 гряд, средняя длина которых по бесприточным участкам, которых было выделено 8, колебалась от 216 до 740 м при ширине русла от 40 до 130 м. Таким образом, длина гряд составляла в среднем 6—8 ширин русла.

Река на этом участке прорезает толщу девонских отложений, имеет долину V-образной формы со слаборазвитой древней поймой и, хотя местами извилистая, эти извилины в настоящее время не развиваются. Ширина долины колеблется от 300 м

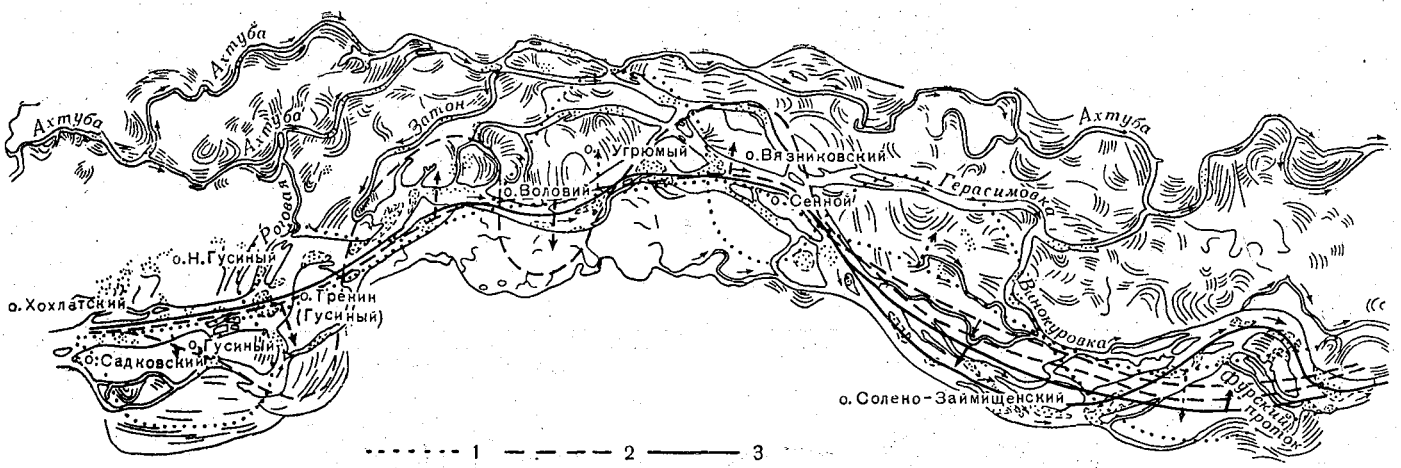


Рис. 74. Общая схема участка Каменный Яр — Никольское с показанием прежних предположительных положений русла р. Волги.

1 — наиболее древнее; *2* — промежуточное; *3* — современное.

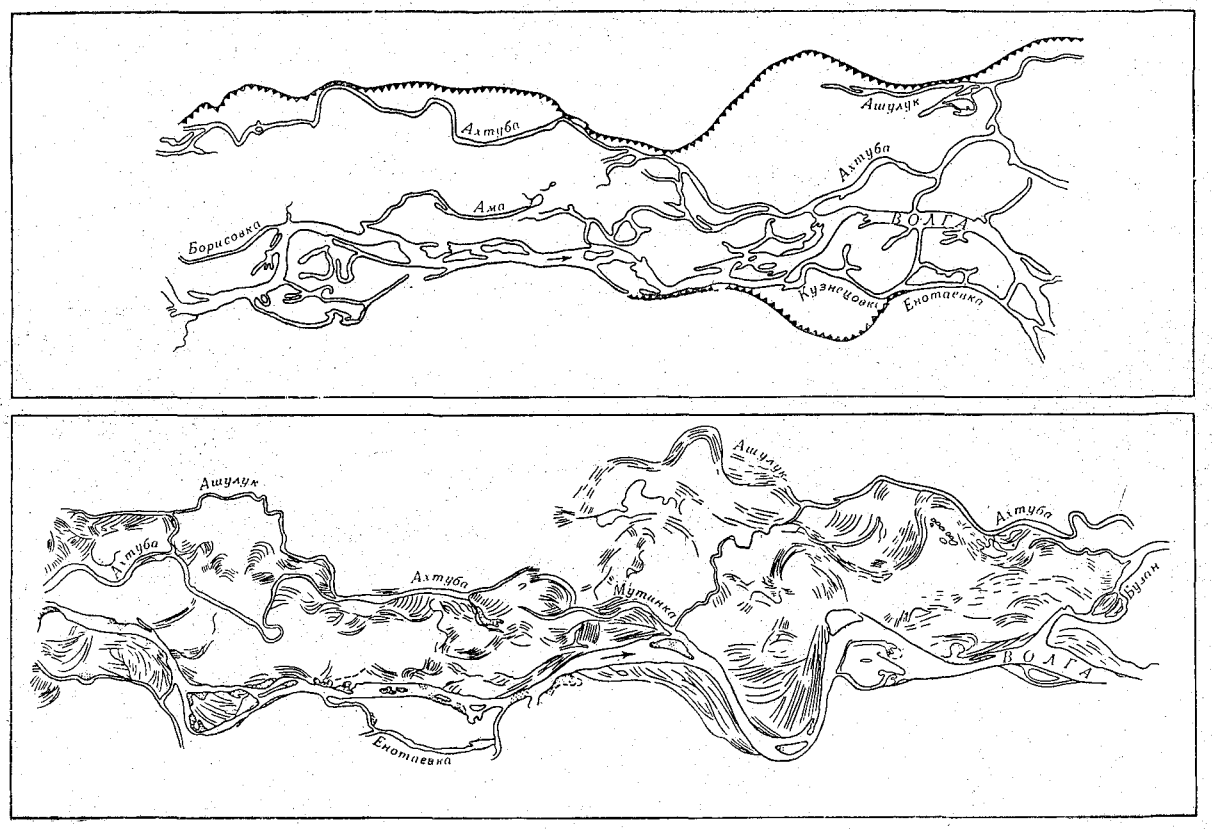


Рис. 75. Общая схема участка Никольское — Астрахань.

В нижней половине участка хорошо виден сложный гривистый микрорельеф поймы.

в начале до 3 км в конце участка при средней ширине 500 м, высота склонов 30—60 м, их крутизна доходит до 45°. Многочисленны овражные выносы. Уклоны колеблются от 0,03 до 0,047%, средние годовые расходы нарастают от 17,7 до 194,1 м³/сек. при средних максимальных расходах 623,1—3800 м³/сек. и подъемах уровня воды в половодье до 16—17 м над меженным.

2. Участки с побочневым типом процесса обнаружены непосредственно ниже участков с ленточногрядовым типом руслового процесса. На этих же участках происходят резкие увеличения водности потока в связи с впадением крупного притока — р. Угры (примерно на $^2/_3$ нормы среднегодового стока). Общее протяжение участка с побочневым типом руслового процесса (от устья р. Угры до устья р. Прони), составляющее 488 км, при наличии практически трех бесприточных участков: р. Угра — р. Протва (126 км), р. Протва — Москва-река (127 км), Москва-река — р. Проня (235 км). На всем участке от впадения р. Угры до устья р. Прони побочневый тип руслового процесса развит на фоне очень медленно развивающегося ограниченного меандрирования, процесса для данного участка очень старого. Не исключено, что наложение побочневого движения наносов на этом участке обусловлено недостаточной «пропускной» способностью для транспорта донных наносов, поступающих в виде сползающих ленточных гряд с выше расположенного участка р. Оки.

Кроме этого случая, побочневый тип руслового процесса обнаружен также на участках свободного меандрирования в стадии спрямленного русла, сформировавшегося после прорыва серии петель реки. Длины этих участков таковы: с. Нарышкино — с. Окшово — 39 км, с. Окшово — с. Новая Азовка — 48 км. На участках ограниченного и свободного меандрирования в стадии спрямленного русла побочни располагались в основном группами, были участки, на которых они отсутствовали (ниже вершин излучин). Уклоны свободной водной поверхности в общем были меньшими, чем при ленточногрядовом типе процесса и составляли 0,03—0,07‰. Среднегодовые расходы по длине участков увеличивались от 296 до 905 м³/сек.

3. Участки со свободным меандрированием на р. Оке оказались приуроченными к расширениям ее долины. Так как в ходе плановых деформаций происходило смещение всего пояса меандрирования, то на ряде участков река оказалась прижатой к склонам длины (правому) и именно здесь располагаются участки спрямленного русла, о которых упоминалось выше. При этом развитие излучин происходило на подобных участках по схеме не свободного меандрирования, а незавершенного. Подробные данные о количественных характеристиках измерителей различных типов руслового процесса приведены в гл. VII.

р. Полометь на участке исток — Лычково. Эти данные приводятся как пример выделения морфологически однородных участков на небольшой реке (рис. 76). Река Полометь является правым притоком р. Полы и относится к водосбору оз. Ильмень. Водосбор рассматриваемого участка расположен в пределах Валдайской возвышенности и его рельеф и геологическое строение имеют ледниковое происхождение. От истока до д. Яжелбицы, т. е. на протяжении 54 км (площадь водосбора 631 км^2), река протекает среди цепей обширных конечных морен, вытянутых преимущественно вдоль реки и возвышающихся над дном ее долины на 100—200 м. Ниже д. Яжелбицы и до с. Лычково река протекает в обширной ледниковой котловине с плоским и низким широким дном, окаймленной также цепями конечных морен высотой до 120 м по левобережью, и полого поднимающихся на правобережье до 10—20 м над дном долины.

Выход реки в эту котловину сопровождается резким переломом продольного профиля реки. Бассейн реки сложен в основном четвертичными отложениями, общая мощность которых достигает 75 м. Они представлены толщей глин и суглинков мощностью 8—20 м с включением гальки и валунов разных размеров, перекрытой флювиогляциальными песками мощностью около 14 м и современными аллювиальными озерными и болотными отложениями мощностью до 6 м. С поверхности развиты подзолистые и слабоподзолистые почвы на легких суглинках, суглинках и супесях. 80% поверхности водосбора занято лесами, преимущественно лиственными, 14% занимают пашни и по 3% озера и болота. Озера расположены в основном в верховьях и на правобережье. Среднегодовое количество осадков на водосборе повышенное благодаря его приподнятости и составляет 753 мм, в то время как на смежных водосборах оно равно 600—650 мм. Несмотря на благоприятные условия накопления влаги в толще рыхлых четвертичных отложений, она долго в них не задерживается и быстро передается рекам. В связи с этим плоскостная эрозия оказывается ослабленной, а русловая (донная, береговая и подмыв склонов долины) — усиленной. По карте мутности Г. И. Шамова для водосборов в районе р. Поломети мутность составляет 50 г/м^3. Вместе с тем в самом маловодном году (1954) в д. Яжелбицах (середина участка) мутность была 154 г/м^3, а в многоводном 1953 — 524 г/м^3.

Поступление наносов в реку идет не только в период половодья, но и при высоких паводках, характерных для этой реки. Форма гидрографов половодья и паводков характерна наличием очень крутого подъема и длительного спада, продолжающегося от 3 недель (паводки) до 1,5 месяцев (половодье).

Среднемесячные расходы воды в период половодья колеблются от 11,7 (маловодный 1954 г.) до 45,8 м^3/сек. (1955 г.).

Условия транспорта донных наносов по длине реки не одинаковы. На первых 75 км от истока река, вытекая из озера, проходит по древнему озеровидному расширению, среди сильно облесенных участков водосбора и практически ничего не несет. Русло напоминает канал с очень небольшими (до 0,5 м/сек.) скоростями. Следующий по течению участок от с. Ельники до впадения р. Гремячей (примерно 3 км выше д. Яжелбицы) является основным в отношении питания реки наносами. Значительных притоков здесь нет и наносы поступают в поток в результате подмыва рекой склонов долины, глубоко врезанной в толщу пород, слагающих бассейн реки. Достаточно указать, что общее падение от истока до д. Яжелбицы около 120 м, а на участке выше д. Яжелбицы, имеющем длину всего 9 км, падение 76,5 км. Река течет быстрым потоком (скорость в межень 1—1,5 м/сек.) в узкой (300—500 м) долине со склонами высотой 15—20 м, а у д. Яжелбицы со склонами — до 25—30 м, часто обрывающимися непосредственно к урезу воды в реке.

Наряду с подмывом здесь развиты обвалы и осыпи. В поток поступают наносы самой различной крупности, вплоть до валунов. При этом в русле остаются только валуны и гравий, а песчаных скоплений наносов нет. Более мелкие фракции выносятся на ниже расположенные участки. Русло реки точно следует за всеми поворотами меандр долины. Можно считать, что именно рассмотренный участок реки протяжением 9 км и является основным первоисточником поступления наносов в реку.

На следующем вниз по течению участке начинается, упоминавшаяся выше, древняя озерная котловина. В русле реки появляются развитые песчаные скопления наносов разнообразной формы. Таким образом, если предыдущий участок являлся транзитным, то ниже д. Яжелбицы начинается зона переотложения наносов и развиваются различные типы руслового процесса. Здесь выделяются следующие морфологически однородные участки.

Устье р. Гремячей — устье р. Пеховки. Участок характерен побочневым типом процесса с отторжениями побочней, развивающимся на фоне ограниченного меандрирования. Развитие побочней можно связать с тем, что на этом участке р. Поломети, а также на р. Гремячей, существенно увеличивающей ее водность, произведено снятие отмостки (выборка валунов для строительства дороги, производившаяся в течение нескольких десятилетий), вследствие чего объемы поступающих в реку наносов увеличились.

От с. Пеховка до д. Полометь река характерна переходом к свободному меандрированию, сопровождающемуся интенсивным нарастанием береговых валов (при высоких половодьях до 20—30 см/год). Наблюдаются случаи отторжения

пляжей в связи с прогрессирующим сосредоточением потока из-за нарастания береговых валов.

д. Полометь—д. Заречье. На этом участке низкая хорошо затапливаемая пойма, развито незавершенное меандрирование. Часты прорывы береговых валов и выносы песка на пойму. Все это создает на пойме сложные течения.

д. Заречье—д. Кашино. Вследствие изъятия на пойму части русловых наносов река переходит к свободному меандрированию с хорошо развитыми петлями русла. Имеются старицы.

д. Кашино—д. Рокушино. Начинается растекание потока по низкому заболоченному и очень широкому дну бывшей озерной котловины. Процесс меандрирования идет замедленно.

д. Ракушино—д. Зеленый Бор. Пойменные протоки вновь собираются в главное русло и река свободно меандрирует со значительной интенсивностью, меняя при этом и положение пояса меандрирования в пределах дна долины.

д. Зеленый Бор—д. Углы. Под влиянием выхода на дне долины древних глинистых отложений, в которые врезано русло, меандрирование ослабевает и река имеет относительно прямое русло, но образование высоких (2—4 м) береговых валов продолжается. Наблюдаются их прорывы и выносы наносов (песка) на пойму.

д. Углы—с. Лычково. На участке имеется значительная приточность (реки Копка, Ямница и др). Русло реки спрямлено (мелиорация). Продолжается интенсивный вынос наносов на пойму, ведущий к быстрому (2—3 года) заилению мелиоративной сети.

У с. Лычково ледниковая котловина замыкается, речная долина становится узкой и извилистой, развито ограниченное меандрирование.

Таким образом, на р. Поломети прослеживается достаточно отчетливо связь типов руслового процесса с гидрологическими и геоморфологическими особенностями ее водосбора и долины.

В заключение следует упомянуть о работе С. И. Пиньковского (1962), который, пользуясь только топографической картой и справочными гидрологическими и геоморфологическими изданиями, составил карту распределения основных типов руслового процесса на реках СССР, дал статистический обзор распространенности этих типов и описал региональные их особенности. Он выделил случаи полного совпадения извилистости речного русла и долины, указывающие на возможность развития в этих условиях ленточногрядового и побочневого типов процесса, участки неполного совпадения извилистости русла и долины, идентичные ограниченному меандрированию, участки рек со свободным меандрированием и так называемые разветвленные русла (осередковый тип процесса в предгорьях, незавер-

шенное меандрирование и пойменная многорукавность на равнинах).

К сожалению, на картах не удалось показать унаследованные (неразвивающиеся) формы русла, что должно явиться, равно как и более дробная типизация, последующей задачей. Чтобы дать представление с распространенности различных типов процесса ниже приводится табл. 21, составленная Пиньковским (1962) для территории СССР.

Так как в табл. 21 вошли данные по всем основным рекам территорий, то по ним можно достаточно уверенно судить о распространенности отдельных типов руслового процесса и их приуроченности к различным геоморфологическим областям.

В среднем по всей территории наибольший процент составляют реки, на которых развито свободное меандрирование (42%).

Второе место (35%) занимают немеандрирующие реки, в которых плановые деформации не развиваются из-за стеснения потока склонами долины и на которых можно ожидать ленточногрядового и побочневого типов процессов, а иногда и отсутствие существенных деформаций, как, например, на реках Карелии и Кольского полуострова, несущих ничтожно малое количество взвешенных и донных наносов вследствие того, что с их водосборов смыв при современном климате практически почти отсутствует.

Третье место (17%) принадлежит многорукавным руслам, т. е. участкам рек с развитием осередкового типа процесса (русловая многорукавность) или участкам рек с различными видами пойменной многорукавности (например, развитое незавершенное меандрирование и случаи развития вторичных протоков на пойме).

Последнее, четвертое место (6%) занимают реки с ограниченным меандрированием. Эта цифра еще раз наглядно показывает значение типизации руслового процесса, поскольку в гидрологической литературе свойство сползать приписывалось всем меандрирующим рекам.

Относительно приуроченности типов руслового процесса к различным геоморфологическим областям можно отметить следующее.

Немеандрирующие русла с ленточногрядовым и побочневым типами руслового процесса приурочены к участкам стеснения потока склонами долины, развиты в глубоковрезанных долинах рек, например, проходящих среди холмов, платообразных возвышенностей, при пересечении ими кряжей и горных хребтов, а также к участкам выхода реки из гор при неслишком высоком стоке донных наносов. Наиболее высокий процент таких рек падает на территорию Средней Азии (59% всех рек), Средней и Южной Сибири (51,5%) и Кавказа (48%). Кроме того, эти

Таблица 21

Распределение типов речных русел на территории СССР (Русская равнина, Западная, Средняя и Южная Сибирь)

Территория	Длина участков на оси долины, км				Суммарная длина обследованных рек, км	Количество рек
	меандрирование		немеандрирующий тип	разветвленное русло		
	свободное	ограниченное				
Русская равнина	41 510 56%	4 580 6%	23 785 32%	4 380 6%	74 256	498
Западная Сибирь и северная часть Казахстана	36 920 74%	— —	9 970 20%	2 800 6%	49 690 100%	208
Средняя и Южная Сибирь	36 990 35%	4 625 4,5%	53 260 51,5%	9 470 9%	104 415 100%	987
Северо-Восток СССР	27 490 35%	4 440 6%	11 070 14%	35 850 45%	78 850 100%	883
Дальний Восток (южная половина)	22 255 34%	7 110 11%	23 760 36%	12 365 19%	65 490 100%	1 190
Средняя Азия	3 770 16%	2 470 10%	14 165 59%	3 700 15%	24 105 100%	283
Кавказ	3 290 21%	1 140 8%	7 510 48%	3 600 23%	15 540 100%	289
Всего по СССР	172 225 42%	24 435 6%	143 520 35%	72 165 17%	412 345 100%	4 338

типы процесса часты на равнинных реках с искусственно закрепленными берегами.

Свободно меандрирующие реки приурочены к равнинным низменным территориям. Судя по данным табл. 21, наиболее высокий процент таких рек падает на территорию Западной Сибири (74%), следующее место занимает Русская равнина. На территориях, имеющих горный характер, свободно меандрирующие реки встречаются в обширных межгорных впадинах и в пределах древних, хорошо разработанных долин. Наименьшее число свободно меандрирующих рек встречается в Средней Азии (16%) и на Кавказе (21%). По остальным неравнинным территориям процент их оказывается все же относительно высоким (34—35%). Ограниченное меандрирование распространено по различным геоморфологическим областям более или менее равномерно, составляя от 4,5 до 11% всей длины рек таких областей. На равнинных территориях оно встречается преимущественно в верховых участках рек, если они протекают среди холмистой местности или в узких унаследованных долинах. Таким образом, влияние ограничивающих факторов в формировании ленточно-грядового, побочневого типов руслового процесса и при ограниченном меандрировании оказывается очень существенным.

Многорукавные русла (осередковый тип процесса и пойменная многорукавность) на равнинных территориях распространены относительно мало. Так, на Русской равнине и в Западной Сибири протяженность таких рек составляет всего около 6%, и они приурочены в основном к приустьевым участкам относительно крупных рек.

В Средней и Южной Сибири наблюдается большой, но не слишком высокий процент многорукавных русел (9%), что связано, по-видимому, с относительно невысоким стоком донных наносов. Наибольший процент многорукавных русел падает на территорию Северо-Востока СССР (45%), где их образование обусловлено главным образом наличием таких превходящих факторов, как явления многолетней мерзлоты, наледей и т. п.

В горных условиях многорукавные русла распространены и на участках горных рек и на выходах рек из гор. В первом случае, особенно распространенном на Кавказе (23%), многорукавность создается в основном крупными галечными отмелями, обтекаемыми меженным потоком. Во втором случае (предгорье) распространен преимущественно осередковый тип руслового процесса. Пойменная многорукавность приурочена большей частью к участкам относительно крупных рек, протекающих в широких древних долинах. Разветвленные русла встречаются на Дальнем Востоке (южная половина) в 19% случаев, в Средней Азии в 15%.

В последующем, цифры характеризующие распространенность рек с тем или иным типом руслового процесса, по-видимому, должны быть уточнены главным образом вследствие того, что окажется возможным учесть проблему унаследованности руслового процесса. В частности, по-видимому, наибольшим уточнениям подвергнется процент распространения свободно меандрирующих рек по территории Сибири, где в ряде случаев, хотя внешний вид плановых очертаний и соответствует возникающим при свободном меандрировании, однако в современных условиях процесс этот оказывается законсервированным или развивающимся чрезвычайно медленно, и в русле таких рек значительно лучше выражены другие типы процесса (ленточногрядовый, побочневый и др.), обнаружить которые можно только по крупномасштабным картам или аэрофотоснимкам. Однако в целом можно ожидать, что приведенные цифры достаточно убедительно показывают степень распространенности основных типов руслового процесса.

Глава XI

СВЯЗЬ СОВРЕМЕННОГО РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА С ВЕКОВЫМ ХОДОМ РАЗВИТИЯ РЕЧНЫХ СИСТЕМ

Все рассмотренные (в главах III—VII) типы русел свойственны современному русловому процессу — транспорту наносов, развивающемуся в реках под влиянием современных особенностей водного режима, стока наносов и ограничивающих условий, под которыми имеются в виду естественные или искусственно созданные факторы, препятствующие свободному развитию деформаций речного русла и поймы. К ограничивающим условиям могут быть отнесены особенности геологического строения склонов и дна речной долины, различные гидротехнические сооружения в руслах и поймах рек, ограничивающие свободное развитие русловых и пойменных переформирований, которые могли бы иметь место при данном сочетании особенностей водного режима и стока наносов.

Например, при данной комбинации характеристик стока воды и наносов поток имеет возможность строить пойму и развиваться по схеме свободного меандрирования. Однако, протекая по узкой долине, неразмываемые склоны которой препятствуют развитию значительных плановых деформаций реки, он вынужден деформировать свое русло по схеме ограниченного меандрирования — процесса сползания слабовыраженных излучин при сохранении ими своих размеров, форм и т. д.

Различие современных и прошлых условий, в которых развивается русловой процесс, и является основной причиной широко

распространенного несоответствия размеров речных долин и современного речного русла — вопроса уже давно привлекающего внимание и отечественных, и зарубежных исследователей (см. Введение).

Из характеристик речной поймы (гл. IX) и из приведенных примеров следует, что история формирования речных долин как арены деятельности современного потока, в том числе и ход развития основных факторов руслообразования имеют важное значение для понимания закономерностей современного руслового процесса, для выяснения его связей с определяющими факторами, для выделения действующих и унаследованных морфологических образований.

Долины большинства крупных и даже многих средних равнинных рек, если рассматривать их развитие от времени первоначального образования, т. е. так называемого исходного рельефа (Григорьев, 1948), формировались под воздействием многих природных факторов. Первоначальное происхождение речной долины может быть обязано горообразовательным процессам, тектонике, образованию флексур (прогибов), сбросов и сдвигов горных пород. Однако в дальнейшем к числу главнейших факторов, формирующих элементы речных долин, можно отнести работу льда в период великого оледенения, деятельность флювиогляциальных (талых) вод, сбрасываемых потоком при отступлении льдов этого оледенения, и вод современных рек — продуктов современного климата и сложившихся к моменту установления его геологических условий.

На развитие речных долин также оказывают влияние вековые колебания суши, выражающиеся в прямых и наклонных подъемах и опусканиях земной коры, эвстатические колебания океанической оболочки (колебания океанических базисов эрозии), вулканические процессы, эоловые процессы и др.

Перечисленные выше процессы и явления в той или иной мере, но неизбежно сказываются на высотном положении водосборов, отдельных их участков и базисов эрозии и, следовательно, могут оказывать влияние на работу текущих вод.

Л. Б. Рухин, много работавший в области палеогеографии, указывает, что реки на поверхности Земли существуют очень давно. При этом новейшие геологические данные показывают, что, непрерывно изменяясь под влиянием многочисленных факторов, гидрографическая сеть оказывается все же способной сохранять общее направление стока в течение ряда резко различных между собой геологических эпох. Обнаруживается, что даже при разных изменениях климатических условий этих эпох новая гидрографическая сеть вновь появляется примерно на тех же местах, где она существовала и ранее, особенно после отступания моря. Унаследованность в строении гидрографической сети объясняется тем, что после отложения не слишком мощных

морских осадков, покрывающих древний, существовавший до наступления моря трансгрессии, эрозионный рельеф плащеобразно, над древними речными долинами остаются несколько пониженные участки и потоки «нащупывают» погребенные депрессии.

В случаях же, если данный водосбор представлял собой область сноса, то речные долины сохраняются в основных своих направлениях в течение нескольких геологических эпох. В пределах областей сноса денудация очень редко полностью стирает речные системы, хотя они и подвергаются со временем существенным изменениям.

О том, насколько велика работа рек, дают представление следующие цифры. В современную эпоху из общего объема обломочного материала 12,2 км³, попадающего за год в моря, около 12 км³ или свыше 99% сносятся в них реками и лишь менее 1% обязано своим происхождением абразии.

Из приведенных данных следует, что гидрографическая сеть обладает большой консервативностью, что объясняется главенствующей ролью водноэрозионного фактора. Даже и в том случае, если в силу тектонических движений направление стока и меняется на обратное и древние долины расчленяются перехватами, то фрагменты этих долин неизбежно сохраняются в современном рисунке речной сети. «Современная речная сеть не возникает на чистом месте, а является итогом предшествующего развития древней гидрографической сети. В качестве примеров указывается, что большинство крупных рек Казахстана возникло уже в мезозое, что реки Лена, Вилюй и Алдан существовали возможно даже и в палеозое. Современный Дон протекает на месте очень древней Ергень-реки, существовавшей, повидимому, еще в миоцене. В последнее время по этой реке сбрасывались воды с современного бассейна Верхней Волги». Волга в ее нынешнем виде возникла, по Г. Ф. Мирчинку, только в эпоху максимального четвертичного оледенения, а Поволжье занимало водосбор Камы.

1. ВЛИЯНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ

В последнее время в геоморфологической литературе появилось много работ, в которых особое внимание уделяется оценке влияния на русловой процесс неотектонических движений и даже делаются попытки установить связь типа руслового процесса с этими движениями, причем получается так, что тектоника оказывается чуть ли не решающим фактором современного руслового процесса (Рождественский, 1963; Горелов, 1963; Гвин, 1963).

К. И. Геренчук (1960) следующим образом формулирует влияние тектоники на речную сеть, которое он исследует на при-

мере рек Русской равнины, ссылаясь на общеизвестные факты перестройки гидрографической сети. «Побудительной причиной, вызвавшей перестройки, были тектонические движения, а действующей силой, непосредственно производящей перестройки, являлась эрозия рек в сочетании с оползневыми процессами». Отмечается, что обширные долины, образовавшиеся при таянии льдов Великого оледенения, появление которых также вело к перестройке гидрографической сети, носили временный характер (быстро заполняясь отложениями), и многие реки вернулись к прежнему направлению.

В. Я. Гвин (1963) с еще большей категоричностью отмечает наличие связи между тектоникой и русловым процессом.

Все эти положения применительно к макроструктуре гидрографической сети и масштабам геологического времени в значительной мере справедливы. Однако значение их для выявления связи современного руслового процесса с современной тектоникой более чем условно. По сути дела, указание на влияние тектоники на русловой процесс в этих положениях сводится к указанию о бесспорном влиянии на него рельефа и ограничивающих факторов. Действительно, представим себе, что во всех случаях вертикальные движения отсутствуют или даже имеют обратный знак. Разве от этого пострадала бы справедливость выдвинутых положений о влиянии рельефа и ограничивающих условий на русловой процесс? По-видимому, ни в коей мере. Однако даже в том случае, когда для доказательств используются фактические данные о вертикальных движениях земной коры, они не могут быть убедительными потому, что это влияние часто вуалируется значительно более изменчивыми и сложными воздействиями основных факторов руслообразования — стоком воды и наносов. Эти факторы способны вызывать значительно более крупные переформирования речных русел и пойм, причем и разнонаправленные в течение коротких отрезков времени, и однонаправленные в течение длительных периодов также однонаправленного изменения водоносности. Нельзя не признать, что участки свободного меандрирования приурочены к расширению долин, а ограниченного — к ее относительным суженим (влияние ограничивающего фактора) и что эти расширения и сужения часто обусловлены тектоникой. Вместе с тем достаточно распространены случаи, когда на участках расширений вместо свободного меандрирования развивается незавершенное, побочневый тип процесса (иногда приводящий к параллельному смещению прямолинейных участков русла), иногда ленточногрядовый, иногда осередковый тип процесса (развивается русловая многорукавность). В других случаях оказывается распространенной пойменная многорукавность. Напомним примеры незавершенного меандрирования на Нижней Волге или побочневый тип русла на ней же, примеры пойменной многорукавности р. Оби

в пределах Васюганья и вопросы об унаследованных поймах (гл. IX). Напомним также, что существует и ряд других факторов, способных нейтрализовать влияние тектоники на отдельные реки. К ним принадлежит, например, болотообразовательный процесс, накопление растительных остатков, эоловые воздействия, морозное выветривание и гравитационные процессы, смыв почв. Наконец, нельзя не учитывать и влияние человеческой деятельности — регулирование стока, агротехнические и мелиоративные мероприятия и т. п., приводящие к коренной перестройке русла и поймы реки.

Вместе с тем данные о величинах современных колебаний земной коры показывают, что они несоизмеримо малы по сравнению, например, с возможной сработкой продольного профиля под воздействием текущей воды, и недаром Н. И. Маккавеев (1955) и Н. А. Ржаницын (1960) ступенчатость продольного профиля прежде всего связывают с приточностью.

Вертикальные движения земной коры характеризуются дифференцированным проявлением вертикальных движений, при этом отмечается иногда полное несоответствие знаков движений отдельных локальных структур и целых геотектонических зон, а также изменение скорости и знаков вертикальных движений во времени. Так, на участке трассы Тернополь — Курск по нивелировке 1933—1948 гг. район Изяслав—Новгород-Волынский (Украинский щит) поднимался со скоростью 10 мм/год, а в последующий период — с меньшей скоростью (4—6 мм/год). В районе Курска за последние 8 лет произошла смена знаков вертикальных движений.

Изменения в высотном положении речного русла, обусловленные работой потока, таковы. При анализе продольных профилей р. Куры на участке от Мингечаура до устья (протяжением около 600 км) за период с 1914 по 1948 г. (Попов, 1955) была обнаружена характерная его волнистость с закономерным сползанием этих «волн» продольного профиля вниз по реке. Связанные с этим периодические повышения и понижения дна выражаются в метрах, а длина подобных песчаных волн — в десятках километров. За 32 года некоторые из этих песчаных волн сползли на значительную часть своей длины, перемещаясь со скоростью сотни м/год.

Многие перекаты являются лимитирующими, т. е. играют роль местных базисов эрозии. Поэтому их сработка, естественная или искусственная, способна вызвать существенное падение уровня, распространяющегося на участки длиной в десятки километров. Например, разработка одного гравийного переката на р. Днестре вызвала снижение уровня воды в межень, выражающееся в метрах. Оно распространилось на 60—80 км вверх по течению почти до Дубоссарской ГЭС.

Упускается из вида и другой непреложный факт: на равнинных реках пойма нарастает иногда со скоростью несколько см/год, а не поток врезается.

Наконец, общеизвестны факты, показывающие, что реки, стекающие с древних хребтов, успевали прорезать свои долины в поднимающихся горных складках, сохраняя свое прежнее направление, как, например, это имеет место на р. Чусовой, на большом протяжении текущей по долине прорыва, врезанной в толщи твердых известняков и доломитов.

Возможность врезания русла даже при очень интенсивных поднятиях подтверждается и лабораторным экспериментом (Н. И. Маккавеев и др., 1961).

При поисках связи между неотектоническими движениями и формами речных русел упускается из вида цикличность развития плановых переформирований при свободном меандрировании, ведущая к смещениям пояса меандрирования по дну долины вследствие прорыва петель. Подобные случаи имеют место на р. Оке в районе ниже Спасска, на многих участках Иртыша и т. д. Это убедительно доказывается восстановлением прежних положений речного русла на основе дешифрирования грядового рельефа пойм на аэрофотоснимках. При этом обнаруживается, что и наличие яров может быть обусловлено не только поднятием, но и просто узостью долины реки и большими уклонами, унаследованными потоком, в силу чего поток оказывается способным и в условиях полного покоя подмывать склоны своей долины. В других случаях имеет место отход русла в процессе меандрирования от участка яра и средней части долины, как например, это имеет место на многих участках Нижней Волги, Иртыше и других реках.

При рассмотрении вопроса о влиянии тектоники на русловой процесс, почему-то часто обходят факт периодичности неотектонических движений, причем изменение их знака может происходить в течение очень коротких периодов, всего в несколько лет, как это, например, достаточно отчетливо было показано в работе Горелова (1963). При перемене знака тектонических движений, естественно, изменяется и направление их влияния на русловой процесс. Это, конечно, существенно осложняет обнаружение тектонических влияний в многовековом разрезе по характеру накопления аллювия.

Периодичность неотектонических движений не только сопоставима с продолжительностью цикла развития излучин, но иногда оказывается много меньше последних. Так, например, на р. Оке были обнаружены излучины, полный цикл развития которых, как указывалось в гл. IX, составлял несколько сот лет. Если судить по данным Горелова, то за период развития этих излучин знак тектонических движений мог измениться

несколько раз, вместе с тем излучина развивалась по схеме свободного меандрирования, без существенных нарушений хода этого развития. Это еще раз указывает на возможную связь руслового процесса с тектоническими движениями только в масштабах геологических эпох, а в этом случае, как уже указывалось, все сводится к обнаружению зависимостей между типами речных русел и характером рельефа.

При оценке влияния на русловой процесс тектонических движений недоучитывается также и соотношение изостатического (колебания суши) и эвстатического (колебания уровня Мирового океана) компонентов. Вместе с тем положение базисов эрозии крупных речных систем определяется равнодействующей этих движений.

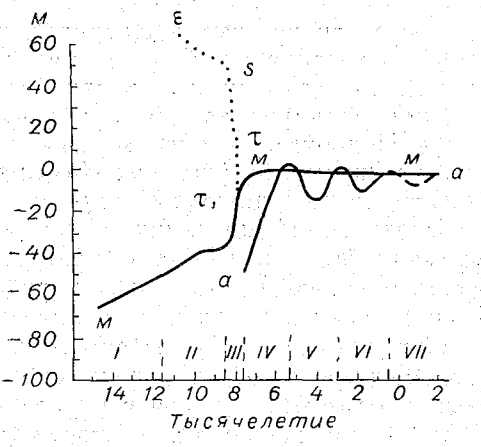


Рис. 77. Колебания уровня моря и поверхности суши, по С. С. Яковлеву, для района Ленинграда.

Относительная скорость изостатических и эвстатических колебаний различна. В случаях, когда поднятие уровня океана происходит быстрее, чем суши, происходят трансгрессии моря и повышение высотного положения общих базисов эрозии, если же поднятия суши оказываются интенсивнее, чем поднятие моря, наблюдается регрессия моря и понижение общих базисов эрозии. На рис. 77 видно, что на протяжении последних 17 тысяч лет соотношения в скорости поднятия уровня Мирового океана и суши изменялись неоднократно и были периоды продолжительностью несколько тысячелетий, когда эвстатические движения оказывали явно преобладающее влияние на русловой процесс по сравнению с тектоническими движениями.

2. ВЕКОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ РУСЛООБРАЗОВАНИЯ — СТОКА ВОДЫ И НАНОСОВ

Если сток воды и наносов признать главнейшими, ведущими факторами руслового процесса, то представляет интерес проследить их вековые изменения, так как они покажут и основные этапы и тенденции в развитии современного руслового процесса.

Толща аллювия на Русской равнине была сформирована мощными ледниковыми потоками. Характерного для современ-

ного аллювия расчленения его на русловую и пойменную фации, отличающиеся по своей крупности, в этом случае не наблюдается. Это свидетельствует о том, что пойм в рассматриваемый период не существовало. Отсутствие пойм Шанцер связывает с тем, что благодаря обильному снеговому и дождевому питанию, половодное состояние в течение большей части года было нормальным для этих рек и размеры их русла соответствовали максимальным расходам, в связи с чем разливов не наблюдалось.

По мере удаления от края ледника (его площадь в Европе составляла 6,5 млн. км^2) появляется пойменный аллювий (р. Волга ниже г. Казани) мощностью 4—6 м при ширине (у г. Куйбышева) около 5 км.

В дальнейшем сформировавшаяся толща аллювия начала разрабатываться потоками, близкими по своим гидрологическим характеристикам к современным, и постепенно сформировались поймы. Таким путем поймы современных рек сформировались в голоценовом (послеледниковом) периоде и имеют возраст 8—10 тысяч лет, а большинство средних и крупных рек имеют долины, унаследованные от прошлой деятельности других, более многоводных потоков.

Как показал А. В. Шнитников (1957), за этот период имели место несколько циклов изменения водоносности продолжительностью около 1800 лет каждый. В соответствии с этим правомерно ожидать, что и в русловом процессе за этот период существовала цикличность. В эпохи обводнения наблюдались углубление дна долин, размыв их склонов и интенсивное формирование аллювия. В эпохи убывания водоносности происходило сглаживание неровностей рельефа долин, частичное удаление накоплений наносов и покровной породы.

3. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ О РАЗВИТИИ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

Воздействие всех указанных факторов на русловой процесс в конечном итоге должно приводить к изменению его типа.

Чтобы оценить возможное направление таких изменений рассмотрим связи, существующие между отдельными типами руслового процесса и объединяющие их общие закономерности.

Как утверждает Н. Е. Кондратьев (1968), переход от осередкового типа руслового процесса (русловой многорукавности) к ленточногрядовому и затем последовательно к пойменной многорукавности сопровождается уменьшением транспортирующей способности потока.

При этом факторы, способствующие увеличению транспортирующей способности при переходе от одного типа руслового процесса к другому, различны. Переход от ленточногрядового типа руслового процесса к русловой многорукавности (осередковому

типу) связан с резким расширением русла, что повышает его пропускную способность, так как, несмотря на уменьшение глубины и скорости течения, увеличивается фронт перемещения наносов.

Увеличение же транспортирующей способности при переходах от пойменной многорукавности к незавершенному меандри-

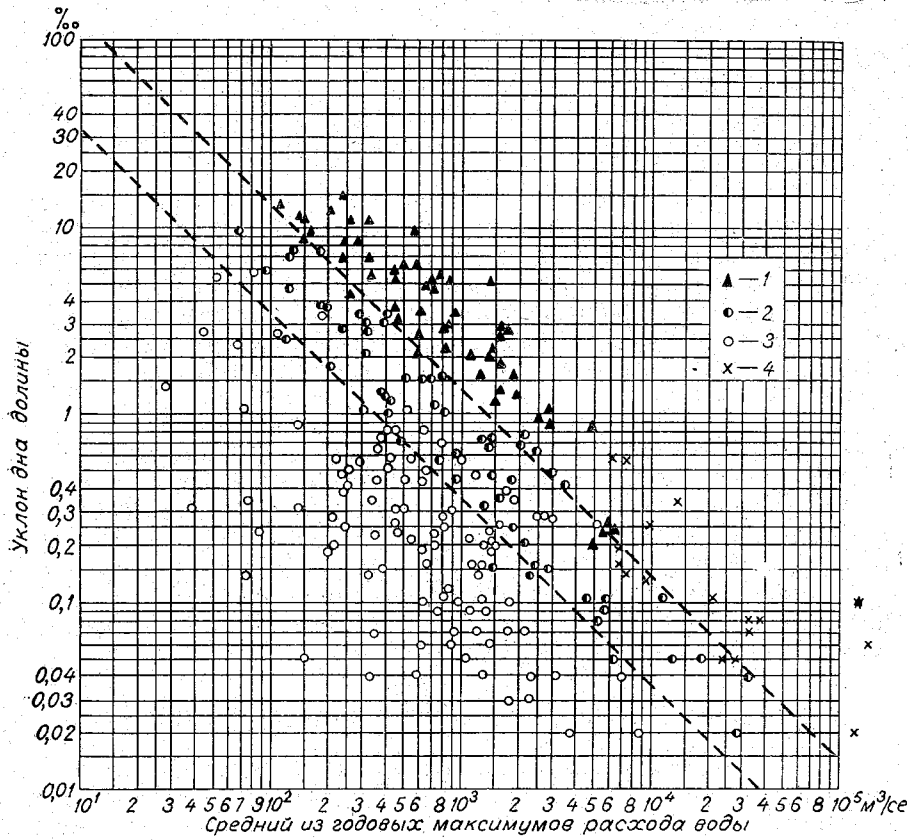


Рис. 78. Зависимость типов руслового процесса от уклона долины и средней водности паводков.

1 — русловая многорукавность; *2* — незавершенное меандрирование; *3* — свободное меандрирование; *4* — пойменная многорукавность.

рованию и далее последовательно к ленточногрядовому типу связан со все более полным использованием потоком уклонов дна его долины. Действительно, если при ленточногрядовом типе руслового процесса уклоны дна долины и свободной водной поверхности потока практически совпадают, то при ограниченном и свободном меандрировании уклоны свободной водной поверх-

ности благодаря извилистости русла во все большей мере становятся меньшими, чем уклоны дна долины и, следовательно, не используются потоком. При незавершенном меандрировании и пойменной многорукавности, по-видимому, имеет место некоторое выравнивание разницы между уклонами свободной водной поверхности и уклонами дна речной долины, а замедленный транспорт наносов, по-видимому, следует связать с общим уменьшением уклонов, приводящим к увеличению доли донных наносов в общем расходе из-за осаждения частиц, проходящих на вышерасположенных участках с большим уклоном во взвешенном состоянии.

В. В. Ромашин (1968) на основе обработки натурных материалов делает попытку количественно охарактеризовать связи между типами руслового процесса и факторами руслообразования. В этих целях он построил связь между средними годовыми максимумами расходов воды и уклонами дна долины (рис. 78). Оказалось, что эти связи различны при разных типах руслового процесса. При этом, как видно на рис. 78, с увеличением расходов воды при небольших уклонах дна долины наблюдается последовательный переход от свободного меандрирования к незавершенному и пойменной многорукавности, при больших уклонах незавершенное меандрирование переходит непосредственно к русловой многорукавности.

Как указывает В. В. Ромашин, график (рис. 78) приобретает практический интерес в тех случаях, когда требуется предвидеть изменение типа руслового процесса в результате изменения факторов руслообразования или тип процесса на вновь создаваемых каналах без крепления берегов и дна, т. е. в условиях отсутствия ограничивающего фактора. Учет нарушений тенденций руслового процесса под влиянием ограничивающих условий Ромашин предлагает учитывать путем установления соотношения фактической ширины зоны плановых деформаций с теоретически возможной. Для расчета последней он предлагает эмпирические зависимости:

для меандрирующих русел

$$B = 29{,}1\,\frac{Q^{0{,}50}}{i^{0{,}33}}\ \text{м},$$

для русловой многорукавности (осередки)

$$B = 14{,}5\,\frac{Q^{0{,}50}}{i^{0{,}33}}\ \text{м}.$$

ЧАСТЬ II

ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

Глава XII

ОСНОВНЫЕ ПРИЕМЫ ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

1. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАБОТ И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ

Комплекс приемов, направленных к выявлению схем деформаций речного русла и пойм, получению их количественных характеристик и связей с определяющими факторами, получил название гидролого-морфологического анализа руслового процесса.

Производство гидролого-морфологического анализа дает возможность получить данные, необходимые для теоретических исследований руслового процесса как в морфологическом аспекте, так и в гидравлическом (задание схемы развития и получение исходных данных для расчетов), а также выполнить ряд практических задач, осуществив расчеты и прогнозы русловых и пойменных деформаций. Ряд этих задач оказывается возможным решать на чисто морфологической основе, ряд задач требует дополнительных гидравлических расчетов, что прежде всего определяется особенностями требований практики, т. е. особенностями решаемых инженерных задач. Так, например, выбор мест расположения сооружений, оптимальных по условиям развития руслового процесса, установление схем наиболее эффективных защитных мероприятий и ряд других задач решаются на чисто морфологической основе достаточно уверенно. Задачи расчета режима деформаций, особенно в условиях измененного водного режима, требуют часто детализирующих гидравлических расчетов.

Создание типизации руслового процесса, т. е. выявление типичных схем его развития, существенно облегчает производство гидролого-морфологического анализа и позволяет создать ограниченное число расчетных схем решения самых различных задач.

Наличие четких опознавательных признаков типов руслового процесса дает возможность начать анализ их путем использования уже имеющихся материалов, прежде всего картографических и аэрофотосъемочных. Это придает камеральным исследованиям руслового процесса значительную роль и вместе с тем

позволяет существенно рационализировать полевые работы, до сего времени являвшиеся, по сути дела, единственными источниками сведений для суждения о русловом процессе на участке сооружений.

Вследствие изложенного гидролого-морфологический анализ руслового процесса целесообразно подразделить на три основных этапа:

1) предварительное камеральное изучение руслового процесса по уже имеющимся материалам;

2) полевые исследования руслового процесса;

3) обобщение данных предварительных (камеральных) и полевых работ, производство окончательных расчетов деформаций русла и поймы, составление прогнозов развития руслового процесса.

При предварительном исследовании руслового процесса по уже имеющимся картографическим или аэрофотосъемочным материалам обычно можно:

а) установить тип руслового процесса, т. е. выявить схему деформаций русла и поймы реки, свойственную исследуемому участку, определить границы морфологически однородных участков;

б) получить значения основных измерителей макроформ и на этой основе выяснить их характерные значения;

в) оценить средние многолетние и по отдельным периодам скорости плановых деформаций русла реки на основе сопоставления съемок разных лет;

г) уточнить необходимость проведения и задачи полевых работ.

Задачей полевых работ является получение дополнительных данных для уточнения сведений, полученных камеральным путем.

В этих целях производятся:

а) сбор на месте дополнительных картографических, геологических и гидрологических данных;

б) уточнение данных о типе руслового процесса на основе маршрутного обследования участка;

в) уточнение данных о размерах деформаций русла и поймы на основе полевого картирования элементов макроформ на готовой картографической основе съемок прежних лет;

г) получение данных, требующихся для производства детальных гидравлических расчетов, которые могут потребоваться для оценки режима деформаций; данные получаются на основе производства специальных гидрометрических работ на участках типичных макроформ (съемки скоростного поля потока на участках 2—3 смежных макроформ, гранулометрия применительно к элементам макроформ, специальные наблюдения за грядовым движением наносов и др.).

Завершающим этапом предварительных камеральных работ и полевых исследований является получение окончательной схемы развития руслового процесса на исследуемом участке реки, количественных его характеристик, основных закономерностей и связей с определяющими факторами. Как следствие, появляется возможность производства инженерных расчетов и прогноза руслового процесса.

2. АНАЛИЗ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА ПО УЖЕ ИМЕЮЩИМСЯ МАТЕРИАЛАМ

а. Подготовительные работы

Этот первый этап исследований руслового процесса можно в свою очередь подразделить на ряд последовательных задач. Первая из них может быть названа подготовительной работой. Она заключается в сборе и подготовке к анализу исходных материалов.

В качестве основных должны быть получены:

— картографические и аэрофотосъемочные материалы;
— материалы об особенностях геологического строения водосбора изучаемого участка и долины, поймы и русла реки;
— характеристики водного и ледового режима и сток наносов.

Подбор картографических и аэрофотосъемочных материалов. Картографические и аэрофотосъемочные материалы являются основными для суждения о типе руслового процесса и размерах деформаций русла и поймы.

Для изучаемого участка реки должны быть подобраны наиболее крупномасштабные наземные съемки русла и поймы реки, выполненные в разные годы, а также аэрофотоснимки.

Так как наиболее наглядно и объективно характер общих деформаций русла может быть выявлен лишь при пользовании данными за длительные сроки, то русловые съемки следует подбирать так, чтобы они освещали возможно более длительный период (25—50 лет и более). Для того чтобы получить уверенность в закономерном характере деформаций русла и поймы в годы между крайними по времени съемками, желательно иметь возможно большее число промежуточных съемок, хотя детальному сопоставлению будут подлежать съемки, наиболее удаленные друг от друга по времени. При отсутствии таких съемок суждение о ходе деформаций может быть приближенно получено на основе использования материалов аэрофотосъемки по приемам, описанным ниже. Поэтому наличие аэрофотоснимков весьма желательно даже в тех случаях, когда на участке имеются и наземные съемки.

Для крупных рек наземные съемки обычно имеются в виде лоцманских карт, для средних же и малых рек в большинстве

случаев приходится ограничиться использованием аэрофотоснимков.

Следует стремиться получить аэрофотоснимки разных лет, но даже и разовый аэрофотоснимок является весьма ценным пособием, поскольку по нему можно восстановить ход деформаций, а, кроме того, он может служить в качестве картографической основы, позволяющей с высокой подробностью картировать в поле местную ситуацию и на этой основе определять размеры деформаций берегов, островов и других русловых образований.

Особую ценность в последнем случае представляют аэрофотоснимки, выполненные за 10—15 лет до производства работ, так как при картировании на них русла реки и отдельных макроформ деформации русла обнаруживаются наиболее ярко, а высокая подробность изображения обеспечивает наличие множества легко опознаваемых на местности и хорошо сохраняющихся ориентиров.

Для крупных рек пригодны аэрофотоснимки даже самых мелких масштабов. Для средних и малых рек (ширина русла 200 м и менее) следует иметь снимки масштаба 1 : 15 000—1 : 10 000.

Длину участка, для которого необходимо подобрать картографический и аэрофотосъемочный материал, желательно иметь такой, чтобы в его пределах размещался по крайней мере один морфологически однородный участок. Если изучение ведется для очень короткого участка, то картографический и аэрофотосъемочный материал можно подобрать только на участок реки, включающий 3—4 излучины, расположенные выше исследуемых створов, и 2—3 излучины — ниже их или длиной не менее 20—30-кратной ширины русла.

Аэрофотосъемочные материалы бывают в виде репродукций накидного монтажа, фотосхем, фотопланов, контактных отпечатков [подробнее об их свойствах см. в работах Попова (1960, 1961)].

Размер площади, охватываемой каждым аэрофотоснимком, зависит от масштаба съемки. При формате снимка 30×30 см и масштабе 1 : 25 000, каждый снимок охватывает площадь 7,5×7,5 км, при масштабе 1 : 10 000 — 3×3 км.

Для освещения участка реки длиной 50 км при формате кадров 30×30 см для масштаба 1 : 10 000 потребуется 60 км : 3 км = =20 снимков, но так как каждый из них перекрывает предыдущий на 50%, фактическое число снимков составит 40 отпечатков.

Контактные отпечатки по сравнению с другими материалами аэрофотосъемки представляют существенные преимущества, так как два смежных отпечатка позволяют получить стереоскопический эффект, т. е. рассматривать объемное изображение местности и проводить по ним не только линейные измерения, но и определения превышений точек на местности. Контактные

отпечатки могут быть нетрансформированными и трансформированными, т. е. лишенными оптико-механическим путем различных искажений, получившихся при съемке. Для производства точных измерений по аэрофотоснимкам желательно иметь трансформированные отпечатки. Однако их отсутствие не должно служить основанием для отказа от других материалов аэрофотосъемки, в частности, от нетрансформированных отпечатков. При работе контактные отпечатки рассматриваются по длине изучаемого участка так, чтобы они, перекрывая друг друга, совмещались идентичными контурами изображенной на них местности. После этого снимки закрепляются скрепками или кнопками и могут быть использованы как обычная, но очень подробная карта. Такие совмещенные контактные отпечатки представляют собой так называемый накидной монтаж. Для рассмотрения отдельных наиболее важных и сложных участков реки смежные отпечатки изымаются из накидного монтажа и могут рассматриваться стереоскопически, т. е. по ним под стереоскопом может быть воссоздана объемная модель местности, которая, как указывалось, может быть обмерена с помощью специальных приборов.

Стереофотограмметрические измерения могут быть освоены в короткий срок и не специалистом в области аэрофотосъемки и стереофотограмметрии.

Подробные указания к пользованию аэрофотоснимками и к производству по ним измерений приведены в монографии Д. М. Кудрицкого, И. В. Попова и Е. А. Романовой (1956), в Методических указаниях УГМС, № 29, в книгах И. В. Попова (1960 и 1961), а также можно воспользоваться специальными общими курсами по аэрофотосъемке и стереофотограмметрии.

Фотосхема представляет собой тот же накидной монтаж, но с отрезанными перекрывающимися частями контактных отпечатков, которые совмещаются и наклеиваются на листе картона. Объемного изображения местности по фотосхемам получить нельзя.

Прежде чем пользоваться накидным монтажом или фотосхемами, необходимо сопоставить их с картами или планами участка с тем, чтобы нанести на них подписи населенных пунктов, рек, урочищ и другой местной ситуации. Одновременно следует проверить масштабы, сопоставляя расстояния, полученные по аэрофотоснимкам и по карте.

Фотоплан представляет собой уточненную фотосхему, составленную из трансформированных отпечатков, но приведенную к заданному масштабу и имеющую подписи местной ситуации, горизонтали и отметки высот. Таким образом, он совмещает содержание обычной крупномасштабной топографической карты и исключительную документальную подробность изображения, свойственную аэрофотоснимкам.

Из сказанного следует, что аэрофотоснимки представляют ряд существенных преимуществ по сравнению с обычными картами уже по одному тому, что дают подлинное и не схематизированное в результате генерализации и применения условных обозначений изображение местности.

При наличии небольшого опыта в обращении с аэрофотоснимками чтение их (дешифрирование) не сложнее, чем чтение обычной крупномасштабной карты. Опыт дешифрирования легко приобретается при сопоставлении аэрофотоснимков с картой и тем более с местной ситуацией (при сличении с натурой), т. е. при полевом дешифрировании.

Подбор материала по геологическому строению водосбора изучаемого участка, долины, поймы и русла реки. Основная цель работы — получить представление о размываемости пород на водосборе изучаемого участка и особенностях их переноса в реки, о наличии участков речной долины, поймы и русла реки, на которых имеются выходы трудноразмываемых пород и русловой процесс не может по этой причине получить свободного развития, а транспорт наносов принимает специфические формы. Кроме того, следует стремиться получить материал по особенностям строения аллювия, следовательно, особенностям накопления наносов и их размыва.

В этих целях желательно иметь по исследуемому району геологические и почвенные карты, освещающие водосбор и пойму реки, материалы бурения в долине реки (на ее склонах, на пойме, в русле), геоморфологические описания. Большое значение имеют данные по эрозионному смыву, овражной деятельности, распашке. Они существенно дополняют и уточняют представление об условиях формирования твердого стока.

Существенную помощь в отношении получения данных о геоморфологии водосборов, пойм и речных долин оказывает дешифрирование аэрофотоснимков. О приемах работы с ними см. стр. 256.

Сбор сведений об особенностях водного режима и стока наносов. Основная задача этой работы — получить суждение о вероятном режиме деформаций русла и поймы реки как в многолетнем, так и во внутригодовом разрезе.

При этом должны быть получены:

1) гидрографы и графики колебания уровня воды по водомерным постам и гидростворам, расположенным на участке, за средний, маловодный и многоводный годы, графики изменения мутности за те же годы;

2) данные о норме стока и средних многолетних и крайних значениях расходов воды и наносов;

3) данные о гранулометрическом составе наносов и донных отложений;

4) характеристики водного и ледового режима и режима твердого стока;

5) данные о распределении скоростей течения воды по длине участка, на отдельных морфологических образованиях (плёсах, перекатах) и во времени (хотя бы наибольшие скорости и скорости в межень);

6) данные о сроках прохождения ледоходов (осеннего и весеннего), толщине льдин, густоте, местах образования зажоров и заторов для суждения о воздействии льда на берега и сооружения в русле и на пойме;

7) отметки меженных и наивысших уровней воды, бровок берегов и поверхности поймы, выхода воды на пойму, о скоростях течения на ней, о доле расхода воды, проходящего на пойме, о порядке и сроках затопления поймы и освобождения ее от воды, об аккумулирующей способности (вероятности застоя воды после спада половодья), о размывах и намывах поверхности поймы.

Все эти материалы следует стремиться получить, даже если имеются только общие и качественные характеристики.

б. Обработка материалов по русловому процессу

Обработку этих материалов рекомендуется проводить по следующим этапам:

1) предварительный общий морфологический анализ картографического и аэрофотосъемочного материала;

2) определение количественных значений измерителей крупных форм, характеристик русловых и пойменных деформаций на основе сопоставления съемок разных лет;

3) анализ данных по водному режиму и твердому стоку;

4) составление гидролого-морфологической схемы руслового процесса.

Работы по первым трем этапам исследований могут вестись одновременно, четвертый этап работ является, по сути дела, обобщением всех остальных проработок.

Анализ по картам и аэрофотоснимкам основных и морфологических образований в русле и на пойме реки, выделение морфологически однородных участков. В результате предварительного анализа руслового процесса должен быть установлен его тип — схема развития типичных крупных форм русла и особенности влияния на ход деформаций основных факторов, определяющих развитие процесса.

Тип руслового процесса устанавливается по картам и аэрофотоснимкам по признакам, описанным в главах III—VII. Затем выделяются морфологически однородные участки и основные общие тенденции переформирований русла (гл. X), а также особенности развития отдельных крупных форм русла. В соот-

ветствии с указаниями гл. VIII производится определение значений основных измерителей типов руслового процесса, устанавливаются морфометрические и гидроморфологические зависимости, оцениваются скорости плановых и высотных деформаций.

Измерительные операции производятся в соответствии с приемами, рекомендуемыми для картометрических измерений в работе Попова (1961). На аэрофотоснимках наносятся границы поймы, средняя линия русла и поймы, разбивается километраж по ним и намечаются точки перегибов русла.

Ниже помещены рекомендации по приемам, позволяющим уточнять схемы деформаций русла и оценивать особенности основных факторов руслового процесса.

Восстановление прежних положений речного русла по аэрофотоснимкам. Для подтверждения общих выводов, полученных при предварительном общем морфологическом анализе карт и аэрофотоснимков, и создания более детальных представлений об особенностях плановых деформаций макроформ рекомендуется пользоваться разработанными автором приемами восстановления прежних положений берегов речного русла на основе анализа строения микрорельефа пойм по аэрофотоснимкам, позволяющим составить общую схему плановых деформаций русла.

Следует отметить, что этот прием уже находит практическое применение, в частности, используется для выявления на реке участков с устойчивыми берегами и тенденцией к деформации берегов при выборе мест расположения опор линий высоковольтных передач при их переходах через реки и мест водозаборов.

Подробное обоснование этих приемов изложено в статье автора (1956). Ниже приведены только указания по технике работы.

Восстановление прежних положений речного русла следует начинать на участках выпуклых берегов по рисункам микрорельефа, хорошо согласующимся с общими очертаниями современного русла.

В первую очередь восстанавливаются положения бровок выпуклых берегов, наиболее близких к современному руслу, а затем можно вести работу, последовательно отдаляясь от русла в глубь поймы. Длина участка, для которого производится восстановление прежних положений речного русла, как минимум должна охватывать две смежные излучины русла.

Практически работа ведется следующим образом. На снимках очерчивается рамка, ограничивающая исследуемый участок. Затем на них накладывается калька. На кальку переносится указанная рамка и современные контуры речного русла и проводится линия, соответствующая бровке гребня (старого берегового вала), расположенного непосредственно за современным

береговым валом на выпуклом берегу, сначала одной излучины, а затем смежной. Таким образом, полученные линии будут соответствовать положению бровок: одна — правого, другая — левого берега русла при его положении, непосредственно предшествующем современному. Так как полученные линии будут соответствовать различным берегам реки, то на кальке их концевые участки будут расходиться в плане на величину, равную ширине русла реки на данном участке. Получив положение указанных линий, которые можно назвать опорными, легко получить и общие очертания русла. Для этого надо продолжить каждую из опорных линий параллельно друг другу. В итоге будет получено общее очертание речного русла при его положении, непосредственно предшествующем данному. Затем следует нанести среднюю линию этого русла, определив ее графически. После этих операций калька снимается с аэрофотоснимков, на них накладывается следующий чистый лист кальки, на который наносится рамка участка и современное положение русла. На новой кальке наносится описанным выше способом следующее по порядку положение русла и т. д.

В результате получается серия калек, на каждой из которых зафиксирована рамка, современное положение русла и более древнее. При составлении схемы кальки последовательно нумеруются в порядке расположения изображенных на них положений русла по отношению к современному. Накладывая кальки одна на другую и совмещая их по рамкам и положению современного русла, легко проследить, как изменялись очертания русла в плане, и получить общую схему плановых деформаций изучаемого участка реки, причем за очень большие промежутки времени (столетия и тысячелетия). Для большей наглядности схемы рекомендуется наносить на нее не оба берега реки, а только среднюю линию русла при каждом его положении.

Если восстановление прежних положений русла вести в строгой последовательности, то в ходе работы удается привлечь к построению не только системы, хорошо согласующиеся с современным положением русла, но и системы, на первый взгляд не увязывающиеся с ним, но хорошо согласующиеся с его более древними положениями.

После получения известных навыков в производстве этой работы восстановление прежних положений русла можно вести не для каждого гребня, а для наиболее характерных положений, обычно хорошо выявляющихся при общем просмотре структуры рисунка микрорельефа поймы в пределах изучаемых излучин.

Для приближенной ориентировки можно рекомендовать наносить прежние положения русла через определенное число гребней. Это возможно потому, что специально произведенные подсчеты показали, что число гребней, приходящихся на единицу длины, в пределах современной поймы не существенно.

Следовательно, пойма формировалась в условиях примерно одинаковой водоносности и темпы перемещения выпуклых берегов развивающейся извилины русла (двух смещенных излучин) не слишком разнятся друг от друга. Более тщательный анализ гребней показывает, что размеры, конечно, меняются в зависимости от чередования многоводных и маловодных периодов, но изменения эти не слишком велики.

Нарушения в ходе развития смежных излучин обычно отмечаются в случаях, когда они достигают значительной кривизны, в случаях прорывов петель и т. п. Приобретение навыков в восстановлении прежних положений речного русла позволяет в некоторых случаях прямо по характеру рисунка систем гребней (вееров перемещения русла) представить себе схему плановых деформаций. Так, например, наличие внутри петли русла рисунка, напоминающего полностью развернутый веер с полосами, изогнутыми в стороны от реки, показывает, что данная петля в ходе своего развития одновременно смещалась вниз по течению. В этом случае восстановление прежних положений речного русла оказывается возможным на основании анализа рисунка микрорельефа только на одном берегу. Признаками наличия недавних прорывов петель является наличие в русле обширной широкой, но короткой косы со слабо выраженным микрорельефом, образующейся на участке ниже прорыва перешейка.

Различно ориентированные системы вееров оказываются обычно и разновысотными. Как правило, поверхности древних систем вееров (не согласующихся с современными положениями русла) оказываются повышенными по сравнению с современными. Наличие разных систем вееров, резко несогласных по своим очертаниям с современным руслом, нередко можно встретить в непосредственной близости от реки, преимущественно у подмываемых вогнутых берегов. Они также свидетельствуют о наличии прорывов петель и изменении направления деформаций.

Получение схем плановых деформаций русла позволяет выявить границы, которых могут достигать вершины излучин в ходе своего развития (пояс меандрирования). Тем самым можно оценить и стадию развития излучин, соответствующую их современному положению.

При оценке современных тенденций развития излучин следует широко использовать приемы морфологического анализа — анализировать формы скоплений наносов в русле, оценивая возможные изменения в водном режиме и характере поступления наносов.

Схемы плановых деформаций русла позволяют выявлять участки с наиболее устойчивым и наиболее сильно деформируемым руслом, определять длины фронтов размыва и намыва берегов и их изменение в ходе развития излучин (см. рис. 56).

Для определения сроков деформаций можно пользоваться рядом косвенных признаков, описанных в гл. VIII, но наиболее надежно они могут быть определены только на основе сопоставления карт различных лет съемки.

Схемы плановых деформаций могут быть составлены нередко и для целых участков большого протяжения длиной в сотни километров.

Во всех этих случаях не следует упускать из вида то обстоятельство, что полные циклы деформаций нередко протекают в течение столетий, в то время как сроки, представляющие наибольший практический интерес, ограничиваются десятилетиями. Кроме того, наиболее надежны схемы, построенные по системам вееров перемещения русла, хорошо согласующимся с его современными очертаниями. Поэтому построение возможно более полных схем следует выполнять только для отдельных наиболее важных участков и для суждения об общем характере плановых переформирований. Расчетное же значение имеют преимущественно схемы, составленные по системам вееров перемещения русла, хорошо согласующимся с его современным положением.

Эти схемы правомерно интерпретировать количественно и по ним могут быть установлены средние величины линейных и объемных деформаций и сопоставлены изменения кривизны русла с помощью графиков распределения кривизны (рис. 79) и т. п.

Приемы сопоставления съемок разных лет. Сопоставление карт различных лет съемки выполняется для получения количественных характеристик деформаций речного русла и поймы. Существует ряд приемов сопоставления русловых съемок.

При обработке материалов изысканий на судоходных реках Гипроречтрансом для участков, затруднительных для судоходства, рекомендуется составление так называемых сопоставленных планов. Они представляют собой расположенные один над другим планы участков речного русла, составленные по съемкам, выполненным в разное время, и имеющие общую координатную сетку. По квадратам этой сетки и производится сопоставление рельефа речного русла и бровок его берегов.

Сетка квадратов строится следующим образом. На съемках опознаются местные надежные (не изменяющиеся во времени) ориентиры. Через идентичные ориентиры проводится линия, положение которой в пространстве одинаково на всех сопоставляемых планах. Эта линия является опорной — от нее строится сетка квадратов. В случаях когда известны точные координаты отдельных точек, построение упрощается и более точно, чем построение сетки квадратов по местным ориентирам.

Для суждения об общем характере и направлении деформаций в многолетнем разрезе можно ограничиться сопоставлением

съемок, выполненных в межень и в годы, падающие на периоды с неслишком разнящейся водностью.

Для получения данных о величинах сезонных деформаций подбираются съемки, выполненные при разных высотах стояния уровня. Масштабы этих планов 1 : 10 000—1 : 25 000.

Для детального анализа сезонных деформаций по сопоставленным планам составляются так называемые схемы деформаций русла.

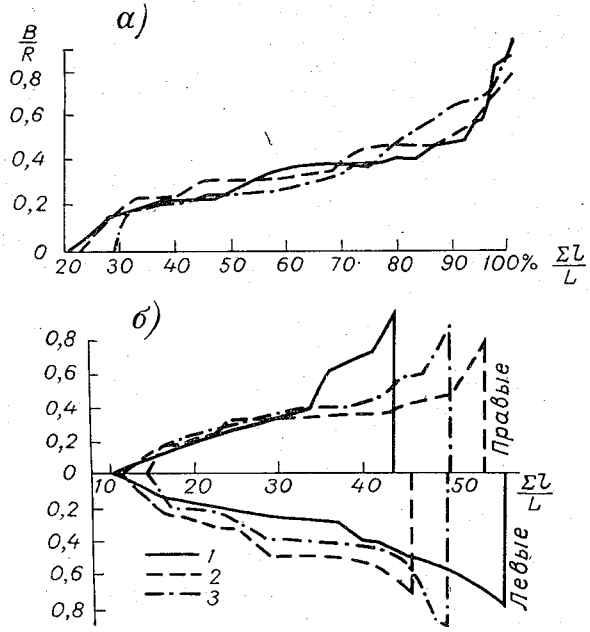


Рис. 79. Совмещенный график распределения кривизны русла по длине реки для различных его положений, восстановленных по аэрофотоснимкам.

а — общий вид участка, *б* — раздельно для левых и правых поворотов; *1* — исходное положение, *2* — промежуточное, *3* — современное.

Схемы деформаций русла представляют собой план участка реки с показанием изолиниями величин размывов и намывов русла. Работа по их составлению практически осуществляется следующим образом.

На кальку с одного из планов копируются горизонтали и ориентиры, по которым можно произвести накладку точек на другую съемку (сетка квадратов, реперы, здания и т. п.). Затем калька накладывается на второй план и на ней помечаются все точки пересечения горизонталей, и у этих точек выписываются величины деформаций. Если при этом обнаруживается, что число

точек недостаточно (на плане есть участки с малым числом точек или без точек), то проводятся дополнительные горизонтали (путем интерполяции между показанными на съемках), и получаются для недостаточно освещенных участков дополнительные точки (в местах пересечения дополнительных горизонталей). По полученному таким образом полю точек проводится изолиния, соответствующая нулевым деформациям. Эта линия разграничивает участки размыва и намыва русла, а затем проводятся через заданные интервалы (например, через 10 см) изолинии размывов и намывов (рис. 80, 81).

Во всех описанных случаях сопоставление планов и оценка деформаций ведется для коротких участков и за относительно короткие сроки.

Для морфологического анализа вместе с тем необходимо иметь материалы сопоставлений по участкам большого протяжения и за длительные периоды.

Применительно к этой задаче рассмотренные приемы сопоставлений планов различных лет съемки могут быть существенно упрощены.

Для выделения зон размыва и намыва, отражающих общую тенденцию плановых деформаций речного русла, следует сопоставлять положения хорошо выраженных бровок берегов русла, островов и протоков, которые вырабатываются обычно в результате длительного взаимодействия потока и грунтов, слагающих дно долины. Эти бровки будут выражать границу между однонаправленными условно необратимыми плановыми деформациями русла и обратимыми деформациями подвижных скоплений наносов в нем. Она обычно бывает хорошо выражена морфологически и может быть легко выделена на плане или, еще лучше, на аэрофотоснимках.

На намываемых берегах определение ее несколько сложнее. На намываемых участках берега можно обычно наметить три хорошо заметные на плане и тем более на аэрофотоснимке линии. Одна из них — линия, соответствующая внешнему подводному контуру пляжа, побочня или косы, вторая — урезу воды в момент съемки и третья — гребню. Наиболее устойчива во времени — линия гребня первого от реки берегового вала. Изменение ее положения происходит только в том случае, если река имеет длительно происходящие однонаправленные тенденции общих плановых деформаций русла.

В тех случаях, когда береговой вал недостаточно хорошо выражен как элемент рельефа, линия, разделяющая подвижные скопления наносов от более устойчивой части берега, обычно легко обнаруживается как граница распространения травяной и кустарниковой растительности. Следует отметить, что этот признак широко используется при топографических съемках для

Рис. 80. Современные планы излучины р. Поломети (русловая съемка ВНИГЛ).

1 — бровка берега 24/IV 1957 г.; *2* — то же 25/IV 1957 г.; *3—4* — горизонтали дна за эти даты; *5* — линия нулевых деформаций (проведены через пересечения одноименных горизонталей разных лет).

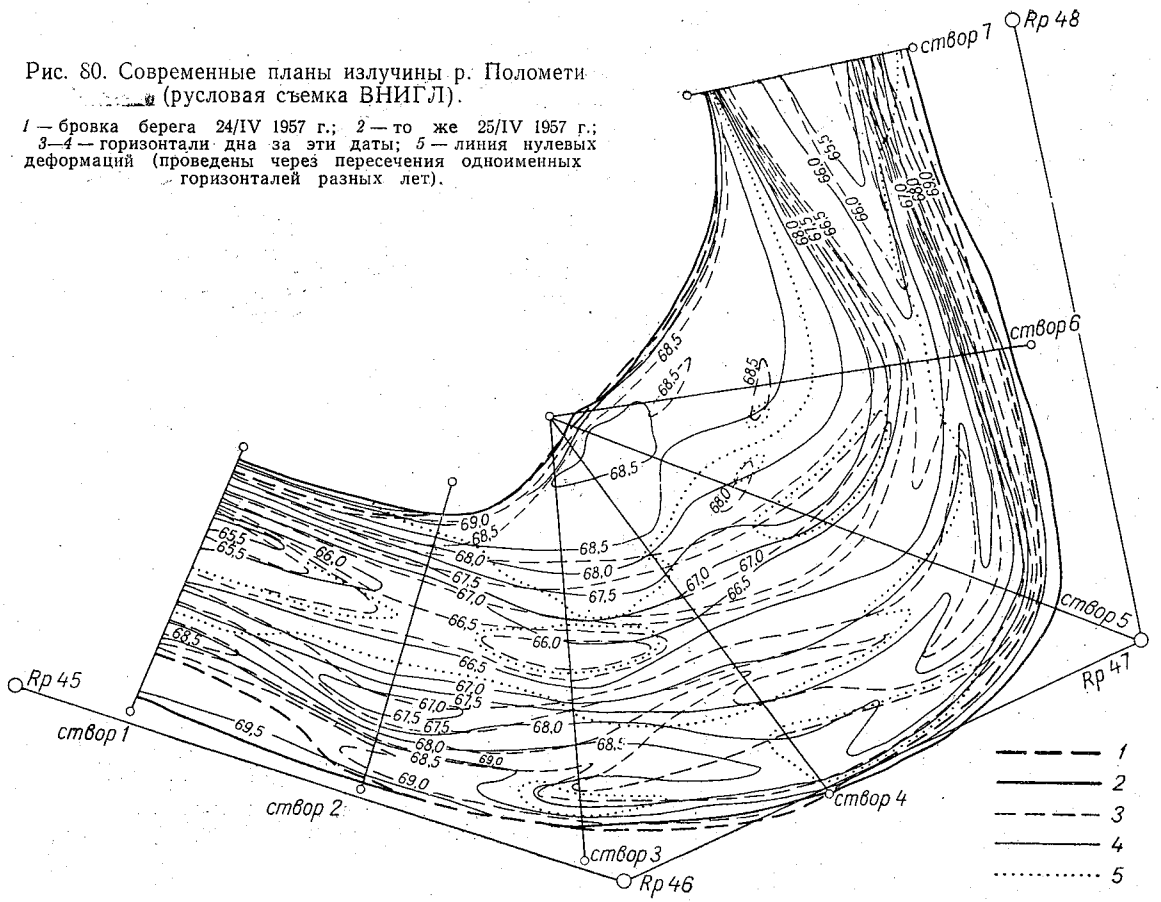
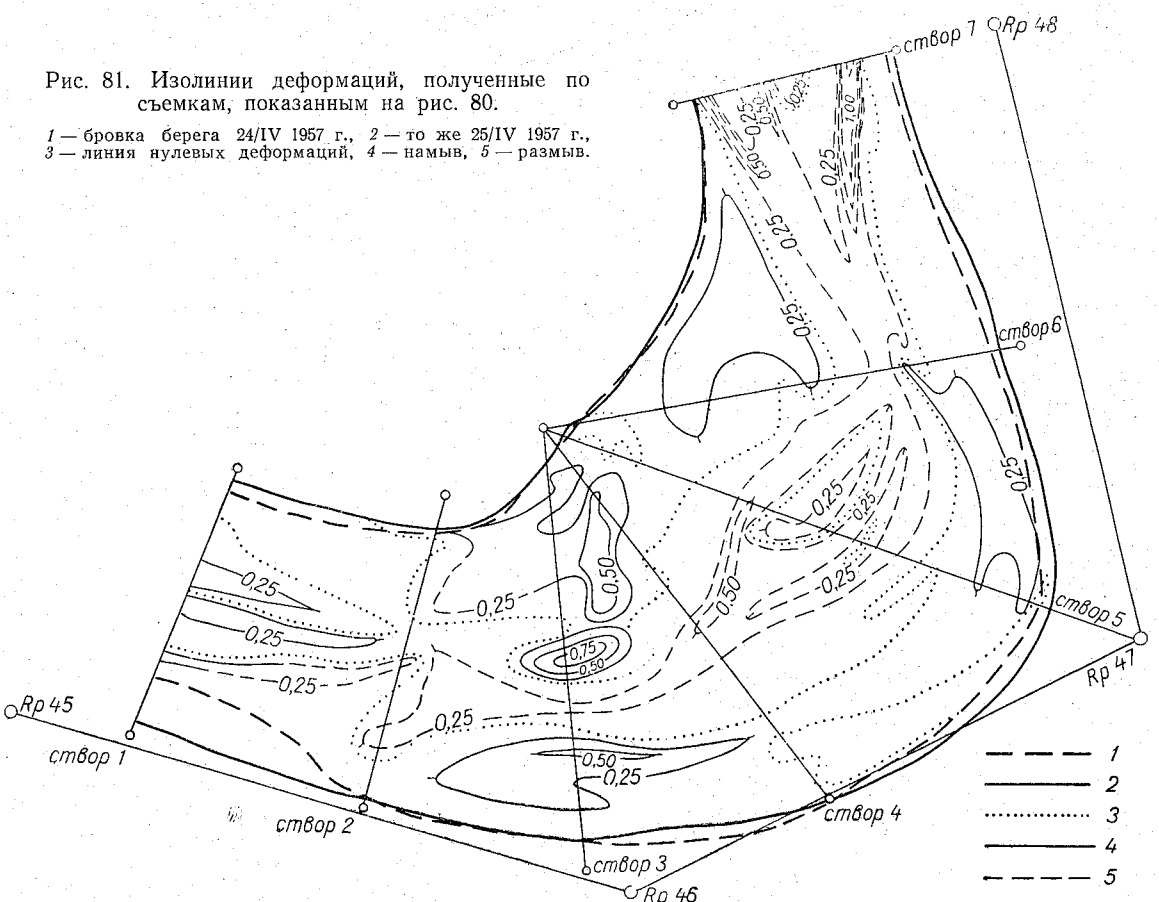


Рис. 81. Изолинии деформаций, полученные по съемкам, показанным на рис. 80.

1 — бровка берега 24/IV 1957 г., *2* — то же 25/IV 1957 г., *3* — линия нулевых деформаций, *4* — намыв, *5* — размыв.



выяснения положения бровки меженного берега в случаях, если она недостаточно четко выражена как элемент рельефа.

Наиболее показательным приемом сравнения является непосредственное наложение сопоставляемых съемок разных лет одна на другую. Совмещение следует производить по участкам не очень большой длины с тем, чтобы по возможности исключить неточность самой съемки.

Прежде чем окончательно наложить сравниваемые съемки одна на другую, необходимо убедиться в том, что в период между съемками деформации русла были однонаправленными, т. е. происходил устойчивый размыв или намыв данного участка берега русла или островов. Для этого все имеющиеся по участку съемки сравниваются между собой любыми приемами и затем уже для окончательного сопоставления выбираются такие из них, в период между которыми деформации были однонаправленными. После этого можно приступить к окончательному наложению съемок.

Дальнейшей задачей является разграничение зон размыва или намыва участков берега, островов, протоков (рис. 82).

Вычисление размеров деформаций русла и поймы при разновидностях меандрирования. Сопоставляя такие контуры, можно наметить площади размыва и намыва берегов русла и островов. Их рекомендуется иллюминовать разными цветами (размыв — синим, намыв — красным) или штриховкой (размыв — косая штриховка, намыв — точки).

По этим данным наглядно выявляются общая тенденция и размеры линейных деформаций. Последние получаются делением площади размыва или намыва на наибольшую длину участков.

Вычисление линейных деформаций осуществляется теми же приемами, которые используются для определения средней ширины озер или других сложных геометрических фигур, т. е. делением их площади на наибольшую длину. Наибольшая длина участка деформаций может быть принята как длина фронта размыва или намыва.

Если на съемках имеются высотные горизонтали или отметки высот берегов, то по выделенным зонам размыва или намыва можно вычислить и объемы деформаций, а зная типичное строение пойм, — определить вероятную долю местного поступления в поток взвешенных и влекомых наносов.

Способы определения объемов деформаций берегов следует рассмотреть подробнее, так как эти данные могут быть использованы для составления уравнения баланса наносов.

Как указывалось, деформации подвижных форм скоплений наносов (гряд, побочней, осередков, кос) по отношению к общим плановым деформациям макроформ (излучина, острова) можно принять как обратимые, а изменения общих плановых

очертаний русла между бровками меженных берегов — условно необратимыми по отношению к деформациям микро- и мезоформ. Таким образом, для оценки объемов материала, поступающего в поток и расходуемого из него на общие плановые деформации русла, следует оценить объемы размыва и намыва берегов русла.

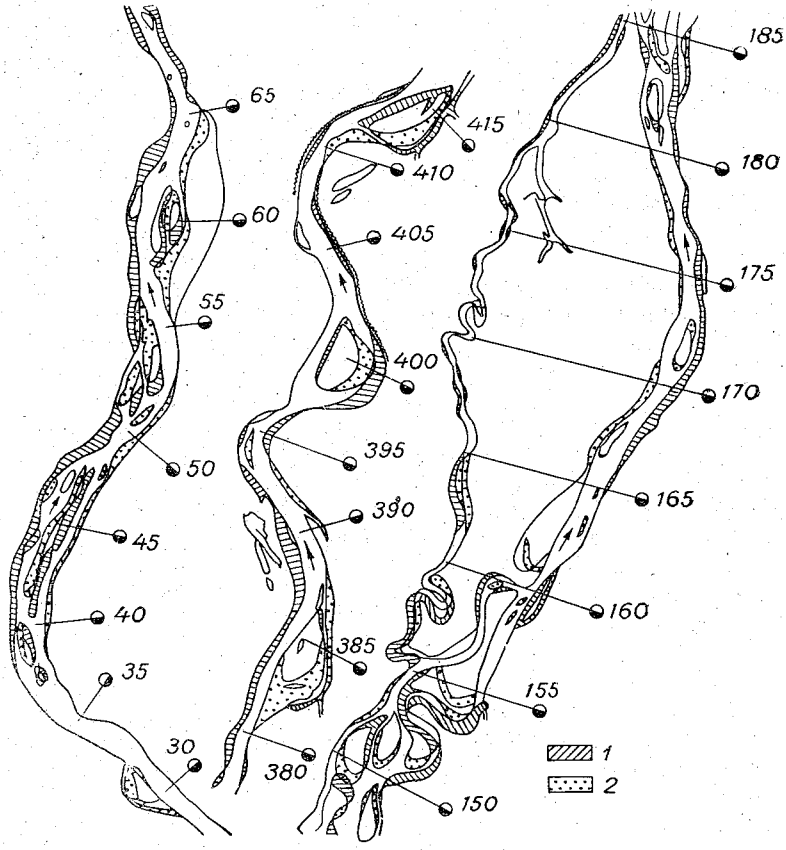


Рис. 82. Совмещенные лоцманские карты для определения линейных и объемных деформаций берегов русла.

1 — размыв, *2* — намыв.

Для этого необходимо получить данные о площадях деформаций берегов (площади их размыва и намыва), имеющих длительное и однонаправленное развитие, и иметь данные о профиле объема отложений, подвергавшихся однонаправленному размыву или сформировавшихся в ходе также однонаправленного в течение ряда лет намыва.

Вопрос об определении площадей размыва и намыва был рассмотрен выше. Что касается вопроса о профиле размываемых и намываемых берегов, то определение его может быть упрощено следующим образом.

На рис. 83 *а* показан план участка с размываемыми *АА′* и намываемыми *ББ* берегами. Положению точки *А* в плане в любом профиле соответствует бровка подмываемого берега, точка *С* будет соответствовать подошве подмываемого склона, находящегося на границе зон обратимых и необратимых деформаций.

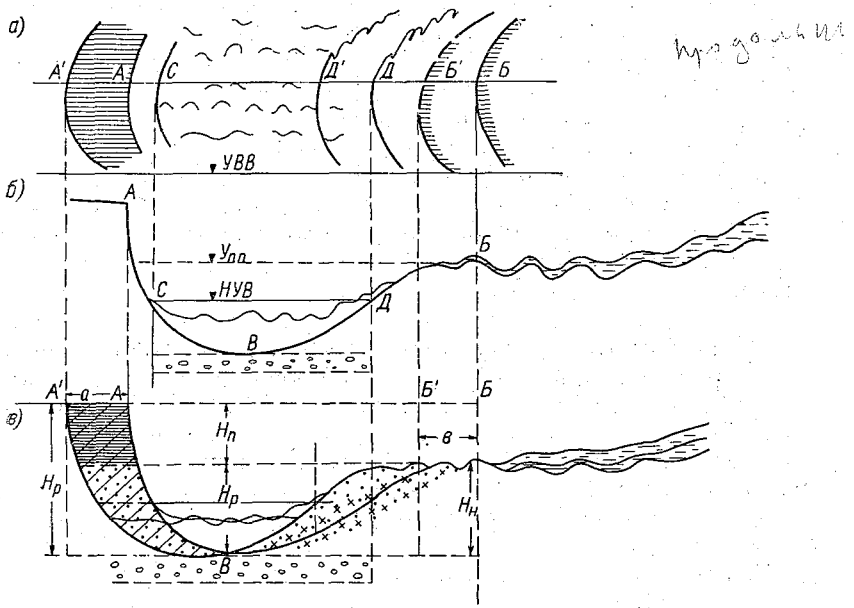


Рис. 83. Выделение зон необратимых и обратимых деформаций в поперечном сечении русла.

а — зоны обратимых деформаций, *б* — однонаправленные деформации берегов, *в* — схематизированное изображение деформаций в сечении русла.

Высотное положение точки *С* должно находиться на отметке уровня воды в межень, так как только в этот период здесь может идти формирование подвижных форм русловых образований, входящих в зону обратимых деформаций (в половодье у подмываемых берегов будет наблюдаться разрушение этих скоплений и вынос наносов).

Граница зоны обратимых деформаций на противоположном намываемом берегу, очевидно, будет лежать на более высокой отметке — на уровне поверхности побочней (*БД*), поскольку их поверхность будет подвергаться обратимым деформациям, приводящим на подъеме половодья к намыву побочней, а при его

спаде к размыву. Эти положения и показаны на поперечном сечении русла (рис. 83 *б*).

Для того чтобы определить высоту берега для подсчета объема его размыва, можно было бы измерить расстояние по вертикали от бровки берега до наинизшей отметки дна. Однако, имея в виду, что обратимые деформации захватывают какой-то слой отложений на дне и съемки могут отразить случайное положение этой точки, высоту берега следует вычислять над отметкой поверхности базального горизонта (точка *B*), если он где-либо обнажается на данном бесприточном участке, или определить точку *B* как отметку дна в наиболее глубоком плёсе на данном участке, что легко сделать при просмотре карт.

Тогда, как это видно на рис. 83 *в*, площадь однонаправленного размыва русловой и пойменной фаций и их намыва в поперечном сечении может быть определена перемножением величины смещения бровок берегов (*в*) на высоту $H_р$ для размываемого берега и высоту $H_н$ для намываемого, а объем размыва на участке может быть определен умножением площади размыва или намыва в плане на среднюю высоту берега на участке этих намывов или размывов.

Отметим попутно, что вычисление высоты размываемого берега над отметкой поверхности побочней позволяет оценить объем размыва пойменной фации аллювия, а разница суммарного объема размыва и объема размытой пойменной фации дает возможность оценить и объем размыва русловой фации аллювия. Объем размыва пойменной фации в условиях динамического равновесия в обратимых деформациях можно вычислить и как разность между суммарным однонаправленным размывом и намывом.

Таким образом, в результате сопоставления съемок разных лет можно получить средние количественные характеристики деформаций русла и поймы для периодов между годами сопоставляемых съемок (в виде линейных показателей), характеризующих плановые деформации отдельных русловых образований, берегов русла и поймы, а также получить суждение об объемах перемещаемых масс наносов.

Следует иметь в виду, что данным об объемах деформаций, полученным таким путем, не следует придавать большого самостоятельного значения из-за приближенности результатов сопоставления карт. Их следует рассматривать как предварительную, грубо приближенную характеристику, дополняющую морфологический анализ и пригодную только в том случае, если полученные соотношения элементов баланса наносов хорошо согласуются с выводами этого анализа и данными о местных деформациях русла и поймы.

Значительно более полные и надежные данные могут быть получены при производстве морфологической съемки (см.

гл. XIV). Тогда все полученные объемные характеристики деформаций могут быть с большой уверенностью использованы для составления уравнения баланса и его интерпретации, для установления связей между различными соотношениями его элементов и морфологическим обликом русла и поймы, а также для целей прогноза русловых и пойменных переформирований.

Графическое оформление данных о линейных деформациях русла. При сопоставлении карт для нужд анализа руслового процесса на участке большого протяжения получаем данные о величине смещения береговых линий русла, островов, длине фронтов размыва и намыва берегов, площади, занятой береговыми переформированиями. Эти данные для получения наглядных характеристик деформаций целесообразно показать в виде графиков, иллюстрирующих распределение по длине изучаемых элементов, и в виде средних характеристик на морфологически однородных участках.

Рекомендуется построить диаграмму изменения по длине реки величин плановых смещений берегов русла и длин фронтов размыва и намыва. График позволяет наглядно выявлять участки с наибольшими и наименьшими плановыми деформациями русла и закономерности чередования зон размыва и намыва и длин их фронтов, что позволяет судить и о типе руслового процесса, и о стадиях его развития. График изображен на рис. 84.

При наличии на реке большого числа островов для изображения характера их деформаций следует величины деформаций бровок берегов русла откладывать не от одной оси, а от двух параллельных. В промежутке между этими осями можно показать деформации островов и одновременно их направление (перемещение островов вверх по реке, вниз, в стороны, сработка острова, разрастание острова).

Графическое оформление данных об объемах деформаций. Для анализа распределения величин элементов баланса наносов по длине реки удобно изображать их ход в виде систем интегральных кривых, которые строятся по данным сопоставления карт.

При построении интегральных кривых поступления и расходования наносов по оси абсцисс откладываются расстояния, а по оси ординат — нарастающие по длине реки объемы поступления и расходования наносов. По этим данным могут быть построены интегральные кривые среднегодовых объемов основных элементов баланса наносов (гл. VII).

Сопоставление хода этих кривых показывает распределение величин различных видов поступлений и расходования наносов по длине реки и изменение соотношения различных статей прихода и расходования наносов внутри участков и в целом по морфологически однородному участку (рис. 85).

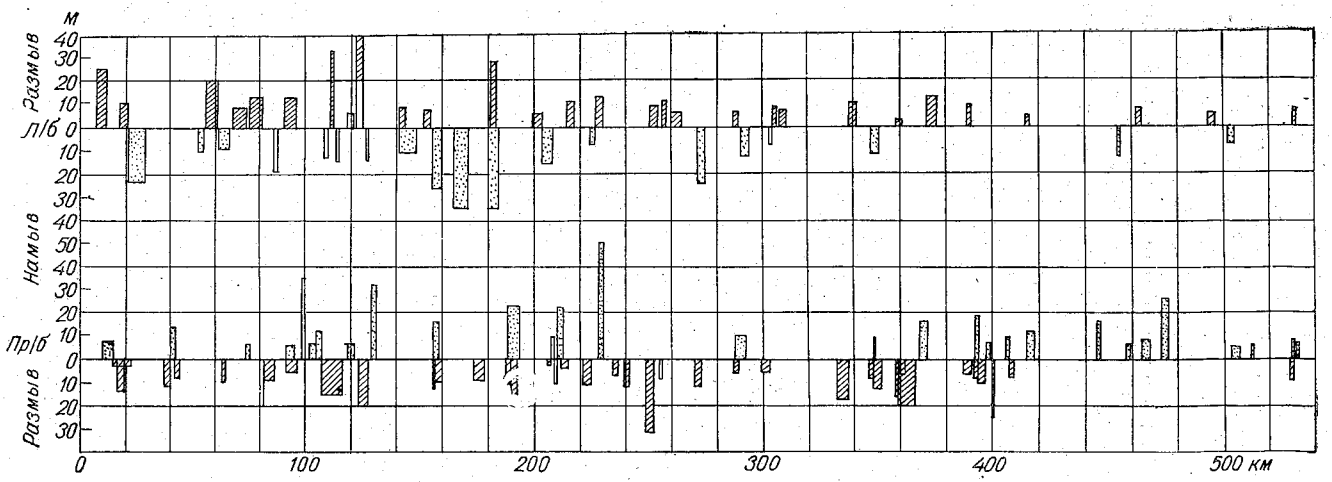


Рис. 84. Диаграмма распределения величин плановых смещений русла по длине р. Волги между Волгоградом и Астраханью.

По этим кривым можно выявить участки реки, на которых сосредоточиваются основные объемы поступления и расходования наносов (участки с наиболее крутым ходом кривых), и участки с устойчивым руслом (ход кривых близок к горизонтальному). Снося эти участки на горизонтальную ось, можно получить наглядную схему чередования по длине размываемых и намываемых участков как в целом по руслу, так и по отдельным берегам и для островов. Это имеет существенное значение и для морфологического анализа и для получения ряда перечисленных выводов, например, для выбора мест расположения

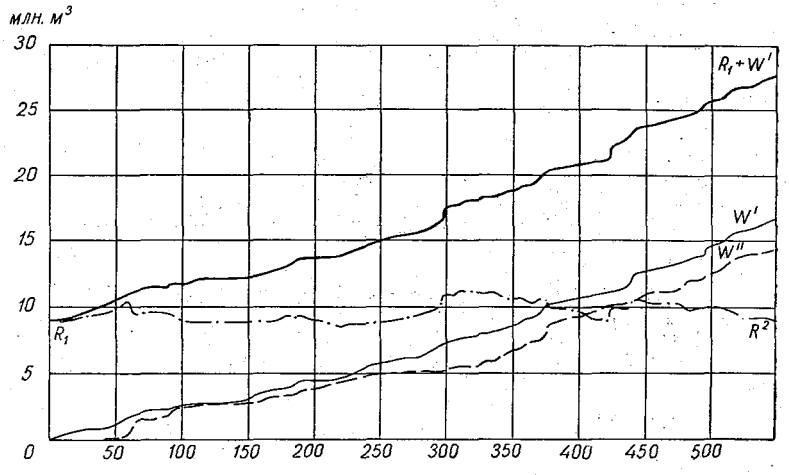


Рис. 85. Интегральные кривые поступления и расходования наносов в ходе плановых деформаций берегов, по укрупненным данным.

сооружений в русле и на пойме, для планирования русловыправительных работ, оценки их эффективности и т. п. С помощью интегральных кривых путем простейших графических построений можно построить кривую хода объемов наносов, переносимых потоком в пределах его русла между створами гидрометрических наблюдений. Это имеет существенное значение для оценки вероятных величин стока наносов (гл. VII), для границ морфологически однородных участков, на которых далеко не всегда могут оказаться гидрометрические створы. Подобное построение можно использовать и для оценки репрезентативности существующих гидрометрических створов и надежности получаемых по данным наблюдений данных, так как с его помощью устанавливается влияние на сток наносов местных их переотложений.

Как указывалось, данные сопоставления карт различных лет съемки, очевидно, будут давать приближенные характеристики,

которым не следует придавать большого абсолютного значения, и использовать их можно, если они хорошо согласуются с данными гидролого-морфологического анализа карт.

Определение скорости сползания ленточных гряд и побочней. При ленточногрядовом и побочневом типах руслового процесса сопоставление разновременных съемок реки позволяет оценить среднюю скорость сползания ленточных гряд и побочней за период между съемками, пользуясь совмещением графиков распределения глубин по длине исследуемых участков.

Построение графиков распределения глубин по длине речных участков практиковалось еще при обработке данных гидрографических исследований рек. По оси абсцисс этих графиков откладываются расстояния по линии максимальных глубин, а по

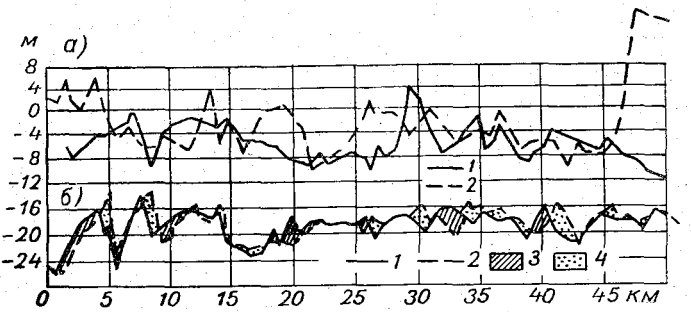


Рис. 86а. Определение скорости сползания ленточных гряд путем совмещения продольных профилей русла.

а — отметки берегов (*1* — левый берег, *2* — правый берег); *б* — отметки дна по линии наибольших глубин (*1* — 1954 г., *2* — 1956 г., *3* — размытые части гряд, *4* — намытые части гряд).

оси ординат — наибольшие в сечениях русла глубины от среднего уровня воды. Исходными материалами для построения таких графиков являются данные продольного промера. Особенно хорошие данные дает использование материалов эхолотирования, увязанного с аэрофотоснимками. Графики могут быть построены по материалам лоцманских карт, а также по любым съемкам рек с показанием рельефа дна русла.

Рекомендуется вначале произвести сопоставление или совмещение полных съемок разных лет, а затем уже на этой основе сопоставлять сами графики. В крайнем случае графики могут совмещаться по принципу наилучшего совпадения, так как и в этом случае достаточно четко выявляются смещения характерных переломов линии глубин.

После совмещения тем или иным способом графиков распределения глубин (рис. 86а) с них снимаются величины сдвига характерных точек (гребней гряд, точек, соответствующих их подвальям) по горизонтальной оси графика и вычисляются

средние значения сдвига. Путем деления этих средних величин на период времени между сравниваемыми съемками оценивается средняя скорость сползания ленточных гряд (побочней) в м/год.

При побочневом типе руслового процесса скорость сползания гряд (побочней) может быть оценена по плановым характеристикам русла — по изменению положения точек перегиба средней линии русла, проведенной между урезами воды в межень и таким образом очерчивающей меженное положение побочней (рис. 86б). Эта средняя линия русла, учитывая обычно шахматное положение побочней, получается извилистой. Поэтому точки перегиба ее достаточно четко выделяются даже на глаз. После нанесения точек перегиба русла съемки сопоставляются в общей

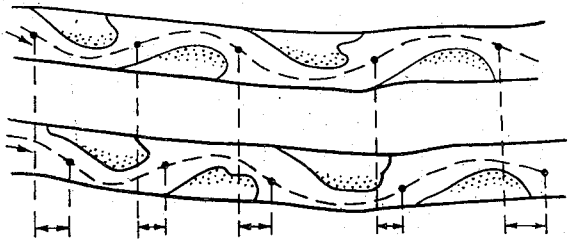


Рис. 86б. Определение скорости сползания побочней по смещению точек перегиба средней линии меженного русла по съемкам разных лет (принципиальная схема).

координатной сетке. Местоположение их сносится на горизонтальную ось и определяются величины сдвигов точек. Затем вычисляется среднее значение сдвига и путем деления его на число лет между съемками определяется средняя скорость сползания побочней.

Очевидно, что все эти операции следует производить для практически бесприточных участков, с примерно одинаковыми уклонами свободной водной поверхности и однородным составом донных отложений.

Прием определения скорости сползания побочней по смещению точек перегиба русла можно применить и для оценки скорости сползания излучин при ограниченном меандрировании.

Анализ распределения мутности и расходов взвешенных наносов по длине реки. Поскольку для оценки русловых деформаций можно использовать уравнение баланса наносов, а в качестве его составных элементов — данные о взвешенных наносах, то следует подробнее остановиться на приемах анализа этих величин.

Приемы анализа фактических материалов по стоку наносов и связи мутности, расходов воды и колебаний уровня для отдельных пунктов достаточно подробно изложены в монографии Г. И. Шамова (1954) и др. Поэтому здесь остановимся главным образом на менее освещенном вопросе — на анализе хода мутности и расходов наносов по длине реки. В этих целях рекомендуется составлять графики распределения по длине реки ве-

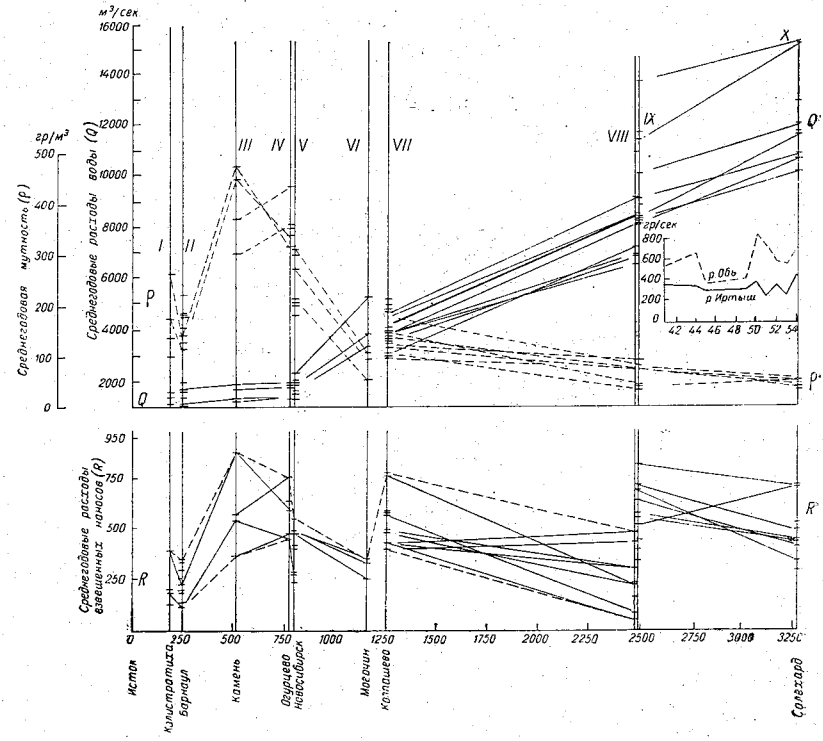


Рис. 87. Распределение по длине реки мутности расходов воды и взвешенных наносов.

Засечками на вертикальных линиях, обозначенных римскими цифрами, показаны значения ρ, Q и R за отдельные годы.

личин мутности ρ, годовых расходов взвешенных наносов R и расходов воды Q за все годы наблюдений (рис. 87).

При построении графика учитывается приход взвешенных наносов из притоков. Если фактических наблюдений по ним мало, то величины ρ, R, Q все же следует определять хотя бы приближенно, например, по картам мутности и норм годового стока и, если эти данные согласуются с общей гидролого-морфологической обстановкой на водосборе притока и морфологическим обликом русла на главной реке, то их можно использо-

вать при анализе распределения величин R, ρ и Q как в целом по морфологически однородным участкам, так и по бесприточным участкам.

При рассмотрении подобных графиков следует прежде всего обращать внимание на особенность хода кривых в отдельные годы, так как часто обнаруживаются случаи, когда ход кривых ρ и Q в годы с различной водностью оказывается неодинаковым, например, на реках с широкой поймой обнаруживается убывание мутности по длине участков в годы с высокими половодьями и увеличение в маловодные годы. Обычно это бывает связано с влиянием широких пойм. При высоких половодьях отток воды на них может вызвать некоторое осветление потока, в маловодные же годы сток наносов идет сосредоточенно в русле реки и мутность может оказаться несколько повышенной.

Резкие изменения в ходе кривых по длине реки могут быть вызваны и явлениями массового осаждения взвешенных наносов или их взмыва при поступлении на данный участок. Тем самым обнаруживаются и общие тенденции деформаций русла и поймы. Таким образом, построение этого графика позволяет углубить морфологический анализ и иногда выяснить некоторые общие тенденции развития переформирований речного русла и поймы. Кроме того, применяя графический прием определения средней величины, подобные графики помогают оценить норму стока наносов.

Построение гидролого-морфологической схемы развития руслового процесса. Данные по гидролого-морфологическому анализу рекомендуется оформлять в виде серии совмещенных графиков, показывающих распределение по длине изучаемого участка основных характеристик природных условий водосбора, морфометрических данных о русле и пойме реки, типов русловых и пойменных деформаций и границ морфологически однородных участков (рис. 76, 81—83). Поскольку они предназначены для того, чтобы охарактеризовать общий тип руслового процесса, а не его отдельные детали и, следовательно, должны обеспечивать хороший обзор значительных по протяжению участков реки, график не должен быть слишком растянутым по оси абсцисс.

Масштаб длин зависит от протяжения морфологически однородных участков. На малых и средних реках длина морфологически однородных участков обычно измеряется в километрах, на больших — в десятках и сотнях километров. На каждой схеме желательно иметь не менее 3—4 участков, чтобы проследить закономерности их смены по длине реки. Поэтому для средних и малых рек масштаб длин должен быть порядка 1 см — 1 км, а для больших — 1 см — 5 км, 1 см — 10 км.

Совмещаются следующие графики (в порядке их размещения сверху вниз).

1. График нарастания по длине реки площадей водосбора.

2. График изменения по длине реки средних годовых расходов воды.

3. График изменения по длине реки расходов взвешенных наносов и мутности.

4. График изменения по длине реки высот берегов, их строения, крупности отложений наносов и характеристик коренных пород.

5. Графики изменения по длине реки ширины русла между бровками меженных берегов.

6. Графики изменения по длине реки ширины и площадей поймы.

7. Продольный профиль русла с показанием грунтов дна, положением свободной водной поверхности в межень и половодье (при построении в одной системе отметок с графиком высот берегов по положению уровня высоких вод удобно проследить за изменениями по длине реки глубины затопления поймы).

8. Схема типичного морфологического облика русла и поймы и характера их деформаций.

а. Схема расположения русла в пределах дна долины.

б. Схема типичных макроформ на морфологически однородных участках.

в. Характеристика скорости плановых и высотных деформаций по длине участка.

К схеме прилагается:

1. Гидролого-морфологическое описание развития руслового процесса.

2. Характеристика условий формирования водного режима и стока наносов на исследуемом участке реки.

а. Условия развития эрозии на водосборе участка.

б. Условия транспортирования наносов, обусловленного особенностями изменений водного режима и поступления наносов по длине реки и влиянием ограничивающих факторов.

в. Краткая история формирования речной долины изучаемой реки.

3. Типы руслового процесса по бесприточным участкам.

а. Границы и длины морфологически однородных участков. Характеристика основных факторов руслообразования на каждом из участков, оценка общей тенденции в развитии крупных форм (стадия развития, особенность обмена наносами между поймой и руслом, тенденции к размыву, транзиту и аккумуляции наносов в русле и на пойме (донных и взвешенных).

б. Основные черты развития средних и крупных форм, морфометрические и гидроморфологические зависимости в том числе и характеристики скорости плановых и высотных деформаций.

в. Оценка характера влияния руловых и пойменных деформаций на хозяйственную деятельность (существующую и проектируемую).

4. Сводная таблица с обобщенными по бесприточным морфологически однородным участкам гидролого-морфологическими данными (морфометрия русла и поймы, измерители типов руслового процесса, характеристики стока воды и наносов, параметры морфометрических и гидроморфологических связей, оценка скорости плановых и высотных деформаций).

Способ построения всех этих графических документов гидролого-морфологического анализа ясен из рис. 88, 89. Более подробные рекомендации по построению отдельных графиков даны в работе автора (1961).

Следует еще раз подчеркнуть, что графическая интерпретация указанных выше характеристик, выполненная даже в виде грубых схем (при недостатке исходных данных), все же очень помогает производству гидролого-морфологического анализа.

При полном отсутствии исходных данных необходимо производить гидролого-морфологическую съемку (гл. XVI).

Глава XIII

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РУСЛА

Зная типичные речные морфологические образования и закономерности их изменения и имея в распоряжении систему измерителей, с помощью которых можно охарактеризовать основные особенности деформаций русла, свойственные тому или иному типу руслового процесса, можно подойти и к созданию методов инженерных расчетов на чисто морфологической основе. В этом отношении сделаны еще только первые шаги, однако и они дают возможность ответить на ряд вопросов, возникающих при строительстве сооружений и прежде всего связанных с размещением сооружений или их отдельных элементов и с выбором систем наиболее эффективных защитных мероприятий.

Из приведенных в предыдущих главах характеристик руслового процесса различного типа следует, что при ленточно-грядовом и побочневом типах руслового процесса, при которых все основные деформации речного русла сводятся к сползанию по нему крупных одиночных гряд, соизмеримых с размерами русла, главной задачей является оценка размеров сроков наступления изменений отметок дна, обусловленных сползанием этих гряд. В этих случаях изменения отметок дна, обусловленные намывом и размывом таких гряд в разные по водности

годы, не должны иметь решающего значения по следующим причинам. Эти гряды, как указывалось, обладают значительной инерционностью. Создаваясь при особенно больших половодьях или паводках, они способны длительное время сохранять свои размеры, видоизменяясь только в отдельных своих частях. Таким образом, их основные размеры должны соответствовать предельно большим значениям и могут быть приняты в расчет как обеспечивающие известный запас. В качестве примера можно сослаться на помещенное в гл. X описание формирования побочней на Нижней Волге, которые, образовавшись в период 1914—1917, 1919, 1926 и 1929 гг., сохранили свои основные размеры до момента перекрытия русла плотиной ГЭС им. XXII съезда КПСС, т. е. в течение более чем 25 лет.

При разновидностях меандрирования в дополнение к задаче расчета предельных глубин размыва и намыва русла, сохраняющих свою актуальность при проектировании самых разнообразных сооружений, встает ряд дополнительных задач, обусловленных природными особенностями развития руслового процесса при том или ином его типе.

В качестве основных из них возникают задачи расчета плановых деформаций русла и расчета спрямлений.

Рассмотрим основные расчетные схемы, предложенные для расчета на чисто морфологической основе перечисленных выше задач.

1. РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНЫХ ГЛУБИН РАЗМЫВА И НАМЫВА РУСЛА ПРИ ЛЕНТОЧНОГРЯДОВОМ И ПОБОЧНЕВОМ ТИПАХ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА И ПРИ ОГРАНИЧЕННОМ МЕАНДРИРОВАНИИ

Итак, в этих случаях важно предусмотреть ход изменения отметок дна, связанный со сползанием ленточных гряд, побочней и ограниченно меандрирующих излучин.

Обнаруженная в результате статистического анализа значений измерителей этих типов руслового процесса их устойчивость в пределах морфологически однородных и бесприточных участков дает основание считать, что и вертикальные размеры гряд — их высоты — не должны сколько-нибудь существенно изменяться по длине реки. Поэтому можно утверждать, что в условиях сползания рассматриваемых русловых форм понижение отметок дна не превзойдет отметок наиболее глубоких плёсов (подвалий гряд) на данном бесприточном участке с однородным строением берегов русла и за предельную отметку размыва можно принять отметку наиболее глубокого плёса на участке.

Для получения поперечного профиля предельного размыва (неразмываемый профиль русла) предлагается простой графический прием, обеспечивающий и возможность проследить последовательное изменение отметок дна в расчетном створе. Он

заключается в следующем. На участке реки длиной не менее двух шагов побочня, выше расчетного створа, разбиваются поперечные профили русла (5—8 профилей по длине каждого шага). Все эти профили совмещаются по средней линии русла в бровках меженных берегов и по общей вертикальной шкале и наносятся на один график (см. рис. 16). Нижняя огибающая этих совмещенных профилей и показывает предельные наибольшие глубины размыва и намыва русла в расчетном створе (низовом створе участка). Верхняя огибающая будет характеризовать предельные отметки намыва русла при наползании гребня ленточной гряды (побочня). Время, которое потребуется для того, чтобы любой из заданных поперечных профилей русла, расположенных выше расчетного, достиг его, может быть рассчитано по формуле

$$t = \frac{\lambda_{\text{п}} n}{c_{\text{п}} m},$$

где t — период времени, за который произойдет смещение заданного поперечника в расчетный створ; $\lambda_{\text{п}}$ — шаг побочня; $c_{\text{п}}$ — скорость сползания побочня, средняя по участку, м/год; n — порядковый номер заданного створа; m — расстояние данного створа от расчетного в долях от $\lambda_{\text{п}}$.

Наконец, можно указать, что площадь, заключенная между верхней и нижней огибающими совмещенных поперечных профилей, будет характеризовать мощность активной толщи донных наносов. Зная скорость сползания ленточных гряд (побочней) и площадь активной толщи донных наносов, можно приближенно оценить и норму расхода донных наносов на исследуемом участке.

Определение предельных отметок размывов и намывов при ограниченном меандрировании может быть осуществлено теми же приемами, которые были описаны выше. Разница заключается только в том, что совмещение поперечных профилей производится не по средней линии русла, а по средней линии пояса меандрирования, т. е. полосы, заключенной между касательными, проведенными через вершины излучин.

Вследствие того что скорость сползания излучин обычно много меньше скорости движения побочней, длина участка совмещения при расчетах предельной глубины размыва в случае ограниченного меандрирования может быть сильно сокращена, поскольку за расчетный срок службы сооружения через его створ пройдет лишь часть излучины. Длина этого участка может быть принята равной величине сползания излучины за расчетный срок (срок службы сооружения). При отсутствии данных о скорости сползания излучины, обычно определяемой путем совмещения съемок реки разных лет (топографических карт или аэрофотосъемок), Н. Е. Кондратьев рекомендует длину участка

принимать равной половине шага излучины. При этом расчетная глубина предельного профиля размыва должна быть не меньше средней глубины русла на участке. Для производства таких расчетов необходимо иметь следующие исходные материалы: 1) план участка длиной 15—20 ширин русла с данными промеров, выполненных на спаде паводка или вскоре после его окончания, 2) съемки или аэрофотоснимки участка реки разных лет (не менее чем за 2 срока), позволяющие проследить идентичные побочни, что необходимо для оценки скорости их сползания.

Учитывая возможность применения для получения планов и глубин таких прогрессивных методов, как аэрофотосъемка с параллельным эхолотированием, получение плана участка с характеристикой основных размеров гряд (они легко определяются при продольном эхолотировании) не должно составить больших трудностей.

2. РАСЧЕТ ПЛАНОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ИЗЛУЧИН

При просмотре натурных материалов разновременных съемок было обнаружено, что в случаях длительно протекающих однонаправленных плановых деформаций излучин наибольшие смещения берега отмечаются на участках наибольших глубин. Это дает возможность предложить основные положения для построения расчета плановых деформаций излучин при ограниченном и свободном меандрировании и для начальных стадий незавершенного меандрирования, когда еще не произошел переход основной части расхода воды в развивающееся спрямление. В любом поперечнике русла на излучине, нормальном к средней линии русла, вогнутые участки берегов смещаются в направлении от средней линии русла в сторону линии наибольших глубин, обычно прижатой к этому берегу. Величина смещения бровки берега в каждом поперечнике прямо пропорциональна наибольшей глубине на этом поперечнике.

Тогда, очевидно, величина смещения бровки вогнутого берега ($y_м$) будет прямо пропорциональна скорости плановых деформаций (c м/год) и продолжительности расчетного периода (T лет) и отношению глубин в заданном поперечнике ($z_п$ м) и наибольшей глубине плёса на участке излучины (z_m м). При свободном меандрировании и в начальных стадиях незавершенного меандрирования участки перегибов русла, как указывалось, слабо смещаются в плане (здесь расположены перекаты). Поэтому, чтобы отразить это обстоятельство, наибольшую глубину в заданном створе и наибольшую глубину плёса следует вычислять от средней отметки гребней перекатов в начале и конце излучины (z_0).

При этих условиях формула для расчета плановых деформаций русла приобретает вид

$$y = cT\frac{z_п - z_0}{z_m - z_0},$$

где c — наибольшее в пределах данной излучины смещение бровки берега. При описании закономерностей свободного меандрирования указывалось, что скорость плановых деформаций излучины меняется в ходе ее развития, достигая максимума в средних стадиях и убывая к конечным. Однако материалов для строгого количественного учета этого явления накоплено еще недостаточно. В равной мере можно было бы попытаться учесть изменение глубин плёса в ходе развития излучины и уточнить приведенную выше формулу, но и этих материалов для строгого количественного учета еще недостаточно.

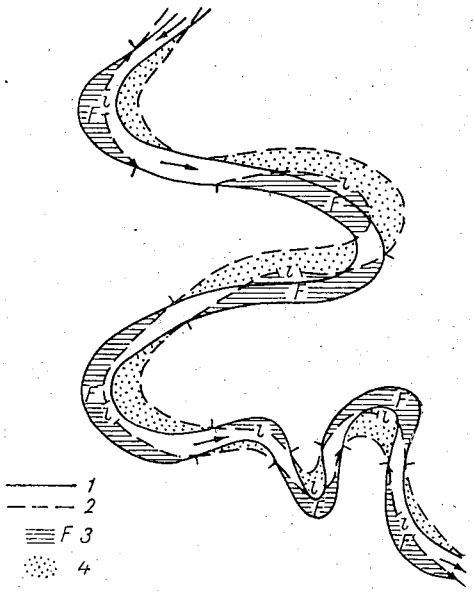


Рис. 90. Схема совмещения съемок разных лет и определение площадей размыва (F) и длины фронтов (l).

1 — 1926 г., *2* — 1960 г., *3* — размыв, *4* — намыв.

Для расчета плановых деформаций, так же как и для расчета предельных глубин при ленточно-грядовом и побочневом типах руслового процесса, следует иметь съемку излучины, выполненную на спаде половодья при максимально размытых плёсах, и две разновременные съемки, служащие для определения величины c. Чтобы иметь известный запас, рекомендуется принимать $c = 4c_{ср}$, где $c_{ср}$ — среднее значение плановых деформаций на участке 8—10 смежных излучин, определенных по формуле (рис. 90)

$$c_{ср} = \frac{\sum F}{T\sum l}.$$

Здесь F — площадь размыва за период T в пределах одной излучины, м^2; l — длина размываемого участка берега на данной излучине, измеренная по первоначальному плану русла, м; T — период времени между двумя сопоставленными съемками;

чем больше период T, тем надежнее величина c. Важно только, чтобы в течение этого периода деформации были однонаправлены и не происходило спрямления излучин. В случае обнаружения спрямившихся излучин их следует исключить из расчета.

3. РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНЫХ ГЛУБИН РАЗМЫВА В СВОБОДНО МЕАНДРИРУЮЩИХ ИЗЛУЧИНАХ

Расчетную глубину неразмываемого поперечного профиля в любом заданном створе Н. Е. Кондратьев рекомендует брать не меньше средней глубины, взятой по линии наибольших глубин на участке излучины. При этом глубины вычисляются от среднего меженного уровня. В случае если наибольшая глубина в излучине ($z_п$) больше указанной средней глубины, расчетную глубину $z_р$ следует оценивать по формуле

$$z_р = z_п + \Delta z_п \left(1 - \frac{Q_н}{Q_п}\right).$$

Здесь $z_п$ — запас глубины, величину которого рекомендуется принимать равной 0,2 $z_п$ м; $Q_н$ — наибольший расход предыдущего половодья; $Q_п$ — расход воды при уровне выхода воды на пойму. Запас глубин учитывается только в случае, если $Q_н < Q_п$, $z_п$ принимается как наибольшая глубина в русле на участке, ограниченном поперечниками, отстоящими на величину B (ширина русла) в обе стороны от расчетного створа.

Глава XIV

ПОЛЕВЫЕ РУСЛОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Полевые русловые исследования, описываемые ниже, имеют основной целью дополнить, уточнить и детализировать данные, получаемые при осуществлении гидролого-морфологического анализа по уже имеющимся материалам прежних исследований.

По этой причине их состав и методы проведения могут быть достаточно разнообразными. Они зависят от типа руслового процесса, от полноты исходных материалов, использованных при камеральных работах, а также от целей, поставленных перед гидролого-морфологическим анализом.

Могут быть случаи, когда результаты полевых русловых исследований явятся единственным исходным материалом для производства гидролого-морфологического анализа руслового процесса и тогда их состав будет целиком определяться типом

руслового процесса, развитым на изучаемом участке, и характером обеспечиваемой задачи. В других случаях их основной целью может быть оценка скорости плановых деформаций русла при разновидностях меандрирования или оценка скорости сползания гряд при ленточногрядовом или побочневом типах руслового процесса или при русловой многорукавности. Это может иметь место при отсутствии разновременных съемок или недостаточной их подробности. Иногда задачей полевых работ может быть оценка влияния на ход руслового процесса, например, таких факторов, как вечная мерзлота, воздействие сооружений или регулирования стока.

Состав работ будет различным в зависимости от требований обеспечиваемой задачи. Например, если задачей выдвигается выбор оптимальных по условиям развития руслового процесса мест расположения сооружений, то обычно оказывается возможным ограничиться только камеральными работами, т. е. использованием уже имеющихся материалов. Если же задача усложняется требованием оценить детально режим деформаций, то могут понадобиться не только полевые русловые исследования, но и организация стационарных наблюдений или производство лабораторных работ по моделированию изучаемого участка реки. В этом случае особое значение приобретают гидравлические исследования, обеспечивающие исходными гидравлическими данными детальные расчеты самого руслового процесса, модели и экспериментов на ней.

Однако во всех этих случаях остается необходимым знание типа руслового процесса, его количественных характеристик, размеров и видов деформаций, их связей с обусловливающими факторами и местными особенностями. Все эти данные могут быть получены в поле с помощью морфологической съемки, которая должна предшествовать производству любых детальных работ по изучению руслового процесса.

2. МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ СЪЕМКА

Под морфологической съемкой понимается совокупность приемов, направленных к получению в полевых условиях основных характеристик руслового процесса и определяющих его факторов. Основным средством их фиксации является картирование элементов и характеристик руслового процесса с одновременными записями, детализирующими сведения, которые по тем или иным причинам не удалось нанести на карту.

Как правило, морфологическая съемка выполняется на готовой картографической основе, желательно на аэрофотоснимках, обладающих большой подробностью изображения и обеспечивающих обычно наличие множества местных ориентиров, что крайне важно для полевого картирования.

Подобные съемки можно рассматривать как разовое мероприятие, направленное, как указывалось, на уточнение данных предварительного камерального гидролого-морфологического анализа. Однако их можно использовать и для изучения общего характера и режима деформаций русла и поймы путем их осуществления ежегодно или в разные сезоны года. Подобные морфологические съемки могут быть названы следящими. Разовую морфологическую съемку рекомендуется проводить в период после спада половодья, когда хорошо видны последствия его работы в русле и пойме реки.

Основное внимание при производстве морфологической съемки должно быть направлено на:

— выявление особенностей строения русла и поймы и в первую очередь таких морфологических образований, как макроформы; при этом следует выяснить границы морфологически однородных участков;

— получение количественных характеристик русловых и пойменных деформаций;

— выявление местных факторов, влияющих на особенности строения и развития макроформ;

— сбор сведений о влиянии русловых и пойменных деформаций на условия хозяйственного использования реки;

— выявление участков реки, требующих по своим природным особенностям или хозяйственной значимости постановки детальных исследований;

— получение данных для составления программ детальных исследований.

Практически морфологическая съемка сводится:

— к картированию на готовой картографической основе выявленных при маршрутном обследовании участка реки особенностей строения морфологических образований в русле и на пойме реки;

— к составлению описаний, детализирующих особенности строения речного русла и поймы, с соображениями о факторах, обусловливающих эти особенности;

— к составлению типичных геологических разрезов подмываемых склонов долины, берегов русла и отдельных морфологических образований в русле и на пойме реки с указанием крупности отложений и составлению детализирующих описаний;

— к фотографированию русла, поймы и отдельных образований на них для иллюстрации и дополнения описаний и геологических разрезов;

— к постановке ряда измерительных работ, направленных к получению количественных характеристик основных элементов русла и поймы и их деформаций.

В качестве картографической основы желательно иметь аэрофотоснимки в виде контактных отпечатков, фотосхем и фотопла-

нов в масштабах 1 : 5 000—1 : 25 000 в зависимости от размеров реки. Для очень крупных рек (Волги, Оби, Иртыша, Лены и др.) можно ограничиться съемками в масштабе до 1 : 50 000.

Выходя в поле, исполнитель морфологической съемки должен иметь:

а) предварительную гидролого-морфологическую схему участка работ с текстовыми пояснениями к ней;

б) комплекты аэрофотоснимков или в крайнем случае любую плановую основу в масштабе, позволяющем наносить на нее по крайней мере мезоформы речного русла;

в) он обязан иметь хотя бы общие представления о геоморфологических и гидрологических особенностях водосбора и речной долины изучаемого участка. Эти данные могут быть получены из геологических, почвенно-ботанических, климатических, гидрологических, гидрографических и, в крайнем случае, общих географических описаний.

На основе всех этих данных исполнитель работ должен заблаговременно составить программу и план производства морфологической съемки, обратив особое внимание на выявление в поле тех данных, которые нельзя получить по аэрофотоснимкам.

Картографическая основа (аэрофотоснимки или план) морфологической съемки также должна быть заранее подготовлена к работе в поле. Снимки должны быть разложены по планируемым для обследования участкам. На них на основе сличения с картой должны быть сделаны подписи местных ориентиров (населенных пунктов, рек, урочищ и т. п.), разбит километраж для привязки на местности получаемых в поле данных.

Полевое картирование морфологических характеристик. Состав работ при полевом картировании и их задачи сохраняются такими же, какие были указаны при описании подготовки картографических материалов и методики камеральных исследований.

При производстве картирования и описаний морфологических образований следует обратить особое внимание на выявление факторов, обусловливающих появление тех или иных русловых и пойменных образований и особенности их деформаций. Описание должно констатировать не только наличие, форму и размеры тех или иных морфологических образований на пойме и в русле рек, но в нем должны содержаться обоснованные фактическими данными выводы о факторах, обусловливающих особенности строения и развития данного образования.

а. Обследование русла реки и русловых образований

Так как основные особенности берегов русла и русловых образований могут быть обнаружены по аэрофотоснимкам до выхода в поле, основной задачей полевых работ является выяснение

изменений в их положении и деталей их строения, которые не могут быть получены по аэрофотоснимкам (детальные объемные размеры образований, их разрезы и т. п.).

Картирование положения бровок подмываемых и намываемых берегов русла является важнейшей частью работ по обследованию русла, так как с его помощью можно получить достаточно надежные данные об объемах перемещаемых потоком наносов, значительно более точные, чем получаемые при сопоставлении карт.

Работа по картированию положения бровок подмываемых и намываемых берегов русла сводится:

1) к сопоставлению положения бровок берегов на аэрофотоснимках и на местности;

2) к определению высот берегов;

3) к определению строения берегов (распределение наносов по крупности).

Сопоставление положения бровок берегов, зафиксированных на аэрофотоснимке и в момент производства морфологической съемки, осуществляется следующим образом.

По аэрофотоснимкам намечаются местные ориентиры, позволяющие с наибольшей простотой и надежностью определить положение по отношению к ним бровки берега. В качестве ориентиров могут быть приняты любые устойчивые во времени образования, обнаруженные на аэрофотоснимке и на местности. Эти же ориентиры опознаются на местности. После этого мерной лентой промеряется кратчайшее расстояние между данным ориентиром и положением бровки берега. Это расстояние выбирается по аэрофотоснимку, для чего определяются дополнительные ориентиры, позволяющие перенести намеченный створ измерений этих расстояний с аэрофотоснимка на местность. Измеренные в натуре расстояния откладываются в масштабе аэрофотоснимка и получается точка, фиксирующая современное положение бровки берега в данном створе.

Частота створов назначается в зависимости от сложности очертаний измеряемого участка бровки берега. Она должна позволить получить все основные изломы этих очертаний в плане. Подобная работа проводится по обоим берегам реки сплошь на всем протяжении исследуемого участка. На меандрирующих извилистых реках наибольшие деформации обычно сосредоточиваются в вершинах излучин и малы на перегибах от одной излучины к другой. На таких участках створы измерений окажутся разреженными и основное их число будет концентрироваться в вершинах излучин.

Об определении на аэрофотоснимке и на местности положения бровки берега, до которой следует производить измерения расстояний от местных ориентиров, подробно сказано в гл. XIV. Отметим, что для оценки общих плановых деформаций русла

можно ограничиться только промерами расстояний до границы (бровки берега), разделяющей зону общих плановых условно необратимых деформаций от зоны обратимых деформаций, т. е. зоны, в которой расположены различные виды подвижных скоплений наносов в русле. Измерению подлежат бровки берегов русла и островов, а также бровки подмываемых склонов долины. Положение бровок может быть зафиксировано не только промерами лентой, но и засечками. При производстве засечек в качестве плановой основы используется аэрофотоснимок.

В итоге этой работы на аэрофотоснимке будут нанесены бровки берегов и островов в момент обследования. Сопоставляя положение этих бровок с теми, которые существовали в момент производства аэрофотосъемки, легко разграничить площади размыва и намыва берегов и по ним судить о направлении плановых деформаций русла и островов. Каждый участок размыва и намыва, зафиксированный указанным путем, на аэрофотоснимках отмечается порядковым номером.

По полученным контурам площадей размыва определяются размеры этих площадей и длины фронтов размыва и намыва (по бровке берега). Для получения объемов деформаций необходимо знать высоты подмываемых и намываемых берегов.

Определение высоты берегов следует производить в тех же створах, которые были приняты для нанесения положения их бровок. Измерения высот желательно проводить с помощью нивелировок, но в крайнем случае можно ограничиться ватерпасовкой. Нивелирование или ватерпасовка ведутся от поверхности современной бровки до отметки уровня воды в низкую межень. В результате должны быть получены поперечные профили берегов, по которым можно определить среднюю высоту берегов в пределах площадей, занятых размывом или намывом, приводящим к общим плановым перемещениям бровки берега (границы, разделяющей условно необратимые и обратимые деформации).

При определении деформаций берегов русла важно получить характеристику состава отложений для оценки объемов поступления наносов, которые могут в дальнейшем формировать отложения на пойме (взвешенных) или русловые образования (донных). Для этого делается оценка распределения наносов по крупности в подмываемых берегах. В этих целях производится осмотр обнажений, а в случае их отсутствия делаются расчистки или производится бурение или шурфование.

Разрез берегов рассматривается послойно. Для каждого слоя оценивается его мощность (толщина) и процентное содержание в нем различных фракций наносов. Суммируя полученные данные, можно оценить и объем наносов разных фракций, содержащихся в объемах размытых отложений. К русловым можно

отнести наносы тех фракций, которые преобладают в разрезе подвижных скоплений наносов, к взвешенным же — наносы более мелких фракций. Их крупность будет примерно такая же, как у наилка на пойме в непосредственной близости от русла, но за пределами ближайшего к реке берегового вала, на который могут выноситься и крупные наносы. Напомним, что по мере отдаления от реки крупность наносов, слагающих наилок, на пойме уменьшается. Определение крупности наносов в подмываемых берегах можно производить способом эталонных сравнений при характеристике работ по шурфованию (см. ниже).

Картирование русловых образований. При производстве морфологической съемки на участках большого протяжения не следует ставить задачу определения количественных характеристик всех подвижных форм скоплений наносов из-за большой трудоемкости этих работ. Так как эти образования имеют внутригодовые циклы развития, то съемку пришлось бы производить несколько раз в год, что по сути дела привело бы к производству регулярных стационарных наблюдений. Подобные задачи могут ставиться только для относительно коротких участков при условии организации специальной русловой станции.

Главнейшими задачами по изучению подвижных форм скоплений наносов в русле, которые могут быть решены при производстве разовой морфологической съемки, являются следующие:

а) выделение форм скоплений наносов в русле, не обнаруживаемых на аэрофотоснимке, и выявление районов (участков) их наибольшего распространения;

б) получение данных об особенностях строения типичных, наиболее распространенных форм скоплений наносов в русле и их преобладающих размерах;

в) выявление местных факторов, обусловливающих данную форму транспорта донных наносов (существование данного вида их скоплений), и общих закономерностей их пространственного распределения;

г) получение данных о смене крупности отложений по длине реки.

Все эти сведения получаются на основе рекогносцировок участка (обхода или объезда на плавсредствах) и работ на отдельных типовых образованиях. Рекогносцировщик и в этом случае должен иметь комплект аэрофотоснимков участка, которые служат основой для картирования. При обходе или объезде участка исполнитель работ глазомерно картирует на аэрофотоснимках изменение положения основных крупных скоплений наносов в русле (пляжей, побочней, кос, осередков) с тем, чтобы получить общее представление о характере их деформаций и их

особенностях по характерным участкам реки. Одновременно ведутся записи об обнаруженных особенностях и деталях изменений, которые нельзя показать на аэрофотоснимках по условиям масштаба или особенностям происшедших изменений (влияние развития растительности, появление поверхностных размывов, изменение высоты образования и т. п.).

В записях даются сведения о местных факторах, которые могут обусловить происшедшие изменения (о влиянии притоков, овражных выносов, об изменениях общих плановых очертаний, о процессах развития растительности, наличии местных естественных или искусственно созданных базисов эрозии, выходах трудноразмываемых пород на берегах, отмостках или случаях ее разрушения, следах различных хозяйственных мероприятий и т. п.).

При обходе или объезде следует получить данные о границах участков, характеризующихся различной крупностью донных отложений. О крупности донных отложений можно судить по составу наносов в основных видах их скоплений в русле, при прощупывании дна на стержне и в периферийных областях потока. Выделяются и картируются участки с различной степенью развития грядового движения наносов, оценивается скорость перемещения гряд.

На типовых образованиях, заблаговременно выбранных по аэрофотоснимкам, производятся более детальные работы. Выполняется обмер образования, позволяющий составить суждение о его объемных характеристиках, производится шурфование (см. ниже) с целью описания структуры отложений и характеристики крупности наносов (послойно). В пояснениях описываются особенности строения, даются схемы поперечного и продольного разрезов образования с показанием слоев и крупности слагающих их наносов, приводятся суждения о вероятном направлении деформаций с обоснованием фактическими данными.

Таким образом, в итоге произведенного осмотра русловых образований должны быть выявлены образования, не отображенные на снимках, уточнены границы распространения тех или иных типов скоплений наносов в русле, получены детали строения форм, данные о крупности донных отложений и о вероятных факторах, влияющих на деформации русловых образований. Все это дает важный исходный материал для суждения об особенностях транспорта донных наносов, качественные характеристики размеров и интенсивности этого транспорта и его связи с деформациями русловых образований. Эти данные важны не только для общих выводов о направленности руслового процесса и особенностях деформаций, но и для планирования детальных стационарных исследований. Они позволяют наиболее обоснованно выбрать типовые участки для постановки таких исследований и обосновать их программу.

Шурфование при производстве морфологической съемки. Эта работа является вспомогательной и направлена на выяснение состава, крупности и порядка напластования наносов в главнейших морфологических образованиях в русле и на пойме реки. Это, как неоднократно указывалось, необходимо для выяснения объемов наносов, которые могут быть израсходованы на построение пойменных образований и на формирование русловых образований.

Шурфованию подвергаются типичные виды скоплений наносов на пойме и в русле реки (пляжи, побочни, береговые валы, косы, осередки, острова). При шурфовании различных видов скоплений наносов на пойме, а также пляжей, побочней, кос, осередков обычно бывает достаточно ограничиться прикопками на глубину до 0,5 м, редко несколько больше.

При изучении строения береговых валов и островов шурф желательно доводить до отметки уровня воды в низкую межень. Кроме шурфов, как указывалось выше, должны быть широко использованы обследования естественных обнажений (подмываемых берегов, откосов размоин на пойме и т. п.) и расчистки. Количество прикопок не следует ограничивать, так как работа эта не слишком трудоемкая.

Шурфы закладываются из расчета три-четыре на каждой типичной излучине русла и два-три на островах и только тогда, когда на участке не имеется естественных обнажений и нельзя произвести расчисток. Шурфы располагаются в начале, в вершине и конце излучины, а также в центральной или притеррасной ее частях с тем, чтобы получить характеристику изменения состава наносов по длине реки и по ширине поймы. Шурфы на островах располагаются в зависимости от формы острова и общих тенденций его деформаций. Желательно иметь шурфы на размываемой и намываемой частях островов и располагать шурфы на островах так, чтобы данные по ним обеспечили возможность сопоставления разрезов острова и участка поймы у этого острова, что важно для оценки способов образования островов.

Размеры шурфов в плане, приемы зарисовок и составления схем разрезов остаются такими же, как при закладке шурфов с целью производства почвенных или геологических исследований. В разрезе за нулевую точку принимается поверхность земли, а на границах слоев выписывается глубина залегания их кровли от этой поверхности.

Учитывая приведенные выше соображения об определении сроков размывов и намывов поверхности поймы, толщина и число слоев в разрезе обнажения или шурфа должны быть определены с большой детальностью и тщательностью. При очень мелкой слоистости на разрезе показываются только общие границы толщи, характеризующейся такой слоистостью, и выписы-

ваются сведения о числе мелких слоев, их толщине (средней при равномерной слоистости и в виде крайних значений при определенной тенденции в распределении слоев по толщине).

Особое внимание должно быть обращено на наличие и описание слоев погребенной дернины, характеризующих периоды, в которые отложения наносов были незначительными, а затем резко усилились, что и привело к заносу дернины. Места расположения прикопок (или их групп), а также каждого шурфа, обнажения или береговой скважины обязательно картируются на аэрофотоснимке и помечаются порядковым номером.

Определение крупности наносов при производстве морфологической съемки может быть ограничено эталонным способом. Суть его состоит в том, что крупность отложений в натурных разрезах глазомерно сопоставляется с крупностью отложений на заранее подготовленных эталонах, в которых она определена на основе полного механического анализа. Эталоны изготовляются из отложений, свойственных исследуемому участку (для чего заблаговременно берутся пробы наиболее распространенных на изучаемом участке отложений и подвергаются тщательному механическому анализу), в виде плоских застекленных ящиков с образцами пород и с подписями о фракционном их составе в данном образце.

При детальном обследовании типичных образований и разрезов рекомендуется, кроме того, брать пробы на механический анализ. Это следует делать также во всех случаях, когда сопоставление с эталоном почему-либо затруднено.

Фотографические работы при морфологической съемке применяются не только для иллюстрации основных особенностей морфологически однородного участка реки, отдельных макро-, мезо- и микроформ скоплений наносов (их внешнего вида, разрезов и т. п.), но и в измерительных целях, в частности, для определения высот берегов, объемов размоек на пойме, объемов русловых образований и т. п. Во всех этих случаях желательно взамен трудоемких обмеров применять фототеодолитную съемку. Однако даже с помощью обычного фотоаппарата любого типа можно получить достаточно надежные плановые и высотные характеристики отдельных образований, маркируя их вешками с известной высотой и определяя только расстояния между ними. Это дает возможность развернуть снимок в план и оценить превышения точек на местности.

Для развертывания снимка в план достаточно иметь всего четыре зафиксированные на нем вехи с известными расстояниями между ними — две на переднем и две на заднем плане. Это дает возможность определить масштаб заднего и переднего планов и с помощью сетки квадратов развернуть снимок в план.

Построение сетки квадратов ведется следующим образом. На снимке линии, соединяющие переднюю и заднюю пары вех, а также линии, соединяющие крайние вехи передней и задней их пар, делятся на равное число отрезков. Концы отрезков передней и задней пары и на боковых линиях соединяются между собой и получается сетка трапеций. После этого в масштабе переднего плана снимка строится сетка равновеликих квадратов. Сторона каждого квадрата должна равняться длине отрезка на линии передней пары вех, а число квадратов должно быть равным числу трапеций на снимке. Затем производится перенос местной ситуации по трапециям на сетку квадратов и получается не перспективное, а плановое изображение сфотографированного участка.

Для определения объемов каких-либо образований следует сфотографировать характерные профили и с помощью вех, устанавливаемых описанным выше способом, но с известной высотой, получить не только горизонтальный, но и вертикальный масштабы плана.

Сфотографированные участки речной долины, поймы и русла или отдельных русловых образований помечаются на аэрофотоснимках, служащих основой для картирования, и нумеруются для удобства отыскания на общем плане этих участков и привязки к нему их описаний.

Гидрометрические работы при производстве морфологической съемки сводятся примерно к тем же, которые выполняются при маршрутном рекогносцировочном обследовании реки и описаны в Наставлении (1949). При съемке производится продольный промер, съемка поперечных профилей русла и поймы и замеры скоростей течения и мутностей.

Продольный промер производится только в том случае, если по исследуемой реке нет подробных русловых съемок или имеются только сильно устаревшие съемки 10—15-летней давности. Основная задача продольного промера — выявить закономерности чередования по длине участков реки наибольших глубин для построения графика их распределения. Промер производится с лодки, сплавляющейся по стержню реки. Частота расположения промерных точек зависит от характера извилистости русла. Точки должны располагаться так, чтобы каждая излучина русла освещалась как минимум тремя-четырьмя точками, располагающимися на перекате — плёсе — перекате. Промер должен производиться с широким использованием аэрофотоснимков, по которым заблаговременно намечаются места промерных точек, а при производстве промера фиксируются по местным ориентирам, обнаруженным на аэрофотоснимке и на местности. При производстве промера обязательно отмечается грунт дна в каждой промерной точке.

Поперечные профили речной долины и русла снимаются для характеристики типичного строения речной долины в количестве двух-трех на каждом морфологически однородном участке.

Места расположения поперечных профилей речной долины заблаговременно назначаются по аэрофотоснимкам. При наличии хорошо выраженных склонов долины рекомендуется верхнюю часть поперечного профиля получать стереофотограмметрическим путем, т. е. путем камерального определения превышений точек на местности по аэрофотоснимкам с помощью хотя бы простых стереофотограмметрических измерений. Нижняя часть профиля (в пределах до уровня высоких вод) с малыми величинами превышений должна быть получена нивелировкой.

В створах поперечных профилей производится детальный поперечный промер русла и съемка скоростного поля.

Измерение скоростей течения необходимо для выделения по длине реки участков с резко различной средней скоростью течения. Выбор створов измерений производится при продольном промере или при морфологической съемке. Границы участков с более или менее одинаковой скоростью течения назначаются глазомерно. Створы измерений располагаются так, чтобы охарактеризовать наиболее распространенные величины скоростей на перекатах и на плёсах и обязательно на лимитирующих (наиболее мелководных) перекатах. На каждом морфологически однородном участке должно быть не менее двух-трех створов, в которых производится измерение скоростей течения на вертикалях в пяти точках, и пять—десять створов, на которых с помощью поплавков определяются поверхностные скорости.

При резко различных по длине реки скоростях течения и в тех случаях, когда по данному участку требуется получить подробные данные о скоростном поле потока (например, предполагается осуществлять детальный гидравлический расчет деформаций), рекомендуется применять фотографирование поплавков с берега или, еще лучше, с вертолета или самолета (Попов, 1962).

Измерение мутности и твердых расходов. Мутность потока представляет интерес при морфологической съемке главным образом как показатель условий транспортирования наносов. Поэтому при производстве съемки желательно взять пробы воды для определения мутности и гранулометрического состава взвешенных наносов.

Пробы мутности должны быть взяты с расчетом получения общей характеристики ее распределения по длине участка. Для этого глазомерно назначаются участки с резко различной мутностью (в этих целях можно использовать аэроразведки и аэрофотоснимки, на которых обычно хорошо выделяются участки с резко различной мутностью) и на каждом из них берутся три-

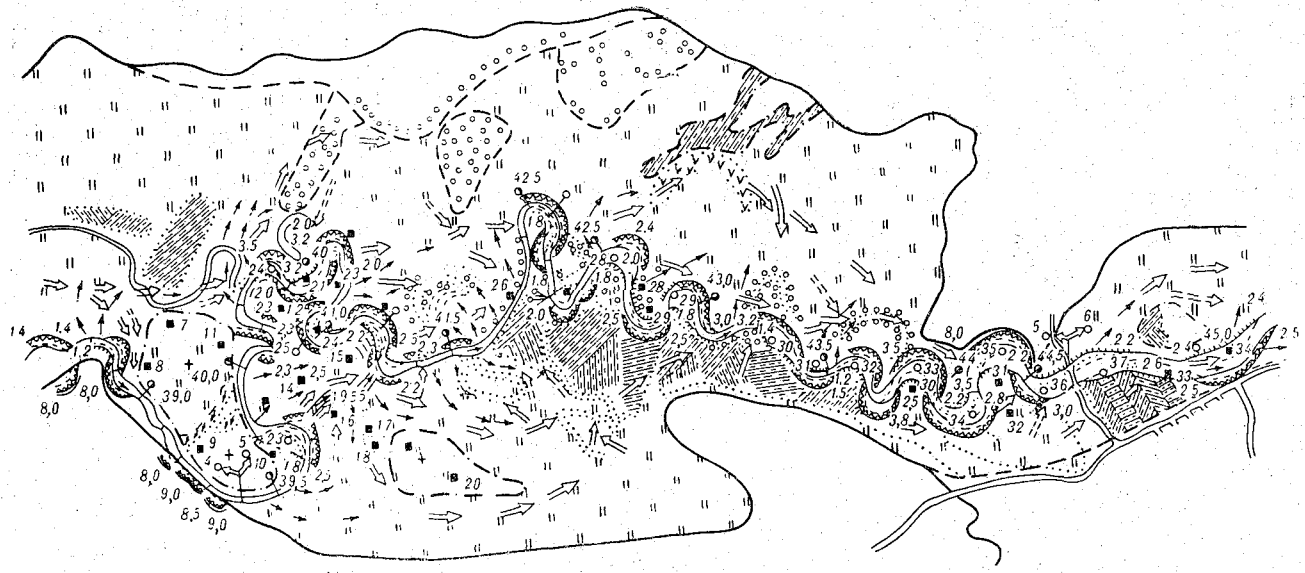


Рис. 91. Образец схемы, составленный при морфологической съемке

(Усл. знаки см. в приложении II.)

четыре пробы не менее, чем в трех точках на каждой вертикали.

Пробы берутся на главной реке и на ее притоках, резко отличных по своей мутности. Кроме взятия проб на мутность, желательно провести определение расходов взвешенных наносов в тех же створах, в которых производилось детальное измерение скоростного поля потока (см. выше).

При производстве морфологической съемки и промерных работ желательно сделать несколько определений расходов влекомых наносов по перемещению микроформ речного русла. Для этого выбираются створы, через которые проходят типичные для данного морфологически однородного участка микроформы скоплений наносов. Промером устанавливается объем отдельной типичной гряды, а затем любыми способами фиксируется скорость перемещения ее гребня. Подробнее о вычислении расхода наносов, осуществляемого в форме перемещения гряд, см. в гл. II. Один из вариантов оформления результатов морфологической съемки показан на рис. 91.

б. Обследование поймы

Главная задача работ — выяснить характер и размеры деформаций поймы реки.

Нанесение границ поймы. Первоочередной работой является уточнение или нанесение заново границ поймы. Для этого производится сопоставление границы поймы, показанной на аэрофотоснимке и обнаруживаемой на местности. Картирование границ поймы осуществляется сплошное, по всему протяжению маршрута. При наличии широкой поймы (в несколько десятков километров) работу следует поручить специально выделенному для этого лицу. Сопоставление аэрофотоснимка с местностью удобно производить из точек местности, представляющих широкий обзор. В местах, вызывающих особые затруднения, следует делать дополнительные поперечные маршруты через всю пойму.

Если разливы захватывают не только пойму, но и участки дна долины, то их границу следует показать на снимках. Если эти границы морфологически не выражены, следует прибегнуть к получению опросных данных с показанием границы разлива старожилами на местности.

Граница поймы наносится непосредственно на аэрофотоснимок гуашью или цветным карандашом в виде сплошной линии. Должны быть показаны не только общие внешние границы поймы, но и границы незатопляемых ее участков, а также границы зоны, за пределами которой нет свежих следов размывов поверхности поймы или отложения на ней наносов.

В районах с интенсивным хозяйственным использованием поймы, кроме границ затопления, должны быть показаны

контуры различных видов сельскохозяйственных угодий, заболоченных участков, участков с кустарниками, лесом, системы мелиоративных канав и т. п.

Так как все эти границы имеют изображение на аэрофотоснимке, то задача сводится только к их уточнению на основе сличения снимка с местностью. Наличие различных видов угодий и мелиоративных мероприятий, а также их изменения, прошедшие за период между датой производства съемки и полевым обследованием, дают ценный материал для суждения об устойчивости отдельных участков поймы размыву или о факторах, благоприятных для аккумуляции на поверхности поймы наносов. Это существенно помогает выяснению причин, обусловливающих те или иные особенности русловых и пойменных деформаций.

Отдешифрированные границы поймы должны сопровождаться краткими описаниями, в которых указывается частота затоплений поймы на всю ее ширину, данные о сроках затопления и особенностях затопления и слива воды с поймы.

Схема затопления поймы. При обследовании поймы следует стремиться показать на аэрофотоснимке порядок ее затопления, оценивая ее для каждой излучины русла и не упуская из виду возможность начала затопления поймы через ее пониженную притеррасную часть. Эти данные необходмы для суждения об условиях размыва и намыва поверхности поймы и путях перемещения по ней наносов.

Для составления схемы затопления необходимо отметить на аэрофотоснимках участки наиболее низких берегов, через которые в первую очередь вода будет выходить на пойму при ее подъеме, и стрелками наметить основные пути перемещения воды по поверхности поймы при подъеме и спаде уровня. При этом надо иметь в виду, что слив воды с поймы не всегда будет происходить через места, в которых вода проникает на пойму при подъеме уровня. Часто вода уходит в направлении общего продольного уклона данного пойменного массива, в частности через его особенно пониженную притеррасную часть. Также следует иметь в виду, что при наличии растянутого спада половодья и хорошо выраженных береговых валов или при очень широких разливах вода может длительное время застаиваться на пойме, а иногда безвозвратно теряться для потока. В подобных случаях вода на пойме часто скапливается не в результате ее проникновения из русла, а вследствие стока талых и дождевых вод по склонам долины.

Для суждения о вероятном направлении течений на пойме следует проследить по аэрофотоснимку и сопоставить с местностью системы ложбин, понижений, грив, останцев, следы размывов поверхности поймы и общие направления выноса наносов из русла (по форме скоплений наносов на пойме).

Наиболее пониженные, обычно увлажненные участки на

пойме хорошо выделяются на местности более яркой окраской растительности и появлением ее влаголюбивых видов (например, осок и др.) и наглядно видны на аэрофотоснимках в виде полос темного тона.

Схему течений на пойме особенно важно выявить для участков со следами свежих размывов или заносов поверхности поймы, а также для участков интенсивного хозяйственного использования (мелиорация, пашни, огороды и т. п.).

К схеме затоплений также должны иметься краткие пояснения, обосновывающие ее и дающие дополнительные сведения об особенностях процессов затопления и освобождения поймы от воды и о морфологическом эффекте этих процессов.

Картирование основных эрозионных и аккумулятивных образований на пойме. Все эти работы выполняются только на участках поймы с хорошо выраженными следами размывов и намывов. На аэрофотоснимках должны быть показаны места прорывов береговых валов, размывов поверхности поймы, происходящих при ее затоплении, скоплений на ней свежих выносов наносов. Все эти эрозионно-аккумулятивные образования обнаруживаются при обходе участка поймы и по аэрофотоснимкам и наносятся условным знаком, а при возможности изображения в масштабе снимка даются их контурные очертания. При наличии большого числа мелких образований районы из наибольшего распространения оконтуриваются и оценивается площадь, занятая данными образованиями по отношению к общей площади оконтуренного участка их наибольшего распространения.

Кроме данных о площадях размывов и аккумуляции наносов на поверхности поймы, должны быть получены данные об объемах размывов и намывов поверхности поймы. Для этого оценивается глубина размыва или толщина слоя скоплений наносов на пойме. Для небольших эрозионно-аккумулятивных образований может быть дана обобщенная суммарная оценка этих величин. Для крупных размывов и скоплений наносов следует производить обмеры в натуре каждого такого образования. Для скоплений наносов обмеры должны производиться путем шурфования до уровня поверхности поймы, не подвергшейся существенным деформациям. Места расположения шурфов и мощность отложений наносятся на карты и нумеруются.

В описании мест размывов и заносов поймы должно быть отмечено время, когда сформировалось данное образование, крупность отложений (в разрезе размоины или в толщине скопления), порядок напластования наносов.

Сроки появления местных размывов и намывов на пойме устанавливаются по опросным данным, а при невозможности получить эти данные оцениваются косвенным путем. Для аккумулятивных образований это возможно на основе сопоставления

толщины годичного наилка с общей мощностью скопления наносов, установленной при шурфовании. Такой прием возможен только в том случае, если величина наилка существенна и слой свежих отложений хорошо прослеживается в разрезах. В условиях, когда состав отложений наносов благоприятствует быстрому развитию растительности, толщина отложений переслаивается погребенной дерниной и годичные слои выделяются достаточно четко. Если состав наносов не благоприятствует развитию растительности (например, песчаные разности), слои дернины образуются только в периоды, когда интенсивных выносов наносов на пойму не было в течение нескольких лет. Следует также учесть, что слои отложений наносов на пойме далеко не всегда отражают годичный период. Это обычно бывает лишь на реках с одновершинным половодьем и с хорошо выраженным подъемом и спадом уровня в период половодья, а также при отсутствии затоплений поймы при летних и осенних паводках. При многовершинных половодьях с затоплением поймы и при паводках годичные отложения наносов на берегах и пойме состоят из нескольких слоев. Грубо приближенно можно принять, что число этих слоев соответствует числу пиков половодья и паводков в году, вызывающих затопления.

При оценке толщины годичных отложений наносов на пойме необходимо помнить, что мощность их убывает в направлении от русла к склонам долины.

Как следует из приведенных соображений, оценка времени, потребовавшегося на образование тех или иных видов скоплений наносов, требует анализа водного режима. При отсутствии данных о водном режиме подобный прием оценки сроков формирования скоплений наносов на пойме неправомерен и для определения этих сроков надо ставить специальные полустационарные наблюдения хотя бы в течение 1—2 лет. Они заключаются в производстве обмеров аккумулятивных образований на пойме до и после прохождения половодья. Сроки формирования эрозионных образований на пойме по косвенным признакам определять затруднительно и их оценка также требует специальных обмеров, по крайней мере в течение 1—2 лет до и после прохождения половодья.

В случаях, когда эрозионно-аккумулятивные образования на пойме выражены слабо и полевое их картирование осуществить нельзя, для суждения о размерах размывов и намывов поверхности поймы приходится прибегать к постановке специальных наблюдений, основанных на тщательной нивелировке поверхности поймы на эталонных участках до и после половодья.

Подробное описание методики производства стационарных наблюдений на поймах приведено ниже (см. п. 3).

Все картированные на аэрофотоснимках районы скопления небольших эрозионно-аккумулятивных и отдельных крупных об-

разований должны быть занумерованы для обеспечения удобства их описаний и отыскания на аэрофотоснимках.

В описаниях указывается площадь и мощность (глубина) образования; год его появления, состав наносов, порядок их напластования, даются соображения о факторах, влияющих на развитие описываемого морфологического образования, и соображения о возможном дальнейшем направлении его развития.

При выявлении причин, вызвавших появление на пойме местных размывов и намывов, следует обратить особое внимание на их связь с особенностями затопления поймы, с характером обмена наносами между руслом и поймой, с развитием растительности и хозяйственной деятельностью. Выявить влияние растительности и хозяйственной деятельности на эрозионно-аккумулятивные процессы существенно помогает сопоставление контуров различных видов угодий и оценка состояния искусственных сооружений на пойме, т. е. просмотр материалов первого раздела работ по картированию поймы (нанесение границ поймы), описанного в начале этого раздела.

Картирование мест значительного дополнительного поступления наносов в поток с его водосбора. При обследовании поймы, кроме картирования имеющихся на ней эрозионных и аккумулятивных образований, возникающих в результате деятельности на ее поверхности потока, отмечаются места, в которых происходит наиболее интенсивный вынос наносов по овражной сети с пашен за счет оползней и обвалов, протоки на пойме, пойменные речки и притоки реки, выносящие в главное русло наиболее значительное по сравнению с другими количество наносов.

На аэрофотоснимках помечаются также места, в которых поток интенсивно подмывает коренные породы, дающие значительный дополнительный приход наносов.

Во всех этих случаях стрелками показываются основные пути перемещения наносов, а в пояснениях указывается примерный объем выносимых наносов (хотя бы качественный) и их состав (крупные, мелкие, средние).

3. СПЕЦИАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА ПОЙМЕ

При производстве полевых работ на участках большого протяжения может встретиться необходимость постановки специальных наблюдений за наилком на пойме. Для учета возможных величин наилка необходимо выполнить специальные работы, носящие полустационарный характер.

На реках с высокой мутностью и большим содержанием относительно крупных фракций взвешенных наносов при прочих равных условиях можно ожидать значительных величин наилка, во всяком случае на прирусловой части поймы. В этих условиях он может быть определен на основе нивелировочных работ.

При ширине поймы до 1 км для их производства по данным морфологической съемки выбирается типичная на участке излучина русла. В ее пределах разбивается сетка нивелировочных профилей, располагающаяся либо по радиусам, либо параллельно друг другу в направлении от реки к подножию склонов долины (надпойменная терраса). Профили рекомендуется располагать не реже чем через 50—100 м. Частота точек нивелирования должна позволить получить профиль поверхности поймы, отражающий все детали ее микрорельефа — гряды и ложбины между ними, размойки, скопления свежих наносов и т. п.

Все нивелировочные створы закрепляются реперами, располагающимися в начале и конце каждого из них. Нивелировочные профили наносятся на аэрофотоснимок или на специально выполняющуюся контурную съемку излучины. Нивелировка профилей производится в период после спада половодья и просыхания поймы. Она повторяется как минимум дважды и так, чтобы последующая нивелировка показала изменения отметок поверхности, вызванные прошедшим между съемками половодьем. Для оценки величин намывов и размывов поверхности поймы строятся совмещенные планы с горизонталями, на них помечаются точки нулевых деформаций поверхности поймы и точки с явлениями аккумуляции и размыва поверхности поймы и вычисляются слои размыва и намыва. Затем эти точки с данными о слое намыва или размыва переносятся на отдельный план и через заданное сечение проводятся изолинии равных величин размывов и намывов поверхности поймы, например, 0, +5, +10, . . ., —5, —10, . . . см.

Планиметрируя площади, заключенные между одноименными изолиниями, можно оценить и средний слой наносов, отложившихся на данном участке поймы и вымытых с ее поверхности.

При очень сложном микрорельефе точки нивелирования можно располагать через равные расстояния друг от друга, но не реже чем через 2—3 м. Тогда построение упрощается, так как совмещенных вспомогательных профилей можно не составлять, а на плане непосредственно фиксировать только разность отметок поверхности в идентичных точках.

Для рек с широкой поймой нивелирование полных профилей от русла до подножия склонов долины (надпойменной террасы) слишком трудоемкая задача. В этом случае рекомендуется нивелировать типичные площади на пойме. Площади назначаются на характерных участках поймы, обычно у русла, в центральной и в притеррасной частях поймы. Каждая площадка представляет собой квадрат со сторонами 100—200 м, равными на всех площадках. Она закрепляется надежными реперами, которые должны сохранять свои отметки после затопления поймы. Нивелирование производится также в нериод после окончания половодья в течение двух лет подряд с тем, чтобы оценить намыв

и размыв поймы, вызванный прохождением половодья в сроки между съемками. Обработка данных по этим площадкам производится так же, как описывалось выше.

При незначительных величинах наилка учесть их нивелированием нельзя. В этих случаях непосредственно до начала половодья рекомендуется применять закладку на пойме ватных или марлевых тампонов, пластинок с искусственной шероховатостью, равной естественной шероховатости поверхности поймы, или стаканчиков, устанавливаемых заподлицо с поверхностью поймы. При пользовании этими приемами необходимо, чтобы установки были сняты сразу же после освобождения поймы от воды с тем, чтобы на количество удерживаемых ими наносов не повлияли выпадающие дожди. В отношении стаканчиков дожди представляют наименьшую угрозу. В практике работ ГГИ в качестве стаканчиков использовались либо обрезки труб с запаянным концом, либо обычные стеклянные граненые стаканы.

Те или иные устройства для задержания наносов располагаются на пойме либо по профилям в несколько рядов, либо на отдельных характерных площадках (см. выше).

Профили и площадки должны быть закреплены на плане (аэрофотоснимках).

Тампоны или пластинки должны иметь одинаковый размер (вес, площадь). Площадь стаканчиков может быть определена впоследствии. После снятия устройств производится изъятие из них наносов и их взвешивание. По этим данным и судят о величинах наилка.

Во всех случаях (при нивелировке или при закладке специальных наносоулавливающих устройств) необходимо провести механический анализ наилка. Поэтому при нивелировке должны быть дважды взяты пробы отложений. Приемы отбора проб указаны выше.

Глава XV

СТАЦИОНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРУПНЫХ РУСЛОВЫХ ФОРМ

Для детального изучения крупных русловых форм, которое может потребоваться как в исследовательских целях, так и при решении инженерных задач, связанных с проектированием особенно ответственных сооружений, обычно требуются систематические, выполняющиеся в течение ряда лет наблюдения и организация для этого специальной русловой станции. Рекомендации к проведению стационарных исследований изложены в работе автора (1961). Поэтому здесь ограничимся только перечислением состава этих работ.

1. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ

1. Выбор участка исследований. Здесь целиком должен быть соблюден морфологический принцип. Независимо от того, располагается ли сооружение в одном створе или занимает некоторое протяжение реки в пределах данной формы, исследованию подлежат не мене 2—3 смежных крупных форм русла, что необходимо для учета их взаимовлияния, которое может оказаться решающим для хода деформаций данного короткого участка.

2. Создание топографической основы путем производства специальных съемок. Масштаб ее должен обеспечить заданную точность измерения деформаций и может колебаться от 1 : 500 до 1 : 10 000. Съемка должна охватывать не только русло в его меженных берегах, но и поймы, по крайней мере в пределах полосы возможных плановых деформаций русла (при меандрировании это пояс меандрирования).

При выполнении съемки должно быть предусмотрено закрепление магистрали и положения поперечников, что важно для обеспечения удобного сопоставления съемок за разные периоды с целью выявления размеров деформаций. Сечение горизонталей должно быть не более 10—25 см для средних рек и 0,5 м для крупных.

Геологические работы заключаются в составлении геологических разрезов, освещающих строение морфологических образований на участке. Главной их задачей должно быть выявление базального горизонта и состава и мощности пойменной и русловой фаций в берегах русла и островов. Поэтому особое внимание должно быть обращено на послойное описание аллювия и коренных пород.

2. СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА КРУПНЫХ ФОРМАХ

Выполняются циклы работ, имеющие назначением изучить режим деформаций и их связь с режимом скоростного поля потока. Частота циклов определяется характером водного режима (должны быть оценены деформации, происходящие в каждую фазу режима) и интенсивностью самих деформаций.

Каждый цикл должен состоять из следующих работ.

1. Топографические и промерные работы заключаются в перенесении из натуры на топографическую основу ситуации, существующей в момент производства цикла наблюдений, с целью сравнения ее с исходной (положение бровок берегов русла реки и островов, рельефа поймы, профилей русла реки до незатопляемых отметок или по крайней мере в пределах пояса меандрирования).

Эти работы следует проводить на закрепленных на местности поперечниках. Их частота по длине участка должна обеспечить

возможность определения величин деформаций как крупной формы в целом, так и ее отдельных элементов. При промерных работах следует возможно чаще практиковать также продольный промер (эхолотирование) с целью выявления основных размеров ленточных гряд, а также средних и мелких форм (гряд).

2. Морфологическая съемка сводится:

а) к картированию границ основных русловых форм, не отображенных с помощью горизонталей или изобат (гребни гряд, виды малых и средних форм, смещающихся в русле участков, намываемых и размываемых берегов русла, островов, местные препятствия и т. д.);

б) к картированию распределения послойной крупности донных отложений в русле и на пойме, прежде всего применительно к имеющимся отдельным структурным образованиям;

в) к картированию форм проявления макротурбулентности (зоны обратных течений, различный характер водной поверхности, заметный на глаз, выход донных водоворотов, вихревых воронок, остановившиеся волны и т. д.). Следует максимально использовать фотосъемку водной поверхности и рельефных образований, в частности, возможность фототеодолитной съемки и аэрофотосъемки. Подробнее о съемке см. гл. XIII.

3. Измерение продольных и поперечных уклонов в момент производства промеров и получение рельефа водной поверхности с обязательной увязкой с данными о расходах воды и ее уровнях (см. ниже).

4. Съемка скоростного поля потока в плане и на вертикалях, на поперечниках, на которых ведется нивелировка и промеры русла. В этом случае также необходимо в наибольшей мере использовать возможность наземной фототеодолитной съемки и аэрофотосъемки. Запись исправлений векторов скоростей течения следует осуществлять с помощью самописца (Попов, 1961).

5. Производство стационарных гидрометрических наблюдений, обеспечивающих получение гидрографа наносов и графика хода уровней за год.

3. ОСНОВНЫЕ ОТЧЕТНЫЕ ДОКУМЕНТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ КРУПНЫХ РУСЛОВЫХ ФОРМ

Отчетные документы состоят из материалов двух основных видов.

1. Разовые отчетные документы:

а) детальный топографический план участка (исходная картографическая основа) в масштабе от 1 : 50 до 1 : 25 000;

б) геологические разрезы и планы крупных форм.

2. Отчетные документы цикловых наблюдений:

а) совмещенные планы русла и поймы с показанием зон с различным характером деформаций;

б) интегральные кривые объемов деформаций по длине участка;

в) картограммы донных отложений;

г) схемы скоростного поля потока (совмещенные планы поверхностных, средних и донных течений с показанием основных форм макротурбулентности);

д) продольные и поперечные профили свободной водной поверхности;

е) графики хода во времени стока воды, мутности, расходов наносов.

4. ИЗУЧЕНИЕ ПЕСЧАНЫХ ГРЯД

Основная задача — использование данных о грядах для расчета месячных, декадных и др. расходов донных наносов для учета их при проектировании водозаборов, заносимости каналов или различных русловых емкостей. С этой целью производится систематическое эхолотирование по сериям продольных профилей, картирование крупности наносов, перемещаемых в грядовой форме, съемки скоростного поля потока, в особенности его распределение вдоль гряд и преимущественно в придонном слое с выявлением структурных образований в потоке, обусловленных наличием гряд.

Эти исследования могут уточняться в лабораторных условиях.

ЧАСТЬ III

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СООРУЖЕНИЙ НА РЕКАХ

Как указывалось, применение в практических целях гидролого-морфологических основ теории руслового процесса с помощью изложенных в части II этой книги приемов, комплекс которых может быть назван гидролого-морфологическим анализом, позволяет получать ряд важных выводов, прежде всего для выбора места расположения различных сооружений на реках, систем защитных мероприятий и составлять прогнозы русловых и пойменных деформаций как для коротких участков (для крупных форм русла), так и для участков большого протяжения (в сотни километров).

Ниже даются только некоторые общие рекомендации применительно к проектированию различных типов сооружений, поскольку при этом возникают и несколько отличные специфические задачи.

Глава XVI

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПЕРЕХОДОВ ЛИНИЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПЕРЕДАЧ (ЛЭП) ЧЕРЕЗ РЕКИ

К настоящему времени уже накоплен известный опыт в применении гидролого-морфологического анализа к выбору мест переходов линий высоковольтных передач через реки. За период примерно с 1960 по 1964 г. приходилось неоднократно давать консультации по этим вопросам для «Теплоэлектропроекта», а в дальнейшем для проектного института «Энергосетьпроект», а также проводить семинары для специалистов этих учреждений с разбором фактических примеров. Надо отметить,

что применение гидролого-морфологического анализа по прилагаемой методике для выбора мест переходов ЛЭП через реки было первым опытом его практического использования, поэтому с рассмотрения этих вопросов и начато изложение настоящего раздела книги.

При проектировании переходов ЛЭП через реки возникает прежде всего задача разместить опоры ЛЭП на участках берега, подверженных наименьшим плановым деформациям, при наименьшей возможной длине перехода. На реках большой ширины и, следовательно, при больших расстояниях между береговыми опорами может возникнуть задача о размещении опоры непосредственно в русле реки или на острове, также в наименее деформирующихся точках. При расположении опоры в русле реки необходим детальный расчет деформаций дна, вызванных сооружением.

При трассировании ЛЭП на поймах (особенно на длинных переходах и трассах, идущих вдоль реки, что наиболее вероятно в горных условиях, когда пойма является часто участком наилучшей проходимости строительной техники) также возникает задача размещения опор на наиболее устойчивых участках пойм. В этом отношении интерес представляет не только учет размываемости поверхности поймы, но и учет участков, на которых можно ожидать наиболее интенсивных воздействий льда на опоры при прохождении ледохода по пойме. Надо отметить, что проектирование трасс ЛЭП обычно осуществляется в предельно сжатые сроки, практически в одну стадию проектирования.

В этих условиях применение гидролого-морфологического анализа представляет особые выгоды, так как многие основные вопросы в этом случае могут быть решены камеральным путем, причем особенно надежно при применении материалов аэрофотосъемки.

Состав и порядок работ для оценки влияния руслового процесса на опоры ЛЭП могут быть рекомендованы следующие.

1. ПОДБОР ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Прежде всего следует подобрать материалы аэрофотосъемки речных участков. Для крупных рек необходимо получить лоцманские карты разных лет съемки, что необходимо для оценки скорости плановых деформаций. Наряду с этим желательно подобрать также и гидролого-геоморфологические материалы, перечисленные в гл. XIV.

Обработка их ведется по указаниям, приведенным в гл. XV, причем главной задачей ставится оценка плановых деформаций.

2. АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Как следует из замечаний по подбору исходных материалов, главной задачей является оценка плановых деформаций речных русел и лишь при расположении опор в самом русле необходимы данные о высотных его переформированиях.

Порядок работ должен быть следующий.

Выделение типа руслового процесса на участке перехода. Работа сводится к анализу преимущественно плановых материалов и к определению типов крупных русловых форм на участке перехода ЛЭП, пользуясь при этом приемами, описанными в части I.

При ленточногрядовом и побочневом типах руслового процесса можно ожидать, что берега русла будут устойчивыми. Поэтому следует обратить особое внимание на выяснение положения бровки берегов русла, т. е. оценить внешние границы побочней. При этом следует иметь в виду, что задернованная поверхность побочня отнюдь не всегда свидетельствует о его малой подвижности и может бысь обусловлена длительной меженью и мелкозернистостью наносов, быстро образующих супесчаный и суглинистый наилок, благоприятствующий развитию растительности на поверхности побочня. Учитывая значительную подвижность побочней (известны случаи, когда даже ряды поперечных дамб, построенные для приостановки движения побочня, не задерживали его сползания), опоры ЛЭП нужно всегда располагать за бровками русла с некоторым небольшим запасом.

При ограниченном меандрировании в результате сползания излучины рано или поздно вся пойма в пределах пояса меандрирования будет полностью переработана потоком. Однако надо иметь в виду, что ограниченное меандрирование обычно развивается не слишком быстро, поэтому возможно размещение опор на выпуклых берегах, но обязательно в низовых их частях, которые подвергнутся разрушению в наиболее отдаленные сроки. В этих случаях все же необходимо оценить скорость плановых деформаций на основе сопоставления разновременных карт или с помощью полевого картирования бровок берегов на аэрофотосъемках 5—6-летней и более давности (см. выше).

При свободном меандрировании в первую очередь важно определить узловые точки (участки) разворота излучин и стадии развития этих излучин. В этих целях, кроме сопоставления карт различных лет съемки, желательно провести работу по восстановлению прежних положений русла на основе анализа рисунка вееров его перемещения (см. гл. V).

В узловых точках (участках) разворота излучин плановые деформации обычно бывают наименьшими и на берегах русла

в этих точках можно надежно разместить опоры ЛЭП. Стадии развития излучин, хорошо выявляющиеся при восстановлении прежних его положений по аэрофотосъемкам, важно выявить по следующим причинам.

На участках русла, находящихся в ранних стадиях свободного меандрирования, можно ожидать наиболее интенсивных плановых деформаций (гл. VIII), в конечных стадиях, т. е. при хорошо выраженных петлях русла, они значительно замедляются.

Таким образом, в первом случае нахождение узловых точек особенно важно, во втором случае возможно размещение опор в вершинах излучин на участках с наименьшим радиусом кривизны. В гл. V было показано, что по мере развития излучин они приобретают обычно асимметричное строение и участки с наибольшим радиусом кривизны смещаются в плане с наибольшей скоростью. При свободном меандрировании очень важно также установить характер взаимодействия смежных петель русла, имея в виду, что прорыв петель нередко приводит к изменению направления плановых деформаций, особенно на участках реки ниже прорыва.

При незавершенном меандрировании, кроме указанных моментов, важно оценить стадию развития излучин, на которых происходит образование спрямляющего протока, наметить возможное место спрямления, если оно не развилось, и оценить степень разработки спрямления, если оно уже имеется. При хорошо разработанном спрямлении правомерно ожидать ослабления и прекращения плановых деформаций излучин старого русла, что дает возможность размещать на них опоры ЛЭП даже в вершинах излучин. Выявление слаборазработанных или возможного направления еще не наметившихся спрямлений важно для размещения опор на пойме. В этом случае следует иметь в виду, что подобные участки при развитии незавершенного меандрирования со временем могут превратиться в главное русло реки. В разработанных спрямлениях, как указывалось, первоначально может развиться ленточногрядовый или побочневый тип руслового процесса и лишь затем они перейдут к меандрированным. Поэтому для каждого спрямления необходимо оценить тип развивающегося в нем руслового процесса и выяснить возможный дальнейший его ход. Здесь можно широко использовать аналогии, исследуя ход развития излучин на смежных участках.

Во всех этих случаях необходима оценка скорости плановых деформаций главного русла и спрямляющих протоков. Можно отметить, что обычно спрямляющие протоки развиваются не слишком быстро, и цикл незавершенного меандрирования составляет нередко 30—40 лет.

Осередковый тип руслового процесса обычно развивается достаточно интенсивно. Вместе с тем русло реки характерно распластанностью и большой общей шириной. Поэтому приходится использовать для размещения опор острова. В этих условиях, кроме выяснения общих границ русла, важно оценить тенденции развития островов (гл. IX). Кроме того, при осередковом типе процесса наблюдается меандрирование отдельных протоков и рукавов и, следовательно, возможны местные размывы берегов. Это также должно быть учтено при размещении опор. И здесь большую помощь в выяснении тенденций развития островов и отдельных участков оказывает анализ гривистого рельефа пойм. По характеру расположения грив (пользуясь приемами, указанными в гл. XIV) удается обычно выяснить наличие и направление меандрирования протоков и тем самым смещения островов и размывы берегов русла. Характерным признаком наличия меандрирования протоков является обнаружение сегментов дугообразных грив на островах и на основных массивах пойм. В последнем случае часты сегменты с выпуклостью грив от реки (причленившиеся острова). Необходимо иметь в виду и возможность расчленения островов поперечными течениями, возникающими в половодье.

Таким образом, при осередковом типе руслового процесса требуется особенно детальное фрагментирование при рассмотрении типов отдельных крупных форм русла.

При пойменной многорукавности анализ также сводится к фрагментированию — выделению типов крупных форм русла в главной реке и протоках, пользуясь предлагаемой их типизацией. Для обоснования выбора места расположения опор на пойме рекомендуется детальный анализ ее рельефа по аэрофотоснимкам и построение плана течений на этой основе, по которым можно судить о размыве ее поверхности и возможных участках наиболее интенсивных ледовых воздействий.

В качестве основных отчетных документов по морфологическому анализу можно предложить:

1) гидролого-морфологическую схему участка (гл. XIV);

2) схемы деформаций отдельных крупных форм русла на участке перехода;

3) таблицы скорости плановых деформаций;

4) краткую пояснительную записку с обоснованием места перехода и прогнозом деформаций (оценке тенденций и общих сроков переформирований крупной формы русла, через которую намечен переход, оценка возможного влияния гидротехнических мероприятий, ведущихся на реке, на развитие этих переформирований);

5) предложения по осуществлению защитных мероприятий при вынужденном расположении опор.

3. СОСТАВЛЕНИЕ ПРОГРАММЫ ПОЛЕВЫХ РАБОТ И ИХ ПРОВЕДЕНИЕ

Полевые работы для обоснования места расположения опор на берегах должны быть в основном направлены на уточнение сроков плановых переформирований речного русла и выяснение некоторых деталей процесса, которых не удалось получить камеральным путем. В случае размещения опор в русле реки полевые работы должны быть направлены на выяснение в основном высотных деформаций русла.

В первом случае полевые работы фактически сведутся:

1) к производству облегченной морфологической съемки участка перехода (участка длиной, равной 20—30-кратной ширине русла, см. гл. XIV);

2) к определению сроков деформаций на основе картирования бровок берегов на аэрофотоснимках (гл. XVI). В особо ответственных случаях может потребоваться постановка стационарных наблюдений за плановыми деформациями на характерных профилях (гл. XII);

3) к вопросам о деформациях и водном режиме;

4) к сбору дополнительных плановых и других материалов в местных учреждениях.

Данные полевых работ включаются как дополнительные к материалам камеральной обработки и должны быть отражены в рекомендованных выше отчетных документах.

Приведем примеры обоснования выбора переходов ЛЭП через реки, выполненные на основе гидролого-морфологического анализа.

р. Дон, 616—617-й км от устья. Схема участка представлена на рис. 92 *а*.

Исходные материалы следующие:

1) лоцманская карта 1930—1933 гг.;

2) измерения плановых деформаций участка длиной 17 км по съемкам 1951 и 1958 гг.;

3) аэрофотоснимки 1948 г.;

4) заключение о выборе места перехода.

Произведенное восстановление прежних положений речного русла по аэрофотосъемке, хорошо согласующееся с данными сопоставления карт различных лет съемки, показало наличие на участке ограниченного меандрирования сползания излучин (рис. 92 *б*).

Намеченный створ перехода оказался на участке берегов, подверженных хорошо выраженным плановым деформациям — размыву левого пойменного берега и намыву правого (рис. 92 *б*).

Скорость размыва линии левого берега на участке перехода по данным сопоставления съемки разных лет характеризуется

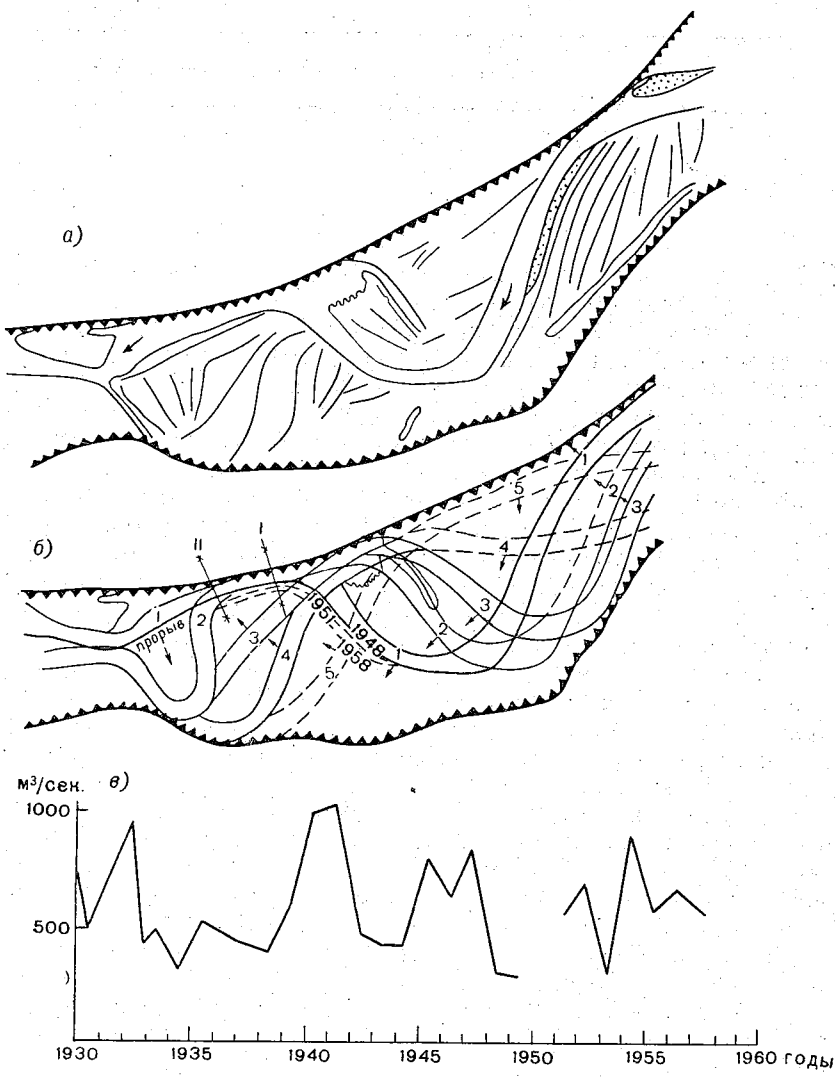


Рис. 92. Схема участка р. Дона на переходе ЛЭП.

а — схема участка, *б* — схема плановых деформаций, *в* — изменение расходов за 1930—1958 гг.

следующими цифрами [1930—1958 гг., на участок наибольших деформаций (табл. 22)].

Таблица 22

Период	Смещение за период, м	Средняя скорость, м/год
1930—48	500	27
1949—51	90	22
1952—58	130	16

Непосредственно в створе перехода деформации происходили следующим образом (рис. 92 *б*).

От 1930 к 1948 г. левый берег (пойменный) намывался и сместился на 180 м, или по 10 м/год. С 1948 г. он начал размываться (пунктир на схеме у переходов *I* и *II*, рис. 92 *б*) и сместился к 1951 г. на 90 м (22 м/год). С 1951 по 1958 г. размыв уменьшался, составив за этот период 30 м, или 4 м/год. Эта же величина получена и в 1959 г.

Можно предположить, что ослабление плановых деформаций, подтверждаемое также и опросом, связано с появлением подпора от Цимлянского водохранилища. Однако это затухание не следует переоценивать, так как анализ гидрографов стока (рис. 92 *в*) показал, что за период после наполнения водохранилища больших половодий не было.

В ходе сползания излучин пойма неоднократно подвергалась крупным переформированиям (рис. 92 *б*). Этот процесс может продолжаться и в условиях подпора, причем в этом случае возможны промывы поверхности поймы вследствие увеличения глубины ее затопления.

На основании изложенного сохранность опоры в намечаемом створе перехода (*I*) можно гарантировать на период не более 15—20 лет. Поэтому рекомендуется переход перенести ниже по течению на 450 м (переход *II*) в будущую вероятную точку перегиба реки. Это позволит гарантировать отсутствие угрозы опоре ЛЭП на левом берегу на ближайшие 50—60 лет. Вследствие возможности промывов поверхности поймы при пропуске половодья следует предусмотреть перекрытие наиболее пониженных ее участков в створе перехода простейшими земляными перемычками.

р. Десна, приустьевой участок. Исходные материалы:

1) аэрофотоснимки на участке длиной 30 км;

2) данные сопоставления съемки 1934 и 1962 гг.

Первоначально был намечен переход *I* (рис. 93). Восстановление схемы плановых деформаций по аэрофотоснимкам показало следующее.

а. На участке развито незавершенное меандрирование (рис. 93) с образованием спрямляющих протоков на поздних стадиях развития меандрирования [при наличии хорошо выраженных петель русла, при отношении длины излучин между точками перегиба русла (S) к шагу излучин ($\lambda_и$), т. е. $S/\lambda_и$, изменяющемся в пределах 2,3—3,8].

б. Главное русло проходит в основном по спрямлениям, т. е. находится в средней стадии развития излучин ($S/\lambda_и=1{,}5$) и, таким образом, скорость плановых деформаций в дальнейшем будет ослабляться. Створ перехода *I* первоначально был намечен на слабоизвилистом участке излучины с $S/\lambda_и$ равным 1,2 и 1,3, т. е. таком, на котором скорость деформаций должна еще возрастать (гл. VIII). Отмечается тенденция к сползанию излучин, причем низовая излучина (*Б*) упирается вершиной в правый склон долины и развиваться не сможет, а верховая (*А*) может свободно меандрировать. В ходе сползания возможна полная переработка полосы шириной 750 м. При скорости плановых деформаций 7—8 м/год она будет полностью переработана в течение 40—50 лет.

в. Лучшим вариантом перехода является его расположение по положению *II* (рис. 93). Здесь правый берег устойчив (склоны долины), а левый представляет собой останец старой возвышенной поймы.

Весь этот участок прямолинеен, с побочнями, и ожидать на нем существенных плановых деформаций нет оснований.

Если невозможно осуществить этот вариант на намечаемом створе перехода *II*, то опоры на переходе *I* (рис. 93) следует вынести за пределы пояса меандрирования (пролет около 800 м) или расположить их на мысе левого склона долины (переход *III*), в 150—200 м от бровки левого пойменного берега (пролет 450 м), или обеспечить конструкцию опоры, допускающую ее размещение на размываемом участке поймы.

В случае постройки Киевской ГЭС следует ожидать резкой активизации руслового процесса из-за снижения базиса эрозии Десны, которое распространится на участок длиной 30—40 км от устья. Попуски в межень также могут активизировать процесс, вызвав отторжения побочней на Десне. Подпор от Каневской ГЭС к существенным изменениям в ходе руслового процесса привести не должен. Это дает основание рекомендовать сохранить первоначально намеченный переход, но только если в его створе будет сооружен, как предполагается, мостовой переход.

р. Абакан на приустьевом участке. Исходный материал: аэрофотоснимки на участке длиной 40 км и лоцманские карты. Схема участка дана на рис. 94.

Главное русло проходит у правого склона долины. Имеется старое русло р. Абакана, расположенное в средней части долины.

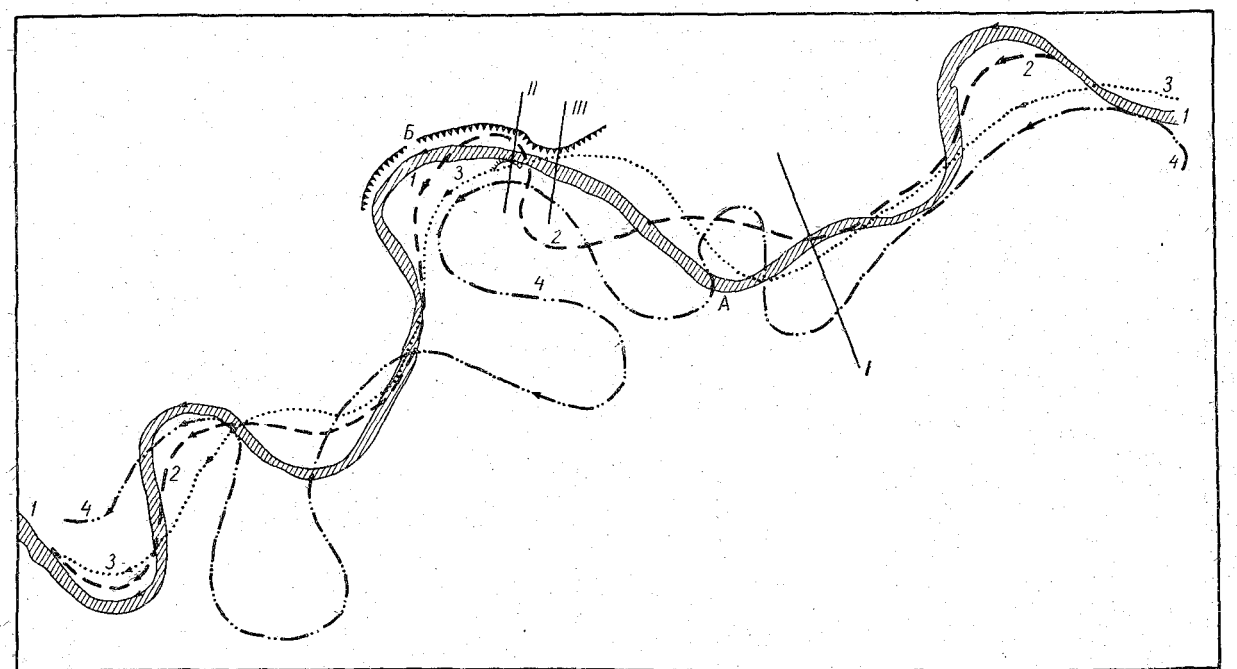


Рис. 93. Участок р. Десны на переходе ЛЭП.

В обоих руслах характерным является незавершенное меандрирование, на участках между излучинами — побочневый тип процесса.

Хорошо выражена пойменная многорукавность, обусловленная повышенной размываемостью поверхности поймы в связи с большими глубинами ее затопления (нередко до 2 м и лишь в центральной части до 1 м) и возникновением по этой причине местных течений. Трасса ЛЭП была первоначально намечена с поворотом на пойме (прямая *I*).

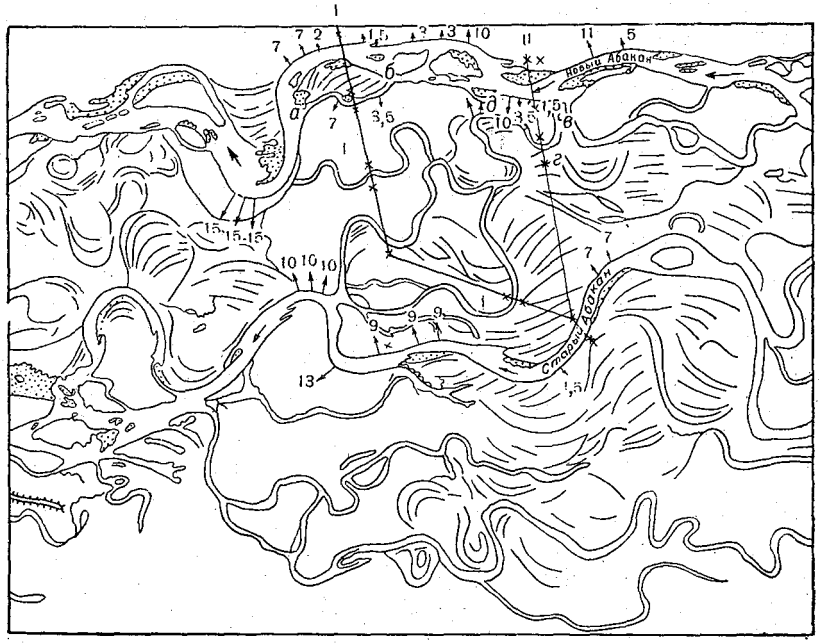


Рис. 94. Участок р. Абакана на переходе ЛЭП.

В условиях хорошей размываемости поймы число опор на ней должно быть минимальным, что повысит надежность запроектированного перехода, поэтому указанный выше вариант перехода не является удачным, т. е. количество опор должно быть значительно уменьшено.

Переход через р. Новый Абакан у с. Кайбалы (рис. 94, прямая *I*) тоже неудачен. Он особенно ненадежен на левом берегу, на котором намечается спрямление излучины с интенсивно разрабатывающимся протоком *а — б* (смещение берегов около 7 м/год). Так как на участке распространено незавершенное меандрирование, то, вероятно, именно в этот проток перейдет главное русло, и проток увеличится до размеров современного

главного русла. Поэтому ставить опору близко от русла нельзя. По этим же причинам нельзя ставить опору и вблизи левого берега острова. Переход главного русла в проток можно ожидать в течение 15—20 лет. Учитывая, что незавершенное меандрирование типично для данного участка, бороться с размывом берегов будет сложно.

На основании изложенного рекомендуется следующее.

1. Удачно намеченное (точка перегиба русла) место перехода р. Старого Абакана сохранить, но далее повернуть трассу вправо (рис. 94) и вывести ее на прямую (*II*). При этом варианте на пойме будет минимальное число опор.

2. При переходе р. Нового Абакана опору на левом берегу можно разместить не ближе 50—70 м от бровки берега (пролет около 500 м). Опора на правом берегу должна быть не ближе 40—50 м, а лучше и дальше от берега и ни в коем случае не на протоке. Ее место на рис. 94 показано крестиком. На этом участке вследствие происшедшего выше него спрямления русла, уже достаточно разработанного и превратившегося в главное русло, существенных плановых деформаций не ожидается. Бывшее главное русло р. Нового Абакана (*в—г—д*, рис. 94) должно в дальнейшем заноситься. Ниже предлагаемого створа перехода р. Нового Абакана возможно новое соединение этого протока с р. Новым Абаканом (стрелки на рис. 94). Если это произойдет, то участок от этого спрямления до начала современного протока из р. Нового Абакана все же должен занестись и угрозу опоре этот проток не представит.

3. Опоры на пойме следует делать на заглубленном фундаменте, имея в виду как возможность образования новых пойменных протоков, так и воронок местного размыва у опор, которые могут появиться благодаря большой затопляемости поймы. Пределом глубины размыва можно принять отметки дна наиболее глубокого плёса на участке перехода.

4. В случае если русло Нового Абакана будет перекрыто, как это намечается сделать в будущем, и поток или большая его часть будет направлена в Старый Абакан, основное внимание должно быть обращено на сохранность опор на переходе через Старый Абакан, так как в этом случае возможно значительное усиление деформаций его русла. Судя по характеру руслового процесса, свойственного данному участку реки, в начальной стадии его развития возможно существенное смещение вправо вершины излучины выше створа перехода, а затем ее спрямление и размыв левого берега. Переход здесь намечен достаточно удачно — на наиболее устойчивом (и сейчас и в будущем) участке, но все же указанные возможности предусмотреть следует.

5. Можно согласиться с тем, что подпор от Красноярского водохранилища на русловой процесс существенно не скажется.

Глава XVII

ПЕРЕХОДЫ ЧЕРЕЗ РЕКИ ТРУБОПРОВОДОВ

В ближайшие годы только на крупных реках СССР должно быть сооружено свыше 3000 переходов трубопроводов. Среди причин аварийного состояния трубопроводов на одно из первых мест ставится влияние на них деформаций речных русел.

С. И. Левин (1963) указывает: «Аварии трубопроводов на подводных переходах можно объяснить следующими основными причинами: необходимостью пересечения водных преград с недостаточно изученным гидрологическим режимом, отсутствием многолетних наблюдений за русловыми процессами — изменениями гидрологического режима пересекаемых водных преград в связи со строительством гидроэлектростанций, выправительных и других сооружений». Аварии трубопровода на переходах через реки, связанные с вибрацией обнажившейся трубы, оцениваются в 72% общего их числа. Из приведенных данных видно, что оценка руслового процесса на участках переходов трубопровода через реки является важной и достаточно распространенной задачей, и гидролого-морфологический анализ руслового процесса, в том числе и на неисследованных реках, должен оказать существенную помощь в правильном выборе места перехода и должен явиться способом рационализировать проведение полевых работ. Переходы магистральных трубопроводов через реки могут проектироваться надземными и подводными.

Для выбора места расположения надземного перехода трубопровода через речные русла применение гидролого-морфологического анализа сохраняет те же черты, что и при выборе мест переходов через реки опор ЛЭП — главной задачей является выяснение возможных плановых деформаций речного русла. Поэтому методика его применения остается такой же, как описанная в предыдущей главе.

При строительстве подводных переходов, кроме оценки плановых деформаций речного русла, возникает задача учета высотных его переформирований, так как размыв засыпанной траншеи, в которую укладывается в этом случае трубопровод, приводит к его обнажению, иногда даже к провисанию, что может иметь катастрофические последствия.

При учете плановых деформаций речного русла при проектировании подводных переходов трубопроводов через реки основное внимание следует направить на выяснение характера, размеров и скорости перемещения зон наибольших глубин и на оценку влияния различных привходящих факторов, например, возможного регулирования стока.

Глубину заложения трубопровода можно приближенно принять больше, чем наибольшая глубина плёса выше перехода. В этом случае неучтенными останутся только сезонные деформации отметок дна плёсов, которые можно оценить дополнительно по приемам, рекомендованным Н. С. Знаменской (1968), позволяющим рассчитывать размеры гряд разного порядка (в том числе и средних форм) для различных расходов воды.

Так как этот метод требует построения планов течений, наличия картограммы донных отложений и данных о расходах воды, то полевые работы следует проводить по схеме, рекомендованной в гл. XIV.

Относительно выбора места перехода при различных типах руслового процесса можно высказать следующие соображения.

При ленточногрядовом и побочневом типах руслового процесса переход трубопровода (учитывая объем земляных работ) следует приурочить к плёсовым участкам (подвальям крупных гряд и побочней), заглубляя поверхность трубы ниже отметок наиболее глубокого плёса на данном бесприточном участке. Это необходимо потому, что в этих условиях плёсы сползают вниз по течению примерно со скоростью сползания крупных гряд. Во введении и гл. VI приводились данные о перемещении плёсов глубиной 12 м и даже 20 м со скоростями до 1 км/год (реки Амударья, Обь и Волга). Таким образом, на эту же величину может меняться отметка дна в заданном створе.

При ограниченном меандрировании переходы целесообразно приурочивать к плёсовым лощинам, принимая, так же как и в предыдущем случае, глубину их заложения равной большей глубине на плёсе в пределах данного бесприточного участка. В этом случае можно считать, что в течение ближайших 15—20 лет в связи со сползанием излучины на створе перехода будет наблюдаться только уменьшение глубин, а их увеличение, вызывающее угрозу размыва трубопровода, может создаться только при сползании плёса выше расположенной излучины.

При свободном меандрировании наиболее глубокие плёсовые участки обычно бывают приуроченными к участкам берега с наибольшей кривизной, наиболее интенсивно смещающимся в плане. Поэтому расположение на них створов переходов не целесообразно. Приурочить их к перекатным участкам, которые при свободном меандрировании находятся на перегибах русла (на участках разворота излучин) и практически очень слабо деформируются в плане, также нельзя, так как на них наблюдаются наибольшие в пределах данной излучины сезонные высотные деформации и разработка перекатов. Поэтому наиболее выгодными створами должны являться участки с относительно прямолинейным руслом, находящиеся между

перекатом и плёсом. Здесь высотные и плановые деформации должны быть минимальными, поскольку через подобные участки проходит только транзит донных наносов, поступающих на подъеме половодья из плёса на перекат, а в период спада — с переката в плёс.

При незавершенном меандрировании следует соблюдать те же принципы выбора места расположения перехода. Надо только иметь в виду, что при разработанных спрямлениях плановые деформации главного русла сильно замедляются. Особое внимание должно быть обращено на неразработанные еще спрямляющие протоки, которые при данном типе руслового процесса в дальнейшем должны превратиться в главное русло. Для них необходимо прежде всего установить стадию их развития и скорость деформаций.

При осередковом типе руслового процесса переходы при большой подвижности осередков можно назначать практически в любом створе, определяя глубину их заложения по отметкам наиболее глубоких плёсов на участке. При наличии островов створ перехода желательно согласовать с общим характером их деформаций. При преобладании сползающих осторовов переход следует приурочить к их низовым участкам, при регрессивных переформированиях — к верховым, при поперечных смещениях необходимо учитывать возможность разработки протоков и смещения зоны наибольших глубин в ходе меандрирования этих протоков.

Глава XVIII

ВОДОЗАБОРНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

При проектировании водозаборных сооружений различия между стадиями проектирования оказываются выраженными обычно значительно более четко, чем в описанных выше случаях проектирования переходов ЛЭП и трубопроводов. Поэтому можно более четко выделить и соответствующие этим стадиям этапы гидролого-морфологического анализа.

На ранних стадиях проектирования могут быть выполнены гидролого-морфологические исследования, основанные на камеральной обработке уже имеющихся материалов (для крупных рек), или на основе морфологической съемки (для средних и малых рек, по которым готовых материалов может не оказаться). Они позволят достаточно надежно выявить место расположения и тип сооружения, наиболее благоприятные по условиям развития руслового процесса, а также, в случае нужды, наметить наиболее эффективные защитные мероприятия. Для выяснения деталей конструкций сооружений, связанных

с особенностями транспорта наносов, может оказаться необходимой постановка исследований по типу рекомендованных в гл. XV.

В соответствии с принципами гидролого-морфологического анализа порядок работ при проведении первого этапа должен быть следующим.

1. Подбор исходных материалов, прежде всего аэрофотосъемочных.

2. Обработка материалов и в первую очередь:

а) типизация руслового процесса и определение его количественных характеристик и морфометрических и гидроморфологических связей;

б) восстановление схем плановых деформаций по аэрофотоснимкам на участке водозабора;

в) оценка скорости деформаций на основе сопоставления карт различных лет съемки или по материалам морфологической съемки;

г) выбор места перехода и составление программы полевых работ для получения недостающих данных и исходного материала для гидравлического расчета высотных доформаций.

3. Проведение полевых работ:

а) морфологическая съемка;

б) стационарные исследования (изучение деталей морфологических образований и сопутствующей им гидравлической обстановки, получение исходных данных для расчёта местных деформаций).

4. Обработка материалов полевых работ и составление характеристик руслового проектирования для вопросов, возникающих на стадии технических чертежей.

5. Контрольные наблюдения за ходом деформаций при строительстве и в первый период эксплуатации сооружения.

Можно наметить следующие рекомендации по размещению водозаборов при различных типах руслового процесса.

При ленточногрядовом типе процесса водозаборы можно размещать практически в любом месте, имея только в виду, что в связи с перемещением ленточных гряд будут наблюдаться периодические колебания отметок с размахом, примерно равным высоте гряд. Поэтому может понадобиться производство систематических его расчисток.

При побочневом типе руслового процесса и большой подвижности побочней следует руководствоваться соображениями, высказанными для ленточногрядового типа. Однако в качестве защитных мер здесь придется прибегать к искусственным отторжениям побочней путем устройства спрямляющего канала в прибереговой, наиболее пониженной части побочня.

При медленном движении побочней водозабор следует располагать в низовой части плёсовых лощин и также предусматривать возможность искусственных спрямлений.

При ограниченном меандрировании водозабор также лучше располагать в низовых концах плёсовых лощин и предусматривать для обеспечения их нормальной работы и устройство спрямляющих каналов.

При свободном меандрировании, учитывая закономерности этого типа процесса, водозаборы следует располагать в наиболее хорошо выраженных излучинах русла, т. е. находящихся в поздней стадии развития процесса, когда плановые деформации существенно ослабевают. При этом в случае наличия в пределах излучины нескольких плёсов водозаборы лучше располагать на наименее активно развивающихся участках излучины, т. е. находящихся не в вершине излучины, обычно не на участке с наибольшей кривизной.

В этих случаях следует предусмотреть возможность:

а) крепления берега водозабора, которое в этих условиях может быть достаточно надежным;

б) предотвращения отмирания петли путем крепления берегов на перешейке излучин, а при сильно затопляемых поймах путем устройства поперечных дамб на перешейке для ослабления размыва его поверхности и спрямления излучины;

в) для ослабления скорости плановых деформаций размываемого берега при наличии высоких половодий на реке может оказаться эффективным искусственное отторжение пляжа на противоположном намываемом берегу.

При незавершенном меандрировании водозаборы выгодно располагать в плёсах отмирающих участков главного русла (по рекомендациям для свободного меандрирования). Для ослабления плановых деформаций можно рекомендовать стимулирование процессов спрямления русла, свойственного этому типу процесса, с последующей его задержкой (крепление берегов спрямляющего канала и т. п.).

При осередковом типе руслового процесса вследствие возможности развития отдельных рукавов по схемам, свойственным разным типам, выбор створа водозабора должен осуществляться на основе фрагментирования русла и в соответствии с приведенными выше рекомендациями для соответствующих типов руслового процесса.

Рекомендации по защитным мероприятиям еще нуждаются в практической проверке, однако основным их свойством является согласование с ходом развития русловых деформаций, выясненном к настоящему времени уже достаточно надежно. Это позволяет считать приведенные рекомендации правомерными. Приведем характерные случаи использования гидрологоморфологического анализа для обоснования выбора места расположения водозаборов.

р. Обь у г. Барнаула. Проектировщиками водозабор был намечен в плёсе на излучине, подмываемый берег которой был

очень близок к левому склону долины, у подножия которого располагалась насосная станция. Глубина плёса превышала 12 м, а то обстоятельство, что излучина упирается своей вершиной в склон долины, на первый взгляд давало уверенность в устойчивом положении берега. В дальнейшем, уже в период строительства, обнаружилось, что выпуклый участок левого берега, непосредственно выше створа водозабора, интенсивно сползает и глубины в плёсе сильно падают. Это потребовало разработки системы защитных мероприятий.

Уже самый общий морфологический анализ участка реки показал следующее. Русло реки на рассматриваемом участке развивается по схеме незавершенного меандрирования. Водозабор оказался расположенным на изогнутом участке сильно разработавшегося спрямления русла, в которое перешел главный поток, а старое главное русло отмирает и в межень практически уже отчленяется от нового главного русла. В спрямлении при переходе в него главного потока реки начал развиваться русловой процесс побочневого типа — по руслу начали перемещаться крупные песчаные побочни длиной 2—3 км, шириной порядка 1 км и более и высотой под меженным уровнем 3—4 м. Вместе со сползанием побочней смещались вниз по течению и предшествующие им их плёсовые лощины, глубина которых составляла более 10 м. Таким образом, надвижение песков на створ водозабора представляет собой перемещение сползающего левобережного побочня. Положение усугубляется тем, что смещение противоположного правобережного побочня, сползшего за период с 1958 по 1963 г. почти на полную длину побочня, обнажило правый берег, который начал интенсивно подмываться особенно выше створа водозабора.

Таким образом, можно констатировать, что побочневый тип процесса, развивающийся первоначально в спрямлении, переходит в свойственное участку незавершенное меандрирование. Спрямление начинает превращаться в излучину, которая в дальнейшем повторит весь цикл развития русла. Это спрямление разовьется в излучину, подобную той, которая сейчас сохраняется в виде старого русла Оби, а в дальнейшем произойдет ее спрямление. На данной излучине, так же как и на смежных с ней, цикл незавершенного меандрирования, как это выясняется на основании сличения съемок 1898 и 1951 гг., завершается в течение 30—40 лет.

В ходе этого процесса левобережный побочень, уже наползающий на створ водозабора, приостановит свое движение и превратится в участок выпуклого берега излучины. Однако при этом он полностью закроет створ водозабора, и вершина изгиба русла, в котором сейчас расположен водозабор, будет полностью занесена, и насосная станция окажется отстоящей от берега русла на 1,5—2 км, а в дальнейшем и на еще большее

расстояние. Существующий сейчас затон левобережного побочня может еще просуществовать некоторое время (до десятка лет). Однако в ходе перемещения правого вогнутого берега, размывающегося со скоростью до 60 м/год, возможен прорыв потока в одно из крупных половодий на низовой участок старого русла и внезапный отход реки от створа водозабора на еще большее расстояние (до 3,5 км).

Таков диагноз и прогноз того, что происходит на данном участке реки. Модельные исследования различных систем защитных мероприятий, выполненные Русловой лабораторией ГГИ в Зеленогорске, показали возможность интенсивного воздействия на эти деформации в желаемую сторону (остановка сползания и закрепление положения правого подмываемого берега, например, с помощью шпоры на перегибе русла). Однако стоимость таких защитных мероприятий оказывается большей, чем стоимость строительства самого водозабора из-за больших местных размывов у защитных сооружений. Поэтому для обеспечения работы водозабора остаются правомерными только паллиативные мероприятия — ежегодное землечерпание для поддержания затона, объем которого из года в год будет увеличиваться.

Вместе с тем даже самый поверхностный морфологический анализ позволил бы запроектировать водозабор на значительно более устойчивом участке, например, выше по течению на участке мостового перехода с фиксированными креплениями берегов. При этом удлинение трассы водовода на 2 км обошлось бы значительно дешевле, чем нынешние защитные мероприятия. Подробное описание хода деформаций и их количественные характеристики помещены на стр. 24. Там же даны и количественные характеристики, положенные в основу прогноза русловых переформирований.

Описанный случай является ярким примером того, к чему приводит неучет руслового процесса. Не исключено, что проектировщики, кстати сказать, знавшие о варианте расположения водозабора у моста и недооценившие влияние руслового процесса, увлеклись в данном случае только возможностью сократить длину водовода.

р. Иртыш на участке в пределах Павлодарской области. По местным условиям водозаборные сооружения можно разместить на протоке Быстрая, ответвляющемся от р. Иртыша, в вершине одной из петель русла этого протока (рис. 95, *X* — возможное место расположения водозабора).

При таком размещении водозабора возникло две угрозы — спрямление петли протока (*а*), превращение его в старицу, и уход Иртыша в расположенную ниже водозабора часть протока (*б*) в результате размыва перешейка между ним и этим протоком, также ведущего к превращению петли протока в ста-

роречье. Размыв этого перешейка происходит в результате меандрирования излучины Иртыша и излучины протока (рис. 95). Проектировщики на основании сопоставления карт оценили скорость размыва этого перешейка со стороны Иртыша в 7, 8 м/год, а со стороны протоки в 23 м/год. На основании связи между величинами плановых смещений берегов и интег-

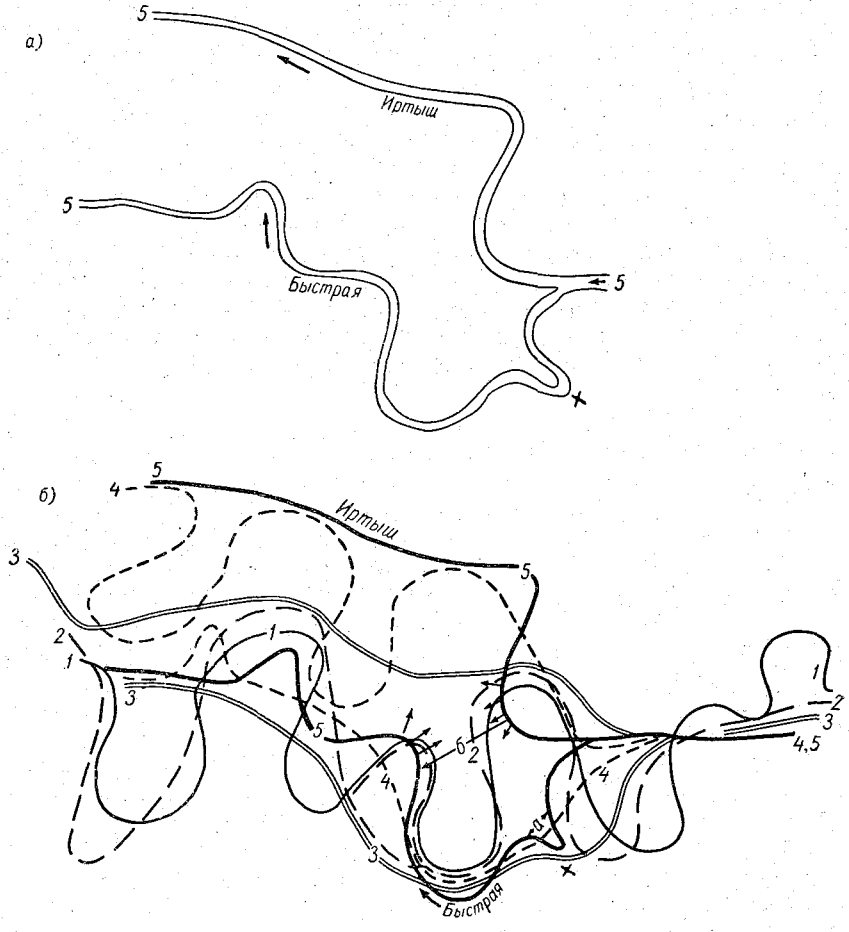


Рис. 95. Участок р. Иртыша.

ральными суммами наивысших суточных уровней за период с 1945 по 1961 г. и исходя из ширины перешейка петли протока (175 м) и перешейка между Иртышом и протоком (725 м) сроки прорыва петли протока были оценены в 17—22 года, а перешейка между нею и Иртышом — в 2—7 лет. Для решения

вопроса о реальности этих угроз следовало прежде всего выяснить: 1) по какой схеме развиваются излучины на протоке и на р. Иртыше, 2) действительно ли возможен уход Иртыша в проток, если произойдет размыв перешейка между ними.

С этой целью на основе анализа гривистого рельефа поймы по аэрофотосъемкам (положения русла, обозначенные на рис. 95 цифрами *1*, *2*, *3*, *4*, *5*) была восстановлена схема плановых деформаций р. Иртыша и протока. Обнаружилось, что излучины протока и Иртыша развиваются по схеме незавершенного меандрирования. При этом на протоке спрямления развиваются длительное время, и отчленение излучин происходит на поздних стадиях меандрирования. Спрямляющий проток появляется на перешейках уже хорошо выраженных петель русла, причем примерно одновременно происходит и отторжение пляжей в вершинах этих петель. Все это ведет к ослаблению темпа плановых деформаций излучин.

Эти же схемы показали, что проток развивается на месте бывшего главного русла р. Иртыша в выработанном им понижении (положение *3*, рис. 95). Старое русло Иртыша, по которому в настоящее время проходит проток, образовалось в результате ряда спрямлений излучин этой реки и в ходе этих спрямлений смещалось вправо. Благодаря спрямлениям оно имеет относительно прямолинейные очертания (положение *3*, рис. 95). Современное главное русло р. Иртыша проходит уже у правого склона долины и таким образом в ходе плановых деформаций пересекло все дно долины от левого ее склона к правому.

Обнаружено, что в ходе плановых деформаций излучины р. Иртыша, угрожающих прорывом перешейка между Иртышом и протоком, зона наибольших размывов смещается вниз по течению реки, что способствует сохранности перешейка.

Кроме того, анализ карт, использованных для сопоставления, показал, что выявленные с их помощью тенденции деформаций противоречат нормальному ходу развития излучин при незавершенном меандрировании, например обнаруживают увеличение ширин перешейков петель. Это свидетельствует о ненадежности некоторых карт. Сличение этих карт с аэрофотоснимками позволило уточнить данные о скорости деформаций. Оказалось, что смещения берега со стороны Иртыша и протока примерно равны и не превышают 2,8 м/год (вместо соответственно 7, 8 и 23 м/год). Таким образом, длительность существования перешейка между ними увеличивается от 2—7 до 25—30 лет, а намечающееся регулирование стока Иртыша должно еще несколько ослабить переформирования. Главное внимание следует уделить размыву перешейка в излучине протока. Желательно предотвратить размыв этого перешейка (он идет не только за счет плановых деформаций). Это возможно с по-

мощью простейших средств — сооружений на нем поперечных земляных дамб. Подмыв вогнутого берега в вершине петли протока можно ослабить разработкой спрямляющего протока в береговой части выпуклого берега. Кроме того, для ослабления деформаций петли желательно уменьшить поступление в проток наносов из р. Иртыша. Для этого прежде всего рекомендуется прекратить отвал грунта на побочне, расположенном на р. Иртыше в начале протока, разрабатываемого при землечерпании на перекате р. Иртыша.

р. Десна у г. Брянска. В первоначальном проекте водозабора место его расположения было выбрано без учета возможного влияния на работу сооружений руслового процесса.

Вследствие этого насосная станция оказалась размещенной в верховой части выпуклого берега излучины, практически на перекатном участке, и для обеспечения благоприятных условий работы оголовка проектом предусматривалась расчистка русла на глубину около 1,5 м при ширине полосы расчистки 16 м и протяжении 100 м (ширина реки 100 м, поймы 2 км). Для связи с насосной и из условий отепления напорного трубопровода предусматривалась дамба поперек поймы, выведенная до незатопляемых отметок.

Морфологический анализ показал следующее.

Река на участке водозабора развивается по схеме незавершенного меандрирования с разработкой спрямляющих проток после превращения излучин в петли. В спрямлениях обычно развивается побочневый тип процесса. При последующем искривлении спрямлений побочни приостанавливают сползание и превращаются в пляжи (рис. 96).

В настоящее время главное русло реки проходит по спрямлениям, уже начавшим меандрировать. В связи с относительно спрямленным состоянием русла транспорт наносов на участке усилился, что привело к появлению существенных переформирований дна речного русла. Об этих обстоятельствах свидетельствует наличие на участке крупных сползающих гряд, занимающих всю ширину русла, с шагом, равным примерно 5—6 ширинам русла (500—600 м), и высотой до 1,5 м. Участок водозабора расположен на еще слабоизвилистых излучинах, вершины которых упираются в склон долины. Вследствие ограничивающего влияния склонов развитие излучин должно происходить преимущественно в сторону пойменного берега, на котором было намечено строительство насосной станции. Скорость плановых деформаций бровок берегов около 10 м/год (на участке насосной), с развитием излучин будет увеличиваться. Побочни на участке начали стабилизироваться в своем сползании и превращаться в малоподвижные перекаты. Все это дает основание считать, что место расположения насосной станции выбрано неудачно, поскольку расчистка дна потребуется не ра-

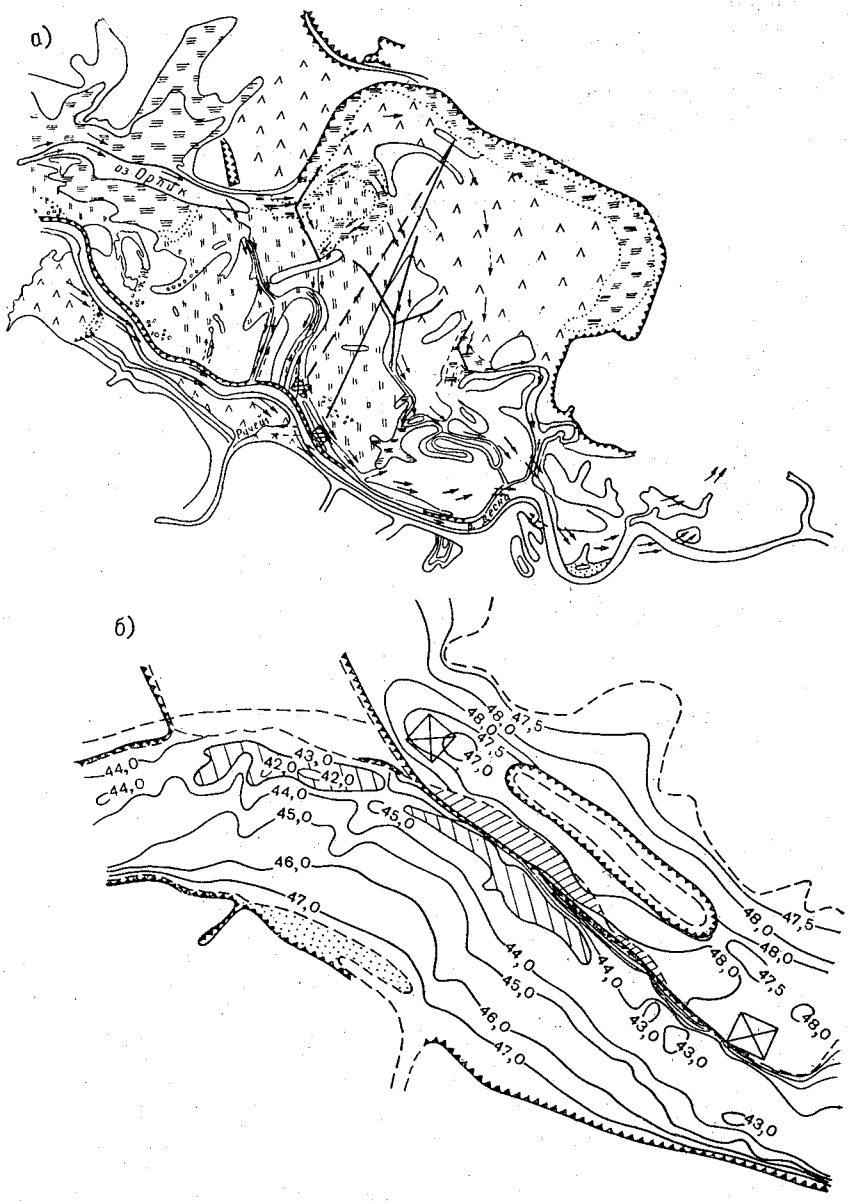


Рис. 96. Десна у г. Брянска.
а — общая схема; *б* — участок водозабора.

зовая, как предполагалось, а ежегодная, так как перекат, на который выведен оголовок, сползать не будет, но будет подвергаться значительным ежегодным намывам и размывам. Кроме того, наибольшие подмывы берега сосредоточены в настоящее время именно на участке насосной.

Все это указывает на необходимость вынесения места расположения насосной вверх по течению реки, на плёсовый участок, в то же время отличающийся наименьшими плановыми деформациями русла (верховая часть раздвоенного плёса, редкая штриховка на рис. 96).

Проектирование дамбы поперек поймы с незатопляемыми отметками приведет к исключению из живого сечения потока в период половодья около 60% его площади. (В естественном состоянии пойма пропускала около 60% расходов в половодье.) Принимая во внимание принцип Белелюбского, размываемое русло после стеснения сечения разрабатывается до приобретения бытовых скоростей, получается примерно двойной размыв русла. При этом сохранность оголовка и площадки насосной станции не обеспечивается. Поэтому создание такой дамбы нежелательно, к тому же грунты поймы допускают требуемое заглубление трубопровода, а сообщение со зданием насосной может быть осуществлено на лодке. Период затопления поймы не превышает 7 дней.

Глава XIX

ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ КРУПНЫХ ГИДРОУЗЛОВ

1. ОСНОВНАЯ ЗАДАЧА АНАЛИЗА

Русловой процесс при проектировании крупных ГЭС обычно учитывается на поздних стадиях проектирования и сводится к оценке местных размывов непосредственно на приплотинном участке в нижнем бьефе плотины. Вместе с тем именно в этом случае необходимо обеспечить наиболее комплексное решение задачи, поскольку регулирование стока приводит обычно к коренным преобразованиям руслового процесса на участках реки в сотни километров длиной и на сети притоков. Эти вопросы были подробно рассмотрены во Введении. Поэтому ограничимся только некоторым уточнением задач исследований на регулируемых участках рек с перечислением основных видов камеральных и полевых работ и отчетных документов, которые следует получить в результате их проведения.

Главной задачей, возникающей при оценке влияния регулирования стока реки на русловые и пойменные деформации, яв-

ляется выяснение новых условий транспортирования наносов потоком. Решение этой задачи прежде всего требует оценки будущего водного режима и его влияния на элементы баланса наносов — выявления наиболее вероятных соотношений между этими элементами, которые, как указывалось в первой части книги, являются показателями особенностей морфологического облика процесса.

Для того чтобы судить о том, насколько существенны будут изменения характера деформаций русла и поймы под влиянием регулирования стока воды и наносов, всегда необходимо знать, какие формы имел русловой процесс в естественных условиях, какими факторами определялись его основные местные особенности. Это поможет также выявить ведущие факторы руслового процесса в условиях регулирования стока.

Необходимость знания того, как протекали русловые и пойменные деформации в естественных условиях при изучении руслового процесса на зарегулированных реках, обусловлена и тем, что характер и общее направление деформаций, вызванных изменениями водного режима, в значительной мере будут зависеть от того, на какой общий морфологический фон наложатся новые воздействия. Например, регулирование стока на меандрирующей реке, по-видимому, вызовет иной морфологический эффект, чем на реке с многорукавным руслом или блуждающим и т. д.

Оценка влияния регулирования стока воды и наносов на русловой процесс (деформации русла и поймы) производится на основе выявления связей между характером этого процесса и определяющими его факторами в естественных условиях, на основе анализа схем регулирования, характера изменений этих определяющих факторов и установления соответствующих изменений в ходе деформаций русла и поймы. По-видимому, количественные связи между типом руслового процесса и определяющими его факторами можно установить на основе гидроморфологических зависимостей (связей между размерами русел, водным режимом и твердым стоком), а также путем выявления соотношений элементов баланса наносов, свойственных тем или иным типам морфологически однородных участков.

При изучении руслового процесса для проектирования регулирования или при изучении руслового процесса на уже зарегулированных реках должны быть освещены следующие вопросы.

Для зоны выклинивания подпора в первую очередь необходимо знать:

1. Каково будет протяжение участка реки, на котором скажется влияние переменного подпора? Задача сводится к установлению границ выклинивания подпора в период прохождения

по реке половодья и в период наибольшей возможной сработки водохранилища.

Основным методом решения этой задачи может служить построение кривых подпора или постановка специальных наблюдений, если регулирование уже осуществлено.

2. Каков должен быть характер изменений строения мезоформ скоплений наносов в русле, происходящих под влиянием регулирования водного режима? На уже зарегулированных реках это позволит существенно детализировать особенности изучаемой зоны выклинивания и выявить местные факторы, влияющие на характер деформаций. Эта работа требует знания того, какие морфологические образования в русле и на пойме были свойственны данному участку в естественных условиях. Без этого судить о новообразованиях на участке будет затруднительно.

3. Какое общее направление примут деформации русла, поймы и отдельных морфологических образований как в целом по зоне выклинивания, так и на ее характерных участках? Какие новообразования могут появиться на участке? При этом важно оценить эти процессы в русле реки и на пойме и раздельно для разных периодов режима (пропуск половодья, периоды сработки), так как очень вероятно (об этом уже указывалось выше), что в эти периоды русловые и пойменные деформации могут оказаться разнонаправленными. Большой интерес представляет оценка возможного изменения характера обмена наносами между поймой и руслом. Поэтому существенно оценить, произойдет ли и в какой мере изменение скоростей течения на пойме по сравнению с естественным режимом, каковы будут эти изменения при затопленной пойме и при сработках водохранилища, т. е. в условиях переменных во времени глубин затопления и уклонов свободной водной поверхности. Поскольку поймы обычно обладают хорошо выраженным микрорельефом поверхности в виде чередования различно ориентированных по отношению к руслу систем грив и понижений между ними, следует учесть влияние особенностей строения этого микрорельефа на скорости течения и на размываемость поверхности поймы.

Очевидно, очертания элементов микрорельефа, совпадающие с очертаниями динамических осей потока на затопленной пойме, будут создавать благоприятные условия для сосредоточенного размыва ее поверхности.

Решение всех этих вопросов требует особенно тщательного анализа строения микрорельефа поймы по аэрофотоснимкам, по картированию отложений на ее поверхности и измерению скоростного поля потока. Требуется также разработка расчетных приемов для определения размываемости поверхности поймы.

Для участков реки, расположенных ниже створа плотины, освещаются в первую очередь следующие вопросы.

1. Должны быть установлены границы между участками реки, на которых в различной мере будет сказываться регулирование стока. Для этого надо выявить:

а) нижнюю границу участка, на котором под влиянием боковой приточности изменения водного режима, вызванные регулированием стока, будут заметны;

б) границу участка, на котором восстановится имевший место при естественных условиях баланс наносов, а следовательно, сохранится прежний тип русловых и пойменных деформаций. При этом особенно важно оценить роль притоков в восстановлении этого баланса. В условиях регулирования стока притоки, впадающие ниже плотин, как указывалось в начале книги и в настоящей главе, будут иметь резко пониженный базис эрозии. Поэтому вынос из них наносов в главную реку может существенно увеличиться. В связи с этим внутри общего участка, на котором будет сказываться регулирование стока, в районах впадающих притоков могут появиться подучастки с резко отличным характером русловых и пойменных деформаций на главной реке.

2. Так же как и для зоны выклинивания подпора, для каждого из выявленных выше участков и подучастков необходимо оценить, какое общее направление примут деформации русла и поймы, какие морфологические образования на этих участках будут свойственны руслу и пойме, каковы будут деформации этих новых и ранее существовавших русловых и пойменных образований.

При решении всех этих вопросов необходимо оценить:

а) как скажется осветление воды в водохранилище на объемах и составе наносов, транспортируемых потоком ниже плотины;

б) как изменится местное поступление наносов в отношении объемов, состава наносов и режима их прихода и расхода в русле и на пойме. Решение этой задачи, в частности, требует выяснить размывающую и аккумулирующую способность потока в различные фазы регулирования водного режима. Например, в условиях многолетнего регулирования стока преобладающим во времени фоном водного режима будет повышенная межень и кратковременные подъемы уровня при попусках. Это, по-видимому, приведет к резкому ослаблению процессов деформаций поверхности поймы, а в русле создадутся условия деформаций, которые не будут соответствовать ни одной фазе естественного водного режима, причем эти изменения могут по-разному сказаться на различных морфологических образованиях. Например, можно ожидать, что в этих условиях уменьшится

намыв перекатов, а период их сработки будет весьма длительным, относительно увеличится объем влекомых наносов, переносимых в форме подвижных скоплений, и при прочих равных условиях уменьшится аккумуляция наносов и т. п.

Суточное регулирование при этом вносит еще дополнительные влияния на ход русловых деформаций, так как на реке может создаться режим колебаний уровня и расходов воды, похожий на паводочный (частое прохождение небольших, коротких волн попусков), который неблагоприятен для развития на реке плёсов и перекатов;

в) как будут перемещаться границы характерных участков реки, в частности участков местного размыва и аккумуляции, например, участков, появление которых связано с возникновением зоны размыва в непосредственной близости от плотины из-за отсутствия компенсации эрозионной работы потока поступлением наносов, задержанных в водохранилище. Из приведенных выше положений следует, что если на участках зоны выклинивания особое внимание необходимо уделять процессам деформаций поверхности поймы, то на участках нижних бьефов основное внимание должно быть сосредоточено на изучении деформаций русла главной реки и пойменных протоков. Программа, методы и средства изучения всех указанных вопросов остаются такими же, как описанные в главах XII—XV.

Выводы по этим вопросам должны основываться на данных предварительного морфологического анализа, морфологической съемки, производства систематических контрольных съемок русла и организации стационарных наблюдений на морфологически однородном участке (наблюдения типичных макроформ русловых образований и микро- и мезоформ скоплений наносов).

В результате этих работ должна быть получена общая схема развития указанных образований в естественных условиях, оценено, каковы будут деформации, возникающие в результате регулирования водного режима, и насколько они будут отличаться от естественных. Тем самым будет составлен фоновый прогноз деформаций и задана схема процесса, необходимая для производства детальных расчетов по наиболее ответственным участкам реки и для максимального приближения их результатов к местным условиям.

2. ПРОИЗВОДСТВО ПОЛЕВЫХ РАБОТ НА ЗАРЕГУЛИРОВАННЫХ УЧАСТКАХ РЕК

Соображения, приведенные выше, обусловливают необходимость проводить исследования русловых и пойменных деформаций на зарегулированных реках по следующей схеме.

1. Составление схемы развития руслового процесса на изу-

чаемом участке реки в естественных условиях и выявление основных определяющих его факторов.

2. Постановка и проведение наблюдений за ходом руслового процесса в условиях зарегулированного стока.

3. Оценка характера изменения основных факторов, действующих на русловой процесс.

Все эти работы в конечном итоге имеют целью составление фоновых и локальных прогнозов дальнейшего хода развития руслового процесса.

Методика и техника проведения этих работ могут быть такими же, как и при исследовании руслового процесса на реках в естественных условиях (при незарегулированном водном режиме).

Составление схемы развития руслового процесса в естественных условиях включает:

а) предварительный гидролого-морфологический анализ, выполняющийся на основе использования всех имеющихся по реке материалов и заключающийся в выделении морфологически однородных участков и основных факторов, влияющих на ход деформаций русла и поймы на этих участках, в выделении типичных макроформ русла и в изучении хода их деформаций;

б) производство морфологической съемки, если материалов по данному объекту не имеется или их недостаточно.

Наблюдения за ходом руслового процесса в условиях регулирования стока заключаются в производстве:

а) периодических (повторных) морфологических съемок;

б) аэрофотосъемок;

в) съемки мгновенных уклонов водной поверхности;

г) стационарных исследований, заключающихся в постановке наблюдений за деформациями отдельных типичных макроформ речного русла, а также мезоформ скоплений наносов;

д) систематических наблюдений за водным режимом и твердым стоком.

Длина участков, на которых следует организовать русловые наблюдения, может составлять сотни километров, а площади — тысячи квадратных километров; их границы могут охватить несколько морфологически однородных участков. Для оценки общих деформаций рекомендуется следующее.

Все виды плановых съемок должны быть заменены аэрофотосъемкой, которой в короткие сроки можно охватить участки в сотни километров длиной. Периодические аэрофотосъемки можно планировать сплошными по всей длине участка 1 раз в 2—5 лет в зависимости от интенсивности общих плановых деформаций. Для учета особенностей внутригодовых переформирований желательно производить более частые съемки на типичных участках, располагаемых в пределах морфологически

однородных участков, с тем, чтобы оценить разновидности деформаций, наблюдающихся в пределах этих морфологически однородных участков. В частности, съемки этих участков должны помочь осветить вопрос о перемещении границ зон размыва и аккумуляции наносов внутри морфологически однородных участков, охарактеризовать деформации в наиболее важных с точки зрения хозяйственного использования участках и т. п. Длина таких участков на крупных реках должна быть не меньше 25—30 км, на средних реках — 7—10 км.

Сплошная аэрофотосъемка при ширине реки до 300 м должна быть не мельче 1 : 25 000, при ширине реки более 300 м и до 1000 м — 1 : 25 000, свыше 1000 м — 1 : 50 000. Аэрофотосъемка характерных участков может быть задана при ширине реки до 300 м в масштабе 1 : 2000—1 : 5000, от 300 до 1000 м— 1 : 5000 — 1 : 10 000, свыше 1000 м — 1 : 15 000 — 1 : 25 000.

На участках, где делается выборочная аэрофотосъемка, полезно, кроме промеров на отдельных макроформах, осуществлять сплошной промер в границах этих участков, который можно производить в те же сроки, когда осуществляется эта аэрофотосъемка, т. е. 1 раз в 2—5 лет.

Это обусловливается тем, что подобные участки могут представлять большой хозяйственный интерес (например, участки непосредственно ниже сооружений, где деформации проходят особенно интенсивно); кроме того, промеры, выполняющиеся на отдельных типичных излучинах, не всегда позволяют проследить деформации, происходящие на границах характерных участков.

Промеры на крупных реках желательно осуществлять путем эхолотирования; они проводятся теми же приемами и приборами, которые обычно приняты для данного вида работ. По поводу их методики могут быть высказаны некоторые частные замечания.

1. Промерные работы на типичных участках должны проводиться в межень. Каждая последующая съемка при таком порядке ее проведения должна позволить оценить эффект работы потока за период между съемками.

2. Частота промерных поперечников должна определяться крупностью русловых образований, т. е. должна позволить провести изобаты или горизонтали рельефа дна так, чтобы получить данные о размерах побочней, пляжей и т. п.

В среднем можно принять, что при масштабах съемки 1 : 1000 — 1 : 2000 изобаты должны проводиться через 0,25—0,5 м, при масштабе 1 : 5000 — 1 : 10 000 — через 0,5—1,0 м и при масштабе 1 : 25 000 — через 1,0 м.

3. При производстве промерных работ данные по отдельным поперечникам должны быть дополнены хотя бы глазомерной зарисовкой контуров основных русловых образований, что

существенно облегчит проведение горизонталей. Эта задача облегчается широким использованием при производстве промера аэрофотоснимков, по которым можно точно привязывать промерные поперечники.

4. В случае многорукавного русла или наличия пойменных протоков промерные работы должны освещать режим рукавов и протоков.

5. Береговая ситуация наносится с той же подробностью, что и рельеф дна в полосе, равной 2—3-кратной ширине русла.

6. При наличии аэрофотоснимков, дающих общие контуры поймы и показывающих особенности строения микрорельефа, наземные топографические работы могут быть ограничены нивелировкой поперечников. Поперечники выбираются по аэрофотоснимкам так, чтобы с их помощью можно было охарактеризовать наиболее типичное на данном участке строение поймы (определить ее среднюю высоту, общий наклон вдоль реки и в поперечном сечении и наиболее распространенные превышения отдельных элементов микрорельефа).

7. При производстве описываемых промерных работ необходимо обратить особое внимание на оборудование высотной магистрали надежными и частыми реперами и на обеспечение возможностей повторения промеров только в тех поперечниках, в которых они производились в первый раз. Для этого промерные поперечники должны быть закреплены постоянными створными знаками. Перед каждым очередным промером должна проводиться контрольная нивелировка высотной магистрали.

8. При производстве промеров необходимо во всех точках фиксировать грунты дна (состав, крупность отложений).

Наблюдения за режимом уклонов свободной водной поверхности на участках большого протяжения осуществляются на основе производства однодневной связки уровней на всем протяжении изучаемых участков, которая выполняется до начала подъема половодья, на его подъеме, пике и спаде и в период межени. По этому же принципу следует организовать наблюдения за уклонами свободной водной поверхности и при дождевых паводках, если они имеются на реке.

Однодневная связка производится по обоим берегам реки с тем, чтобы получить величины не только продольных, но и поперечных уклонов.

Частота расположения урезных кольев должна позволить судить о ходе уклонов по длине всех излучин русла, т. е. на всех перекатах и плёсах. При повторных связках урезные колья должны устанавливаться точно в тех же местах, в которых они располагались при предшествующей однодневной связке. Для этого следует широко использовать створные знаки промерных поперечников, приурочивая к ним забивку урезных

кольев. На участках крутых берегов определение уклонов рекомендуется производить с помощью переносного передаточного устройства с горизонтальной рейкой, устанавливаемого на створных знаках промерных поперечников.

Систематические наблюдения за водным режимом и твердыми расходами проводятся непрерывно на постоянных гидростворах в течение всего периода работ, а не только при производстве очередного промера. Они заключаются в производстве водомерных наблюдений, измерений расходов воды и взвешенных наносов. Гидрометрические створы располагаются на границах всех морфологически однородных участков, а также участков, на которых производится продольный промер. Створы должны охватить всю ширину поймы. На гидростворах ведутся обычные срочные наблюдения по методике, предусмотренной действующим «Наставлением по производству гидрометрических работ». В период производства промеров и однодневных связок уровня воды организуются учащенные водомерные наблюдения через каждые 2 часа. Кроме этих створов, следует организовать временные створы, работающие только в период половодья. Они располагаются на всех поперечниках через пойму и на них ведут наблюдения за скоростями течения на затопленной пойме. Если в период производства промеров будет возможность использовать самолет, желательно производить съемки поля поверхностных скоростей течения в пойме и в русле путем фотофиксации поплавков, сплавляющихся по реке, на всем протяжении участков промерных работ.

В результате проведения стационарных наблюдений на участках большого протяжения должны быть получены следующие отчетные документы.

1. Совмещенные планы участков реки.

2. Графики, иллюстрирующие ход деформаций русла и поймы реки по длине участка и во времени.

3. Графики, иллюстрирующие распределение по длине участков и во времени продольных и поперечных уклонов свободной водной поверхности.

4. Графики, характеризующие водный режим.

5. Графики, иллюстрирующие режим поступления взвешенных наносов и изменение их расходов по длине реки и во времени.

Кроме перечисленных итоговых данных, необходимо составить отчет о выполненных работах и приложения к ним в виде систематизированных графических, табличных и текстовых исходных материалов (планы реки за каждый год съемки, продольные и поперечные профили, результаты морфологической съемки, таблицы объемов деформаций, журналы наблюдений на стационарной сети, полевые дневники и т. п.).

Все указанные материалы оформляются по методике и приемам, рекомендованным в части II книги.

Фоновые прогнозы были составлены автором для ряда объектов и опубликованы в Трудах ГГИ, вып. 44 (р. Кура), вып. 74 (р. Полометь), вып. 94 (р. Обь), вып. 108 (р. Нижняя Волга).

В этих статьях соблюдается схема построения фонового прогноза, рекомендованная выше, а именно:

1) дается характеристика руслового процесса в естественных условиях и выявляются его связи с определяющим фактором;

2) оценивается изменение водного режима и ожидаемый сток наносов;

3) применяется типизация руслового процесса и оценивается вероятный характер его изменения в связи с изменением определяющих факторов. Все эти работы выполнены на основе главным образом гидролого-морфологического анализа уже имеющихся материалов. Это подтверждает возможность составления фоновых прогнозов уже на ранних стадиях проектирования. В качестве примера ниже приводится фоновый прогноз переформирований русла и поймы р. Волги в целом для участка Волгоград — Астрахань (пример 1) и для расположенного внутри него подучастка Волжской ГЭС им. XXII съезда КПСС — г. Красноармейск (пример 2). Подробные морфологические описания этих участков помещены в гл. X.

Пример 1. **Общие тенденции развития руслового процесса на участке Волжская ГЭС им. XXII съезда КПСС — г. Астрахань**

В результате изменений, которые претерпят основные факторы руслообразования (водный режим и сток наносов) под воздействием их регулирования водохранилищами волжских ГЭС, на участке Волгоград — Астрахань можно ожидать следующие общие тенденции в развитии руслового процесса.

1. Русловые и пойменные деформации под воздействием регулирования стока в конечном итоге должны ослабевать, что обусловливается снижением расходов воды в половодье. При наличии указанной общей тенденции в развитии русловых деформаций в начале участка будет наблюдаться временная их активизация, вызванная тем, что задерживаемые в водохранилище наносы не будут компенсировать размывы русла, как это происходило в естественных условиях. Вследствие этого ослабленные размывы будут носить однонаправленный характер. Зона размыва будет перемещаться вниз по течению. По мере ее сползания деформации в начале участка будут ослабевать, а русло будет приходить к состоянию статического равновесия.

2. Морфологический эффект ослабления руслового процесса должен выражаться прежде всего в отмирании пойменных,

а затем крупных русловых рукавов. Это должно происходить вследствие снижения высоты половодий и уменьшения скоростей течения. Снижение высоты половодий вызовет уменьшение глубин, а следовательно, и более резкое уменьшение скоростей течения в рукавах, чем в главном русле. Часть пойменных рукавов отомрет вследствие прекращения затопления поймы и поступления в них воды.

3. Снижение высот половодий должно способствовать уменьшению подвижности сформировавшихся в естественных условиях побочней. Однако наряду с этим в процессе русловых деформаций возможно появление в русле р. Волги вторичных, менее крупных побочней, т. е. возможно формирование на участке однорукавного русла побочневого типа. При этом не исключено, что некоторые побочни смогут отторгаться в процессе своего сползания. Их отторжения приведут к появлению на отдельных участках коротких протоков.

Таким образом, при уменьшении пойменной многорукавности небольшая русловая многорукавность на некоторых участках может не только иметь место, но даже развиваться. Возможность отторжения побочней обусловлена тем, что водный режим все же остается еще далеко не выравненным и возможны значительные колебания уровня воды.

4. Снижение высот половодий и вместе с тем сохранение высот уровня в межень такими же, как в естественных условиях, дают основание предположить, что намыв перекатов, происходящий обычно на подъеме половодья, должен ослабеть, а их размыв, наблюдающийся на спаде половодья и в межень, уменьшится в меньшей мере. Это должно привести к выравниванию отметок дна плёсов и перекатов. В зависимости от местных условий упомянутая тенденция может нарушаться на отдельных участках, в частности на участке зоны размыва, возникшей непосредственно у плотины и распространяющейся вниз по реке. Подробнее этот вопрос рассмотрен в описании ожидающихся русловых переформирований по морфологически однородным участкам.

5. Для обоснования вывода о вероятности появления на Волге на участке Волгоград — Астрахань тенденции перехода от многорукавного русла к однорукавному, кроме приведенных общих морфологических соображений, можно воспользоваться расчетом, основанным на гидроморфологических зависимостях. Подобные же зависимости позволяют приближенно оценить изменения в отметках дна плёсов и перекатов и изменения в затопляемости поймы. Эти расчеты выполнены для настоящего прогноза И. И. Якуниным. В основе расчетов лежат следующие положения.

а. Для оценки направленности руслового процесса, т. е. для суждения о том, по какому типу будет деформироваться русло,

можно использовать зависимости, предложенные Леопольдом и Вольманом. Эти авторы на основе массового материала установили наличие связи между типом русла, водностью реки и ее уклоном. Ими выделены две основные группы речных русел: однорукавные извилистые и многорукавные.

Аналитически кривая, разделяющая область распространения указанных типов русел в этих связях, выражается уравнением

$$I = 0{,}011Q^{-0{,}44},$$

где I — уклон водной поверхности (‰) при руслоформирующем расходе Q м³/сек. Руслоформирующим принят расход воды, соответствующий отметкам выхода воды на пойму.

По расчетам И. И. Якунина, оказывается, что в условиях зарегулированного режима точки, выражающие связь уклонов и расходов воды, отклоняются по сравнению с естественным режимом в область однорукавных русел.

б. Оценка вероятных значений глубин при зарегулированном режиме стока может быть сделана также на основе гидроморфологических зависимостей. Расчет ведется по формулам, предложенным Якуниным.

Средняя глубина на фарватере для практически бесприточных участков определялась по формуле

$$H' = a_1\left(\frac{Q}{B\sqrt{I}}\right)^{n_1}.$$

Вероятные значения глубин на плёсах и перекатах определялись по кривым обеспеченности Пирсона III типа. Параметры этой кривой вычислялись по формулам:

$$C_v = a_2\left(\frac{P}{H'}\sqrt{\frac{Dh_б}{I_п}}\right)^{n_2},$$

$$C_s = 4{,}75e^{0{,}05k}\left(C_v + 0{,}085k^{0{,}37} - 0{,}59\right),$$

где H' — средняя глубина реки на фарватере на практически бесприточных участках, м; Q — протекающий расход воды, м³/сек.; B — ширина реки при расчетном расходе, м; I — уклон водной поверхности при расчетном расходе, вычисляемый как отношение падения к длине реки по фарватеру; $I_п$ — уклон водной поверхности в половодье, вычисляемый как отношение падения реки к длине оси долины; C_v — коэффициент вариации глубин на фарватере расчетного участка; P — характеристика режима стока, вычисляемая как отношение среднего расхода за предшествующее половодье к среднему многолетнему расходу; D — средняя крупность донных отложений, м; $h_б$ — средняя высота поймы на расчетном участке, м; C_s — коэффициент

асимметрии распределения глубин на расчетном участке; k — водность реки в расчетный момент времени в процентах от средней многолетней.

Параметры a_1 и a_2 и показатели степени n_1 и n_2 вычисляются по формулам:

$$a_1 = 0{,}71 - 0{,}15 \lg\left(\frac{Q}{B\sqrt{I}}\right),$$

$$n_1 = 0{,}28 + 0{,}1 \lg\left(\frac{Q}{B\sqrt{I}}\right),$$

$$a_2 = 0{,}57 - 0{,}089k^{0{,}28},$$

$$n_2 = e^{0{,}0028k - 1{,}61}.$$

В табл. 23 помещено вероятное распределение глубин по фарватеру при зарегулированном режиме в многоводные и маловодные годы.

Из данных табл. 23 видно, что вероятные значения глубин на перекатах (обеспеченность 99,9%) в многоводные годы будут колебаться по длине реки в пределах 7,8—5,6 м, а в маловодные годы глубина, обеспеченная на 99,9%, может падать на отдельных участках до 2,9 м.

В условиях естественного стока глубины на лимитирующих перекатах доходили до 2,5 м. Это дает основание считать полученный результат расчета для условий зарегулированного режима правомерным. Как видно из данных табл. 23, глубины на плёсах (обеспеченность 1%) могут достигать в многоводные годы 31 м, а в маловодные — 16—24 м. В естественных условиях стока они достигали в отдельные годы 38 м и более. Таким образом, произведенный расчет показал, что при зарегулированном режиме стока в маловодные годы глубины на перекатах в отдельных случаях могут быть недостаточными для обеспечения нормального судоходства, в связи с чем сохранится необходимость производства дноуглубительных работ.

в. Для приближенной оценки возможной высоты подъема уровня воды над меженью в условиях регулирования стока можно использовать полученную Якуниным зависимость между высотой подъема уровня воды ($h_п$) при прохождении различных расходов воды и морфометрическими характеристиками русла. Общий вид этой зависимости выражается формулой

$$h_п = 0{,}4 \frac{\eta^{0{,}54} \chi^{\beta} D^{0{,}91}}{I_п \overline{B}^{n}}, \qquad (16)$$

где $h_п$ — средняя высота подъема воды на участке, м; η — водность участка реки, равная отношению протекающего расхода воды к среднему многолетнему; χ — относительная кривизна

Таблица 23

Вероятные значения глубин на фарватере р. Волги ниже Волжской ГЭС им. XXII съезда КПСС по морфологически однородным участкам при зарегулированном режиме стока в многоводные и маловодные годы

Границы участка	Характерный год	Расчетный расход, м³/сек.	Обеспеченность глубин, %												
			1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	99	99,9
Волгоград (ГЭС) — с. Светлый Яр	Многоводный	6434	25,3	18,3	16,0	14,5	13,4	12,4	11,5	10,6	9,7	8,8	8,1	7,1	6,5
	Маловодный	4310	17,2	12,3	11,9	10,9	10,1	9,5	8,7	8,0	7,2	6,3	5,5	4,2	2,9
с. Светлый Яр — с. Каменный Яр	Многоводный	6140	25,4	19,1	16,9	15,3	14,4	13,2	12,3	11,5	10,3	9,1	8,3	6,9	5,7
	Маловодный	4270	20,4	18,2	14,7	13,5	12,7	12,0	11,2	10,5	8,7	8,6	7,7	6,2	4,9
с. Каменный Яр — с. Никольское	Многоводный	5510	23,0	17,2	15,1	13,7	12,7	11,7	11,0	10,2	9,27	8,27	7,54	6,42	5,56
	Маловодный	4240	16,6	13,6	12,4	11,5	10,8	10,2	9,5	8,8	8,1	7,0	6,2	4,6	3,1
с. Никольское — с. Сероглазовка	Многоводный	5510	25,2	19,8	17,8	16,3	15,3	14,3	13,3	12,5	11,4	10,1	9,1	7,1	6,1
	Маловодный	4240	19,8	16,5	15,3	14,3	13,6	12,9	12,1	11,3	10,4	9,3	8,2	6,4	4,5
с. Сероглазовка — с. Верхне-Лебяжье	Многоводный	5300	31,0	25,0	22,8	20,9	20,0	18,6	17,6	16,3	15,0	13,3	12,0	9,7	7,4
	Маловодный	4160	24,4	20,8	19,3	18,0	17,2	16,4	15,6	14,7	13,4	12,0	10,7	8,3	5,7
с. Верхне-Лебяжье — г. Астрахань	Многоводный	4100	28,2	21,7	19,3	17,9	16,5	15,6	14,5	13,5	12,5	11,3	10,3	8,8	7,8
	Маловодный	2600	19,1	16,6	15,1	14,0	13,1	12,4	11,6	10,7	9,9	8,6	7,6	5,8	4,0
г. Астрахань — начало рукава Бахтемир	Многоводный	3250	23,0	19,0	17,3	16,3	15,3	14,6	13,6	12,9	11,9	10,7	9,7	8,1	6,3
	Маловодный	2550	19,1	16,5	15,3	14,4	13,8	13,1	12,4	11,8	10,8	9,8	8,7	6,9	5,0
Рукав Бахтемир от истока до пос. Ямный	Многоводный	1500	25,4	19,3	17,1	15,5	14,4	13,4	12,4	11,6	10,6	9,4	8,7	7,3	6,7
	Маловодный	1200	19,0	15,7	14,4	13,4	12,7	12,0	11,2	10,5	9,7	8,6	7,9	6,2	4,5

русла на участке, определяемая как отношение длины реки по руслу ($l_р$) к длине реки по оси долины ($l_о$); $\chi = \frac{l_р}{l_о}$, $I_п$ — средний уклон водной поверхности при расчетном расходе; $\overline{B}$ — относительная ширина русла; β и n — показатели степени, соответственно равные

$$\beta = 0{,}23\eta^{0{,}36},$$

$$n = 0{,}058\eta + 0{,}40.$$

Формула 16 позволяет оценить высоту подъема уровня воды только до отметок ее выхода на пойму. Поэтому расчет по ней дает лишь качественную характеристику затопляемости поймы, позволяя ответить на вопрос, выйдет ли вода на пойму или нет.

Из расчета следует, что в маловодные годы пойма на всех участках затопляться не будет, так как отметки высоты подъема уровня воды намного не достигнут отметок средней высоты поймы. В многоводные годы будут наблюдаться выходы воды на пойму на всем протяжении реки от Волгограда до Сероглазовки. Ниже Сероглазовки затопления в многоводный год будут крайне незначительными.

Пример 2. **Ожидаемый ход русловых переформирований на участке Волжская ГЭС им. XXII съезда КПСС — г. Красноармейск**

Оценка дальнейшего хода деформаций русла р. Волги на участке от створа ГЭС до г. Красноармейска представляет собой задачу локальных прогнозов, требует постановки лабораторных исследований на моделях отдельных узлов и производства гидравлических расчетов. Однако, основываясь на выявленных для рассматриваемого участка морфологических закономерностях и соображениях о связи типов руслового процесса с определяющими их факторами, можно высказать некоторые общие предположения о вероятном дальнейшем ходе русловых деформаций на участке.

На участке, несомненно, будут проводиться различные гидротехнические мероприятия по его реконструкции (берегоукрепительные работы, землечерпание и др.). Кроме того, размеры и характер деформаций русла р. Волги на приплотинном участке будут в значительной мере зависеть от режима работы сбросных сооружений ГЭС. Учесть все эти мероприятия в настоящее время не представляется возможным, поэтому приводимые ниже соображения исходят из оценки развития тех тенденций русловых переформирований, которые появились под влиянием основных, уже осуществленных крупных гидротехнических работ. Такая оценка должна помочь проектировщикам и строителям будущих сооружений на участке ориентироваться в основных тенденциях русловых переформирований (рис. 97).

а. Вследствие полного прекращения поступления к началу участка донных наносов, задерживаемых водохранилищем, происходившие в естественных условиях размывы русла не компенсируются и возникает зона размыва, которая будет распространяться вниз по реке.

По мере перемещения зоны размыва вниз по реке на участке русла выше нижней границы этой зоны должно наблюдаться состояние статического равновесия. Наносы, поступающие в поток из зоны размыва, должны выноситься им без образования зоны аккумуляции за нижней границей зоны

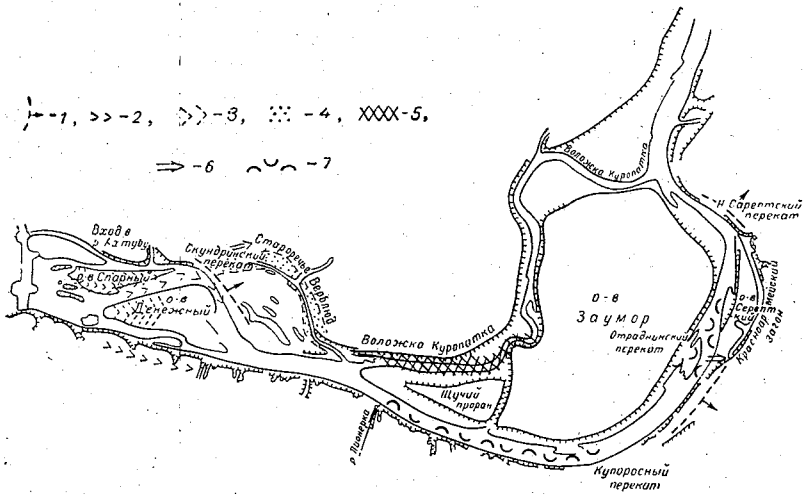


Рис. 97. Ожидающиеся тенденции переформирования русла р. Волги на участке ГЭС—Красноармейск.

1 — тенденция к смещению берегов русла в направлении, показанном стрелкой; *2* — тенденция к размыву дна русла; *3* — тенденция к смыву скоплений наносов; *4* — вероятность усиленной аккумуляции наносов в русле в результате увеличения их поступления; *5* — занесение вследствие снижения уровня и уменьшения скоростей течения; *6* — возможность прорывов и возобновление стариц; *7* — стабилизация скоплений наносов в русле (ослабление деформаций побочней и осередков).

размыва, так как объем этого поступления не будет бо́льшим, чем в естественных условиях, когда река справлялась с их транспортом. Однако возведение плотины ГЭС и производящиеся сбросы воды приводят к возникновению ниже плотины зоны повышенных скоростей и, следовательно, к усилению размывов. Это обусловливает образование ниже ямы приплотинного размыва участка временной аккумуляции наносов. Отложения наносов на этом участке будут происходить до достижения максимума поступления наносов из ямы размыва. В дальнейшем объем выносимых из этой ямы наносов должен прекратиться вследствие разработки русла и достижения потоком базального горизонта, и отложения на участке временной

аккумуляции начнут размываться. Именно таково происхождение участка аккумуляции в рукаве р. Волги, огибающем о. Денежный слева и, следовательно, в дальнейшем эти скопления наносов должны размываться.

Скорость смещения зоны размыва вниз по течению реки, если основываться на данных о скорости смещения русловых образований, можно оценить в 150—200 м/год. Так как в настоящее время тенденция к размыву русла ощущается примерно на участке от плотины ГЭС до оголовка о. Денежный протяжением 4,5 км, то появление тенденции однонаправленного размыва в низовой части рукава, огибающего о. Денежный слева, отстоящей на 5—9 км от оголовка этого острова, можно ожидать через 25—45 лет. Существенный же эффект размыва должен проявиться значительно позже, поскольку в этот рукав будут продолжать поступать наносы от размыва о. Спорный и оголовка о. Денежный, а также от размыва левого пойменного берега р. Волги на участке от южного входа в р. Ахтубу до нижней оконечности о. Денежный. Кроме того, не следует упускать из вида, что в настоящее время на описываемом участке скопились большие массы наносов, поступивших на него в период строительства ГЭС и в ходе разработки зоны размыва.

б. В результате сработки зоны временной аккумуляции наносов, нижняя граница которой проходит у низовой оконечности о. Денежный, ниже ее вследствие усиленного поступления наносов возможно временное ухудшение условий судоходства на перекатах. При последующем надвижении зоны размыва условия судоходства будут улучшаться. Однако рассчитывать на то, что в ближайшие 25—45 лет условия судоходства на Скундринском перекате, перекате о. Денежный (на выходе левого рукава Волги в главное русло) будут улучшаться, нельзя.

в. Сработка зоны намыва может привести к формированию временных аккумулятивных русловых образований типа побочней ниже о. Денежный у левого берега р. Волги. Так как на этом участке наблюдаются относительно повышенные скорости течения, то эти скопления будут довольно интенсивно сползать и могут существенно ухудшать условия входа в Волгоградский затон. При темпе их сползания около 300 м/год появление особенно больших скоплений наносов у входа в этот затон можно ожидать через 15—17 лет. Учитывая, что при осуществлении суточного регулирования в начале попусков уклоны в потоке будут резко возрастать, подвижность донных скоплений наносов может быть значительно большей и аккумуляция их на входе в затон может происходить в более короткие сроки.

По предположениям К. И. Россинского, разрушение о. Спорный должно привести к образованию у левого берега главного русла против о. Денежный сползающего побочня, который, до-

стигнув крутого поворота реки, либо распылится, либо причленится к пойме.

Решение вопроса о возможности причленения этого побочня к пойме требует дополнительных исследований. Все же, по-видимому, правомернее полагать, что продукты размыва о. Спорный в основном будут откладываться на побочне левого берега о. Денежный и маловероятно, чтобы они смогли удержаться у левого, сильно подмываемого берега русла.

Появление же временных скоплений наносов у входа в Волго-Ахтубинский канал вполне возможно.

г. Перемещение зоны размыва будет сопровождаться тенденцией к размыву левого пойменного берега главного русла р. Волги на участке от южного входа в р. Ахтубу до нижней оконечности о. Денежный. Эта тенденция будет наблюдаться еще длительное время. Поэтому необходимость крепления этого участка берега очевидна.

Выявленные на участке тенденции к заносу рукавов по мере увеличения их длины и кривизны и возобновления старых протоков дают основание предположить, что размыв левого берега на указанном выше участке против о. Денежный в дальнейшем все же прекратится и этот участок главного русла начнет заноситься.

Аналогом описанного выше процесса может служить занос некогда существовавшего на участке протока р. Волги в месте расположения староречья Верблюд, в низовой части которого расположен Волгоградский затон.

В настоящее время длина рукава р. Волги, огибающего о. Денежный слева (10 км), такая же, как староречья Верблюд, а кривизна несколько бóльшая (наибольшие радиусы кривизны соответственно составляют 0,4 и 0,8 км). Это дает основание предположить, что рукав, огибающий о. Денежный слева, находится в состоянии, близком к тому, при котором на участке начинается занесение подобных протоков. Однако следует учесть, что подобные рукава по достижении ими определенной длины и кривизны еще длительное время продолжают сползать вниз по течению. Не исключено, что сползание приостанавливается вследствие особенностей геологического строения дна долины.

Если принять это предположение, то можно считать, что о. Денежный прекратит свое сползание, заняв положение о. Крит, некогда огибаемого рукавом Верблюд. Тогда оказывается, что боковое перемещение рукава, огибающего о. Денежный слева, может составить около 4—4,5 км, а сползание о. Денежный — около 7 км. Даже если принять, что скорость смещения левого пойменного берега р. Волги будет такой, какой она наблюдалась при стеснении русла в период строительства, т. е. 70 м/год, то для перемещения этого берега влево на 4—4,5 км, если не учитывать крепления берегов, потребуется 60—70 лет.

При скорости смещения, наблюдавшейся в естественном состоянии (45 м/год), это смещение может произойти в течение 100 лет.

Так как одновременно с боковым перемещением о. Денежный будет сползать вниз по течению со скоростью порядка 200 м/год (см. выше), то левый проток, огибающий этот остров, займет положение староречья Верблюд примерно через 60—70 лет.

В ходе указанных преобразований русла возможны отклонения, связанные с режимом сбросов, обусловливаемых водностью года.

д. Следует обратить внимание на то обстоятельство, что в ходе плановых переформирований рукава Волги, огибающего о. Денежный слева, возможен промыв перешейка, отделяющего р. Волгу от верховой оконечности староречья Верблюд. В этом случае правомерно ожидать быстрой разработки этого староречья и ухода в него значительной части стока р. Волги. Это может привести к существенному изменению условий перемещения масс наносов и в левом и в правом рукавах у о. Денежный. Возможность этого промыва следует учитывать и потому, что возобновление протока Верблюд вызовет коренное изменение условий эксплуатации этого староречья в качестве затона. Как указывалось, в настоящее время здесь расположен Волгоградский затон, имеющий большое значения для обеспечения нормального судоходства на всей Нижней Волге.

е. Деформация Денежной воложки будет определяться рядом факторов: режимом работ сбросных сооружений, ходом переформирований главного русла (рукавов), огибающего о. Денежный слева, возможностью возобновления староречья Верблюд.

В отношении влияния режима работ сбросных сооружений ГЭС пока нужно только отметить, что при больших сбросах поток будет направляться преимущественно вдоль левого берега и Денежная воложка окажется в условиях, благоприятных для ее занесения. О влиянии на деформации русла Денежной воложки переформирований в главном русле можно высказать следующие соображения.

В Денежной воложке имеются аккумулятивные образования в виде осередка в начале протока и крупных сползающих побочней в срединной части.

Так как указанные выше образования довольно быстро перемещаются по руслу (рис. 98), то пока явных признаков того, что Денежная воложка начала интенсивно заноситься, нет. Однако при дальнейшей разработке левого рукава р. Волги, по которому в настоящее время проходит основная часть стока, не исключено, что переуглубление русла этого рукава при передвижении зоны размыва может вызвать падение глубин в Де-

нежной воложке и ее занесение. Этому же будет способствовать не только углубление левого рукава, но и его плановое смещение в сторону левого берега. Особенно благоприятные условия для занесения Денежной воложки создадутся в случае, если при плановых деформациях русла перешеек, отделяющий р. Волгу от вершины староречья Верблюд, будет промыт и поток устремится в это староречье. Это еще раз указывает на важность крепления левого берега р. Волги на участке от южного входа в р. Ахтубу до оконечности о. Денежный.

Как указывалось, рукав р. Волги, огибающий о. Денежный слева, в дальнейшем должен заноситься. Занос его будет способствовать разработке Денежной воложки. Таким образом, ее занесение будет носить временный характер. Однако процесс

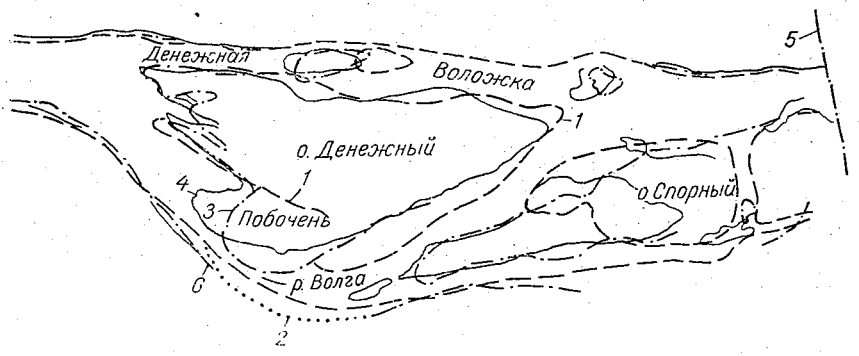


Рис. 98. Схема деформаций русла на приплотинном участке за период 1952—1960 гг. (по К. И. Россинскому).

1 — 1952 г., *2* — 1955 г., *3* — 1960 г., *4* — 1958 г., *5* — ось плотины, *6* — участок крепления берега.

этот, как упоминалось, будет очень длительным и считаться с возможностью занесения Денежной воложки необходимо.

ж. Режим перекатов, расположенных ниже о. Денежный в правом рукаве р. Волги, огибающем о. Сарпинский, должен быть, по-видимому, следующим:

1) вследствие снижения высот половодий деформации побочней, образующих эти перекаты, будут более медленными;

2) влияние суточного регулирования не должно внести существенных изменений в условия судоходства на перекатах. Суточные попуски должны слабо влиять на общие деформации плёсов и перекатов, которые определяются особенностями внутригодового распределения стока.

Глубины на перекатах при суточном регулировании, в период суточного провала расхода воды, как, в частности, показывают исследования неустановившегося движения, выполненные ГГИ на реках Тверце и Свири, должны быть бóльшими,

чем при тех же расходах в естественных условиях, так как эти расходы проходят при уровнях, существенно более высоких, чем при тех же расходах, но проходящих при установившемся режиме. Лишь при увеличении расходов воды они проходят при уровнях, несколько пониженных по сравнению с установившимся режимом.

Формирование крупных скоплений наносов в начале Куропаткинской воложки, огибающей о. Сарпинский слева, должно усилиться вследствие снижения уровня воды при регулировании стока и будут развиваться тенденции к заносу этой воложки по мере уменьшения доли расхода, поступающего в Куропаткинскую воложку (в настоящее время ее сток составляет 25% от расхода Волги). Перекаты в главном русле (Купоросный, Бекетовский, Отрадненский) должны стабилизировать свое положение вследствие замедления сползания побочней.

Так как сползание побочней будет происходить замедленно (из-за снижения уровня), возможно усиление местных плановых деформаций русла на коротких участках. В частности, такое явление возможно на участке берега, прилегающем к вершине правобережного побочня Отрадненского переката. Это будет усиливать угрозу сохранности береговых сооружений предприятий г. Красноармейска. При продвижении бровки правого берега возможен также прорыв перешейка, отделяющего Красноармейский затон.

ЛИТЕРАТУРА

Алтунин С. Т., Базунов И. А. Защитные сооружения на реках. Сельхозгиз, Л., 1953.

Алтунин С. Т. Русловые процессы, защита берегов от размыва, борьба с наводнениями и наносами. Материалы по производительным силам Узбекистана, вып. II. Земельноводные ресурсы низовьев р. Аму-Дарьи. Изд. АН УзбССР, Ташкент, 1960.

Аполлов Б. А. Учение о реках. Изд. МГУ, М., 1951.

Афанасьева Е. А. Почвы нижней части долины р. Мологи и прилегающих частей Молого-Шекснинской низины. Тр. Почвенного ин-та им. В. В. Докучаева, т. 15, 1937.

Башкиров Г. С. Берегоукрепляющие лесонасаждения. Речиздат, М., 1956.

Белинский И. А. и Калинин Г. П. Об использовании закономерностей формирования речных русел при строительстве каналов. Метеорология и гидрология, № 4, 1951.

Берг Л. С. Географические зоны Советского Союза. Географгиз, М., 1947.

Боровиков Л. И., Кипиани М. Г., Колбутов А. Д. Четвертичные отложения и история развития рельефа северного Прикаспия и Казахского Прииртышья. Сб. Основные идеи Н. Г. Кассина в геологии Казахстана. Изд. АН КазССР, Алма-Ата, 1960.

Бронзов А. Я. Типы лугов р. Мологи. Тр. Гос. лугового ин-та, т. 1, М., 1927.

Великанов М. А. Движение наносов. Изд. МРФ СССР, М., 1948.

Великанов М. А. Крупномасштабная турбулентность и структура руслового процесса. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 1, 1957.

Вильямс В. Р. Почвоведение. Избр. соч., вып. 3. Сельхозгиз, М., 1949.

Вирский А. А. Ход развития эрозионного рельефа равнин. Геогр. сб. 1. Геоморфология и палеогеография. Изд. АН СССР, 1952.

Волин А. В. Твердый сток и скорость эрозии. Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., № 5, 1946.

Гвин В. Я. Применение морфометрии при структурных исследованиях Верхнего и Среднего Поволжья и Прикамья. Вопросы географии, № 63. Количественные методы в геоморфологии. Географгиз, 1963.

Геренчук К. И. Тектонические закономерности в орографии и речной сети Русской равнины. Изд. Львовского ун-та, 1960.

Горелов С. К. Методы количественной оценки новейших и современных тектонических движений юго-востока Русской платформы. Вопросы географии, № 63, Количественные методы в геоморфологии. Географгиз, 1963.

Горецкий Г. И. Из наблюдений над молодыми террасами среднего течения р. Чусовой. Тр. Ин-та географии АН СССР, вып. XXXIX, 1948.

Грабовская О. А. Почвы нижнего течения долины р. Шексны. Тр. Почвенного ин-та им. В. В. Докучаева, т. 16, 1940.

Григорьев А. А. О путях развития геоморфологии в СССР. Тр. Ин-та географии АН СССР, вып. XXXIX, 1948.
Гришанин К. В. Квазипериодические эффекты в турбулентном движении жидкостей. Автореферат докторской дисс. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, Л., 1962.
Докучаев В. В. Способы образования речных долин Европейской России. Избр. соч. т. I. Изд. АН СССР, М.—Л., 1949.
Еленевский Р. А. Вопросы изучения и освоения пойм. Изд. ВАСХНИЛ, М., 1936.
Занин Г. В. Эрозионные формы рельефа, создаваемые временными водотоками, и принципы их мелиорации. Изв. АН СССР, сер. геогр., № 6, 1952.
Золотарев Г. С. Инженерно-геологическое изучение береговых склонов водохранилищ и оценка их переработки. Тр. лабор. гидрогеол. проблем, АН СССР, т. XII. Изд. АН СССР, 1955.
Знаменская Н. С. Грядовое движение наносов. Гидрометеоиздат, Л., 1968.
Караушев А. В. Проблемы динамики естественных водных потоков. Гидрометеоиздат, Л., 1960.
Козменко А. С. Основы противоэрозионной мелиорации. Сельхозгиз, Л., 1954.
Кокешко И. Г. и Колбутов А. Д. Основные этапы истории развития долин современных рек и условия формирования берегов на водохранилищах. Тр. Гидропроекта. Сб. 4, М., 1960.
Кондратьев Н. Е. О дискретности русловых процессов. Сб. «Проблема русловых процессов». Гидрометеоиздат. Л., 1953.
Кондратьев Н. Е. Расчеты береговых переформирований на водохранилищах. Гидрометеоиздат, Л., 1960.
Кондратьев Н. Е. Гидроморфологические процессы и методы их изучения. Автореферат. Изд. ГГО, Л., 1968.
Кудрицкий Д. М., Попов И. В., Романова Е. А. Основы гидрографического дешифрирования. Гидрометеоиздат, Л., 1956.
Кузьмин И. А. и Россинский К. И. Некоторые вопросы прикладной теории формирования речных русел. Сб. «Проблемы регулирования речного стока», вып. 1, АН СССР, 1947.
Ламакин В. В. Динамические фазы речных долин и аллювиальных отложений. Землеведение, нов. сер., т. II, 1948.
Лелявский Н. С. О речных течениях и формировании речного русла. В сб. «Вопросы гидротехники свободных рек». Изд. МРФ СССР, М., 1948.
Левин С. И. Предупреждение аварий и ремонт подводных трубопроводов. Госстройтехиздат, 1963.
Лидов В. П. (и др.). Классификация современных линейных форм эрозии. Изв. АН СССР, сер. геогр., № 3, 1954.
Личков Б. Л. Некоторые черты и характеристика геоморфологии южного Полесья. Изв. Геолкома т. XLVII, № 9—10, 1928.
Лохтин В. М. О механизме речного русла. Спб., 1897.
Ляпин А. Н. О некоторых особенностях вторичных движений, сопровождающих основные течения реальной жидкости. Тр. ГГИ, вып. 44(98), 1954.
Макеев П. С. К вопросу об образовании речных аккумулятивных террас. Изв. Всесоюз. геогр. о-ва, т. 73, № 2, 1941.
Маккавеев В. М. К динамике твердого и жидкого стока свободных потоков при прямолинейном и извилистом русле. Тр. по гидрологии. Изд. ГЭНИИ, Л., 1938.
Маккавеев В. М. Вопросы теории речного потока и проблемы турбулентности. Сб. трудов ЛОНИТОВТ «Вопросы гидравлики и гидротехнического строительства», 1952.
Маккавеев В. М. и Коновалов И. М. Гидравлика Речиздат. Л.—М., 1940.

Маккавеев Н. И. Особенности формирования русла в низовьях равнинных рек. Проблемы физ. геогр., т. XVI, 1951.
Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. Изд. АН СССР, 1955.
Маккавеев Н. И., Хмелева Н. В., Заитов И. Р., Лебедева Н. В. Экспериментальная геоморфология. Изд. МГУ, 1961.
Мирошниченко В. П. Аэрогеосъемка. Госгеолиздат, М.—Л., 1946.
Мирчинк Г. Ф. Волга выше Мологи. Тр. комиссии по изучению четвертичного периода АН СССР, вып. 2, 1935.
Морозов И. Р. Ивы СССР. Их использование и применение в защитном лесоразведении. М., 1950.
Наставление по рекогносцировочным гидрографическим исследованиям рек, Гидрометеоиздат, Л., 1949.
Наумов С. В. О классификации форм эрозионных образований. Почвоведение, № 9, 1956.
Никитин С. Н. Долина р. Суры выше и ниже г. Пензы, ее вековые и современные изменения. Изв. Геол. комиссии, т. 19, № 25, 1900.
Павлов А. П. О рельефе равнин и его происхождении под влиянием работы подземных и поверхностных вод. Землеведение, кн. 3—4, 1898.
Пиньковский С. И. Типы речных русел Средней и Южной Сибири. Тр. ГГИ, вып. 94, 1962.
Поляков Б. В. Гидрологические исследования Нижней Волги. Гидрометеоиздат, М.—Л., 1951.
Попов И. В. Изменение морфометрических характеристик во времени как показатель направленности русловых процессов на меандрирующих реках. Тр. ГГИ, вып. 44(98), 1954.
Попов И. В. Жизнь речного русла. Гидрометеоиздат, Л., 1955.
Попов И. В. Процесс меандрирования речных излучин и его изучение с помощью аэрофотосъемки. Тр. ГГИ, вып. 49(103), 1955.
Попов И. В. О формах перемещения речных излучин. Тр. ГГИ, вып. 56(110), 1956.
Попов И. В. Русловой процесс как внешнее проявление твердого стока. Тр. III Всесоюз. гидрол. съезда, т. V. Гидрометеоиздат, Л., 1960.
Попов И. В. Аэрофотосъемка и изучение вод суши. Гидрометеоиздат, Л., 1960.
Попов И. В. Методические основы исследований руслового процесса. Гидрометеоиздат, Л., 1961.
Попов И. В. Баланс наносов речного участка и его использование для оценки руслового процесса. Тр. ГГИ, вып. 94, 1962.
Попов И. В. Русловые переформирования р. Волги на участке Волгоград — Астрахань. Тр. ГГИ, вып. 108, 1963.
Попов И. В. Количественные измерители типов руслового процесса. Тр. ГГИ, вып. 116, 1964.
Практическое пособие для производства изыскательских работ на речном транспорте. Изыскания на судоходных реках в свободном состоянии.
Рекомендации по отчету русловых деформаций при проектировании переходов магистральных трубопроводов через равнинные реки с естественным режимом. ГГИ и ВНИИСТ. Изд. ОНТИ ВНИИСТ'а. М., 1967. Изд. МРФ СССР, М.—Л., 1952.
Ржаницын Н. А. Закономерности строения речной сети. Гидрометеоиздат, Л., 1960.
Рождественский А. П. Типы меандрирования речных русел и связь их с проявлением новейших тектонических движений (на примере рек Южного Урала). Землеведение, нов. сер., т. VI (XLVI). Изд. МГУ, 1963.
Розовский И. Л. Движение воды на повороте открытого русла. Изд. АН УССР, Киев, 1957.
Ромашин В. В., Россинский К. И., Рогов М. М., Штейнбах Б. В. Гидрология устьевой области Западной Двины. Гидрометеоиздат, М., 1964. Деформации русла Волги в нижнем бьефе Волгоградского гидроузла. Гидротехническое строительство, № 10, 1964.

Ромашин В. В. Типы руслового процесса в связи с определяющими их факторами. Труды ГГИ, вып. 155, 1968.
Русловой процесс. Под ред. Кондратьева Н. Е. Гидрометеоиздат, Л., 1959.
Рудский М. П. Опыт исследования главнейших явлений, наблюдаемых у рек. Сб. «Вопросы речного быта», Спб., 1905.
Рыбкин С. И. Морфометрическая классификация рек. Метеорология и гидрология, № 4, 1947.
Рыбкин С. И. К вопросу о закономерностях движения воды в реках и каналах. Инж. сборник, т. XII. Изд. Ин-та механики АН СССР, 1952.
Сакс В. Н. Развитие рельефа и гидрографической сети Советской Арктики в четвертичный период. Тр. Всесоюз. геогр. съезда, т. II. Географгиз, 1948.
Сахарова Е. И. Геоморфологические исследования при изучении русловых процессов по Северной Двине. Сб. «Методы геогр. иссл.» Географгиз, М., 1960.
Соболев С. С. Развитие эрозионных процессов на территории Европейской части СССР и борьба с ними. Изд. АН СССР, 1948.
Сус Н. И. Эрозия почвы и борьба с нею. Сельхозгиз, 1949.
Трегубов Г. А. Боковая эрозия русла Амура и Зеи. Амурский сборник, № 1. Изд. Сиб. отд. АН СССР, Хабаровск, 1959.
Федоров В. В. Гидрология и водные изыскания. Речной транспорт, Л., 1960.
Чалов Р. С. Количественные методы в изучении флювиальных форм и процессов. Вопросы географии, № 63. Количественные методы в геоморфологии. Географгиз, 1963.
Шамов Г. И. Заиление водохранилищ. Гидрометеоиздат, Л., 1939.
Шамов Г. И. Речные наносы. Гидрометеоиздат, Л., 1954.
Шамов Г. И. Сток наносов рек СССР. Гидрометеоиздат, Л., 1956.
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, вып. 135, геол. сер. (№ 55), 1951.
Шенников А. П. Луговая растительность СССР. Растительность СССР, т. I. Изд. АН СССР, 1938.
Шнитников А. В. Изменчивость общей увлажненности материков Северного полушария. Зап. Всесоюз. геогр. о-ва, т. XVI, 1957.
Штегман Б. К. К истории формирования долины р. Или. Геогр. сб. 1. Геоморфология и палеогеография. Изд. АН СССР, М.—Л., 1952.
Шукин И. С. Общая морфология суши, т. I. ОНТИ, 1934.
Яковлев С. А. Наносы и рельеф г. Ленинграда и его окрестностей. Изв. Научно-мелиоративного ин-та, № 8—9, Л., 1925.
De Geer S. Klarälfvens serpentinlopss och flodplan. Stockholm, 1912.
Dury G. H. Contribution to a general theory of mean de ring valleys. Amer. Journal of Science, vol. 252, April 1954.
Dury G. H. Misfit streams: Problem in interpretation, discharge and distribution. Geographical Review, 1960, v. 50, No. 2.
Fargue L. La forme du lit des rivières à fond mobile. Paris, 1908.
Garbrecht G. Wasserabfluss in gekrümmten Gerinnen. Die Wasserwirtschaft. N 2, 1953.
Henin. La conservation du sol. Bull. techn. inform. des Ing. Serv. Agricoles, n° 50—51, 1950.
Kresser W. Gedanken zur Geschiebe und Schwebstoffführung der Gewasser. Osterreichische Wasserwirtschaft Yg. 16 H ½. 1964.
Leopold L. B., Volmann M. G. River channel patterns: braided, meandering and straight. U. S. Geological Survey Professional Paper, 1957, No. 282-B.

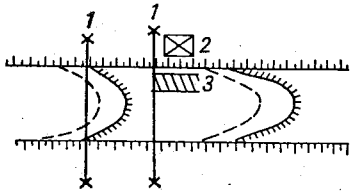
РАЗМЕЩЕНИЕ И ЗАЩИТА СООРУЖЕНИЙ ПРИ РАЗНЫХ ТИПАХ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

Немеандрирующее русло с ленточными грядами

Определяющий фактор: сползание гряд.

Рекомендации по размещению: *1* — переходы в любых местах, *2* — водозаборы также.

Рекомендации по защите: периодические расчистки.

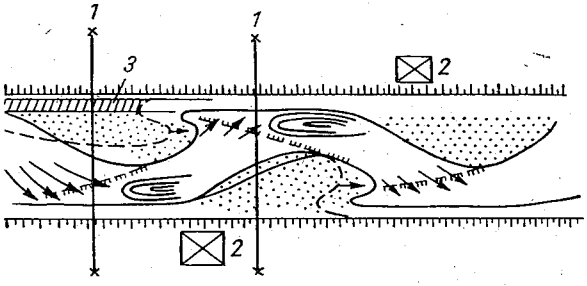


Побочневый тип процесса

Определяющий фактор: наползание побочней.

Рекомендации по размещению: *1* — переходы — в любом месте, опоры — за бровками берегов, *2* — водозаборы — в низовых концах плёсовых лощин.

Рекомендации по защите: отторжение выше лежащего побочня.

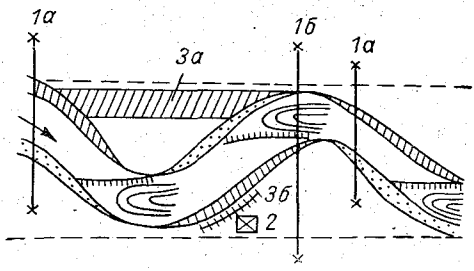


Ограниченное меандрирование

Определяющий фактор: размыв берега в ходе сползания излучин.

Рекомендации по размещению: *1* — переходы: *а* — при медленном сползании опоры за бровками берегов, вне пределов ожидаемого размыва, *б* — при быстром сползании, за пределами пояса меандрирования, *2* — водозаборы — в низовых концах плёсов.

Рекомендации по защите: *3а* — при медленном сползании — крепление берега на участке сооружения, *3б* — при быстром сползании — отторжение побочня на противоположном берегу.

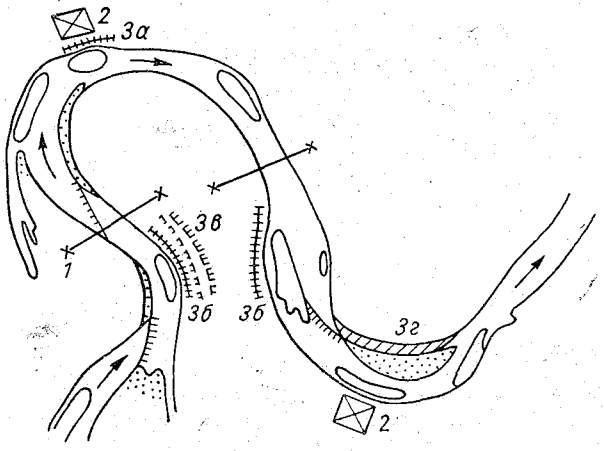


Свободное меандрирование

Определяющий фактор: стадия развития излучин.

Рекомендации по размещению: *1* — переходы в точках перегиба, *2* — водозаборы в хорошо развитых излучинах, на слабо деформируемых плесах.

Рекомендации по защите: *3а* — крепление берега у водозабора, *3б* — предотвращение отмирания петли креплением берегов перешейка, *3в* — при сильно затопляемых поймах возведение поперечных дамб на перешейке, *3г* — при вынужденном расположении — отторжение пляжа противоположного берега.

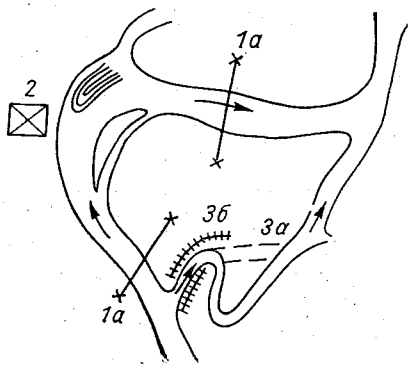


Незавершенное меандрирование

Определяющий фактор: стадия развития спрямлений.

Рекомендации по размещению: *1* — переходы, *а* — в отмирающих руслах — в точках их перегиба, *б* — в спрямлениях — в зависимости от типа развивающегося в них руслового процесса, *2* — водозаборы — размещение в плёсе отмирающего рукава по рекомендациям для свободного меандрирования.

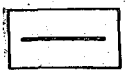
Рекомендации по защите: *3* — стимулирование развития спрямлений (*а*) с последующей его задержкой (*б*).



ПРИЛОЖЕНИЕ II

ЛЕГЕНДА К КАРТЕ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

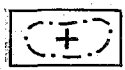
А. Пойма и берега



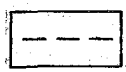
Общая граница поймы



Граница среднего разлива



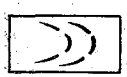
Граница незатопляемых участков на пойме



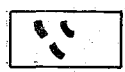
Граница угодий или участков с редкой растительностью



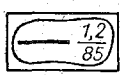
Хорошо выраженный грядовый рельеф на пойме. Ориентировка соблюдается, соответствующая натуре (если нет аэрофотоснимков). Числитель — средняя высота гребня над дном ложбины, знаменатель — среднее расстояние между вершинами гребней.



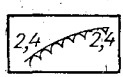
То же, но плохо выраженный



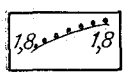
Мелкие промойки (рытвины) на пойме



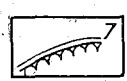
Крупные размывы при изображении в масштабе плана. Числитель — средняя глубина, м; знаменатель — площадь, м²



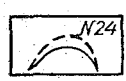
Подмываемые участки берега, его высота



Намываемые участки берега, его высота



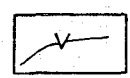
Подмываемые участки склонов долины, их высота



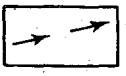
Новое положение бровки подмываемого берега, порядковый номер участка размыва



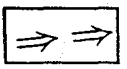
Новое положение бровки намываемого берега, порядковый номер участка намыва



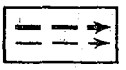
Места прорывов береговых валов



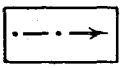
Направление течений в начале подъема уровня



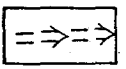
То же, в конце подъема



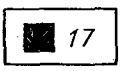
Пик (начало спада)



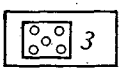
Середина спада



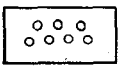
Конец спада



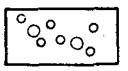
Местоположение шурфов, их номер



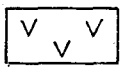
Площадки для наблюдений за наилком, их порядковый номер



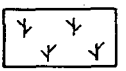
Кустарник



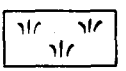
Лес



Осоки



Хвощи



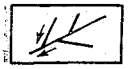
Тростник



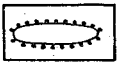
Заболоченные участки



Свежие отложения на пойме и порядковый номер скопления



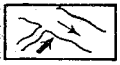
Мелиоративная сеть и направление течения в ней



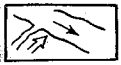
Обвалования (искусственные)



Места интенсивного выноса наносов из оврагов и другой временной сети

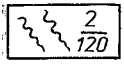


Притоки, выносящие большое количество наносов

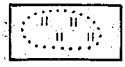


Притоки с мутностью меньшей, чем главной реки

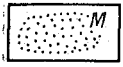
Б. Русло



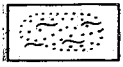
Участки русла с хорошо выраженным грядовым движением наносов, Числитель — средняя высота, знаменатель — длина гряд



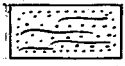
Появление травяной растительности на поверхности скоплений наносов в русле



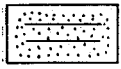
Песок (мелкий — м, средний — ср, крупный — кр)



Иловатые пески



Слоистые пески



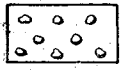
Пески с глинистыми прослойками



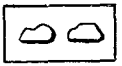
Выходы скальных пород



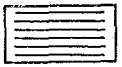
Гравий



Галька



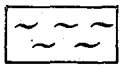
Валуны



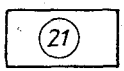
Глина



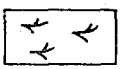
Суглинки



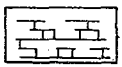
Илы



Порядковый номер скоплений наносов в русле



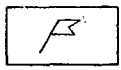
Топляки в русле



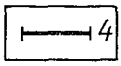
Плитняк



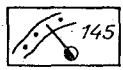
Граница морфологически однородных участков



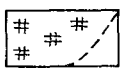
Гидростворы



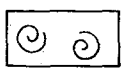
Местоположение поперечных профилей речной долины



Километраж по средней линии русла и пикеты (через 100 м)



Участок выхода на поверхность воды придонных водоворотов и границы этих участков



Область воронок на поверхности воды



Область остановившихся волн; числом показана длина волны, см

SUMMARY

When considering river-bed deformations as a discrete process, it is possible to classify them taking into account the most widespread morphological formations in river-beds and flood-plains.

Morphometric characteristics of river-bed morphological formations may be expressed quantitatively. The study of the correlation of these characteristics (morphometric dependences) and factors of river-bed formation (hydromorphological dependences) made it possible to estimate some regularities of river-bed formation.

Methods of design and forecast of river-bed deformation may be elaborated on a pure morphological basis. In particular, methods of evaluation of transformation of river-bed depth and meander horizontal deformations are elaborated.

Classification of river-bed process is the basis of classification of flood-plains, which are the result of horizontal deformations of river-beds. Each type of river-bed process corresponds to a definite type of flood-plains, characterized by specific features of flood-plain relief, peculiarities of stratification of the alluvium, mode of submersion, currents on the submerged flood-plain. Types of flood-plains are more varied than types of river-bed processes because the former are influenced not only by main factors of river-bed formation, but also by other natural factors (deluvial deposits, formation of swamps, thermokarst, etc). Inherited flood-plains make up a specific type; they are formed by river-bed process, previous to the contemporary one.

The complex of methods for studying field and cartographical materials is called hydromorphological analysis. In many cases this analysis provides forecasting of river-bed and flood-plain deformations on the basis of cartographical material without field surveys.

The hydromorphological analysis can be used for different kinds of engineering and hydraulic design on rivers and serves to elaborate recommendations to forecast river-bed process. Recommendations for the design of river-bed crossings and water intakes, as well as forecast of river-bed process on river stretches of many hundred kilometres are given in this book.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Введение 6
1. Особенности современных требований к оценке русловых и пойменных переформирований при проектировании гидротехнических сооружений . . . . . —
2. Размеры деформаций речных русел и пойм 18
3. Общие замечания о развитии и состоянии теории руслового процесса 31

Часть I

ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

Глава I. **Русловой процесс и определяющие его факторы** 50
1. Дискретность руслового процесса . . . . . —
2. Русловой процесс — транспорт наносов 51

Глава II. **Общая схема типизации русловых форм** 71
1. Основные формы руслового процесса 73
2. Выводы 84

Глава III. **Ленточногрядовый и побочневый типы руслового процесса** 86
1. Ленточногрядовый тип руслового процесса 89
2. Побочневый тип руслового процесса 91

Глава IV. **Ограниченное меандрирование** 96

Глава V. **Свободное и незавершенное меандрирование** 100
1. Свободное меандрирование . . . . . —
2. Незавершенное меандрирование 112

Глава VI. **Осередковый тип руслового процесса** 119

Глава VII. **Измерители для различных типов руслового процесса и основные морфометрические и гидроморфологические зависимости** 125
1. Общие замечания об измерителях руслового процесса . . . —
2. Ленточногрядовый тип руслового процесса 127
3. Побочневый тип 134
4. Ограниченное меандрирование 138

5. Свободное меандрирование 141
6. Незавершенное меандрирование 156
7. Осередковый тип 158

Глава VIII. **Соотношения элементов баланса наносов при разных типах руслового процесса** 158

Глава IX. **Речные поймы** 164
1. Общие закономерности формирования пойм . . . . . —
2. Формирование русловой фации аллювия 166
3. Образование вееров перемещения русла, их свойства 170
4. Формирование пойменной фации аллювия 177
5. Факторы, нарушающие строение толщ пойменного аллювия и закономерности строения рельефа пойм 181
6. Связь современного аллювия с факторами, определяющими его накопление 185
7. Типизация речных пойм 189
8. О типах островов 214

Глава X. **Морфологически однородные участки** 219
1. Принципы выделения участков . . . . . —
2. Возможные местные различия руслового процесса в пределах морфологически однородных участков 220
3. Примеры выделения морфологически однородных участков . . 226

Глава XI. **Связь современного руслового процесса с вековым ходом развития речных систем** 240
1. Влияние тектонических движений 242
2. Вековые изменения основных факторов руслообразования — стока воды и наносов 246
3. Общие замечания о развитии руслового процесса 247

Часть II

ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Глава XII. **Основные приемы гидролого-морфологического анализа** 250
1. Основные этапы работ и их назначение . . . . . —
2. Анализ руслового процесса по уже имеющимся материалам . 252

Глава XIII. **Морфологические приемы расчета основных характеристик русла** 277
1. Расчет предельных глубин размыва и намыва русла при ленточногрядовом и побочневом типах руслового процесса и при ограниченном меандрировании 278
2. Расчет плановых деформаций излучин 280
3. Расчет предельных глубин размыва в свободно меандрирующих излучинах 282

Глава XIV. **Полевые русловые исследования** 282
1. Общие положения . . . . . —
2. Морфологическая съемка 283
3. Специальные наблюдения на пойме 299

Глава XV. **Стационарные исследования крупных русловых форм** . 301
1. Подготовительные работы 302
2. Систематические наблюдения на крупных формах . . . . . —
3. Основные отчетные документы по изучению крупных русловых форм 303
4. Изучение песчаных гряд 304

Попов Игорь Владимирович

ДЕФОРМАЦИИ РЕЧНЫХ РУСЕЛ
И ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Редактор *З. М. Кожина*
Переплет художника *И. И. Сысалова*
Худож. редактор *Ю. Н. Васильев*
Техн. редактор *Г. С. Орлова*
Корректоры: *М. А. Гальперина* и *Т. Н. Черненко*

Сдано в набор 6/V 1969 г. Подписано к печати 6/VIII 1969 г.
Бумага тип. № 1 60×90¹/₁₆. Бум. л. 11,375+5 вкл. Печ. л. 22,75.
Уч.-изд. л. 23. М-15715. Индекс ГЛ-230. Заказ № 358.
Тираж 2000 экз. Цена 1 руб. 71 коп.
Гидрометеорологическое издательство.
Ленинград, В-53, 2-линия, 23

Ленинградская типография № 8 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР
Ленинград, Прачечный пер., д. 6.

Часть III

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СООРУЖЕНИЙ НА РЕКАХ

Глава XVI. **Применение гидролого-морфологического анализа при проектировании переходов линий высоковольтных передач (ЛЭП) через реки** 305

1. Подбор исходных материалов для гидролого-морфологического анализа 306
2. Анализ исходных материалов 307
3. Составление программы полевых работ и их проведение . . . 310

Глава XVII. **Переходы через реки трубопроводов** 317

Глава XVIII. **Водозаборные сооружения** 319

Глава XIX. **Гидролого-морфологический анализ при проектировании и эксплуатации крупных гидроузлов** 328

1. Основная задача анализа . . . . . —
2. Производство полевых работ на зарегулированных участках рек 332

Литература 349

Приложения 353

Summary 360