

**И. В. Попов**

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ГИДРОМОРФОЛОГИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ  
РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА**

**Избранные труды**



Нестор-История  
Санкт-Петербург  
2012

УДК 556.537  
ББК 26.3  
П58

Редакционная коллегия:  
*д. техн. наук А. Б. Клавен; канд. техн. наук З. Д. Копалиани*

П58 **Попов И.В.**

Методологические основы гидроморфологической теории руслового процесса : Избранные труды. — СПб. : Нестор-История, 2012. — 304 с.

ISBN 978-5-98187-969-2

В книге представлены избранные научные труды одного из крупнейших ученых Государственного гидрологического института доктора географических наук Игоря Владимировича Попова. Девять представленных статей охватывают почти полувековой период научной деятельности автора и отражают основные ее направления. В первую очередь это вопросы методологии исследования, приемы и методы наиболее эффективно и адекватно отражающие развитие русловых деформаций, вычленение типового набора морфометрических характеристик для разных русел и типизация пойм, связанная с типами русел, и практическое использование постулатов этой теории для прогноза русловых деформаций. Представленные в сборнике статьи представляют автора как крупного ученого XX века в области естественных наук.

Издание книги приурочено к 100-летию со дня рождения И. В. Попова.

Книга рассчитана на гидрологов, океанологов, геоморфологов, русловиков, гидротехников, путейцев-речников, она может быть полезной студентам, аспирантам, преподавателям географических факультетов университетов, гидрометеорологических, гидромелиоративных, сельскохозяйственных, воднотранспортных, строительных, геологических ВУЗов.

**УДК 556.537**  
**ББК 26.3**

ISBN 978-5-98187-969-2



9 785981 879692

© Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Государственный гидрологический институт», 2012

## ПРЕДИСЛОВИЕ

9 апреля 2012 года исполняется 100 лет со дня рождения выдающегося ученого-гидролога, доктора географических наук, профессора Игоря Владимировича Попова, одного из создателей, наряду с профессором Н.Е. Кондратьевым, основ гидролого-морфологической теории руслового процесса и научной школы гидрологов-русловиков ГГИ.

Настоящий сборник содержит избранные статьи И.В. Попова, посвященные различным аспектам теории руслового процесса, напечатанные в основном в трудах ГГИ в 1949-1983 годах. Научное наследие Игоря Владимировича существенно шире тематики, охваченной в этих статьях. Оно включает большое число научных работ, опубликованных в различных печатных изданиях, не вошедших в Сборник в силу ограниченности его формата, а также 14 монографий, написанных в соавторстве или единолично, и 8 нормативных документов, посвященных практическим аспектам теории руслового процесса, в которых широко используются типизация руслового процесса и методы оценки русловых деформаций, разработанные Игорем Владимировичем.

В водной статье "Слово о профессоре Игоре Владимировиче Попове" повествуется о жизненном пути ученого, его родителях и родственниках, учебе в Ленинградском университете, политических репрессиях, затронувших его семью, военных годах и славном творческом подвиге этого замечательного гражданина своего Отечества, русского интеллигента, крупнейшего учёного и педагога, оставившего неординарное научное наследие и неизгладимый след в гидрологической науке.

Статьи, отобранные для публикации в настоящем сборнике, расположены в хронологическом порядке и фрагментарно отражают наиболее существенные вехи творческой биографии И.В. Попова, нашедшие существенное развитие в его последующих публикациях.

Первая статья, опубликованная в 1949 году "Анализ продольного профиля рек для целей крупномасштабного картирования речной сети" посвящена схематизации и типизации профилей речных русел и знаменует в творческой биографии И.В. Попова "вхождение" в "русловую" гидрологию. Две последующие статьи, помещенные в сборнике, отражают важные этапы развития фундаментальных представлений о русловом про-

цессе и методологии изучения характеристик русловых деформаций на меандрирующих реках при помощи аэрофотосъемки.

Статья "Русловые переформирования Волги на участке Волгоград - Астрахань" является блестящим примером практического применения методов гидролого-морфологического анализа русловых переформирований на участке реки большого протяжения.

В научном творчестве И. В. Попова решающее значение придаётся своевременному внедрению знаний о русловом процессе и его собственных разработок в практику гидротехнического проектирования. Принципиальные основы использования с этой целью гидролого-морфологической теории и методологии, в сжатом виде раскрыты в статье, приведённой здесь, впервые опубликованной в журнале "Метеорология и гидрология" в 1964 году и позднее, более подробно, в его докторской диссертации "Деформации речных русел и гидротехническое строительство", защищенной в 1968 году.

Статья "Типы речных пойм и их связи с типами руслового процесса" является уникальной, пионерной работой, впервые связавшей речные поймы, их генезис, морфологию и гидравлику с типами руслового процесса.

Статья "О сетевых русловых наблюдениях" подводит промежуточный итог многосторонних усилий Отдела русловых процессов ГГИ (организационный, методический, научный аспекты) по созданию сети стационарных русловых наблюдений, которую удалось организовать в 60-70-е годы прошлого столетия в 27 УГМС СССР. Эта работа демонстрирует, что отсутствие такой сети, являющейся мощным источником и инструментом получения фактических знаний о русловом процессе, существенно тормозит развитие теории руслового процесса и практических методов расчета характеристик русловых деформаций и транспорта наносов в реках. В сегодняшней трактовке, без создания и развития сети стационарных русловых наблюдений невозможно организовать и успешно вести мониторинг дна и берегов водных объектов в соответствии с Водным Кодексом РФ.

Заключительная, простая по своему идейному замыслу и содержанию статья "О соотношении ширины и глубины речного русла при различных типах руслового процесса", написанная в 1983 году, имеет принципиальнейшее значение и убедительно показывает неизбежность и необходимость окончательного перехода все еще доминирующих в различных теоретических воз-



зрениях о русловом процессе традиционных подходов и методов описания русловых деформаций без учета структуры и типов руслового процесса (гидроморфология, транспорт наносов, гидравлическое моделирование и др.) на структурные представления и разработку методов анализа и расчета русловых характеристик исключительно с учетом конкретных типов руслового процесса.

Творческое наследие Игоря Владимировича Попова направлено на перспективу и еще долго будет служить источником вдохновения и верным ориентиром для современного и будущих поколений исследователей речных долин, гидрографической сети, русел и пойм рек – одного из еще далеко не разгаданных чудес планеты Земля.

## СЛОВО О ПРОФЕССОРЕ ИГОРЕ ВЛАДИМИРОВИЧЕ ПОПОВЕ

В 2012 году исполняется 100 лет со дня рождения Игоря Владимировича Попова, доктора географических наук, крупнейшего специалиста в области изучения речных русел и пойм, их морфологии и переформирований, одному из создателей гидролого-морфологической теории руслового процесса:

Игорь Владимирович был широко эрудированным, прекрасно образованным, литературно одаренным и просто неординарным, талантливым человеком, обладал большим практическим опытом в области своих научных интересов. Он оставил колоссальное научное наследие и благодарную память в сердцах своих учеников и последователей, живущих и работающих полезно в значительной степени благодаря его оригинальным научным разработкам.

Своей эрудицией, образностью и широтой мышления он обязан своим выдающимся предкам, среди которых немало представителей и даже учредителей гидрометеорологии как таковой. Поэтому, говоря о И.В. Попове, невозможно обойти вниманием этих замечательных людей, большую, в несколько поколений семью Поповых-Вангейгеймов<sup>1</sup>.

Игорь Владимирович родился 9 апреля 1912 года в г. Курске в семье Поповых Владимировича и Ольги Феодосьевны (урожденной Вангенгейм).

Отец Владимир Иванович Попов (1883-1937) – профессор, доктор физико-математических наук после окончания математического отделения Петербургского университета работал в Главной физической обсерватории (ГФО), в Главном военно-метеорологическом управлении, преподавал в Курском институте народного образования астрономию, измерительную физику, читал курс метеорологии, руководил Главной геофизической обсерваторией (ГГО) – центральным метеорологическим учреждением СССР, в ГГИ возглавлял Гидрофизический отдел. В 1932 году возглавлял Памирскую ледниковую экспедицию, которая занималась изучением режима ледника Федченко.

---

<sup>1</sup> Сведения о родственниках И.В.Попова взяты из книг: В.В.Потапов «Профессор А.Ф.Вангенгейм». Серия «Жизнь знаменитых курян». –, Курск2001 г. и В.В.Потапов и Э.А.Вангенгейм «Возращение имени. Алексей Феодосьевич Вангенгейм» -М.:Изд-во Таблицы Менделеева, 2005.

В марте 1935 года после убийства С.М.Кирова Владимир Иванович был арестован (проходил по так называемому "ленинградскому делу") и, якобы, как социально опасный элемент, вместе с семьей был выслан в Курск. В Курске Владимир Иванович организовал в медицинском институте кафедру физики и стал ее первым заведующим, готовил доклады для радиокомитета. Однако в начале 1937 года он был вторично арестован, и дальнейшая его судьба остается неизвестной. После ареста его труды были изъяты из библиотеки ГГИ, а ссылки на его работы в публикациях других ученых были тщательно зачернены. В 1957 году дело В.И.Попова было прекращено за отсутствием состава преступления.

Мать Игоря Владимировича, Ольга Феодосьевна Попова-Вангенгейм (1886-1979), закончила в Санкт-Петербурге Бестужевские высшие женские курсы по специальности "Древняя история" и работала библиотекарем сначала в Курске, а с 1923 года до середины 1960-х годов – в Ленинграде, где в последние годы была директором библиотеки им. В.И.Ленина на Петроградской стороне. Одновременно преподавала историю и литературу в техникумах и в школе.

Дед по материнской линии, Феодосий Петрович Вангенгейм (1859-1925) – землевладелец, метеоролог и земский деятель. Его многогранная полезная деятельность отмечена орденами св.Анны, св.Станислава и серебряной медалью "В память царствования императора Александра III".

Усадьба Ф.П.Вангенгейма в хуторе Уютном располагалась в долине р.Свапы и была окружена полями, лесами и болотами. В 1888 году Феодосий Петрович организует в Уютном дождемерный пост, а в 1895 году метеостанцию 2 разряда 2 класса и опытное поле, на котором выполнялись систематические экспериментальные исследования агрометеорологического направления.. Здесь, в усадьбе отца происходило первое знакомство детей Феодосия Петровича с метеорологическими наблюдениями. После революции 1917 года, Феодосий Петрович не принял предложение своего старшего сына Николая эмигрировать во Францию. Умер в 1925 году после тяжелой болезни.

У Феодосия Петровича было 8 детей, все они были высокообразованными людьми. Старшая дочь Наталья закончила биофак, работала врачом. Старший сын Николай после революции эмигрировал во Францию, был военным инженером, служил в марковских войсках. Младший сын Михаил был инженером, ра-

ботал в комиссии по принятию в эксплуатацию гидростанций. Пострадал в 1949 году от ложных обвинений в том, что принятые им гидростанции не дают запланированной мощности. Реабилитирован в 1956 году.

Образованными и очень интересными людьми были дочери Феодосия Петровича Ксения (1888-1962) и Нина (1890-1977). Нина Феодосьевна (по мужу Колошина) училась в Орловском Александровском институте, в совершенстве владела французским и немецким языками. Всю долгую жизнь свою она много и активно работала, главным образом преподавала, вела большую общественную работу, пользовалась авторитетом и любовью учителей и учеников. Ее многолетняя и плодотворная деятельность отмечена орденами Ленина, Трудового Красного Знамени, медалями "За оборону Москвы", "В память 800-летия Москвы" и др.

Выдающейся личностью был Алексей Феодосьевич Вангенгейм (1881-1937) профессор, организатор и первый руководитель единой гидрометеорологической службы СССР. Он учился в МГУ на физико-математическом факультете, а также окончил Московский сельскохозяйственный институт. В 1911 году организовал гидрометеорологическую службу Каспийского моря. В первую мировую войну в чине полковника был назначен на должность начальника метеослужбы 8-ой армии и затем Юго-Восточного фронта, и за организацию газовой атаки против австрийцев награжден золотым оружием. Им был составлен "Краткий курс газовой метеорологии" (1916).

После революции Алексей Феодосьевич работал в г. Дмитриеве инспектором народного образования. Им был организован музей родиноведения. В дальнейшем ему пришлось заниматься восстановлением метеорологической сети Дмитриевского и соседних уездов Курской губернии, работать в Петрограде синоптиком в ГФО, помощником руководителя ГГО, а в Москве – в аппарате Главнауки Наркомпроса РСФСР и в последствии первым председателем Гидрометеорологического комитета (ГМК) при СНК СССР. Он возглавлял это ведомство до 1934 года. Его стараниями ГГО и ГГИ были признаны научными учреждениями общесоюзного значения, были организованы Центральное бюро погоды СССР (ныне Гидрометеоцентр РФ), первые в мире в этой области учебные заведения: гидрометеорологический Московский институт и гидрометеорологические техникумы в Москве, Владивостоке и Ростове-на-Дону.

Профессиональная деятельность Алексея Феодосьевича прекратилась 8 января 1934 года, когда он был арестован и приговорен к 10 годам исправительно-трудовых лагерей (Соловецкие лагеря особого назначения) по ложному обвинению в принадлежности к буржуазно-националистической организации. В 1937 году он был расстрелян, а в 1956 – посмертно реабилитирован.

С гидрометслужбой СССР был связан Георгий Яковлевич Вангенгейм (1896-1961) – младший сын Я. П. Вангенгейма, младшего брата Федосия Петровича. Выдающийся советский ученый-метеоролог, профессор, доктор географических наук, создатель и руководитель научной школы в области долгосрочных метеорологических прогнозов. В 1931 году вышла его монография "Синоптическая метеорология и ее возможности в предсказаниях погоды", а в 1935 году – работа "Опыт применения синоптических методов к изучению и характеристике климата".

В 1939-1942 годах Георгий Яковлевич работал в ГГИ и возглавлял научно-оперативную группу по обслуживанию Ленинградского и Северо-Западного фронтов гидрометинформацией. Далее был переведен в Москву, где занимался вопросами метеорологического обеспечения авиации на фронтах ВОВ.

В послевоенные годы Георгий Яковлевич преподавал в Военно-воздушной инженерной академии им. А.Ф.Можайского и в ААНИИ, продолжая совершенствовать методы долгосрочного прогноза погоды и климата. Большая и полезная научная и ратная деятельность Георгия Яковлевича отмечена многими государственными наградами.

Таков далеко неполный перечень членов большой семьи, в которой росли два мальчика братья Игорь и Олег Поповы. Разница в возрасте между ними два года, и дальнейшее повествование о старшем из них, об Игоре.

Он рос среди родных и близких, и имел возможность впитывать замечательную культуру окружающих его людей, знакомиться с их научной и общественно-политической идеологией, уже в детстве усваивать приемы и методы некоторых наблюдений за природными явлениями и процессами. Он очень естественно и сознательно выбрал свой жизненный профессиональный путь, осознавая его большое значение для Российского государства как в прежнем, так и в новом общественно-политическом и хозяйственно-экономическом укладах. Он учился на географическом факультете Ленинградского государ-

ственного университета и совмещал учебу с работой в Ленинградском управлении гидрометслужбы (УГМС), принимал участие в исследованиях сплавных рек, в изысканиях в связи с водоснабжением Южно-Уральской железной дороги и в связи с регулированием стока р. Тускарь, впадающей в родном его городе Курске в р. Сейм. Так что его трудовой путь гидролога начался в 1932 году.

Два трагических события 30-х годов – аресты дяди, Алексея Феодосьевича, и отца сильно повлияли на судьбу и на формирование характера тогда еще молодого человека. Учеба в университете была прервана, а вся семья сослана в Курск. Только через год детям Игорю и Олегу разрешили вернуться в Ленинград, чтобы завершить обучение в университете. Игорь Владимирович окончил учебу в 1936 году и был направлен на работу в Государственный гидрологический институт, где до ареста работал его отец руководителем Гидрофизического отдела.

Молодого специалиста-гидролога живо интересовали все разделы этой многоплановой науки - гидрологии, но наибольшее внимание он сосредоточил на руслах рек.

Первые годы его работы в ГГИ проходили в сложной общественно-политической обстановке. В начале 1937 года вторично был арестован отец. Его научные труды были изъяты из библиотеки института, а ссылки на его работы в статьях других авторов были зачернены. Все это тяжело переживалось Игорем Владимировичем, но он продолжал мужественно и полезно работать. Принимал участие в работах по водному кадастру, занимался методическими и оперативными вопросами гидрологических прогнозов, активно участвовал в организации службы гидропрогнозов. В эти годы Игорь Владимирович был уже женат и имел сына.

Великая Отечественная война прервала его научную деятельность. Он добровольцем пошел на фронт, был пулеметчиком в стрелковом полку, а позже – метеорологом-наблюдателем в химической роте. В начале 1942 года старший техник-лейтенант И.В.Попов был назначен помощником начальника гидрометотделения штаба 42-й армии Ленинградского фронта. За участие в ледовой разведке в тылу противника и успешное обеспечение боевых действий войск Игорь Владимирович награжден орденом Отечественной войны II степени и медалями.

После демобилизации он вернулся в ГГИ и уже в 1948 году защитил кандидатскую диссертацию, в которой рассмотрел вопросы методики выполнения гидрографических работ и применения аэрофотосъемки в гидрологических исследованиях водных объектов. В этой диссертации на фоне разрешения общих методических проблем гидрографических исследований Игорь Владимирович уже определенно сосредотачивается на речной гидрографии и видит перспективность и эффективность использования аэрофотосъемки в изучении морфологии и морфодинамики речных русел.

В 1954 году Отдел гидродинамики ГГИ преобразуется в Отдел русловых процессов. Инициатором этого преобразования был Н.Е. Кондратьев. Он стал первым начальником отдела, в котором работали А.В. Караушев, В.М. Маккавеев, Н.Н. Федоров, С. И. Пиньковский, И. И. Якунин, М. С. Грушевский. Пришел работать в ОРП и Игорь Владимирович. К этому времени он уже явно и целенаправленно обращается к изучению речного русла. В статье "Анализ продольного профиля рек для целей крупно-масштабного картирования речной сети» (1949) им была предпринята попытка схематизации и типизации продольных профилей рек с целью логически обоснованного назначения глубин и ширин русла при нанесении их на топографические карты. Выделено было 6 характерных случаев продольных профилей рек, включая случай, когда "резко различные глубины беспорядочно чередуются на очень коротких участках по длине реки", который отнесен им к "молодым" рекам, не выработавшим еще себе русла, или к горным рекам. Позже Игорь Владимирович существенно изменил мнение относительно горных рек.

Так сложилось, что в научном коллективе Отдела русловых процессов с приходом в него Игоря Владимировича выделились два лидера, два единомышленника, которые по существу определили новую идеологию в исследованиях руслового процесса рек и которые за сравнительно небольшой отрезок времени сформулировали основные положения (постулаты) гидролого-морфологической теории руслового процесса.

Дискретный подход к представлению речного потока и ограничивающей его твердой среды наряду с выделенными структурными уровнями этой дискретизации, выдвинутый Н.Е.Кондратьевым, был блестяще раскрыт и обоснован исследованиями Игоря Владимировича, широко и эффективно при-

менившего для этих целей топографические и лоцманские карты разных лет, многочисленные материалы аэрофотосъемок речных русел и пойм.

В 1954 году Игорь Владимирович опубликовал статью "Изменение морфологических характеристик во времени как показатель направленности русловых процессов на меандрирующих реках" с анализом деформаций русла р. Куры, основанном на сопоставлении во времени морфометрических характеристик участков большого протяжения. В этой статье, кроме прочего, впервые показана возможность существования таких видов деформаций русла, которые охватывают участки, пространственно значительно большие, чем участки "плес-перекат", а по времени существенно более длительные, чем сезонные деформации русловых форм. Определение этим процессам он дал позже, в коллективной монографии 1982 года (соавторы Н.Е. Кондратьев и Б.Ф. Смищенко).

В статье "Процесс меандрирования речных излучин и его изучение при помощи аэрофотосъемки" (1955), посвященной разработке методов расчета и прогноза деформаций русла, фактически представлено историческое развитие меандрирующего русла, детально описывается микрорельеф поймы, его происхождение, процесс образования береговых валов и систем веев перемещения русла, изменение длин и шагов отдельных излучин в ходе их развития, подробно рассказывается, как восстанавливать прежние положения русла по аэрофотоснимкам, высказываются соображения о возможности определения сроков формирования береговых валов.

Эта статья, по существу, является учебным пособием для начинающих осваивать приемы анализа русловых переформирований меандрирующих рек и не менее полезна для уже достаточно осведомленных исследователей руслового процесса, поскольку в ней очень подробно, убедительно и, вместе с тем, просто описывается и раскрывается многовековая жизнь реки.

Все три упомянутые выше статьи приведены в данном сборнике. В них, а потом и в книге «Методические основы исследований руслового процесса» (1961) замечательным, понятным языком была изложена методология формирующегося в Отделе русловых процессов научного мировоззрения. Это мировоззрение впервые обобщенно изложено в монографии коллектива авторов под редакцией Н.Е.Кондратьева "Русловой процесс" (1959). В ней представлена основная идеологическая



концепция нового подхода к изучению сложного, многофакторного природного явления и изложены основные положения гидролого-морфологической теории руслового процесса. Главы II–V, посвященные представлениям о геоморфологической составляющей руслового процесса, проблемам происхождения и развития речных долин, эрозионных процессов, являющихся первоисточниками поступления наносов в реки, проблемам формирования речных пойм и речного русла, а также методам дешифрирования аэрофотоснимков пойменно-руслового рельефа, написаны И.В.Поповым.

Прежде, чем оказаться в монографии, все эти вопросы были представлены Игорем Владимировичем в двух докладах III-му Всесоюзному гидрологическому съезду, состоявшемуся осенью 1957 года в Ленинграде, и обрели "права научного гражданства" в ходе заинтересованной и порой весьма горячей дискуссии с виднейшими учеными Советского Союза и зарубежья.

Развитие новой теории потребовало выявления еще неизвестных деталей взаимодействия потока с твердой средой, привлечения массового натурального материала по разным рекам. Памятуя об этом, Игорь Владимирович постоянно собирал топографические и лоцманские карты за разные годы, русловые съемки, выполнявшиеся в ходе работ по улучшению судоходных условий, геологические материалы и сведения о хозяйственной деятельности в руслах и поймах рек. В результате анализа такого комплексного материала выявлялись особенности руслового процесса участков конкретных рек и формировались прогнозы возможных переформирований русла.

Примером такого типа исследований И.В.Попова служит фундаментальная статья "Русловые переформирования Волги на участке Волгоград-Астрахань" (1963). В ней изложен опыт применения принципов и приемов гидроморфологического анализа, разработанных в Отделе русловых процессов ГГИ, к крупному гидрологическому объекту. Выделяются типы руслового процесса, встречающиеся на рассматриваемом участке Волги, приводится их качественная и количественная оценка, выявляются основные факторы руслообразования, устанавливается влияние на ход переформирования русла и поймы выполненных на участке гидротехнических мероприятий. Соображения о дальнейшем ходе руслового процесса сводились, в частности, к уменьшению многоруканности, нивелированию отметок дна плесов и перекатов, уменьшению подвижности круп-

ных побочней и появлению вторичных, менее крупных побочней. Морфологические изменения на этом участке Волги за следующие 45 лет подтвердили приведенный в статье прогноз.

В начале 1960-х годов в Отделе русловых процессов накопился достаточно большой натурный материал по разным рекам, позволивший не только качественно оценить типы руслового процесса, но и характеризовать их количественно набором конкретных измерителей. В 1964 году Игорь Владимирович публикует статью "Количественные показатели руслового процесса различного типа", открывшую широкие возможности специалистам-русловикам более полно выполнять гидроморфологический анализ состояния участков рек и более надежно прогнозировать возможные изменения на перспективу.

С самого начала образования Отдела русловых процессов работа коллектива была ориентирована на решение многочисленных практических водохозяйственных задач страны. Новые научные разработки отдела оказались весьма удобным и эффективным инструментом для решения таких задач. Ряд работ периода 1964-1966 годов, посвященных практическому использованию гидроморфологической теории руслового процесса, стали исключительно значимыми в научном наследии Игоря Владимировича. Это и докторская диссертация "Деформации речных русел и гидротехническое строительство (гидролого-морфологическая теория руслового процесса и ее применение)", которую он защитил в 1966 году, и книга «Деформации речных русел и гидротехническое строительство», изданная в 1965 и переизданная в 1969 году.

Неоценимым вкладом Игоря Владимировича в теорию стала типизация пойм. Пойма, являясь неотъемлемым элементом реки и в известные фазы водного режима существенной составляющей транзита речного потока, испытывает его влияние и, в то же время, оказывает сама влияние на русло реки. В 1968 году типизация пойм представлена в статье "Типы речных пойм и их связи с типами руслового процесса". В этой статье условия формирования и особенности рельефа пойм рассматриваются в непосредственной связи с типами руслового процесса. Обстоятельно для каждого типа русла рассмотрена гидравлика пойменных массивов механизм их затопления, транзита пойменных потоков и механизм опорожнения от воды.

Важной составляющей деятельности Игоря Владимировича была организация сетевых русловых наблюдений. Необ-

ходимость в этом была связана с недостаточностью усилий небольшой группы энтузиастов-гидрологов, собиравших сведения о деформациях речных русел и пойм, о смещении бровок берегов в плане, необходимых при выборе оптимальных конструкций и мест расположения сооружений на берегах рек и в поймах. В соответствии с указаниями ГУГМС русловые наблюдения были начаты в 1971 году и к 1978 году проводились в 27 УГМС.

В 1978 году он публикует статью "О сетевых русловых наблюдениях", в которой обобщает работу в этом направлении 15 УГМС. Автор обосновывает необходимость организации и выполнения таких исследований во всех УГМС страны, уделяя внимание методической основе наблюдений и порядку их организации и выполнения. Далее он участвует в подготовке выпущенных ГГИ ряда рекомендательных документов и "Временные методические указания по организации и производству сетевых русловых наблюдений".

В 1982 году вышла в свет монография "Основы гидроморфологической теории руслового процесса", написанная Н.Е.Кондратьевым, И.В.Поповым и Б.Ф.Снищенко. В этой небольшой по объему книге (всего 270 страниц) теория руслового процесса представлена в четко оформленном виде, показаны ее преимущества по сравнению с подобными разработками других научных школ, которые заключаются в компактности, физически логичной оформленности и доступности для освоения и использования в практической деятельности гидрологами и специалистами смежных специальностей.

Главы 3, 6–12 и 14 этой монографии написаны Игорем Владимировичем. В этой книге, как и в ранее изданных работах, он выступает и как прекрасный рассказчик, и как нарочитый учитель, обучающий приемам выполнения специфических работ с картографическими, геологическими, аэрофотосъемочными и другими материалами. В частности, он обобщил с точки зрения динамического равновесия русел и дал конкретное объяснение однонаправленным деформациям на очень продолжительном (вековом) отрезке времени. Он заметил, что под влиянием внешних естественных или искусственно созданных факторов возможно однонаправленное изменение деформаций речных русел и пойм и даже их коренное преобразование. Это вызывает потребность, кроме выделения необратимых и обратимых переформирований речного русла, использовать понятие «условно необратимые деформации, под которыми следует по-

нимать такие, в ходе которых определенное направление перестроений продолжается длительное время, иногда столетия, но затем происходит изменение направления деформаций, хотя морфологический их тип остается прежним" (стр.48). Таким образом, Игорь Владимирович первым подметил и определил явление, которое мы называем динамически неравновесными состояниями участков рек.

В 1983 году в одной из последних своих статей "О соотношениях ширины и глубины речного русла при разных типах руслового процесса" Игорь Владимирович поднял много вопросов относительно соотношения  $B/H$ , которое является интересным предметом для исследования. Он показал и статистически обосновал, что величина  $B/H$  является функцией не только размера реки (увеличиваясь от малых к большим рекам), но и существенно зависит от типа руслового процесса.

Приведенные ниже избранные научные труды Игоря Владимировича наглядно характеризуют широту его научных интересов и практическую ценность его исследований. В целом за свою жизнь Игорь Владимирович опубликовал 14 монографий, более 40 научных статей в Трудах ГГИ и других изданиях, был одним из авторов 8 нормативных документов, активно участвовал в написании многих методических пособий и рекомендаций. Основные работы И.В.Попова хорошо известны российским и зарубежным гидрологам и геоморфологам.

Важной чертой деятельности Игоря Владимировича была постоянная связь с проектными и строительными организациями. Он провел десятки консультаций со специалистами разных организаций разных отраслей хозяйства. Им написаны десятки заключений, проведены экспертизы многочисленных водохозяйственных проектов. Он неоднократно выезжал на реки в связи с возводимыми или проектируемыми в русле или на пойме объектами. Он выполнил большую подготовительную, организационную и научно-методическую работу по внедрению исследований русловых процессов на сети гидрометеостанций страны.

Помимо исследовательской и производственной деятельности Игорь Владимирович с 1948 года занимался педагогической деятельностью. Кроме лекционных занятий со студентами гидрологических ВУЗов, он неизменно проводил беседы - экскурсии в ГГИ, на Главной экспериментальной базе ГГИ и в Валдайской научно-исследовательской гидрологической лаборатории со студентами и с уже работающими специалистами. Им на-

писан учебник (совместно с Н.Б.Барышниковым) для студентов гидрологических факультетов. В течение многих лет он был ответственным в ГГИ за производственную практику студентов.

Игорь Владимирович был прекрасным популяризатором науки. Он был консультантом БСЭ и написал ряд статей для III издания этой энциклопедии и энциклопедии "Британика". Среди опубликованных им научно-популярных брошюр достаточно назвать такие увлекательные книги как "Жизнь речного русла" (1955) и "Загадки речного русла" (1977). В течение многих лет он был консультантом ВДНХ и участником устройства экспозиции в гидрологическом павильоне этой выставки; награжден золотой и серебряной медалями ВДНХ.

Игорь Владимирович был простым замечательным человеком. Он очень органично существовал в большом коллективе, и его рабочий стол стоял среди таких же столов научных сотрудников, инженеров, техников. Он работал почти не отвлекаясь от дела, лишь позволяя себе кратковременные перерывы на перекур (был заядлым курильщиком). За время коротких перекуров он успевал обменяться с товарищами информацией на разные бытовые и небытовые темы, шутил, рассказывал анекдоты, но избегал рассуждать на политические темы, и если кто-то ожидал его реакции по этому поводу, обычно произносил протяжное: "Да-а-а", – которое звучало как защитная реакция типа: "Кто его знает?" после пережитых в прошлом трагедий в семье.

При этом он был исключительно скромным человеком и не очень-то рассказывал о трудных годах войны и других тяготах жизни. Выдающийся ученый, широко известный в родной стране и за рубежом, он никогда не выезжал за границу. На вопрос, почему его и Николая Евгеньевича никогда не направляют на конгрессы, съезды, конференции, он неизменно лаконично отвечал: "Рожей не вышли". За этим грубоватым лаконизмом чувствовалась и горечь пережитого, и досада на последующую несправедливость.

Он был замечательным рассказчиком и очень хорошим оратором-докладчиком. Его мягкий баритон, четкая дикция, ясное мышление и исключительная выдержка, размеренность завораживали слушателей на заседаниях Ученого Совета. Когда он шел к трибуне, по залу передавался говорок: "Ну сейчас Попов скажет!!" Его речь была небыстрой, короткими фразами с интервалами. Он как бы хотел, чтобы его хорошо услышали и

хорошо поняли. Часто именно так и было, особенно в родной институтской среде. И, помнится, лишь один только раз эмоции перехлестнули через край. Реагируя на какую-то реплику, Игорь Владимирович так резко взмахнул рукой, что разбил палец в кровь о край трибуны, даже не заметив этого.

Будучи всю жизнь горячим проповедником гидроморфологической теории руслового процесса, выступая в дискуссии на V Всесоюзном гидрологическом съезде и чувствуя несколько обидное невнимание слушателей других научных направлений, он лаконично, но с вызовом закончил свое выступление словами: "Читайте нас". Это было, пожалуй, последнее выступление и последний призыв Игоря Владимировича на большом научном форуме.

Да! Скромность была неотъемлемой чертой этого изумительного человека, но цену себе он знал. Однажды, в начале 1960-х годов, оказавшись на ГЭБ ГГИ, он прогуливался по территории базы. В должности коменданта в то время был отставной военный, который ходил по территории в форме и наводил порядок. Увидев мужчину в вельветовой куртке, узких брюках, берете, темных модных очках с зонтом-тростью в одной руке и сигаретой в другой, он спросил его начальственно: "Вы кто такой?!" На что «пижон» ответил: "Я-то Попов! А вот вы кто?"

В кругу русловодов Игорь Владимирович был милым, обаятельным, всеми любимым и всегда желанным в разных мероприятиях человеком. Он шутил, рассказывал интересные истории, выпивал, играл на пианино, пел, в общем, – был душой компании. Он всегда использовал свой статус мэтра, профессора для того, чтобы создать, насколько это возможно, комфорт сотрудникам низшего ранга. Они тянулись за ним как гусята за гусыней, зная, что Игорь Владимирович в обиду не даст.

Когда 1 февраля 1992 года случилось непоправимое, за поминальным столом в его квартире на Васильевском острове сложились такие слова:

"Зарж'авеет ученое перо. И сигарета  
Не задымит теперь, не зазвучит роуаль.  
Ушел Попов, его забрала Лета.  
Естественно. Но только очень жаль!"

Ушел, это верно. Но ученое перо продолжает работать в руках его учеников, его последователей. И работает оно с доброй, благодарной памятью об этом замечательном человеке.

А.Б.Клавен

## **АНАЛИЗ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ РЕК ДЛЯ ЦЕЛЕЙ КРУПНОМАСШТАБНОГО КАРТИРОВАНИЯ РЕЧНОЙ СЕТИ**

Вопросы крупномасштабного картирования морфометрических элементов до недавнего времени не находили достаточно полного отражения в работах гидрологов. А методы изображения гидрографической сети, принимаемые картографами, обычно основываются на показе только внешних признаков и не дают изображения динамики гидрологических явлений, иначе говоря, являются фотографией какого-то определенного и не всегда характерного момента, не показывая тенденции его развития. В настоящее время наметился значительный прогресс во взглядах картографов на эту проблему, о чем свидетельствует ряд работ [Виноградов, 1944, Комков и Костриц, 1945, Стрельбицкий, 1937], пытающихся более полно подвести генетическую основу в методы и способы изображения гидрографической сети и отразить динамику и тенденцию развития гидрографических явлений.

Сложность изображения гидрографической сети на картах заключается в обилии характеристик и элементов, ее составляющих, и изменчивости их, обусловливаемой колебаниями водного режима и изменениями в площадном (или линейном) распределении, даже при одном и том же состоянии водного режима. Все это значительно ограничивает детальность изображения. Поэтому при отборе величин для изображения их на картах приходится прибегать к известному отбору и их схематизации. Однако в картографических и гидрографических наставлениях и руководствах еще нет четких правил этого отбора.

Изменения, связанные с водным режимом (изменения во времени), обычно учитываются путем отбора величин картируемых характеристик по определенным периодам в состоянии водного режима, т. е. по принципу создания сезонных карт, причем один из сезонов, наиболее устойчивый, принимается основным, на фоне которого тем или иным способом показываются величины характеристик для остальных сезонов.

Пространственные изменения, заключающиеся в различии величин по абсолютным размерам и частоте, с которой они встречаются, бывают настолько значительными, что и здесь приходится прибегать к осреднениям и схематизации. При этом для картирования всегда необходимо знать не отвлеченные, чисто статистические характеристики, а данные, привязанные к опре-

деленным точкам и участкам на местности. С этой точки зрения использование обычно употребляющихся преобладающих значений оказывается не всегда возможным, и требуется знать тенденцию в изменениях тех или иных величин. Наибольшие трудности возникают при изображении морфометрических элементов водных объектов, имеющих немасштабные изображения на карте, благодаря чему они показываются в виде подписей. При этом одним из основных вопросов являются принципы выбора места для размещения этих подписей, в частности, наиболее сложны изображения таких морфометрических элементов, как глубина и ширина рек, и здесь картографами допускается наибольший произвол и случайность в выборе мест для подписей.

Во всех этих случаях основным требованием к показываемым характеристикам должно быть условие, чтобы на основании величин, показанных для отдельных створов или точек, можно было с наибольшим приближением к действительности судить о характере пространственного распределения величин между этими двумя точками.

Для выяснения возможности такого решения нами был подвергнут анализу характер распределения глубин и ширин по длине 136 различных рек СССР.

Как известно, распределение глубины по длине реки в большинстве случаев отражает чередование плесовых и перекатных участков. В зависимости от сочетания уклонов, грунтов, характера местности, извилистости рек, гидрографической сети, водности, зарастаемости русла, сооружений на реке и т. п., соотношение длины плесовых и перекатных участков и соответствующих им глубин бывает разным. В существующей гидрологической литературе вопросы установления определенных зависимостей между всеми этими факторами и распределением длин плесовых и перекатных участков и соответствующих им глубин, равно как и типизация этого распределения, не нашли еще себе полноценного отражения.

М. А. Великанов в своей работе «Динамика русловых процессов» [Великанов, 1946], указывает: «Оценка и учет всех факторов, образующих своей совокупностью весь сложный комплекс воздействия потока на русло, до сих пор являлись результатом почти исключительно интуиции, основанной на непосредственном наблюдении реки» (стр. 414). И далее: «К сожалению, на современном уровне науки это воздействие (воздействие потока на русло – И.П.) еще не поддается строгому физико-



математическому анализу и может быть охарактеризовано лишь совокупностью положений, скорее качественного характера» (стр. 437). Однако, упоминая о работах Лелявского, Лохтина, Фарга и Жиардона, Великанов пишет: «Хотя полученные ими закономерности носят скорее лишь качественный характер и, во всяком случае, не поддаются строгой математизации, но, тем не менее, в истории развития наших знаний о речном потоке сыграли и играют до сих пор очень большую роль» (стр. 414).

Приведенные цитаты с очевидностью показывают, что эти вопросы представляют собой очень сложную и большую проблему, еще нуждающуюся в детальном изучении и разработке.

Но и более простая задача – типизация распределения глубин и ширины реки – даже без генетического анализа причин, обусловивших тот или иной характер распределения, также еще недостаточно разработана и ограничивается только общими указаниями. Анализ продольных профилей рек производится обычно с точки зрения распределения уклонов и падения на участках, и имеющиеся типизации продольных профилей (С. В. Григорьева, Б. В. Полякова для малых рек) произведены именно под таким углом зрения. Учитывая сложность всех этих вопросов, и преследуя сравнительно узкую цель – установить правила отбора и размещения подписей глубин рек на картах, нами сделана попытка типизировать наиболее часто встречающиеся случаи распределения глубин по длине рек, не ставя задачей выяснение всех сложных причин, обусловивших тот или иной его характер.

В ранее цитированной работе Великанов по этому поводу высказывает соображение, что «в естественных потоках, имеющих за собой длительный период существования, форма русла всегда наилучшим образом отвечает тем скоростям и расходам, которые присущи данной реке. Из этого следует, что вдоль реки должна иметь место сравнительно слабая изменчивость размеров и формы ее живого сечения; глубины, правда, чередуются (плесы и перекаты), но и это чередование обычно носит относительно правильный характер, исключение составляют, например, места пересечения рекой каменных гряд».

Произведенный анализ распределения глубин по длине рек показывает, что, несмотря на то, что в природе эти случайные причины нередко оказываются настолько часто встречающимися, что обуславливают чрезвычайную изменчивость в распределении глубин, все же выделение определенных типов распределения глубин, при известной схематизации, представляется

вполне реальной задачей, имеющей не только теоретическое, но и большое практическое значение.

Продольный профиль реки в том виде, как его обычно принято строить, отражая не только глубины, но и падения, не всегда можно использовать для анализа распределения глубин по длине для рек, имеющих значительные уклоны водной поверхности, поскольку, как это видно из рис. 1, он не дает наглядной картины этого распределения.

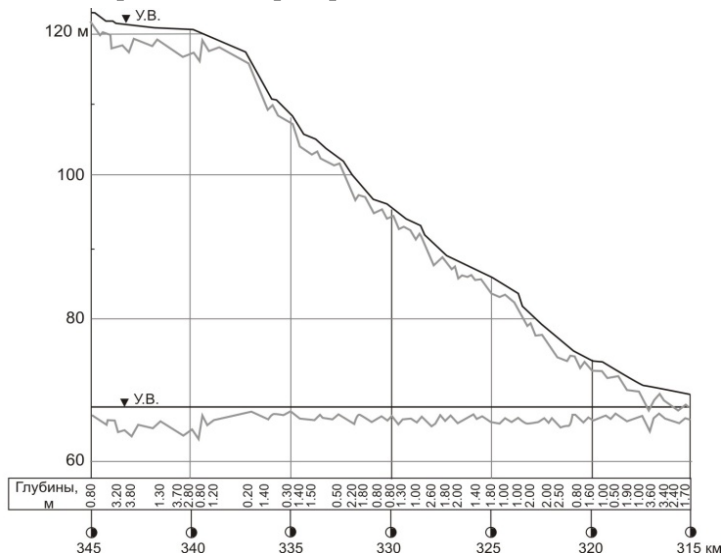


Рис. 1. Продольный профиль р. Мсты и соответствующий ему график распределения глубин

Поэтому для установления характера распределения глубин по длине реки в том разрезе, как это требуется поставленной задачей, строились специальные графики распределения. На этом графике глубины наносились от одной горизонтальной плоскости, за которую принимаются отметки приведенного по длине реки уровня воды. Глубины для построения такого графика выбирались по фарватеру.

Рассматривая на таких графиках участки равной длины для различных рек или их участков, можно установить несколько основных типовых случаев распределения глубин. Рассмотренные случаи представлены в виде схем на рис. 2.

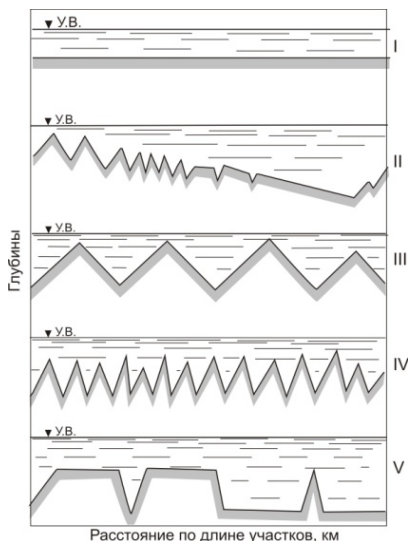


Рис. 2. Схемы типовых случаев распределения глубин на участках равнинных рек

I случай. На участке преобладают однообразные глубины, мало различающиеся по длине реки. Такое распределение глубин встречается на многих болотных реках, на слабоизвилистых участках рек, протекающих по однородному грунту, но может наблюдаться и при значительной извилистости, при наличии твердых, трудноразмываемых пород,

когда извилистость обусловлена тем, что река следует направлению тектонических трещин и изломов.

II случай. Глубины имеют определенную тенденцию к увеличению или уменьшению по длине реки. Это наблюдается на участках рек, находящихся в естественном или искусственном подпоре, а также может обуславливаться равномерно увеличивающейся живой силой потока при равномерном нарастании водности и однородном грунте дна на участке. Следовательно, такой случай может определяться и характером взаиморасположения притоков по длине участка, т. е. характером гидрографической сети. Внутри такого участка могут встречаться отдельные глубокие впадины и мелкие места, распределение которых может быть таким, какое получилось для случаев III, IV, V, а также и в случае I.

III случай. Характерно редкое чередование плесовых и перекатных участков<sup>1</sup>. Такое распределение встречается на многих крупных равнинных реках в хорошо размываемых породах, с постоянным перемещением размытого материала, скопления которого и образуют перекаты. Как разновидность этого случая, распределение глубин может быть и такое, когда между отдельными глубокими и мелкими местами будут встречаться участки

<sup>1</sup> - под плесами понимаются вогнутые формы профиля, под перекатами – выпуклые

со сравнительно ровным дном и глубинами, мало отличающимися друг от друга.

IV случай. Характерно частое чередование плесов и перекатов, что встречается при частых сменах грунта по длине участков или на реках с большой извилистостью русла.

V случай. По длине участка преобладают длинные плесовые или длинные перекатные участки, перемежающиеся короткими перекатами или плесами. Следует отметить, что этот случай очень часто встречается на многих разных по своему типу реках.

VI случай. Резко различные глубины беспорядочно чередуются на очень коротких участках по длине реки. Этот случай свидетельствует о том, что на данном участке влияние различных факторов накладывается один на другой, нарушая обычную закономерность распределения глубин. Этот случай характерен для распределения глубин на «молодых» реках, не выработавших еще себе русла, или для горных рек.

Следует отметить, что эти случаи распределения глубин справедливы как для больших, так и для малых рек, при этом разница получается в основном за счет крупности отдельных элементов профиля дна, составляющего тот или иной тип распределения глубин.

Из описания приведенных типичных случаев распределения глубин очевидно, что районировать по этим признакам реки весьма затруднительно, поскольку не только на соседних реках, но и на протяжении данной реки может неоднократно наблюдаться смена различных типов распределения, как это видно на примере р. Мегры (рис. 3), где наблюдается 4 различных по своему характеру участка, однако типизация даже коротких участков позволит установить определенные правила для численной характеристики глубин такого участка и значительно приблизить к истинному положению освещение глубин на картах или в гидрографических описаниях.

Отметим только, что грубо можно разграничить реки на две основные категории – равнинные, в которых наиболее часты будут случаи I-V и горные – случай VI. Таким образом, для применения приведенных схем распределения имеются широкие возможности.

На картах и при составлении гидрографических описаний до сего времени обычно было принято употреблять преоблада-

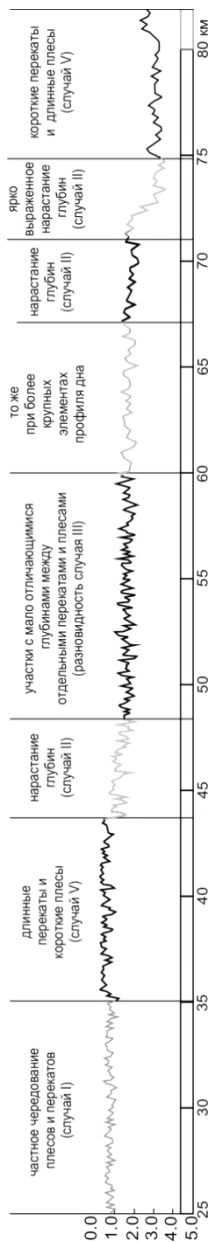


Рис. 3. График изменения глубин по длине р. Мегры (приток Онежского озера)

ющие значения глубин для характеристики их распределения на участке и показывать крайние значения.

Как следует из рассмотренных случаев распределения глубин по длине рек, характеристика глубин не всегда показывает их истинный характер распределения и дает слишком общие характеристики. Преследуя цель дать не только отвлеченные характеристики, но и привести их к определенным местам, т. е. соблюсти ранее указанное условие, чтобы по двум соседним величинам можно было судить о характере распределения между данными, при отборе величин следует руководствоваться определенными правилами. Например, для случаев I и V характер распределения глубин преобладающей величины вполне приемлем.

Для случая II преобладающее значение глубин не дает требуемого результата, совпадает со средней и не отражает тенденции в развитии глубин. Такие участки должны выделяться особо и для них должны показываться крайние значения для начала и конца участка.

В случае III или IV, когда глубины, близкие к преобладающей по абсолютным значениям, встречаются немногим реже ее, для более полной характеристики ряда требуется давать преобладающие значения в определенных пределах, интервал которых будет обуславливаться, с одной стороны, характером графика частоты, а с другой — требующейся точностью оценки глубин. Если при этом интервал окажется слишком велик, то характеризующийся участок должен быть разделен на более короткие, обеспечивающие требующуюся точность. Укорочение ряда, понятно,

может быть произведено только в определенных пределах, чтобы не сократить чрезмерно числа величин, на основании которых делается оценка.

В случаях, когда с близкой или одинаковой частотой встречаются резко отличные между собой глубины, преобладающие значения должны даваться отдельно для каждой из них (например, при небольших разницеах между глубинами всех плесов, или между глубинами всех перекатов).

Для случая VI, при невозможности схематизации и приведения данных к типам I–V, требуется, по сути дела, давать график частоты.

Таким образом, применение преобладающих значений для характеристики распределения глубин должно производиться на основе анализа характера распределения их по длине реки и графиков частоты.

Эти правила отбора величин для характеристики ряда могут быть приняты в наставлениях по гидрографическим исследованиям и в картографических руководствах. Как показали проведенные работы по картированию глубин с соблюдением указанных положений, оно вполне осуществимо для масштабов карт 1:100 000, принимая точность схематизации для мелководных участков  $\pm 0,25$  м, а для глубоких (свыше 2,0 м)  $\pm 1,0$  м.

Практически, отбор величин и определение места для размещения подписей на картах (или выбор пунктов, для которых целесообразнее дать сведения в гидрографических описаниях) производится следующим образом.

На графике изменения глубин по длине реки выделяются участки с одинаковым характером распределения глубин в соответствии с типами, показанными в случаях I–VI. Если по условиям масштаба или степени подробности, с которой должны даваться данные, можно показать все изменения, то они должны быть показаны для всех точек. В противном случае, что встречается значительно чаще, требуется схематизация. Схематизацию можно с достаточной точностью провести графически, а аналитические подсчеты (вывод преобладающих, вычисление отклонений и т. п.) можно и не производить.

Для графической схематизации удобно все точки на графике, соответствующие подъемам дна (пикам), рассматривать отдельно от точек впадин, учитывая их взаиморасположение. Такая группировка точек позволит сразу определить преобладание тех или иных глубин на участке и установить общую тен-

денцию в распределении глубин. По этим точкам, по принципу равновесия преобладающих из них, и отбрасывая резко отличные, строятся кривые так же, как обычно строится, например, кривая расходов воды.

Для точек перегиба кривой с графика снимаются соответствующие им глубины и отбираются для помещения на карте или в описаниях.

При явном преобладании определенных глубин строится одна кривая, а при одинаковой частоте двух различных градаций глубин – две кривых. В последнем случае величины выписываются двойными (отдельно для пиков и впадин), показывая тем самым, что на участке происходит частое чередование плесовых и перекатных участков. Изображение на карте всех перекатов показывает эту частоту. Величины, резко отличные от преобладающих значений, полученных указанным способом, отмечаются особо.

Участки, для которых производится схематизация, не должны быть слишком длинными, чтобы не усложнять сопоставление выписанных величин, и, учитывая наличие закономерности в распределении глубин по длине реки, практически указывается, что кривые преобладающих глубин в большинстве случаев могут быть приведены к прямым линиям. Следовательно, на картах подписи могут даваться к концам характерных участков. При выборе мест для подписей почти всегда можно приурочить их к таким створам, чтобы полученная с кривой преобладающих глубин величина соответствовала бы глубине в данной точке. Тогда подписи глубин на карте будут одновременно показывать глубину, характерную для участка (сравнением соседних подписей), и глубину в данной точке.

В заключение необходимо отметить, что график распределения глубин по длине реки может быть использован и при постановке палеогидрографического анализа, так как обнаруживающиеся на нем при схематизации «укрупненные» плесы и перекаты, выступающие на фоне более мелких форм дна, могут свидетельствовать о том, что существующий продольный профиль реки отражает работу мощных древних потоков, по дну которых протекают современные реки, показывая расположение древних плесов и перекатов. На возможности анализа продольного профиля реки в этом аспекте указывал покойный проф. А. Д. Дубах, в одной из своих работ [Дубах, 1925], доложенной на I Всероссийском гидрологическом съезде. К этой цели Дубах шел иным путем – перестраивая продольный профиль по средним

высотам уровня воды каждой версты (пикеты через 50 саж.). В результате профиль обнаруживал волнистость поверхности и для рек Мерло и Лопань позволил обнаружить местонахождение древних плесов и перекатов, что подтвердилось и геологическими данными.

Интересно отметить, что, как указывает Дубах, по характеру кривой, соединяющей гребни двух соседних древних перекатов, можно судить о заболоченности берегов. Разграничение сухих и заболоченных участков определяется наибольшей стрелой прогиба. Меньшая кривизна соответствует сухим участкам, большая – заболоченным.

В настоящей статье указывается только часть возможностей, которые дает детальный анализ продольного профиля рек. Однако и эти выводы уже можно использовать для решения ряда задач, связанных с изображением и описанием ряда морфометрических элементов, в частности ширины рек. Аналогичный анализ для ширины рек показал возможность изображения и описания их также по предлагаемому способу. Размеры настоящей статьи не позволяют подробнее остановиться на всех этих вопросах. Во всяком случае, несомненно, что вопросы морфологии, имеющие большое значение для обеспечения нужд обороны страны и народного хозяйства, все больше и больше привлекают к себе внимание гидрологов.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. - Гидрометеиздат, 1946.
2. Виноградов Н.В. Гидрография на листах международной карты мира, изданных за 50 лет (1891-1941 гг.). – Изв. ВГО, т. 76, вып. 1, 1944.
3. Дубах А.Д. Характеристика продольного профиля рек. - Тр. 1-го Всерос. гидрологического съезда. Л., 1925.
4. Комков А. М., Костриц И. Б. Гидрографическая сеть и ее изображение на топографических картах. - Изд. ВТУ Генштаба ВС СССР. М., 1945.
5. Наставление по гидрографическим исследованиям рек, озер и болот, ч. 1 и 2. Свердл. – М. Гидрометеиздат. 1944.
6. Стрельбицкий А.В. Физико-географическое содержание топографической карты масштаба 1:200000. - Проблемы физ. географии, вып. IV. М.-Л., 1937.



## **ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВО ВРЕМЕНИ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ НАПРАВЛЕННОСТИ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА МЕАНДРИРУЮЩИХ РЕКАХ**

### *Основные предпосылки к постановке вопроса*

Существующие приемы расчета русловых деформаций применительно к значительным по протяжению участкам рек основаны на весьма грубых схематизациях и допущениях, недостаточно учитывающих морфологические особенности объекта, для которого они выполняются. В этом заключаются причины того, что современные методы расчета русловых деформаций еще не в полной мере удовлетворяют запросам практики.

Теоретическое изучение русловых процессов, обособившееся от морфологических представлений, привело к увлечению математической стороной исследований, а также к тому, что русловые проблемы замкнулись в рамках лабораторных экспериментов. Полевой же эксперимент развит слабо, а уже имеющиеся натурные материалы, прежде всего в виде крупномасштабных съемок русла разных лет, для оценки деформаций не используются.

Основная в СССР сеть наблюдательных станций – сеть системы ГУГМС – массовыми русловыми наблюдениями не занимается и если они когда-либо и выполняются, то лишь в узко специальных целях на ограниченных участках или чаще в отдельных створах. Наблюдательные станции других ведомств ведут наблюдения над русловыми процессами, может быть, и в большем объеме, но без единой методики, подчиняя их решению также лишь узко специальных задач.

Суждение об ограниченном значении выполняющихся в настоящее время специальных русловых натурных наблюдений в известной мере относится и к существующим съемкам перекатов, поскольку такие наблюдения дают материал только о режиме отдельного переката и не позволяют выделить те его особенности, которые определяются воздействием соседних участков реки.

Действительно, при устойчивой водности и отсутствии внешних воздействий, вызванных такими явлениями как тектонические процессы, изменение положения базиса эрозии и т. д., общие для всей реки односторонние деформации, выражающиеся в снижении продольного профиля, стремящегося к про-

филю равновесия, могут часто весьма сильно нарушаться в зависимости от изменений в положении местных базисов эрозии. При этом местные деформации могут не только значительно превосходить по величине общие односторонние деформации, но на разных участках реки могут иметь разный знак, в силу чего даже рядом расположенные створы могут давать совершенно различные представления не только о величине общих деформаций, но и об их направлении.

Следует также учесть то обстоятельство, что перекаты в течение года деформируются иначе, чем плесы, а формы русел, свойственных им, резко различны. Так, в подавляющем большинстве случаев перекаты имеют форму поперечного сечения, близкую к прямоугольной, а плесы – к треугольной.

Исходя из этого, казалось бы, естественно вести наблюдения, по крайней мере на участке перекаат-плес-перекаат, т. е. с расчетом охватить ими определенный морфологический комплекс русловых образований и проследить их режим, по крайней мере в течение года. Однако промерные створы зачастую располагаются только на перекаатных или переходных участках от плеса к перекаату, и исследуют, таким образом, только случайный профиль и часто за незначительный период времени. Полученные таким путем данные этого случайного профиля, конечно, не могут распространяться на участки длиной в десятки, если не сотни километров, и составить на их основе суждение об общей направленности русловых процессов на реке или проверять результаты, полученные путем расчетов, нельзя.

Неучет указанных обстоятельств может привести не только к ложным предпосылкам при разработке методов расчета русловых деформаций и к ошибкам оцениваемых величин деформаций, но нередко способен привести исследователей к прямо противоположным выводам об их направлении.

Именно такую ошибку делает, как нам кажется, Д. А. Козловский [Козловский, 1951] при оценке возможных деформаций нижнего течения р. Куры, основывая свои суждения на анализе кривых расходов в отдельных двух створах.

Можно привести и другие примеры возможных ошибок и недоразумений, возникающих благодаря неучету морфологических местных особенностей развития русловых процессов.

Так, например, в качестве расчетного поперечного сечения русла часто принимается некоторый осредненный поперечник для участков в десятки и сотни километров длиной. В этом

случае соответственно нивелируется разница в плесах и перекатах различно ведущих себя в отношении размыва и намыва в одни и те же сезоны, нередко не учитывается возможный «вес» различных форм русла, обусловленный и разной длиной плесовых и перекатных участков. Часто считается, например, что построение поперечных профилей русла через равные интервалы длины вполне обеспечивает возможность оценки средней формы и размеров русла. Однако в ряде случаев чередование плесов и перекатов может быть весьма закономерным [Попов, 1948], т. е. они располагаются примерно через равные промежутки длины. Следовательно, если расстояния между поперечными профилями будут приняты без учета частоты чередования плесов и перекатов, то эти поперечные профили могут приходиться в большом числе случаев на идентичные формы русла. При этом средние размеры нередко вычисляются без учета изменения водности по длине реки (их надо осреднять по бесприоточным участкам), и, следовательно, обобщаются далеко не равноценные совокупности.

Таким образом, даже технические приемы получения исходных данных для расчетов еще недостаточно отработаны.

Все изложенное выше свидетельствует о том, что такой материал не может служить основанием для проверки результатов теоретического расчета русловых деформаций.

Основоположник изучения русловых процессов В. М. Лохтин писал: «Природа – лучшая лаборатория». Это глубоко справедливое положение оказалось, как видно из дальнейшего, в значительной мере недооцененным.

Успешное решение задачи расчета русловых процессов может быть обеспечено только на основе сочетания гидродинамических методов исследования с широким изучением русловых процессов в натуральных условиях.

Главные преимущества такого направления исследований усматриваются в следующем.

Широкое использование натуральных материалов, в том числе и уже имеющихся, позволяет составить четкие представления о том, как протекает формирование русла естественных потоков и на коротких участках, и на участках большого протяжения.

Оно позволит исследовать различные стороны динамики русловых потоков и более четко изучить отдельные конкретные случаи, т. е. учитывать местные конкретные условия и, следовательно, в конечном итоге приблизить теорию руслового про-

цесса к запросам практики. Возможность составить четкие представления об особенностях русловых процессов в различных природных условиях позволит установить границы, диапазоны явлений, в которых русловые процессы будут, по крайней мере, однотипными и применение законов гидродинамики будет отличаться своей спецификой.

Изучение природных гидроморфологических зависимостей должно дать также материал для выбора основных параметров лабораторных установок, т. е. для вопросов моделирования речных русел.

Исходя из всех указанных выше предпосылок, была сделана попытка оценить возможность использования широко распространенных натуральных морфометрических материалов разных лет для суждения о направленности и характере русловых деформаций на участках реки большого протяжения. Обработка таких данных одновременно давала бы большой фактический материал для выяснения природных соотношений между различными морфометрическими характеристиками речного русла, с учетом особенностей водного режима реки. Первые итоги этой работы и излагаются ниже.

### ***О возможности сопоставления съемок рек для суждения о русловых деформациях***

В первом разделе уже пояснялись причины, по которым данные по отдельным, редко расположенным створам не могут считаться показательными для суждения об общих деформациях на участках большого протяжения.

Все эти соображения и заставляют для суждения о преобладающей тенденции в развитии русловых процессов на участках большого протяжения прибегнуть к сопоставлению съемок речного русла разных лет.

Для того чтобы оценить возможность использования этих съемок в указанных целях, прежде всего необходимо рассмотреть вопрос о том, как влияют на русло внутригодовые колебания стока.

Очевидно, что для рек с неустойчивым руслом внутригодовые изменения отметок дна (размывы или намывы), вызванные неравномерностью внутригодового распределения стока данного года, могут значительно превышать изменения, обусловленные факторами, ведущими к односторонним изменениям русла в многолетнем разрезе. Как известно, перекатные и

плесовые участки русла ведут себя в период половодья различно, и изменения их высотного положения могут достигать за период половодья 2-3 м и более.

На этом основании можно было бы предположить, что разница в отметках дна на продольных профилях двух сравниваемых лет съемки, разделенных значительным промежутком времени, может быть обусловлена не наличием многолетней односторонней тенденции деформаций, а только работой половодья в период между съемками.

При решении этого вопроса необходимо иметь в виду следующие обстоятельства.

Эффект от размывов или намывов русла в период половодья уже к началу межени обычно сглаживается, и поэтому при отсутствии ясно выраженной односторонней тенденции деформаций отметки среднего дна в межень различных лет разнятся несущественно.<sup>1</sup>

Поскольку русловые съемки обычно выполняются в межень, то можно полагать, что сопоставление их правомерно и может объективно показать наличие односторонней многолетней тенденции.

Можно считать, что объективность таких показаний еще увеличивается, если сопоставление проводить по сглаженным (осредненным) линиям дна, поскольку при этом нивелируются случайные отклонения в отдельных створах.

Для рек с очень неустойчивым руслом и ясно выраженной циклическостью в ходе водности, например, р. Урал [Гришанин, 1952], т. е. для рек, на которых создаются аналогичные многолетние циклы изменения высотного положения дна даже на участках большого протяжения, годы съемок не должны выходить за пределы двух смежных циклов. Следовательно, возможность сопоставления профилей должна быть установлена в каждом отдельном случае на основе анализа изменений водности от года к году и определения таким путем соответствия периода между съемками продолжительности периода двух смежных циклов водности.

---

<sup>1</sup>На устойчивость в многолетнем разрезе средних по участкам глубин русла указывали еще В. М. Лохтин и В. Г. Клейбер [Лохтин, 1948, Клейбер, 1948]. В 1948 г. И. А. Логинов, работавший под руководством автора настоящей статьи, произвел сличение продольных профилей р. Оки по съемкам 1879 и 1937 гг. и установил, что средние глубины на фарватере по бесприточным участкам сохранились неизменными, несмотря на существенные переформирования очертаний продольного профиля.

Для оценки правомерности сопоставления продольных профилей разных лет необходимо еще рассмотреть, достаточна ли точность промеров, выполняющихся при составлении карты речного русла даже в самом крупном масштабе, для того чтобы уловить основные тенденции в русловых деформациях.

Сопоставление промеров разных лет способно обеспечить возможность оценки изменения глубин с точностью, по видимому, порядка 10-16 % в лучшем случае уже по одному тому, что при каждой съемке местоположение промерных точек практически никогда не совпадает.

Однако возможность сопоставления съемок разных лет может быть обоснована следующими соображениями.

Деформации, при которых снижение или повышение отметок дна составляет незначительные величины, представляют преимущественно теоретический интерес, и практически такие реки относятся к категории устойчивых, для которых проблема установления явления намыва или размыва несущественна.

Кроме того, как будет показано ниже, даже при наличии общих весьма незначительных деформаций (в пределах сантиметров) за многолетний период, внутри этих участков могут наблюдаться существенные деформации разных знаков, которые представляют самостоятельный интерес и могут быть оценены благодаря их значительности путем сопоставления профилей разных лет съемки.

Несовпадение промерных точек разных лет съемки также не должно оказывать существенного влияния на возможность сопоставления по этим данным глубин, поскольку для анализа используются сглаженные линии дна (осредненные по длине реки) и само сопоставление ведется по участкам значительного протяжения. Таким образом, если в этом случае обнаруживается общая тенденция на участке длиной, по крайней мере, в несколько километров, то, очевидно, что она не может быть обусловлена только неточностью промерных работ и, следовательно, качественный анализ съемок в этом случае вполне правомерен.

Кроме того, не следует упускать из вида, что, например, на судходных картах изобаты и линия фарватера проводятся не по продольному промеру, а на основании частых поперечных промеров русла. Применение аэрофотоснимков в качестве картографической основы, практикующееся уже давно, позволяет еще более повысить точность промерных работ. На аэрофотоснимках часто линия фарватера прослеживается достаточ-

но отчетливо, а главное имеется огромное количество местных ориентиров, позволяющих достаточно точно закрепить путем засечек местоположение отдельных промерных точек.

### *Показатели русловых деформаций*

Сопоставление русловых съемок разных лет представляет собой трудоемкую и сложную задачу, требующую, кроме картографического материала, сведений о гидрологическом режиме реки. Для осуществления такого сопоставления необходимо разработать объективные показатели русловых деформаций и целесообразные приемы работы, позволяющие оценивать деформации и в отдельных створах и на участках большого протяжения, а также анализировать различные явления, сопутствующие этим деформациям, как-то: понижения и повышения дна, расширения и сужения русла, изменения его извилистости, перемещения местоположения отдельных перекатов и т. д.

Для выбора показателей русловых деформаций применительно к задаче их оценки на основе сопоставления съемок разных лет прежде всего необходимо уточнить возможные проявления этих деформаций.

Преобладание на участке выноса размытого водой материала над его поступлением обычно связывается с явлением размыва русла, а преобладание поступления над выносом – с намывом русла [Гришанин, 1952].

Результатами размыва или намыва русла, очевидно, могут быть изменения: объемов русла, его формы, общего высотного положения русла, длины.

На больших реках зоны размыва или намыва чередуются, причем границами таких участков обычно служат местные базисы эрозии. Вследствие этого изменение уклонов на каком-либо одном участке может привести к усилению наблюдавшихся тенденций деформаций на одних участках и к ослаблению их на других. Например, увеличение уклонов на участке, на котором ранее наблюдался размыв, приведет к увеличению размеров русла, в то время как на вышележащем намываемом участке увеличение уклонов может сказаться только на ослаблении намыва и может продолжаться, хотя и замедленное, но все же уменьшение размеров русла. В равной мере на нижележащем участке при этом может произойти ослабление размыва, за счет выноса размытого водой материала с вышележащего участка, или усиление по этой же причине явлений намыва.

Таким образом, общая тенденция к размыву на участке большого протяжения может по-разному сказаться на деформациях отдельных коротких участков, и, следовательно, характер изменения объемов русла в известные периоды может не соответствовать общей тенденции деформаций. Например, при общей тенденции к размыву, т. е. к увеличению размеров русла, на некоторых участках могут продолжаться, так сказать, «остаточные» явления намыва и уменьшения размеров русла.

Для того чтобы влияние изменения уклонов сказалось на изменении размеров русла, необходимо известное время. Следовательно, если съемки, по которым производится сопоставление объемов русла, разнятся по времени на меньший период, чем это необходимо для проявления соответствующего эффекта от изменения уклонов, то это сопоставление также не сможет выявить общей тенденции деформаций. Такое положение особенно ярко проявляется в том случае, когда изменение уклонов происходит на реке, создавшей за предшествующий период своего существования определенные плановые формы русла.

Так, например, увеличение уклонов на реке со слабо извилистым руслом приведет к быстрому изменению его объемов как за счет общего углубления русла, так и, возможно, за счет усиления боковой эрозии.

Увеличение уклонов на реке с сильно извилистым руслом приведет к спрямлению его, и объемы нового русла только через известное, более длительное, чем в первом случае, время сравняются по величине с прежними, а затем превысят их, хотя за все это время и будет наблюдаться усиление эродирующей способности потока.

Поэтому для выявления тенденции деформаций оказывается необходимым анализировать не только изменение объемов, но и формы русла и его высотного положения.

Изменения формы русла связаны с характером соотношения глубинной и боковой эрозии.

Увеличение уклонов и, следовательно, явления размыва, очевидно, может вызвать усиление и глубинной и боковой эрозии.

В случае если уклоны имеют возможность увеличиваться значительно, наиболее выраженной оказывается глубинная эрозия при ослабленном эффекте боковой и, следовательно, русло начинает углубляться, вытягивая свою форму по вертикальной оси. По мере врезания русла, как указывают В. В. Ламакин [Ламакин, 1943], И. П. Герасимов и К. К. Марков [Герасимов,



Марков, 1939], материал, поступающий в русло с его склонов, затушевывает эффект глубинной эрозии, заносит дно и создавая отмостку из крупнозернистых фракций. В этом случае преобладающей оказывается боковая эрозия, при которой русло либо увеличивает свою извилистость, либо расширяется, вытягиваясь по горизонтальной оси.

При уменьшении уклонов и, следовательно, явлении намыва, очевидно, в первую очередь ослабевает глубинная эрозия, а затем боковая.

При этом резкое ослабление глубинной эрозии может относительно усилить на известный период боковую эрозию. В результате при общем повышении высотного положения русла оно получает возможность несколько расширяться, вытягиваясь по горизонтальной оси, а впоследствии при извилистом русле может сужаться, например, за счет образования кос у выпуклых берегов<sup>1</sup> при относительном усилении в связи с этим глубинной эрозии.

Из изложенного следует, что и при размыве и при намыве русла можно обнаружить одинаковые тенденции в изменении его формы. Следовательно, для определения тенденции или знака русловых деформаций необходимо исследовать не только общее изменение формы русла, но и оценить относительную интенсивность этих изменений по вертикальной и горизонтальной осям. Это покажет характер соотношения интенсивности глубинной и боковой эрозии и позволит сделать вывод о наличии явлений размыва или намыва русла.

Таким образом, выделение границ отдельных участков размыва или намыва может быть выполнено путем сопоставления взаимного хода изменений осредненных по длине реки отметок дна по линии максимальных глубин и ширин.

---

<sup>1</sup> Просмотр материалов русловых съемок и, в частности, многочисленных аэрофотосъемок показывает, что общее изменение ширин русла почти всегда происходит за счет только одного из берегов. Намыв русла часто происходит путем образования у выпуклых берегов кос, направленных вниз по течению от вершины излучины и, следовательно, при резком уменьшении ширины. Такие косы отгораживают весьма значительные участки реки, которые впоследствии, при разрастании косы, нередко превращаются в старицы. На ряде участков кос не обнаруживается, хотя по аэрофотосъемкам хорошо видны следы свежего намыва выпуклого берега. Таким образом, сам факт наличия косы свидетельствует о явлении интенсивного намыва и может служить его хорошим демаскирующим признаком.

Расширение русла происходит обычно за счет размыва вогнутого берега. При этом в зависимости от интенсивности деформаций при сужении русла могут быть явления относительного углубления русла, а при расширении – его обмеление.

Одновременное усиление боковой и глубинной эрозии, очевидно, вызовет увеличение и глубин и ширин русла, а ослабление – их уменьшение. В этом случае вывод о знаке деформаций оказывается несложным.

Также несложно сделать вывод о знаке деформаций в тех случаях, когда один вид эрозии явно преобладает над другим, так как при этом также произойдет изменение размеров сечений русла, о котором можно судить по характеру изменений ширин и глубин.

В тех же случаях, когда по данным об изменении ширин и глубин можно сделать заключение об отсутствии преобладания какого-либо из видов эрозии и противоположной тенденции в ее изменениях, размеры русла могут сохраняться прежними. При такой ситуации правомерно сделать заключение об отсутствии размыва и намыва, но общая тенденция деформаций, существующая на таком участке, оказывается неопределенной, поэтому необходимо прибегнуть к анализу изменения уровня свободной водной поверхности. Однако необходимо иметь в виду, что изменение уровня воды кроме того, что оно отражает изменение размеров и формы русла, может быть вызвано несовпадением фаз водного режима или связано с местным подпором от лимитирующих перекаатов и т. п.. Приведение уровня воды к одинаковой фазе водного режима можно осуществить путем построения кривых свободных поверхностей при равных расходах. В этом случае изменение уровня свободной водной поверхности на участках большого протяжения объективно покажет общую тенденцию деформаций, но судить о том, что при этом будет происходить на отдельных участках, как указывалось выше, нельзя, поскольку общее снижение уровня может на одних участках изменить знак деформаций, а на других – только ослабить их развитие при сохранении прежней тенденции.

Приведение уровня свободной водной поверхности к его значениям, соответствующим равным расходам, может быть осуществлено только при наличии подробных гидрометрических материалов по пунктам, достаточно часто расположенным по длине реки. При отсутствии достаточных для этого гидрометрических материалов (кривых расходов) можно считать сопоставимыми уровни, отвечающие одинаковому проценту их средней многолетней обеспеченности, при допущении пропорциональности между расходами и уровнями воды. Такая операция обычно выполняется при сопоставлении лоцманских карт,

и уровни, показанные на них, обычно приведены к значениям их 95 %-ной обеспеченности.

Определение общей тенденции деформаций для участков большого протяжения можно, как указывалось, осуществить, сопоставляя нанесенные на продольных профилях уровни свободной водной поверхности при равных расходах. Понижение их укажет на преобладание размыва, повышение – намыва. Такое сопоставление можно считать правомерным потому, что местные подпоры не смогут оказать решающего влияния на общую тенденцию изменения высотного положения уровня свободной водной поверхности на участках большого протяжения.

В качестве показателя русловых деформаций можно было бы использовать изменения длины реки, поскольку ее увеличение может свидетельствовать об уменьшении уклонов и, следовательно, об ослаблении эрозии, а уменьшение длины – об увеличении ее уклонов, т. е. о появлении тенденций к размыву.

Однако крупные изменения длин реки могут происходить и без существенного изменения уклонов на больших по протяжению участках рек, например, за счет отпадения отдельных петель. В силу этого сокращение длины оказывается еще недостаточным фактором для характеристики наблюдающихся на участке деформаций. Кроме того, и в случае отсутствия изменений длины реки остается неясным произошло ли при этом изменение уклонов и в связи с этим появление тенденции к размыву или намыву.

В отношении сопоставления объемов русла уже указывалось, что оно не во всех случаях может показать происходит ли на участке явление размыва или намыва русла, если съемки по времени их производства разнятся незначительно. Кроме того, такое сопоставление для коротких участков можно осуществить только при незначительных изменениях длин реки в их пределах. При значительных изменениях длин такой прием можно использовать только для участков большого протяжения.

### ***Выделение участков размыва и намыва русла по изменению отметок дна и ширин русла***

Возможность использования отметок дна по линии максимальных глубин в качестве показателя изменений интенсивности глубинной эрозии обосновывается тем, что в условиях равнинных меандрирующих рек, текущих в толще собственных отложений, поперечные сечения обычно бывают более или ме-

нее правильных геометрических форм. Следовательно, при отсутствии резких переломов профиля поперечного сечения изменения отметок дна по линии максимальной глубины окажут существенное влияние на изменение общих размеров или формы русла.

Использование для оценки изменения размеров и формы русла ширин правомерно только при отсутствии широких заплесков. Кроме того, следует учесть, что в некоторых случаях изменения размеров русла и его формы могут происходить без существенных изменений ширин, за счет общего расширения или сужения русла по дну.

Поэтому перед тем как приступить к анализу изменений глубин и ширин русла, необходимо при определении ширин принимать такие общие высотные плоскости (горизонталы), которые бы исключали участки обширных отмелей, а при отсутствии изменений ширин и максимальных глубин во времени дополнить анализ изучением средних глубин по принципам, изложенным ниже.

Итак, при сопоставлении отметок дна по линии максимальных глубин и ширин могут быть следующие комбинации в их соотношениях.

Обозначим отметки дна по линии максимальных глубин первоначального (прежнего) положения русла  $H$ , последующего –  $H'$ , а ширину русла соответственно через  $B$  и  $B'$ .

Случай 1. Глубина и ширина русла сохраняются прежними, т. е.  $H'=H$  и  $B'=B$ . В этом случае либо деформаций русла не происходит, либо при увеличении средней глубины имеется явление размыва, а при ее уменьшении – явление намыва, что и требует анализа изменения средних глубин на таком участке.

Случай 2. Тенденция в изменении глубин и ширин одинаковая. При этом могут быть следующие соотношения в их изменениях во времени  $H'>H$ ,  $B'>B$  и  $H'<H$  и  $B'<B$ :

а) на участке отмечается увеличение глубин и ширин ( $H'>H$ ,  $B'>B$ ). В этом случае можно утверждать об общем увеличении размеров русла, следовательно, о явлении размыва;

б) при общем уменьшении ширин и глубин ( $H'<H$  и  $B'<B$ ) можно утверждать об уменьшении размеров русла, т. е. о наличии явлений намыва.

Случай 3. Тенденция в изменении глубин и ширин разная ( $H'<H$  и  $B'>B$  и  $H'>H$  и  $B'<B$ ).

В этом случае надежный вывод о явлении размыва или намыва может быть сделан только на основе выяснения, в какой мере на изменении размеров русла сказались изменения глубин и ширин. Действительно, наличие, например, одновременно происходящих явлений углубления русла и его сужения не дает оснований сделать вывод о том, происходит ли явление намыва или размыва русла, без определения интенсивности глубинной и боковой эрозии.

Интенсивность отдельных видов эрозии можно оценить, вычислив по бесприточным участкам средние величины отклонений максимальных глубин между съемками сравниваемых лет и средние величины отклонений ширин между съемками этих же лет и затем сопоставив изменения ширин и глубин с полученной таким путем нормой их отклонений.

Величина отклонений максимальных глубин будет равна  $H'-H=h'$ , отклонений ширин  $B'-B=b'$ . Норма отклонений максимальных глубин определится как  $\Sigma h_i l_i / \Sigma l_i = \bar{h}$  и  $\Sigma b_i l_i / \Sigma l_i = \bar{b}$ , где  $l_i$  – длина участка с одинаковыми по величине отклонениями.

Можно, сопоставляя  $b$  и  $\bar{b}$ ,  $h$  и  $\bar{h}$ , выделить участки с разным характером соотношений:

$$\frac{\bar{b}-b}{\bar{b}} = \mp \Delta_1, \quad \frac{\bar{h}-h}{\bar{h}} = \mp \Delta_2, \quad \text{где } \Delta_1 > 0 \text{ и } \Delta_2 > 0.$$

Очевидно, что если на участке наблюдаются значительные отклонения величин расширения (сужения) русла от их нормы, то можно, утверждать, что плановые деформации русла на этом участке оказываются усиленными или ослабленными по сравнению с нормой. Сопоставляя полученные данные с наблюдающимися на участке тенденциями в отклонении изменений высотного положения дна от их «нормы», установленной аналогичным путем, можно прийти к заключению о преобладании явлений изменения ширин или глубин русла и сделать вывод о наличии явлений размыва или намыва русла. При условии различной тенденции в изменении ширин и глубин комбинации в соотношениях  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  могут быть следующими.

При уменьшении глубин и увеличении ширин ( $H' < H$  и  $B' > B$ ):

а)  $\Delta_1 = \Delta_2$  – размеры русла сохраняются прежними, хотя форма его и меняется, следовательно, явление намыва или размыва русла в целом на участке отсутствует;

б)  $\Delta b > \Delta z$  – расширение русла преобладает над уменьшением глубин, следовательно, происходит размыв русла за счет увеличения его ширины;

в)  $\Delta b < \Delta z$  – повышение дна русла идет интенсивнее, чем его расширение, следовательно, наблюдается явление намыва русла.

При увеличении глубин русла и уменьшении ширины  $H' > H$  и  $B' < B$ :

г)  $\Delta b = \Delta z$  – размеры русла сохраняются прежними при изменении его формы и, следовательно, намыв или размыв русла в целом на участке не наблюдается;

д)  $\Delta b > \Delta z$  – сужение русла преобладает над понижением его дна,

следовательно, можно констатировать явление намыва за счет сужения русла;

е)  $\Delta b < \Delta z$  – понижение дна русла преобладает над его сужением, следовательно, происходит размыв русла.

Все рассмотренные выше комбинации в соотношениях изменений ширины и глубины русла для удобства анализа продольных профилей и графика ширины сведены в табл. 1. Из таблицы следует, что только в двух случаях из девяти рассмотренных знак деформаций, устанавливаемый по изменению максимальных глубин, может быть определен неверно. Это случаи Зб и Зд, когда изменения глубин по сравнению с преобладающей на реке их величиной не позволяют установить, происходит ли явление намыва или размыва русла.

Суждение о намыве или размыве русла и сопутствующих им изменениях в форме русла можно получить на основе сопоставления совмещенных продольных профилей русла, построенных по сглаженным линиям средних и максимальных глубин. Оно основывается на изучении соотношений между средними и максимальными глубинами двух положений русла в одном и том же створе, при условии их высотной увязки.

Представим себе возможные комбинации соотношений этих величин и факторы, способные привести к тем или иным из этих соотношений.

Обозначим среднюю глубину живого сечения прежнего положения русла  $H_{cp}$  и соответствующую ей максимальную глубину  $H_m$ . Среднюю глубину при новом положении русла обозначим  $H'_{cp}$ , максимальную  $H'_m$ .

Табл. 1. Комбинации в соотношениях изменений ширины и глубины русла

№ п/п	Комбинации взаимного хода ширины русла (I, B), максимальных глубин (II, H) при прежнем (— H, B) и новом (--- H, B) положениях; глубины отложены вниз			Характеристика деформаций
	Изображение на графиках совмещенных профилей и графике ширины	Изменение максимальных глубин и ширины русла	Соотношение отклонений ширины $\Delta b$ и глубины $\Delta z$ от нормы их изменений по бесприточным участкам	
1		$B' = B; H' = H$	$\Delta b = 0; \Delta z = 0$	Деформаций нет, если средние глубины устойчивы; размыв – если они увеличились; намыв – если уменьшились
2а		$B' > B; H' > H$	Определения не требуется	Размыв при общем увеличении размеров русла
2б		$B' < B; H' < H$	То же	Намыв при общем уменьшении размеров русла
3а		$B' > B; H' < H$	$\Delta b = \Delta z$	Намыв русла или размыв не наблюдается; по форме русло изменяется за счет его расширения и повышения дна
3б		То же	$\Delta b > \Delta z$	Размыв при преобладании расширения русла над уменьшением глубины
3в		То же	$\Delta b < \Delta z$	Намыв при преобладании повышения дна над расширением русла
3г		$B' < B; H' > H$	$\Delta b = \Delta z$	Намыва или размыва русла не наблюдается, но происходит изменение формы русла за счет его углубления при сужении
3д		То же	$\Delta b > \Delta z$	Намыв при преобладании сужения русла над его углублением
3е		То же	$\Delta b < \Delta z$	Размыв при преобладании углубления русла над его сужением

Очевидно, что возможны следующие комбинации этих величин.

1. Сохранение при новом положении русла величин средней и максимальной глубин. Этот случай можно выразить так:

$$H'_{cp} = H_{cp}, H'_m = H_m, H'_{cp}/H'_m = H_{cp}/H_m. \quad (1)$$

Сохранение величин средних и максимальных глубин при новом положении русла свидетельствует об отсутствии деформаций.

Можно было бы предположить, что деформации русла в этом случае могли бы происходить за счет увеличения или уменьшения извилистости. Однако, как уже указывалось, в связи с тем, что изменения извилистости повлекут за собой изменения уклонов и, следовательно, скоростей течения, трудно рассчитывать, что русло при этом сохранит прежние размеры. Таким образом, случай этот может свидетельствовать и об отсутствии существенных изменений в извилистости реки.

2. Увеличение средних и максимальных глубин, т. е. случай, когда  $H'_{cp} > H_{cp}$ ,  $H'_m > H_m$ .

Если увеличение максимальных глубин может происходить только за счет понижения или повышения дна, то средняя глубина может изменяться и за счет приобретения руслом новой формы при разных соотношениях изменений ее по вертикальной и горизонтальной осям.

В случае, когда увеличение средней глубины оказывается меньшим, чем увеличение максимальной глубины

$$H'_{cp}/H'_m < H_{cp}/H_m. \quad (2a)$$

то можно заключить, что средняя глубина увеличилась под преобладающим воздействием углубления русла и, следовательно, произошел размыв.

Если средняя и максимальная глубины увеличились на одну и ту же величину

$$H'_{cp}/H'_m = H_{cp}/H_m, \quad (2б)$$

то, очевидно, что на увеличение средней глубины, кроме углубления русла, оказали влияние добавочные факторы, которыми могут быть либо некоторое его сужение, не приведшее к уменьшению глубин, либо увеличение ширины по дну. В этом случае можно вывести заключение об устойчивости размеров русла при его сужении и о размыве при постоянстве ширины или при их увеличении.

Наконец, если увеличение средних глубин оказалось большим, чем увеличение максимальных,



$$H'_{cp}/H'_{m} > H_{cp}/H_{m} , \quad (2в)$$

то вывод также может быть двояким, поскольку средняя глубина могла уменьшиться и под влиянием расширения русла и, следовательно, размыва, и под влиянием значительного сужения русла, приведшего к уменьшению ее, и, следовательно, намыва. Для получения определенного вывода в этом случае требуется проанализировать изменения ширин.

3. Рассмотрим возможные соотношения в изменении средних и максимальных глубин при условии их общего уменьшения, т. е. при условии  $H'_{cp} < H_{cp}$ ,  $H'_{m} < H_{m}$ .

При этих условиях, так же как и при общей тенденции увеличения средних и максимальных глубин, могут быть следующие случаи.

Уменьшение средней глубины оказывается меньшим, чем уменьшение максимальной:

$$H'_{cp}/H'_{m} < H_{cp}/H_{m} \quad (3а)$$

Такое соотношение могло осуществиться только за счет преобладающего влияния на размеры русла подъема дна и, следовательно, имеет место явление намыва.

Уменьшение средних и максимальных глубин на одну и ту же величину, т. е.

$$H'_{cp}/H'_{m} = H_{cp}/H_{m} \quad (3б)$$

Случай показывает, что наряду с существенным влиянием на среднюю глубину подъема дна имеет место либо несущественное расширение, оказавшееся недостаточным для ее большого изменения, либо такое же небольшое сужение, т. е. можно сделать заключение об устойчивости размеров русла при увеличении ширин и о намыве при их сужении или постоянстве.

Уменьшение средних глубин на величину большую, чем уменьшение максимальных:

$$H'_{cp}/H'_{m} > H_{cp}/H_{m} \quad (3в)$$

Резкое уменьшение средней глубины может быть обусловлено либо значительным расширением русла (размыва), о чем указывает небольшое уменьшение максимальной глубины, либо весьма значительное сужение русла (намыв). Для окончательного вывода, так же как и в случае 2в, требуется анализ изменения ширин.

4. Наконец, могут быть случаи, когда тенденция изменения средних и максимальных глубин различна.

При этом могут быть положения, при которых  $H' > H_{cp}$  и  $H'_{m} < H_{m}$ , следовательно,

$$H'_{cp}/H'_m > H_{cp}/H_m \quad (4a)$$

и  $H'_{cp} < H_{cp}$  и  $H'_m > H_m$ , следовательно,

$$H'_{cp}/H'_m < H_{cp}/H_m \quad (4б)$$

Оба эти случая требуют анализа изменения ширины.

Если при анализе оказывается, что ширина русла не изменилась или увеличилась, то резкое увеличение средних глубин могло произойти только за счет общего увеличения ширины реки по дну или всего сечения и, следовательно, наблюдается размыв. При сужении русла правомерно утверждать о явлении намыва (средняя глубина увеличилась под преобладающим воздействием уменьшения ширины). В равной мере резкое уменьшение средней глубины может соответствовать явлению намыва при наличии сужения русла или устойчивом положении ширины или размыву при расширении русла.

Приведенные выше соображения об анализе совместного хода средних и максимальных глубин могут представить преимущественно теоретический интерес, иллюстрирующий разнообразие возможных соотношений средних и максимальных глубин при разных соотношениях изменения формы поперечного сечения.

Практически же для определения зон намыва и размыва пользоваться таким способом не целесообразно, поскольку по своей трудоемкости эта работа мало отличается от сопоставления объемов русла и может быть выполнена более уверенно на основе совместного анализа максимальных глубин и ширины только в случае отсутствия их изменений, требующего дополнительного анализа средних глубин.

Такова общая принципиальная схема анализа русловых деформаций и сопутствующих им изменений соотношений морфометрических характеристик русла для участков большого протяжения, основанного на сопоставлении крупномасштабных съемок русла разных лет.

Можно было бы оспаривать правомерность таких выводов для отдельных створов, в которых деформации русла в силу особенностей местных условий могут изменять форму его поперечного сечения отлично от представленной выше схемы. Но если такие выводы делаются на основе осредненных по длине реки линий максимальных и средних ширины и глубины и при этом достаточно четко выраженная тенденция в соотношении их взаимного хода обнаруживается на участках значительного

протяжения, то сомневаться в правомерности полученных таким образом выводов нет оснований.

### ***Результаты сопоставления морфометрических характеристик русла р. Куры***

С целью проверки полученных выше выводов был произведен опыт сопоставления морфометрических характеристик русла р. Куры ниже Мингечаура.

Изменения длин русла характеризуются следующими цифрами: от 1914 к 1935 г. река удлинилась на 12 км, а от 1935 к 1947 г. сократилась на 53 км. Для обеспечения сравнимости длин участков в их концевых частях были выбраны надежные устойчивые ориентиры (в данном случае ж.-д. мосты, водокачки и т. п.). Подробный анализ изменения длины реки приведен в статье С. И. Пиньковского [Пиньковский, 1954].

Совмещение продольных профилей разных лет практически осуществилось следующим образом.

Первоначально был построен продольный профиль 1948 г. как наиболее полный и надежный. Затем на съемку 1935 г., по местным устойчивым ориентирам (в данном случае они встречались через каждые 7-10 км), был перенесен километраж 1947 г. При таком нанесении спрямившиеся участки выпали (длина реки сократилась). Глубины отбирались по их наибольшему в поперечных сечениях значениям (по линии фарватера).

Одновременно были построены графики ширин и объемов русла.

Продольные профили, построенные по линиям максимальных глубин, были сглажены по методу скользящей средней, исходя из того, что такой способ осреднения наиболее близко отражает взаимосвязь между отдельными элементами русла.

Интервал при сглаживании принимался равным 10 км, это обеспечивало наличие 35-40 промерных точек внутри каждого из них. Интервал для сдвига был принят равным 1 км.

Осредненные линии дна, полученные по максимальным и средним в сечениях глубинам, были нанесены на совмещенные профили. Таким образом, оказалось возможным проследить изменения во времени по длине реки наибольших и средних в сечениях глубин по фарватеру в отдельных створах, ход сглаженных по длине реки максимальных и средних в сечениях глубин, ход ширин русла и его объемов.

Обработанные такими приемами материалы были проанализированы на основе изложенных выше положений о методике получения по натурным данным выводов о направлении и характере деформаций речного русла.

### *О деформациях русла р. Куры*

В целом между 1935 и 1947 гг. на участке р. Куры от устья до с. Варвары (Мингечаур) деформации русла оказываются выраженными достаточно отчетливо. Определение зон намыва и размыва было выполнено на основе сопоставления взаимного хода изменений во времени отметок дна по линии максимальных глубин и ширин, с контролем по ходу средних глубин, в тех случаях, когда определение знака деформаций оказывалось затруднительным (совпадение малых отклонений максимальных глубин и ширин русла).

Данные, полученные по совмещенным кривым изменения объемов русла по длине реки, показали хорошее совпадение границ зон с различным знаком деформаций с данными, полученными указанным выше способом.

Распределение зон намыва и размыва по длине реки представлено в табл. 2.

Таблица 2. Распределение участков размыва и намыва по длине реки

Длина участков с явлениями размыва, км	44	41	11	70	89	34	61	12	361	
Длина участков с явлениями намыва, км	4	18	93	30	24	4	21	194		
Километраж от устья	0	44	89	118	281	400	424	457	522	555

Как следует из таблицы, длина намываемых участков составляет 35 % от общей длины, размываемых – 65 %, при этом отмечается чередование зон с различным знаком деформаций.

Из графика (рис. 1) следует, что внутри участков с общей тенденцией размыва или намыва наблюдаются различно направленные сопутствующие этим общим деформациям (намыву и размыву) явления изменения формы русла.

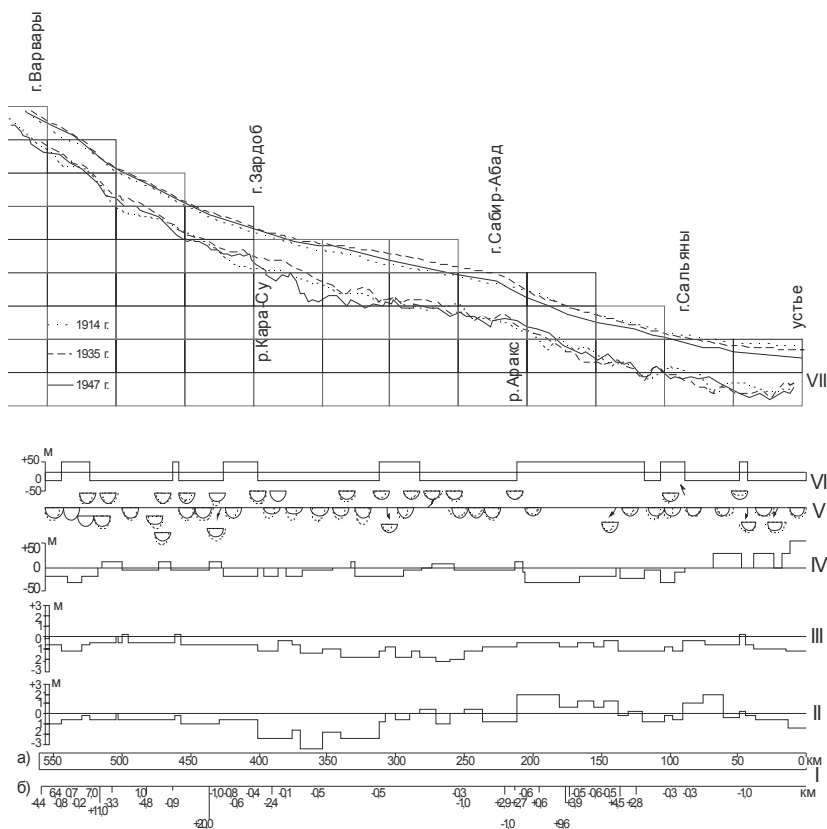


Рис. 1. Изменение основных морфометрических характеристик русла р. Куры за период от 1935 до 1947 г.

I. а) — длина реки по съемке 1947 г., б) — длина реки по съемке 1935 г., приведенная к длинам реки 1947 г. Ответвления черной толстой линии показывают местоположение и длину отпавших петель, перерывы — участки, на которых произошло удлинение русла. Цифрами показана длина отпавших петель и удлинений русла в км.

II. Отклонения линии максимальных глубин на профиле 1947 г. от положения в 1935 г.: (+) - уменьшение, (-) - увеличение максимальных глубин (м).

III. Отклонения линии средних глубин на профиле 1947 г. от положения 1935 г.

IV. Отклонения ширины русла 1947 г. по отношению к 1935 г.: (+) — расширение, (-) - сужение русла (м).

V. Характер деформаций поперечного профиля русла — 1935 г. - - - 1947 г.

VI. Участки размыва (-) и намыва (+) русла. VII. Совмещенный продольный профиль реки 1914, 1935 и 1947 гг., построенный по средним по длине реки максимальным глубинам 1914, 1935 и 1947 годов

Таким образом, внутри общих участков намыва или размыва оказывается возможным выделить более короткие участки, отличающиеся и по величине, и по направлению изменения высотного положения дна, и по различно направленным плановым деформациям русла. В рассматриваемом случае длины таких участков колебались от нескольких километров до 15-20 км и только в одном случае составили 67 км (участок ниже устья р. Аракса), с явной тенденцией к сужению русла и повышению отметок дна (см. рис. 1).

Участки, на которых наблюдается понижение дна (общая их длина 401 км), явно преобладают над участками с повышением дна (общая длина 118 км) и с устойчивым его высотным положением (36 км), причем последние короткие и встречаются в разных местах по длине реки.

Явление понижения дна русла наблюдается преимущественно на первых 60 км от устья (снижение от 0,3 до 1,4 м), между 89 и 119 км (0,5-0,7 м) и на воем протяжении выше 300 км от устья. Между 289 и 399 км снижение дна составляет от 1,8 до 3,5 м, выше – порядка 0,5-0,6 м и до 1,0 м.

Повышения дна в основном сосредоточены между 60 и 89 км (1,2-2,0 м), 120 и 210 км от устья, т. е. ниже впадения р. Аракса (повышение в верхней части этого участка до 1,8 м, в нижней – 0,3 м).

Между 210 и 289 км от устья отмечается чередование коротких (по 8–10 км) участков подъема и понижения дна с величинами изменений высот от 0,3 до 1 м.

В отношении изменения во времени ширины наиболее устойчивое русло обнаруживается лишь на коротких участках.

Наиболее длинный участок с устойчивым ходом изменений ширины во времени расположен между 69 и 89 км от устья (длина 20 км). Длины остальных участков колеблются от нескольких километров до 10-12 км.

К относительно устойчивым по ширине можно отнести также участки между 211 и 293 км от устья, где расширения и сужения русла не превышают 5 м.

Общая длина участков с устойчивыми во времени глубинами составляет 92 км.

Явления расширения русла отмечаются на участках общим протяжением около 110 км и в основном сосредоточены между 69 км и устьем, где они достигают 30-50 м и чередуются с участками, почти не изменившимися с 1935 к 1947 г. своих ши-

рин. На всем остальном протяжении явление расширения русла во времени имеет место только на коротких участках, причем обычно составляет около 20-25 м.

Сужения русла (интенсивный намыв выпуклых берегов) явно преобладают над всеми другими видами плановых деформаций. Общая длина участков сужений составляет 343 км.

Наибольшие сужения отмечаются на участках между 89 и 204 км от устья (до 30 м). На всем остальном протяжении реки сужения не превышают 10-15 м, лишь на коротком участке (между 529 и 539 км) достигая 25 м.

В отношении комбинаций в соотношении высотных и плановых деформаций русла также можно отметить, что за период 1935-1947 гг. зона наибольших подъемов дна совпадает с участками наибольших сужений русла и расположена в основном ниже устья р. Аракса (137-210 км). Зона наибольших понижений дна совпадает с зоной незначительных изменений ширины или небольших (5-15 м) сужений русла (311-399 км от устья).

Зона наибольших расширений русла соответствует зоне небольших понижений высотного положения дна (участок длиной около 48 км от устья) и только на коротком участке (от 48 до 60 км от устья) соответствует значительным повышением дна (до 2,0 м).

Такое соотношение зон изменений высотного положения дна и ширины русла показывает, что на р. Куре соотношения между боковой и глубинной эрозией на разных участках различны.

Если на участке ниже устья р. Аракса, между 137 и 210 км, отмечается ослабление и глубинной и боковой эрозии, то в низовьях реки явно преобладает боковая эрозия, ведущая к расширению русла, а в верхнем участке (выше 311 км от устья) – глубинная.

Приведенные выше данные характеризуют русловые деформации только за период 1935-1947 гг. Поэтому представляет интерес рассмотреть также вопрос о том, в какой мере обнаруженные тенденции деформаций устойчивы во времени.

В этих целях были проанализированы совмещенные продольные профили за большой ряд наблюдений, а именно за 1914–1947 гг.

К сожалению, из-за отсутствия материалов съемки 1914 г. пришлось ограничиться рассмотрением только имевшегося в нашем распоряжении продольного профиля.

В связи с этим надежные выводы можно было сделать только об изменениях высотного положения дна, а о зонах намыва или размыва судить с известным приближением, определяя их для случаев больших расхождений в ходе высотного положения дна.

За период от 1914 к 1935 г. общая картина высотных деформаций выглядела следующим образом.

Устьевой участок реки протяжением около 18 км характеризовался повышением дна.

Участок 18-309 км от устья характеризовался частым чередованием участков, на которых наблюдалось повышение и понижение дна (16 участков).

На протяжении реки от 309 до 451 км шло повышение дна. Между 451 и 463 км от устья располагался короткий (12 км) участок с понижением дна, а выше, до г. Мингечаура, вновь тянулся сплошной участок с повышением дна.

Вместе с тем мы видели, что за период от 1935 к 1947 г. на приустьевом участке русло стало понижаться, и это явление распространилось на 44 км вверх по течению.

Все последующие, до 210 км от устья, участки, характерные чередованием повышения и понижения дна, приобрели общую тенденцию к повышению русла. Характер высотных деформаций между 210 и 309 км сохранился прежним – чередование коротких участков повышения и понижения дна. Существовавший к 1935 г. между 309 и 451 км от устья большой участок с подъемом дна изменил знак высотных деформаций на обратный – здесь к 1947 г. преобладало понижение дна. Участок понижения дна, располагавшийся между 451 и 463 км, слился по направлению деформаций с нижележащим и таким образом сохранил знак высотных деформаций.

Подъемы дна, наблюдавшиеся к 1935 г. между 463 и 555 км от устья, к 1947 г. сменились его понижением. Участки, сохранявшие тенденцию изменения высотного положения дна от 1914 к 1947 г., как правило, короткие (3-10 км) и только в одном случае имеют длину 26 км. Общая их длина 113 км при длине (всего исследуемого участка 555 км, или около 21%). Перечень этих участков приведен в табл. 3.



Табл. 3. Перечень участков р.Куры, сохранивших тенденцию высотных деформаций в период 1914-1947 гг.

Километраж от устья	Длина участка, км	Направление деформаций
18-44	21	Понижение дна
48-58	10	»
60—66	6	Повышение дна
89-104	15	Понижение дна
157-144	7	Повышение дна
181—194	13	»
203-210	7	»
227—230	3	»
236—242	6	»
260-263	3	Понижение дна
288—295	7	»
451—461	10	»

В отношении сохранения явления намыва или размыва с уверенностью можно сказать только по 2 коротким участкам – 181-194 и 203-209 км от устья. Однако по незначительности расхождений линий дна на совмещенных профилях нет оснований предполагать о возможности изменения полученной тенденции деформаций также для следующих участков: 120-138, 165-177, 210-248, 262-272, 294-311, 427-465 и 504-523 км от устья, т. е. на общем протяжении в 152 км. Добавив к ним длину упомянутых выше двух участков, получим общую длину реки, в пределах которой можно считать, что знак деформаций не изменился, равной 171 км, или около 31% от общей длины рассматриваемого участка р. Куры (555 км).

Совмещенные продольные профили 1914, 1935 и 1947 гг. позволяют выявить участки, наиболее и наименее подверженные деформациям, по крайней мере, в отношении изменений высотного положения дна.

В результате сопоставления указанных продольных профилей реки оказывается, что наименьшие высотные деформации, судя по положению крайних линий дна на совмещенных профилях (преобладающие порядка 1.0 м), наблюдаются на

участках 100-309 км (длина 209 км) и 420–555 км от устья (длина 145 км).

Наибольшие высотные деформации обнаруживаются на участке между 309 и 420 км (до 5 м), т. е. на протяжении 111 км, и между 100 км и устьем (около 3 м).

Таким образом, общая длина участков со сравнительно небольшими высотными деформациями составляет 344 км, а с крупными – 211 км, причем они довольно закономерно чередуются по длине реки и наибольшие деформации падают на середину рассматриваемого участка.

Анализ совмещенных продольных профилей позволяет также обнаружить следующее.

На профилях всех трех лет, если судить по сглаженным линиям дна, хорошо прослеживается общая волнистость этих линий, т. е. чередование по длине реки участков с пониженным и повышенным дном. Отдельные пики плесов и впадины перекатов оказываются как бы нанизанными на эту пологоволнистую линию.

Таким образом, можно утверждать, что на реке, наряду с обычными, хорошо выраженными плесовыми и перекатными участками, существуют крупные «плесовые» и «перекатные» формы дна длиной в десятки километров, объединяющие собой целые серии извилин и излучин с отдельными «обычными» плесами и перекатами<sup>1</sup>, т. е. существуют выпуклые и вогнутые макроформы дна.

Можно было бы предположить, что крупные перекатные участки соответствуют зонам намыва, а плесовые – зонам размыва, которые, как указывалось выше, также чередуются по длине реки. Однако сопоставление границ этих зон с расположением макроформ дна, занимающих значительное протяжение, показывает, что зона намыва или размыва может объединять ряд таких крупных форм дна. Кроме того, наибольшая стрела прогиба таких форм на совмещенных продольных профилях разных лет съемки не совпадает. Это дает основание предполагать, что такие крупные формы дна либо перемещаются по длине реки, либо, не меняя существенно своих границ, подвергаются постепенному заносу или размыву на всем своем протяжении одно-

---

<sup>1</sup> На наличие крупных плесовых и перекатных участков, обнаруживаемых по сглаженным линиям дна, указывал еще проф. А. Д. Дубах [Дубах, 1924], считая их следами работы рек ледникового периода.

временно, до тех пор, пока вогнутая форма дна не превратится в выпуклую или выпуклая в вогнутую.

То обстоятельство, что границы зон намыва или размыва, как было показано выше, сохраняют устойчивую тенденцию только на сравнительно коротких участках р. Куры и вместе с тем охватывают ряд вогнутых и выпуклых макроформ дна, позволяет предполагать, что наиболее вероятной причиной в изменениях местоположения таких прогибов и выпуклых форм дна является их передвижение по длине реки.

Очевидно, что материалы только трех лет не могут служить достаточным доказательством наличия такого перемещения и этот вопрос еще нуждается в дополнительном исследовании, но сам факт наличия описанных макроформ важен потому, что позволяет обнаружить ряд местных базисов эрозии, существование которых обусловлено только взаимодействием потока и русла.

Приведенные выше результаты анализа русловых съемок р. Куры, очевидно, далеко не исчерпывают всех возможностей такого приема изучения русловых деформаций, однако все же позволяют сделать ряд существенных общих выводов.

Сравнительно частое чередование участков размыва и намыва (табл. 2) указывает на то, что общего знака деформаций по всему протяжению реки от г. Мингечаура до устья не обнаруживается.

Следовательно, даже наиболее интенсивное снижение общего базиса эрозии р. Куры – уровня Каспийского моря, наблюдавшееся по данным Б. Д. Зайкова [Зайков, 1946] именно в период между 1933 и 1942 г., не вызвало появления общего знака деформаций на всем протяжении реки и ясно сказывается только на первых 89 км от устья.

Такое положение не позволяет еще утверждать, что снижение базиса эрозии не могло оказать никакого воздействия на ход русловых процессов на всем участке, поскольку оно могло сказаться на интенсивности русловых процессов и без изменения знака деформации.

На этот вопрос достаточно объективный ответ дает рассмотрение линий свободной водной поверхности за 1914, 1935 и 1947 г. (рис. 1). На всем участке от устья до примерно 200 км уровни свободной водной поверхности показывают закономерное снижение к 1947 г., определяя таким образом зону влияния снижения общего базиса за период 1914-1935 гг. К 1947 г. это

влияние распространилось уже примерно до 410 км, т. е. на 210 км вверх по реке, на что показывает снижение на этом участке линии свободной водной поверхности 1947 г. по отношению к 1935 г.

Следовательно, правомерно утверждать, что в пределах существовавших на этих участках зон намыва могло быть ослабление интенсивности деформаций, а в зонах размыва – их усиление.

Причины, вызывающие появление на том или ином участке зон с разным знаком деформаций, следует, по-видимому, искать в изменениях местных базисов эрозии.

Каждая зона размыва или намыва, как указывалось выше, охватывает собой ряд крупных макроформ дна, поэтому можно предположить, что только некоторые из них могут явиться местным базисом эрозии, определяющим знак деформаций, а остальные могут сказываться только на их интенсивности без изменения этого знака. Вероятнее всего ожидать, что лимитирующей для участка большего протяжения будет такая выпуклая макроформа дна, которая расположится в точке общего перегиба профиля. При этом в ее пределах лимитирующим может оказаться всего один из перекатов.

В зависимости от характера плановых и высотных деформаций лимитирующим в одни годы может быть перекаат, расположенный в одном створе, а в иные – в другом, отстоящем от первого на десятки километров.

При такой постановке вопроса оказывается возможным объяснить и изменение знака деформаций на участке, и смещение зон размыва или намыва даже при однородных грунтах в русле и на практически бесприточных участках.

Существенная роль местных базисов эрозии заставляет обратить особое внимание на изучение изменений местных уклонов дна, которые, по-видимому, должны позволить получить значительно более подробные сведения о причинах деформаций, чем изучение изменений только одного профиля свободной водной поверхности.

Под углом зрения изложенных выше положений и была сделана попытка рассмотреть возможные причины, обусловившие тот или иной характер деформаций русла р. Куры за период с 1914 по 1947 г.

Причина преобладания явлений размыва на первых 89 км от устья очевидна – ею является снижение уровня Каспийского моря.

На следующем, выше по течению участке, расположенном между 89 и 210 км, наблюдается явление намыва. Непосредственно ниже устья р. Аракса, на протяжении 8-10 км, существует участок размыва, а отложения наносов, как указывалось, отмечаются только ниже этого участка, причем следует отметить, что высота подъема дна уменьшается от начала участка отложений (1,8 м) к его концу (0,3 м). Причиной наличия размыва на коротком участке непосредственно ниже впадения р. Аракса (219 км от устья) следует считать резкое увеличение водности р. Куры за счет вод Аракса, а уменьшение высоты подъема дна вниз по течению реки на участке намыва может свидетельствовать о существенной роли выноса наносов из р. Аракс, при котором часть наносов осаждается в русле р. Куры, а часть выносятся в море.

На явление намыва на рассматриваемом участке оказывает существенное влияние также вынос материала с вышележащего размываемого участка. Действительно, как уже указывалось при рассмотрении результатов анализа продольных профилей за 1914-1947 гг., в период между 1935 и 1947 гг. на вышележащем участке преобладал размыв, а на участке ниже р. Аракса – намыв. В период же между 1914 и 1935 гг. на верхнем участке отмечался намыв, а ниже устья р. Аракса преобладали явления размыва. Таким образом, преобладающего значения вынос наносов реки Аракс иметь не может.

Наконец, на знак деформаций всего участка ниже р. Аракса в известной мере могут влиять изменения в положении местного базиса эрозии этого участка в виде крупной перекастной макроформы дна, которая прослеживается по совмещенным профилям в 1914 г. примерно на 90-м км от устья на низких отметках, а в 1935-1947 гг. – на 110-м км, с более высокими отметками гребня.

Следует отметить, что наличие намываемого участка ниже устья р. Аракса, по-видимому, могло явиться основным препятствием для распространения влияния снижения общего базиса эрозии вверх по реке.

Такие же крупные выпуклые макроформы дна отмечаются непосредственно выше р. Аракса и на 300-325 км от устья, причем характер их изменений совпадает со знаком деформаций.

Местный базис эрозии, существующий выше устья р. Аракса, между 1935 и 1947 гг. срабатывался, и на вышеле-

жащем участке наблюдалось явление размыва; та же картина в этот период наблюдалась и в районе 300 км от устья.

В 1914 г. местный базис эрозии для участка выше р. Аракса располагался в районе 250 км и подвергался размыву. При этом выше 250 км от устья в период 1914- 1935 гг. наблюдался размыв, ниже – намыв.

Значительный интерес представляет участок 311-420 км от устья, на котором отмечается наличие наибольших по величине деформаций с переменной их знака.

Местный базис эрозии этого участка, если судить по макроформам дна, в 1914 г. существовал в районе 325 км от устья, к 1935 г. он начал значительно нарастать и на всем участке существовало хорошо выраженное явление намыва. К 1935 г. этот базис достиг максимального высотного положения и начал интенсивно срабатываться, а на вышележащем участке появился интенсивный размыв. Значительные изменения в высотном положении этого базиса эрозии объясняются тем, что он располагается в районе наибольшего общего перегиба продольного профиля реки.

Преобладание в период 1935-1947 гг. явлений размыва на всем участке выше 425 км следует отнести за счет нормальной сработки продольного профиля, так как хорошо выраженных местных базисов эрозии в 1935-1947 гг. не обнаруживается. В предшествующие годы, как это свидетельствует профиль 1914 г., они были выражены лучше и знак деформаций по длине реки менялся, причем, по-видимому, преобладали явления намыва.

Резюмируя все вышеизложенное, можно прийти к выводу о том, что влияние изменения местных базисов эрозии сказывается на русловых деформациях в значительно большей мере, чем изменения общего базиса эрозии.

Таким образом, определив тенденции в изменении высотного положения таких местных базисов эрозии и оценив интенсивность их размыва, можно предсказать, как в дальнейшем могут пойти деформации русла на отдельных участках, «контролируемых» таким местным базисом эрозии. Приведенные в настоящей статье выводы, очевидно, далеко не исчерпывают всех возможностей, предоставляемых анализом русловых съемок. Так, например, получаемые при этом анализе фактические материалы, по-видимому, способны существенно уточнить существующие представления о соотношении морфометрических характеристик русла, их связи с типами водного режима и дру-

гими природными факторами. На основании всех получаемых по съемкам материалов можно выявить также и строго количественные характеристики русловых деформаций и подкрепить ими прогноз развития русловых процессов.

Однако основной целью настоящей статьи явилось привлечь внимание гидрологов, ведущих исследования в области русловых процессов, к вопросу об использовании уже выполненных русловых съемок и показать широкие возможности такого приема исследований, имея в виду в дальнейшем заняться более глубоким анализом этих материалов.

Кроме того, даже и полученные скромные выводы, по-видимому, могут представить существенный интерес и при планировании сети наблюдательских пунктов и при размещении гидротехнических сооружений, включая такие как насосные станции, береговые дамбы, мостовые переходы, и при обеспечении судоходства на р. Куры.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Козловский Д.А. Русловые процессы и современные вертикальные движения земной коры. - Проблемы физ. геогр., т. XVI, 1951.
2. Маккавеев Н.И. Особенности формирования русла в низовьях равнинных рек. Проблемы физ. геогр., т. XVI, 1951.
3. Попов И.В. Анализ продольного профиля рек для целей крупномасштабного картирования речной сети. - Труды ГГИ, вып. 4 (58), 1948.
4. Лохтин М.В. О механизме речного русла. Сб. «Вопросы гидротехники свободных рек». - Изд. Мин. реч. флота СССР, 1948.
5. Клейбер В.Г. О дноуглубительных работах на перекатах. Сб. «Вопросы гидротехники свободных рек». - Изд. Мин. реч. флота СССР, 1948.
6. Гришанин К.В. Речной поток. - Изд. Мин. реч. флота СССР, 1952.
7. Караушев А.В. Транспорт наносов в открытых потоках. - Труды ГГИ, вып. 28 (82), 1951.
8. Ламакин В.В. Об остаточном речном и вообще об остаточных поверхностных отложениях. - Изв. АН СССР, серия геол. № 2, 1943.
9. Герасимов И. П., Марков К. К. Четвертичная геология. - М., 1939.
10. Дубах А. Д. Характеристика продольного профиля рек. - Труды I гидролог. съезда, 1924.
11. Зайков Б.Д. Водный баланс Каспийского моря в связи с причинами понижения его уровня. - Труды НИУ ГМС, сер. IV, вып. 38. Гидрометеоиздат, Л., 1946.
12. Пиньковский С.И. Изменчивость длины русла р.Куры. - Труды ГГИ, вып. 44, 1954.

## **ПРОЦЕСС МЕАНДРИРОВАНИЯ РЕЧНЫХ ИЗЛУЧИН И ЕГО ИЗУЧЕНИЕ ПРИ ПОМОЩИ АЭРОФОТОСЪЕМКИ**

### ***Постановка задачи***

Успешное решение задачи расчета и прогноза русловых деформаций в значительной мере зависит от наличия отчетливых представлений о том, как происходят переформирования русла в природе, и не только на ограниченных участках, но и на участках большого протяжения, охватывающих различные взаимодействующие формы русловых образований и различные типы речных русел. Только на такой основе возможно осуществить переход от строгих гидродинамических положений к тем природным связям и закономерностям, которые имеют место на реальных реках в природе.

Таким образом, для того чтобы разработать методы расчета и прогноза деформаций речного русла, необходимо изучение развития речных русел и отдельных их форм. Это требует обращения к натурным материалам и применения на первых порах сравнительного метода изучения, на основе сопоставления съемок разных лет.

Несмотря на очевидность этого положения, изучению истории развития речных русел в природе уделяется мало внимания, накопленные материалы натурных крупномасштабных съемок рек используются далеко не достаточно, а полевой эксперимент носит весьма ограниченный характер и приурочивается обычно лишь к отдельным створам или коротким участкам.

Учитывая эти обстоятельства, в Государственном гидрологическом институте в последние годы был проведен ряд работ по использованию уже имеющихся материалов крупномасштабных съемок рек, в том числе и аэрофотосъемок, с целью восстановления истории речных русел и получения природных связей и зависимостей, существующих между морфометрическими элементами русел и водным режимом рек, а также с целью разработки методов определения направленности русловых процессов.

Исходя из положения о том, что формы извилистости речных русел могут служить достаточными показателями развивающихся и возможных тенденций русловых деформаций, существенное внимание было уделено изучению развития плановых деформаций.



Для надежного суждения о величинах деформаций и оценки их тенденции требуется располагать систематическими крупномасштабными съемками, время производства которых должно различаться не только на десятилетия, но иногда и на века. При этом приходится считаться с неравноценной точностью современных съемок и карт прежних лет, поэтому наряду с использованием такого рода материалов следует попытаться найти приемы, позволяющие восстановить различные положения речного русла в историческом ходе его развития, т. е. за более длительное время.

Для решения этой задачи естественно было обратиться к материалам аэрофотосъемки, которая благодаря исключительной подробности изображения местной ситуации дает возможность использовать ряд косвенных признаков, позволяющих хотя бы приблизительно восстановить ход плановых деформаций русла. Такими косвенными признаками в первую очередь могут служить микрорельеф дна и склонов долины.

Возможность получения на аэрофотоснимке изображения микрорельефа обусловлена главным образом наличием тесной связи между ним и растительным покровом.



Растительный покров чутко реагирует на изменения условий увлажнения, меняя при этом свою окраску, а следовательно, и спектральные характеристики. Таким образом, в случаях, когда контраст света и тени оказывается недостаточным для фиксации микрорельефа, он устанавливается по тональности изображения растительности.

По аэрофотоснимкам (рис.1) удается не только просмотреть микрорельеф, но и увидеть значительно более наглядную и полную схему

Рис. 1. Аэрофотоснимок участка поймы



его элементов и их сочетаний, чем это бывает возможным даже при наземных наблюдениях. Это объясняется и лучшим условием обзора, обеспечиваемым аэрофотоснимком, и недостаточной реакцией глаза на изменения цвета.

Насколько четко просматривается смена растительности на пойме, свидетельствует описание А. Я. Бронзова [Бронзов, 1927].

Ясная дифференциация растительности и является, как указывалось выше, причиной того, что гряды и понижения читаются на аэрофотоснимках с исключительной четкостью (рис. 2)

Рис. 2. Аэрофотоснимок участка поймы с хорошо выраженным грядистым микро-рельефом

### *Микрорельеф поймы и его происхождение*

Для поверхности большинства пойм равнинных рек характерен свой специфический микрорельеф. Часто он представлен чередованием выгнутых в плане гряд и ложбин между ними, глубиной нередко до 2-4 м; расстояние между грядами колеблется от нескольких метров до десятка и более. В ряде случаев такой микрорельеф покрывает всю поверхность поймы, иногда же он наиболее развит в прирусловой ее части.

Часто понижения между указанными грядами заполнены водой, т. е. представляют собой образования, похожие на старицы и староречья.

Иногда характерным элементом рельефа поймы является широкий (до нескольких километров) береговой вал высотой 2-5 м.

Следует еще упомянуть о так называемых генетически чуждых [Шукин, 1934] формах в виде останцов.

Широкое распространение на пойме чередующихся изогнутых гряд и ложбин между ними, образующих своеобразные

веера, подтверждается просмотром аэрофотоснимков многих рек: Оки, Чулыма, Луги, Ордежи, Сев. Донца, Дона, Вислы, Эльбы, Припяти и др.

Факт частого наличия подобного микрорельефа поймы в пределах меандрирующих рек подтверждается и в ряде работ почвоведов и луговедов, издавна изучающих речные поймы в целях их использования под сенокосные угодья.

Микрорельеф поймы вызывает пристальное внимание этих специалистов потому, что он в значительной мере определяет собой уровень стояния грунтовых вод, процесс затопления и освобождения поймы от воды в половодье, характер отложения на ней наносов, несомых полыми водами, и, следовательно, характер почвообразовательных процессов и распространения растительных сообществ.

Сводка по этому вопросу имеется в монографии, составленной под руководством Л. И. Просолова «Почвы пойм в районе р. Волхова и оз. Ильмень» [Просолов, Соколов, 1927]. В этой сводке, предпосылаемой рассмотрению пойм Волховского бассейна, указывается, что волнистая, как бы гофрированная поверхность пойм отмечается на многих реках, в частности на р. Волге в пределах б. Васильсурского уезда (описание Левинсон-Лессинга), в б. Макарьевском уезде (отчет Фермихина) в б. Горбатовском уезде (описание Амалицкого), на р. Оке в пределах Рязанской области (Р. А. Еленевский „Окские луга“. М., 1924), на пойме Сев. Двины и Сухоны в верхнем течении (описание Шенникова), на Пинеге, Кулое, Мезени, Пезе, Вологде (исследования А. А. Красюка), на Мологе, Клязьме (исследования М. П. Григорьева), пойме Миссури (отчет Почвенного бюро США за 1916 г.), на Волхове, Ловати и др. [Просолов, Соколов, 1927]. Волнистый микрорельеф поймы отмечается В. Р. Вильямсом для Оки и Волги [Вильямс, 1919], Б. Л. Личковым – для Днепра и Припяти [Личков, 1929].

Интересную сводку строения пойм рек Западно-Сибирской низменности дает Б. В. Мизеров [Мизеров, 1953]. Он также указывает на широкое распространение гофрированной поверхности поймы, например, на многих небольших потоках р. Оби.

Относительно происхождения пойменного микрорельефа, выраженного чередованием гряд и ложбин, существует несколько точек зрения.

Вильямс утверждает, что гряды и ложбины, наблюдающиеся на пойме, имеют эоловое происхождение [Вильямс, 1919]. Таковы же, еще ранее высказанные, воззрения акад. П. А. Тутковского, приведшие его, как известно, к ошибочной мысли о пустынном происхождении Полесья.

По Вильямсу на реках с широкой поймой существуют всегда бризы. Дневной бриз, дующий от русла к склонам долины, захватывает частицы песчаных наносов, отложенных рекой на ее берегах и высохших на солнце, и переносит их вглубь поймы, где они, встречая препятствия в виде кустов и др., отлагаются, образуя дюнообразные возвышенности.

Б. Б. Полынов объясняет происхождение гребней и ложбин на пойме эрозией и считает их остаточными образованиями размытой, приподнятой прирусловой части поймы [Полынов, 1924].

В качестве доводов против эолового происхождения этого рельефа он приводит следующие обстоятельства: гряды на пойме никогда не сопровождаются холмами, косами или любыми другими начальными формами дюнообразования; они не обнаруживают зависимости в своем расположении от направления преобладающих ветров. Таких же взглядов придерживается и Личков [Личков, 1929].

К сожалению, оба указанные автора, утверждая о преимущественно эрозионном происхождении «гофрированного» микрорельефа пойм, недостаточно определенно описывают процесс его образования.

И. С. Щукин приводит по этому поводу более определенные суждения. Он указывает, что при сильном блуждании реки в пойме, «рельеф последней может приобрести очень сложный вид, слагаясь из ряда невысоких продолговатых глив и разделяющих их понижений – ложбин в виде длинных, дуговидно изогнутых линий», указывая на то, что это «петли меандр, покинутых рекой, которая проложила себе более короткий путь» [Щукин, 1934].

Еще более определенные взгляды о происхождении рассматриваемой формы пойменного микрорельефа высказывает Д. И. Никифоров [Никифоров, 1936]. Он предполагает, что гряды на пойме образуются в каждое половодье на выпуклых берегах реки.

В обоснование этого взгляда он приводит сообщение геоморфолога В. К. Хлебникова, который, изучая аэрофото-

снимки р. Чулым и производя обследование реки на месте, установил путем опроса, что «каждое весеннее половодье на р. Чулым оставляет после себя бугор на пойме, отодвигая реку в сторону вогнутого берега на ширину бугра» [Никифоров, 1936].

Наконец, следует упомянуть, что Л.С. Берг объясняет происхождение параллельных гряд на пойме тем, что в период половодья создаются три течения: одно в главном фарватере и два других в центральных частях пойм по обоим берегам. По краям этих боковых потоков наблюдаются те же явления, что и в прирусловой части главного потока (отложение наносов), в результате чего вдоль средней части поймы тянутся гряды иногда в несколько рядов. Таким образом, причиной образования микрорельефа поймы Берг считает аккумулятивно-эрозионную деятельность половодья на поверхности поймы [Берг, 1947].

Изучение рисунка микрорельефа поймы по аэрофотоснимкам позволяет значительно прояснить вопрос о происхождении дугообразно изогнутых гряд и ложбин между ними.

При изучении аэрофотоснимков поймы, прежде всего можно констатировать следующее:

а) Изогнутые веерообразно сходящиеся ряды гряд, так называемые „веера блуждания", наиболее хорошо выражены на участках рек со свободными или блуждающими меандрами, т. е. в случаях, когда извилистость русла развивается независимо от извилистости долины (несовпадение гидрографической и орографической извилистости) и река имеет возможность свободно перемещать свое русло в пределах дна долины. На значительных по протяжению прямых участках и в случаях, когда извилины русла повторяют извилины долины, рисунок веера выражен слабо.

б) Серии сходящихся гряд и ложбин между ними, всегда дугообразно изогнутых, имеют однообразную ориентировку только на ограниченных площадях. Таким образом, в пределах широкой поймы почти всегда обнаруживается несколько весьма разнообразно ориентированных систем «вееров блуждания».

На рис. 3 можно видеть большое разнообразие рисунков вееров и их расположения относительно современного русла реки.

В одних случаях гривы и ложбины веера повторяют очертания выпуклого берега, в других они ориентированы в поперечном направлении к современному руслу (наблюдаются на его прямых участках).

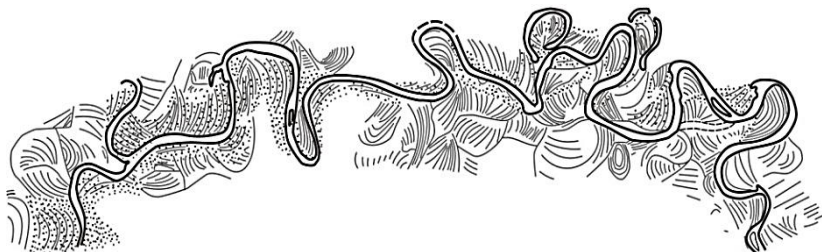


Рис. 3. Схема расположения вееров перемещения разной ориентировки для участка русла, показанного на рис. 2. Точками покрыты веера, очертания гребней которых увязываются с современным положением русла

Иногда выпуклость гряд веера обратна выпуклости современного русла. В некоторых случаях гряды образуют полностью развернутый веер и обычно площадь, занятая им, имеет округлые очертания. Нередко гряды образуют как бы два веера, соединенные вершинами. Наконец, можно обнаружить веера, находящиеся вдали от русла, и расположение их составляющих не имеет видимой связи с современной рекой. При любом рисунке веера почти всегда удастся различить его более широкую и более узкую часть.

Разнообразие ориентировки вееров в пределах даже небольшого участка поймы отвергает соображения об эоловом происхождении вееров. Кроме того, стереоскопическое изучение аэрофотоснимков устанавливает наличие хорошо развитой дернины на гребнях, что свидетельствует о малой подвижности этого образования. Нередко по гребню вееров располагаются узкой полосой развитые кустарники. Различная ориентировка вееров свидетельствует также о том, что размывы и намывы поверхности пойм в период половодья не могут иметь решающего значения для их образования и должны рассматриваться только как факторы, способные в той или иной мере деформировать веер, не приводя к существенным изменениям в общей взаимной ориентировке гребней веера, например, они могут расчленить гребни или отложить наносы в ложбинах, что часто можно видеть на аэрофотоснимках. Следовательно, наиболее вероятным является предположение о том, что «веер блуждания» образуется в результате последовательного смещения излучин и представляет собой серию отошедших от русла берего-

вых валов. Поэтому правильнее принять термин не «веер блуждания», а «веер перемещения».

При такой постановке вопроса легко объясняется дугообразная структура рисунка, наличие расширенной части веера, соответствующей центральной части выпуклого берега, и сужение, соответствующее местам перегиба русла от одной излучины к другой, а также разнообразие в ориентировке отдельных вееров.

Разнообразие ориентировки вееров перемещения может быть объяснено только одновременностью их образования. Это находит себе подтверждение в том, что веера разной ориентировки оказываются лежащими на разных высотных плоскостях по отношению к современному уровню воды в русле.

Это удастся проследить почти во всех случаях по профилям, построенным таким образом, чтобы они пересекали площади, занятые веерами перемещения, с разной ориентировкой гряд и ложбин, составляющих такой веер (рис. 4).

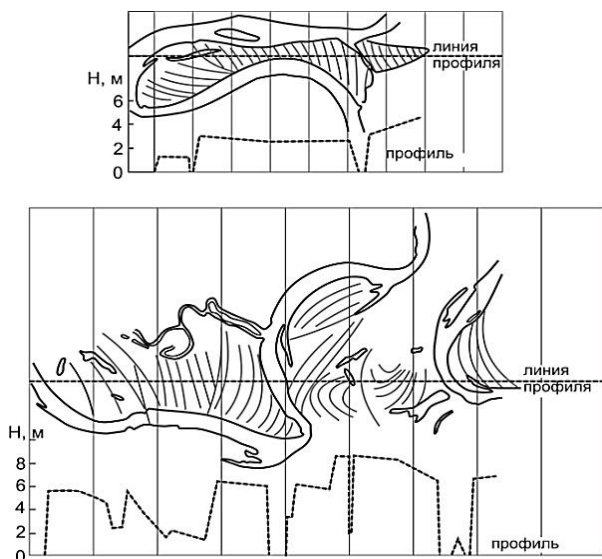


Рис. 4. Схемы участков и профилей поймы с веерами разной ориентировки

Очевидно, что веера перемещения, очертания гряд и ложбин, которые увязываются с извилинами современного русла,

будут наиболее молодыми (рис. 2). Они расположены на наиболее низких отметках.

Предшествующими или близкими к ним по времени должны быть веера, в которых изогнутость гряд обратна современной изогнутости русла. Легко проследить по аэрофотоснимкам, что русло в этом случае наступает на такой веер и разрушает его, следовательно, его образование могло осуществиться только в какие-то предыдущие стадии развития реки, в которые перемещение излучины происходило в направлении, обратном современному.

Гряды, ориентированные в поперечном к современному руслу направлении, по характеру рисунка и по своей большой высоте над современным уровнем воды в реке должны быть еще более древними. В этом случае очертания первоначальной петли или излучины, образовавшей веер этого типа, совершенно не совпадают с возможным положением петли, расположенной в его пределах, и, следовательно, излучина могла образоваться только до его формирования.

Наконец, веера, расположенные вдали от современного русла, – наиболее древние. Образование веера вдали от реки может быть не связано с деятельностью главной реки, а является результатом перемещения по пойме притоков (рис. 2). Оpoznать веер, образованный притоком, можно по меньшей крупности его рисунка.

Попутно отметим, что разновысотность вееров с различной структурой рисунка позволяет, пользуясь только аэрофотоснимками, выяснить целый ряд вопросов, хотя и не связанных непосредственно с исследованием русловых процессов, но имеющих существенное значение при решении ряда гидрологических задач большой народнохозяйственной значимости. Так, в этом случае появляется возможность оценить по рисунку веера примерное высотное положение участка поймы, занятой данным веером, и в конечном итоге оценить порядок затопления и освобождения поймы от воды в половодье, наметить распределение струй потока весенних вод по пойме, получить примерную схему высоты стояния грунтовых вод на пойме и т.д.

### ***Процесс образования береговых валов и систем вееров***

Процесс образования берегового вала можно представить себе следующим образом.

В соответствии с неоднократно описанной многими исследователями схемой образования берегового вала (Вильямс,



1919, Личков, 1929, Полюнов, 1924, Берг, 1947, Шукин, 1934 и др.), во время половодья скорости течения на пойме, вследствие мелководья и более сильного трения, обусловленного наличием травяного покрова и неровностью поверхности поймы, – меньше, чем в русле. Вследствие этого на ней происходит отложение значительной части взвешенного в потоке размытого водой материала.

У берегов русла откладывается наибольшее количество наиболее крупных наносов; по мере продвижения вглубь поймы количество и крупность наносов постепенно уменьшаются. В одних условиях это ведет к образованию общего наклона склонов поймы, в других – к формированию береговых валов.

По этому поводу уместно привести данные Бронзова [Бронзов, 1927], проводившего наблюдения над величиной наилка (слоя наносов – *И. П.*), отложенного весенним половодьем в пойме р. Мологи в 1924 г.

Согласно этим наблюдениям годовой слой наилка убывает вместе с удалением от русла следующим образом:

Расстояние от реки, м	Толщина наилка, см
12-20	6
20-25	5
25-40	3
40-70	1-2
70-90	0,7

Г. Э. Гроссэт указывает, что на гривах, возвышающихся над уровнем реки на 4 м и удаленных от нее, наблюдается наилок толщиной от 1 до 3 мм, между тем как на гривах такой же высоты в прирусловой части поймы толщина наилка колеблется от 10-30 до 6 мм [Гроссэт, 1937].

Развивающаяся вдоль берегов русла растительность, с одной стороны, закрепляет образовавшийся береговой вал, а с другой, – способствует усилению отложения на нем наносов, что ведет к более интенсивному росту вала.

Роль растительности в образовании берегового вала, по-видимому, весьма значительна, так как она располагается уже непосредственно за приплеском. По описанию Берга, заимствованному у Олехина, Бронзова и Шенникова, «на песках можно видеть чистые сплошные заросли подбела. Он обладает длинными и быстро растущими корневищами, способными проби-

ваться из-под песчаного наноса. Кроме подбела, закрепителями прирусловых песков являются полевой хвощ и ивняки, способные питаться при посредстве грибов; из ив наичаще встречается лоза; к ивам присоединяются на некотором расстоянии от реки черемуха, крушина, сибирский дерен, шиповник, черная и красная смородина, ежевика и другие. За ивняками расстилаются прирусловые луга в собственном смысле слова ... Иногда ассоциации с подбелом не бывает, и прирусловая часть сразу начинается ивняками, например, на Волхове» [Берг, 1947].

Следует отметить, что остатки ивняков на гребнях хорошо прослеживаются на аэрофотоснимках. Они нередко образуют серию полос, все более редких и коротких по мере удаления вглубь поймы.

Щукин также указывает, что образованию естественных прирусловых валов способствует растительность в виде галерейных лесов, зарослей кустарника или камышей, растущих вдоль берега узкой полосой [Щукин, 1934].

Если береговой вал формируется в результате отложений наносов в половодья, то следует ожидать, что в разрезе он будет иметь слоистое строение.

Детальное исследование морфологии валов и стратиграфии аллювиальных отложений пойм было выполнено в 1933-1935 гг. почвенным отрядом Волжско-Камской экспедиции, предпринятой совместно Почвенным, Геоморфологическим и Ботаническим институтами АН СССР.

Результаты работ Почвенного института изложены в статьях Е. А. Афанасьевой [Афанасьева, 1940], О. А. Грабовской [Грабовская, 1940] и др.

Указанные авторы констатируют широкое распространение «гривистого» рельефа пойм на исследуемых реках и приводят богатый материал по механическому составу и стратиграфии аллювиальных отложений пойм, в частности для отдельных валов и понижений между ними, давая также общую характеристику аллювия в поймах Шексны и Мологи.

В работах констатируется, что валы на пойме, особенно в прирусловой ее части, имеют ясно выраженную слоистость. Приводя фотографии разрезов и геологические профили пойм с системой береговых валов, а также отдельных валов и ложбин между ними (рис. 5, 6), авторы помещают также данные по механическому составу отдельных слоев.

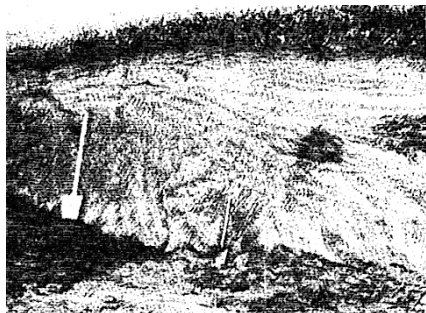


Рис. 5. Разрез берегового вала.  
Видна слоистость отложений

Вот как Афанасьева описывает структуру валов прирусловой части поймы р. Мологи: «На стенке разреза виден желто-палевый тонкий песок с темными сероватыми и коричневыми полосами, более тяжелыми по механическому составу, чем общая песчаная масса аллювия. Эти темные полосы имеют 2-4 см ширины и чередуются с песчаными палевыми полосами. Ширина светлых песчаных полос очень различна – от 1 до 15-20 см и больше. Чаще всего встречаются полосатые аллювии, у которых светлые песчаные полосы имеют ширину в 2-6 см» [Афанасьева, 1940].

Общая мощность полосатого аллювия обычно не превышает 2-3 м; наибольшей мощности он достигает около самого русла реки или в петлях стариц, вглубь поймы мощность его быстро падает.

Афанасьева предполагает, что каждый слой этого наноса не является годичным. Слои свидетельствуют только о периодических колебаниях размеров паводков р. Мологи. Иногда несколько лет подряд разливы реки не достигают больших размеров и, соответственно, отложение аллювия бывает слабое или совсем отсутствует. В такие годы поверхность наноса покрывается дерниной, и верхний слой успевает слегка обогатиться гумусом, затем наступает год большого паводка, а, следовательно, и интенсивного отложения аллювия, и тогда гумусированный слой покрывается сверху новым наносом. Афанасьева обращает внимание на то, что крупность наносов различных слоев в разрезе различна, и связывает это также с изменением высоты половодья от года к году. В годы высоких паводков откладываемые наносы обычно более крупные, чем в годы с низкими половодьями и, следовательно, меньшими скоростями течения, способными захватывать только мелкие фракции.

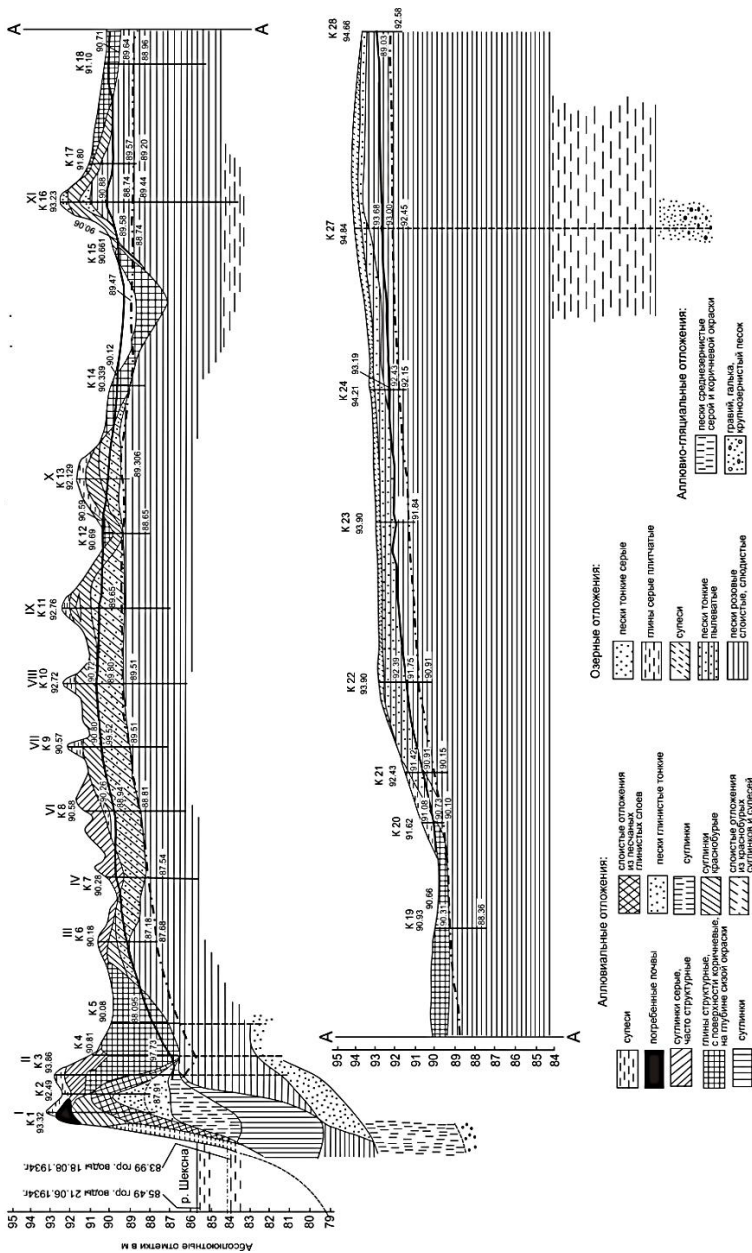


Рис.6. Поперечный геологический разрез поймы Шексны у села Покровское (по Е.А. Ансберг)

По мере отдаления от берега русла состав наносов в верхних слоях представлен все более мелкими фракциями. Отметим также и указание Афанасьевой о том, что процессы почвообразования в сфере интенсивного отложения наносов полностью или почти полностью подавляются нарастанием поверхности за счет свежих аллювиальных слоев.

Далее ею указывается, что выход вала из сферы отложения аллювия может происходить двумя путями – за счет нарастания вала в высоту и вследствие отступления реки, приводящего к отдалению вала от потока и уменьшению, в связи с этим, количества отлагающихся наносов, при этом происходит изменение механического состава грунтов в сторону увеличения глинистости.

В первом случае почвообразование прерывается лишь высокими половодьями и встречаются погребенные почвы, во втором случае даже в маловодные годы идет постепенный рост наилка и почвообразовательный процесс не прерывается. Ввиду того, что почвообразование в обоих случаях происходит при хорошем дренаже, в общем, создаются засушливые условия.

Однако в первом случае, когда отлагаются более крупные фракции, засушливость выражена сильнее. Это приводит к тому, что на участках с разным способом выхода валов из зоны интенсивных отложений образуется и различная растительность. По этому признаку Афанасьева выделяет целые участки на р. Мологе с разными видами растительности и, следовательно, с разным типом выхода валов из упомянутой зоны.

Близкое по структуре описание разреза береговых валов р. Шексны дает Грабовская [Грабовская, 1940]. Здесь также отмечается ясно выраженная полосатость в срезе берегового вала с наличием слоев мощностью от 1-3 до 20 см.

Отмечается, что толщина отложений наносов в ложбинах между валами оказывается большей в ложбинах, которые лежат ближе к руслу.

Ансберг также приводит типичный разрез берегового вала на р. Шексне (рис. 6, вал IX), свидетельствующий о наличии слоистости [Ансберг, 1937].

В работе И. С. Васильева приведен послойной механический состав грунтов, слагающих береговые валы и ложбины между ними [Васильев, 1937]. В табл. 1 он дан для наиболее типичных валов (рис. 6).

Таблица 1. Размещение и защита сооружений при различных типах руслового процесса

Глубина взятия образца, см	Механический состав, мм				
	0-0,25	0,25-0,02	0,02-0,006	0,006-0,002	<0.002
Вал III					
0-10	6,99	21,54	26,23	20,84	24,40
17-24	9,32	30,61	18,51	20,16	21,40
43-50	1,24	38,74	20,62	14,11	25,29
64-70	2,74	36,94	14,83	9,58	35,91
80-86	0,65	64,54	3,29	1,64	29,88
102-109	0,77	76,68	1,52	1,73	19,30
215-222	0,16	78,47	2,63	1,82	16,92
Вал IX					
0-5	3,66	54,11	20,60	5,56	16,07
5-15	5,87	20,08	26,10	4,89	13,06
15-25	2,17	29,43	13,60	1,60	33,20
40-50	1,78	47,02	21,60	6,40	23,20
60-70	1,34	23,86	38,40	6,40	30,00
70-80	0,90	35,50	26,40	6,20	31,00
110-120	0,03	44,97	15,40	15,20	24,40
140-150	0,06	72,39	11,20	2,40	14,00
Ложбина между валами IX и X					
0-10	1,04	29,07	25,16	15,91	22,82
15-22	2,98	21,60	27,09	22,56	25,77
22-27	5,44	23,10	25,35	21,86	24,25
35-42	3,18	17,29	22,62	24,24	31,67
66-73	1,25	60,41	9,25	5,45	23,64
160-165	0,28	75,10	5,62	2,84	16,16

Прежде всего, в этой таблице обращает на себя внимание известное увеличение числа крупных фракций (1-0,25) от подножия вала к его вершине, наблюдаемое на обоих валах. Это увеличение может быть объяснено тем, что по мере роста вала, условия осаждения наносов на его гребне ухудшаются и на нем могут отлагаться только крупные фракции. Убывание процента крупных фракций в самом верхнем слое берегового вала можно объяснить тем, что достигнутая им высота стала настолько значительна, что поток не поднимает на нее прежнего количества крупных фракций, даже при самых высоких половодьях, при

которых вал покрывается водой. Для более мелких фракций ясно выраженной тенденции к их убыванию или возрастанию может и не наблюдаться, а процентное содержание какой-либо из них может значительно меняться с глубиной в ту и другую сторону. В этом случае, по-видимому, основное влияние на распределение наносов по фракциям оказывает не столько высота вала, сколько высота половодья. Таким образом, высота вала оказывает влияние преимущественно только на распределение наиболее крупных фракций.

На характер и состав аллювия на пойме существенное влияние оказывает также характер напластования пород, прорезываемых рекой. По мере врезания поток вскрывает все новые слои пород и разнообразит тем самым состав откладываемого им аллювия. Это обстоятельство необходимо учитывать при анализе пойменных отложений.

В рассматриваемых случаях на реках Мологе и Шексне Грабовская [Грабовская, 1940] на основании изучения аллювиальных отложений восстанавливает историю развития этого бассейна примерно в следующем виде.

Долины этих рек расположены в пределах Молого-Шекснинской впадины. В начале послеледникового периода впадина представляла собой озерный бассейн. Этот бассейн вначале заполнялся грубозернистыми отложениями, а впоследствии, по мере его обмеления, все более тонкозернистым озерным аллювием. В соответствии с этим толща озерного аллювия представлена (снизу вверх): грубыми хрящеватыми песками, толщей тяжелых плитчатых суглинков и глин, тонкослоистыми слюдистыми озерно-аллювиальными глинистыми песками.

В результате спада уровня озера образовалась озерная терраса, покрытая тонкопесчаным наносом. В дальнейшем водоем стал проточным и по краям террасы возникли валы. На этом закончился первый этап развития этого бассейна.

Второй этап – окончательное формирование речной сети в озерной котловине. Реки начали размывать озерную террасу и откладывать аллювий, очень схожий с аллювием этой террасы, поскольку материал брался ими именно за счет ее размыва.

В третий этап развития начала формироваться древняя речная пойма, состав отложений которой близок к озерному аллювию. «Передвигаясь с места на место, река постепенно формировала серию высоких валов и глубоких понижений» [Грабовская, 1940]. Поскольку, как уже указывалось ранее, формирова-

ние отложений в этих понижениях-ложбинах идет несколько от-  
лично от формирования валов, то состав этих отложений оказы-  
вается уже резко отличным от отложений озерной террасы, в то  
время как в валах он еще близок к ним. Валы формировались не  
одновременно, а один за другим. «В большинстве случаев наи-  
более древними валами, обладающими наиболее древним поч-  
венным покровом, являются наиболее удаленные от современно-  
го русла реки». Поскольку пойма иногда прорывалась, то места-  
ми наиболее древние валы оказываются расположенными непо-  
средственно у берегов русла. Древнеаллювиальные речные от-  
ложения встречаются на пойме на высоте 90-93 м и лишь на  
очень высоких валах – на отметке 94-95 м абс.

Четвертый этап развития долины р. Шексны, смыкаю-  
щийся с современным, – это образование структурной тяжело-  
суглинистой гривистой поймы. В этот период врезание реки,  
по-видимому, замедлилось, скорости течения уменьшились и на  
пойме стали отлагаться только мелкозернистые фракции – гли-  
нистые и пылеватые. Эти глинистые наносы поднимаются  
только до высоты 92 м абс., что может свидетельствовать также  
об уменьшении высоты половодий.

В последнее время на пойме вновь усилилось отложение  
более крупных наносов, что заставляет предполагать о вновь  
происшедшем повышении половодий и интенсификации русло-  
вых процессов. Современный аллювий встречается только на  
ближайших к руслу 2-3 валах, до высоты 93 м абс.

Судя по высотным отметкам распространения различных  
по возрасту слоев аллювия, можно заключить, что высота ве-  
сеннего половодья уменьшилась от 95-96 м (граница распро-  
странения древнего речного аллювия) до 92 м абс. (высшая  
точка распространения структурного глинистого аллювия), т. е.  
на 3-4 м, а затем повысилась примерно на 1 м, до отметки 93 м  
абс. (граница распространения современного аллювия).

Итак, на формирование отдельных слоев валов влияет не  
один фактор, а несколько. В данном случае основными из них  
являлись: а) изменение высоты половодья, б) изменение высоты  
вала, в) характер пород, прорезываемых рекой, г) местоположе-  
ние вала по отношению к современному руслу.

Эти факторы повлияли и на мощность отдельных слоев и  
на крупность слагающих их наносов.

Изменение высоты половодий сказывается на всей по-  
верхности поймы. Высота вала имеет наибольшее значение для



валов, непосредственно окаймляющих русло, и, следовательно, местоположение вала по отношению к руслу сказывается на толщине и крупности отлагающихся на нем наносов. Наиболее удаленные от реки валы с течением времени, по мере их отдаления от русла, покрываются все более мелкими наносами и все более тонким их слоем. Характер пород, прорезаемых рекой, определяет общность основного состава наносов при данном положении базиса эрозии во всех валах (песчанистые, суглинистые, глинистые и т. д. разности).

Наращение берегового вала наиболее интенсивно происходит в тот период, когда он ежегодно покрывается паводками. По достижении такой высоты, при которой береговой вал покрывается только наиболее высокими паводками, рост его задерживается. Однако преобразование новых береговых валов и рост валов, отошедших от русла, не прекращается, но наиболее интенсивное отложение наносов идет в ложбинах между валами, в которых при разливах вода задерживается на длительное время. В силу этого мощность отложений в ложбинах может быть больше мощности отложений в валах. Приведенные выше материалы о формировании берегового вала, а также анализ строения берегов и микрорельефа dna речного русла позволяют наметить, в конечном итоге, следующую схему формирования серии параллельных валов на пойме.

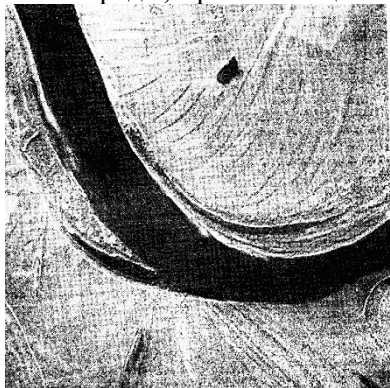
В период, когда только что начала формироваться пойма, при затоплении ее полыми водами начинает формироваться и береговой вал по схеме, изложенной выше.

По-видимому, можно согласиться с предположением Афанасьевой, упомянутым ранее, о том, что последующий береговой вал сформируется либо тогда, когда высота первого вала станет настолько значительной, что на нем будут отлагаться только мелкие наносы и поэтому рост его замедлится, либо когда поток, размывая вогнутый берег, отойдет от подножья первого вала и начнется формирование второго ряда валов.

Стереоскопический анализ крупномасштабных аэрофотоснимков рек позволяет наметить более полную схему формирования рядов валов.

По-видимому, в ряде случаев первоначальные предпосылки к образованию берегового вала могут создаваться в результате перемещения по дну реки песчаных гряд. Наличие таких гряд очень часто можно проследить по аэрофотоснимкам, на которых видно дно русла (рис. 7)

Гряды, передвигающиеся вдоль русла и расположенные у берегов, очевидно, перемещаются с неравномерной скоростью. Часть гряды, примыкающая к руслу, перемещается медленнее,



чем часть ее, обращенная к середине потока. В результате отдельные гряды получают возможность причлениться к берегу, при этом конец гряды, обращенный к середине реки, оказывается сдвинутым вниз по течению и она располагается под углом к берегу.

Рис. 7. Аэрофотоснимок русла реки. Хорошо видны причленившиеся к берегу песчаные гряды и образовавшиеся таким путем косы и старицы

В последующем начинается рост такой гряды в высоту, наиболее интенсивный у берега и меньший в части гряды, обращенной к середине реки. При дальнейшем росте гряды в высоту, наиболее высокая ее часть в межень может освобождаться от воды и зарастать, что приводит к закреплению поверхности гряды и усилению отложений наносов при последующем затоплении. В конце концов, гряда превращается в косу.

Располагаясь под углом к потоку, коса, задерживая перемещающиеся вдоль по течению гряды, растет и в длину. По аэрофотоснимкам удается проследить частые случаи, когда такая коса у выпуклого берега нижним концом соединяется с ним, отгораживая часть реки и образуя нечто вроде стариц, ширина которых, естественно, меньше ширины реки (рис. 7).

Такая коса, очевидно, создает очень благоприятные условия для формирования береговых валов. Кроме того, она способствует перемещению динамической оси потока к противоположному берегу, отжимая его струи, и усилению тем самым размыва этого берега. Таким образом, она способствует и образованию серии валов, формирующихся по мере продвижения вогнутого берега.

Аэрофотоснимки показывают, что в ряде случаев нарастание выпуклого берега идет постепенно и поэтому не должно создаваться перегиба поверхности, соответствующего гребню косы. Однако и в этом случае в прибрежной части косы созда-

ется прогиб поверхности, поскольку берег или предыдущий вал при этом играют роль теневого заслона, и при выходе воды на пойму наносы откладываются не непосредственно на склоне берега или вала, обращенном к реке, а на некотором расстоянии от них, благодаря появлению водяного вальца и выноса им наносов в направлении к середине реки. Таким образом, и в этом случае создаются предпосылки, благоприятные для образования в последующем очередного берегового вала.

Наконец, по аэрофотоснимкам можно найти такие случаи, когда на поверхности отмели появляется одновременно целый ряд небольших валов, образованных отложениями наиболее крупных наносов. В этом случае местоположение таких валиков определяется высотой стояния уровня воды, при котором образовывается каждый из них. Однако начинает интенсивно расти и превращается в береговой вал только тот из валиков, который оказывается в наиболее благоприятных условиях. Остальные замедляют после этого свой рост и отмирают.

На формирование последующего ряда валов, по-видимому, должен оказывать существенное влияние и темп продвижения линии вогнутого берега. В годы особенно высоких половодий или тогда, когда серия предыдущих половодий создает благоприятные условия для интенсивного разрушения вогнутого берега (обвала), он получает возможность интенсивно продвинуться в сторону от реки.

Поток, если при этом не произошло резких изменений уклона, стремится сохранить прежние соотношения между гидравлическими и морфометрическими характеристиками, и вслед за интенсивным продвижением вогнутого берега начнется интенсивное перемещение выпуклого берега. Эти условия, по-видимому, особенно благоприятствуют образованию широких и больших кос. На рис. 8 показана широкая коса на выпуклом берегу. Поток имеет возможность интенсивно перемещать русло, протекая по уже ранее отложенным наносам. Хорошо видна подводная коса в оконечности расположенного выше участка берега. Судя по сужению русла в районе широкой косы, река находится в состоянии аккумуляции, благодаря чему намыв косы очень интенсивный. В данном случае это усиливает темп продвижения вогнутого берега.

Косы, как указывалось, очень часто четко прослеживаются на аэрофотоснимках и обычно развиты у выпуклого берега. Ширина косы может свидетельствовать об интенсивности раз-

мыва вогнутого берега. Чем шире коса, тем интенсивнее идет размыв этого берега. Выпуклый берег как бы стремится не отстать от развития вогнутого. Такова примерная схема формирования гряд и ложбин на пойме, образующих веер перемещения русла.

Следует допустить, что в ряде случаев возможны и золотые образования гряд на пойме и образование их в результате размывов или намывов поверхности поймы. Однако эти случаи не должны иметь широкого распространения. Размывы поверхности



будут встречаться на перешейках очень крутых петель или в верховых частях выпуклого берега, где, как уже упоминалось, в половодье нередко происходит скопление масс наносов, несомых высокими водами. В этом случае гряды должны быть ориентированы вдоль направления преобладающих ветров или динамической оси потока в высокую воду. Еще раз укажем, что такая ориентировка гряд, судя по аэрофотоснимкам ряда рек, встречается редко.

Рис. 8. Широкая коса на выпуклом берегу

В некоторых случаях серий параллельных валов не бывает, хотя по профилю и можно установить значительную высоту прирусловой части поймы и ее понижение в сторону склонов долины. Этот случай можно рассматривать как случай постепенного формирования широкого берегового вала вдоль реки.

Такие валы, например, имеются на реках По, Миссисипи, Кубань и др. Правда, на рр. По и Кубани известно о наращивании вала искусственным путем с целью предотвращения затоплений. Береговые валы на р. Миссисипи имеют высоту порядка 4-6 м и ширину в несколько километров.

Формирование таких валов следует отнести, по-видимому, как за счет наличия серии высоких паводков в течение года, способствующих систематическому наращиванию валов и не оставляющих времени для формирования площадок у их подножья, так и за счет значительной подвижности грунтов и большого количества выносимых рекой наносов.

Значительная подвижность грунтов ограничивает возможность закрепления сползающих по реке гряд у берегов (быстрое сползание побочней), а также, возможно, вызывает усиление меандрирующей деятельности, и поток, быстро меняя свое положение в пределах полосы перемещения, при разливах откладывает наносы по краям этой полосы. Этот вопрос еще нуждается в дальнейшей проработке. Известное значение в этих условиях может иметь и размывающая деятельность весеннего потока в притеррасной части поймы, на что, например, указывает Б. В. Мизеров для р. Оби [Мизеров, 1953]. Им приводятся примеры пойм на отдельных участках этой реки и ее притоках, на которых благодаря отсутствию притеррасного потока в половодье центральная часть поймы имеет совершенно ровную горизонтальную поверхность с также горизонтальным отложением слоев аллювия. Не вдаваясь глубже в обсуждение вопроса о причинах формирования пойм разных типов, следует только отметить, что положение Вильямса о закономерном убывании высоты поймы от русла к склонам долины применимо далеко не во всех случаях.

Представляет интерес выяснить вопрос о связи между образованием валов на пойме и явлениями намыва или размыва русла, как возможными причинами образования того или иного типа строения рельефа поймы. Г. И. Горецкий [Горецкий, 1948] и В. В. Ламакин [Ламакин, 1948] описывают примерно следующую схему образования отложений на пойме при перемещении русла под влиянием боковой эрозии.

На дне русла всегда откладываются наиболее крупные наносы (русовая фация), у берегов – менее крупные (береговая фация) и далее, в сторону от русла, – наиболее мелкие наносы (пойменная фация).

Если река при этом перемещает свое русло от одного берега к другому, то в разрезе поймы, в конце концов, можно обнаружить три слоя: с поверхности – пойменную фацию, наиболее мелкозернистую, ниже – береговую фацию, более крупную, и еще ниже – русловую фацию, наиболее крупную. Под русло-

вой фацией находится уже подошва аллювия. Если при этом на реке происходит процесс врезания ее русла, то, очевидно, при слабом врезании линия контакта русловой фации с лежащими ниже слоями пород окажется наклонной. Если при этом врезание происходит в породах меньшей крупности, чем русловая фация, то последняя может совершенно выклиниться. Кроме того, при врезании в русле аллювий находится временно и в дальнейшем может быть полностью вынесен. В этом случае отложения на пойме будут представлены двумя слоями наносов – береговой и пойменной фациями.

В случае же намыва русловая фация может оказаться все более мощной. Это, конечно, только грубая схема, так как в зависимости от состава пород, прорезаемых рекой, крупность аллювия так же может значительно меняться, что сильно осложнит подмеченную закономерность его распределения. Однако во всех случаях, когда аллювий залегает на мощной толще прежних отложений, линия контакта пойменных отложений с подошвой аллювия будет показывать изменение высотного положения дна русла при его перемещении по дну долины.

На приведенном выше поперечном профиле и геологическом разрезе поймы р. Шексны (см. рис. 6) это можно проследить с большой наглядностью.

На профиле видно, что от времени образования вала XI дно реки (граница толщи, показанной горизонтальной штриховкой) к формированию вала X непрерывно повышалось. Затем, до достижения современного положения, дно русла непрерывно понижалось и только в период после образования вала IV и до формирования вала III вновь повышалось.

Рассматривая эту линию и очертания береговых валов, можно прийти к выводу о том, что как в период наиболее интенсивного намыва (между валами XI и X), так и размыва (валы III и II) четко выраженных валов не образовывалось. Промежутки между крайними валами здесь оказались значительными, а толща отложений представлена мелкозернистым материалом – глинами.

В первом случае (намыв) – это естественно, во втором (размыв), – это может быть объяснено либо тем, что в реку начали поступать лишь мелкие наносы,

которые откладывались на пойме, либо тем, что пойма выполнялась ими уже впоследствии, после образования валов I и II.

Наибольшее число валов образовалось на участке, на котором русло врезалось не слишком интенсивно (см. рис. 6). Однако и здесь можно отметить, что при слабом врезании образовывались крупные валы, а при более интенсивном – частые, но небольшие.

Намеченная здесь связь между интенсивностью размыва (намыва) русла и интенсивностью формирования береговых валов, конечно, должна рассматриваться как предположительная. Для ее обоснования необходим больший материал и, вероятно, специальные исследования.

Чтобы закончить вопрос о формировании береговых валов, следует рассмотреть еще структуру вала I, современного, расположенного непосредственно на берегу реки. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что под валами II и I (см. рис. 6) ясно прослеживается очертание одного крупного вала. Таким образом, валы I и II сформировались за счет раздвоения этого вала.

Схему образования такой системы валов, по-видимому, можно представить себе следующей.

После формирования вала III река начала интенсивно врезаться, одновременно перемещаясь в направлении вогнутого берега. При замедлении этого процесса начал формироваться береговой вал, лежащий в основании валов I и II.

В последующем, вследствие снижения высоты половодий, о чем указывалось выше, при небольшом нарастании вала в высоту, он стал покрываться тонкими наносами, преимущественно со стороны поймы и, следовательно, начала расти его тыловая сторона. Затем, в результате повышения половодий, начал формироваться вал II. Достигнув значительной высоты, он создал предпосылки к образованию второго вала у своего подножья (вал I). Погребенная почва, создавшаяся на этом валу, может свидетельствовать о наличии маловодного периода, вновь сменившего период более высоких половодий. Дно русла продолжало врезаться, но боковые перемещения его были незначительными.

### *Восстановление прежних положений русла по аэрофотоснимкам*

Намеченная в предыдущем разделе схема развития веера перемещения русла позволяет рассматривать плавно сопрягающиеся гребни двух смежных вееров, очертания

которых увязываются с современным положением русла, как прежние положения линии выпуклого берега, и по ним восстановить ряд последовательных положений русла и проследить развитие как отдельных излучин и петель, так и целых участков реки.

В виде опыта такая работа была произведена по материалам аэрофотосъемки участка одной равнинной меандрирующей реки, расположенной в пределах лесной зоны Европейской территории СССР. Морфометрическая характеристика этого участка приведена в табл. 2.

Табл. 2. Морфометрическая характеристика участка реки

Длина участка, км	Извилистость		Средние уклоны		Ширина поймы, км			Ширина реки, м			Глубина по фарватеру			Число петель
	русла	долины	долины	русла	средняя	наибольшая	наименьшая	средняя	наибольшая	наименьшая	средняя	наибольшая	наименьшая	
65	1,7	0,75	0,000032	0,000052	9	12	6	256	500	115	2,6	7,9	0,5	8

Практически восстановление прежних вероятных положений русла осуществлялось следующим путем.

По аэрофотоснимкам на кальку наносилась схема микрорельефа поймы и контуры современного русла для всех участков реки с изображением вееров перемещения русла и намечалась разреженная сетка гребней, образующих веера.

Линии сопрягающихся гребней смежных излучин современного положения русла графически плавно соединяются друг с другом. При этом следует иметь в виду, что линия гребня верховой излучины определяет собой положение линии вогнутого берега на низовой излучине, в то время как линия берега низовой излучины определяет линию вогнутого берега верхней излучины. Поэтому соединение линий двух смежных излучин непосредственно производить нельзя и продолжение линии верхней излучины в пределах ее нижнего прорудления должно быть проведено, несколько отступя от сопрягающейся линии в сторону вогнутого берега нижней излучины, сообразуясь с очертаниями обоих гребней и шириной современного русла.



Можно рекомендовать такое сопряжение линий гребней выполнять вначале для двух смежных хорошо выраженных S-образно расположенных излучин, дающих наиболее надежное положение русла, а затем уже присоединять к ним соседние участки с тем, чтобы в конечном итоге получить очертания ряда последовательных положений русла для значительного по протяжению участка. В рассматриваемом случае длина такого участка составила 65 км.

Из описания приемов сопряжения линий гребня двух смежных излучин следует, что при восстановлении прежних положений русла часть линий, соответствующих определенным его положениям, оказывается нанесенной предположительно, с ориентировкой на хорошо выраженные смежные участки. Длина таких предположительных линий, восстановленных по тенденции изгиба хорошо выраженных гребней, наиболее близких к современному положению, составила в данном случае менее 30% от общей длины участка. Такие линии приходится проводить, главным образом, при восстановлении отдельных петель, у которых веер сохраняется достаточно четко только в контуре петли и по одному из берегов.

Во всех сложных случаях следует помнить и отчетливо представлять себе, что формирование веера осуществляется только за счет продвижения выпуклого берега в сторону вогнутого, и при сопряжении линии учитывать, что каждая из них соответствует прежнему положению бровки выпуклого берега. При соблюдении этих правил процесс восстановления прежних положений не вызовет серьезного затруднения.

Подобная работа по ряду узлов была выполнена независимо двумя лицами и результаты ее оказались идентичными. Это позволяет утверждать о сравнительной надежности такого приема построения.

В пределах рассматриваемого участка удалось восстановить ряд последовательных положений русла и по ним судить о характере его плановых изменений как по всей длине участка (65 км), так и по отдельным излучинам и петлям (рис. 9).

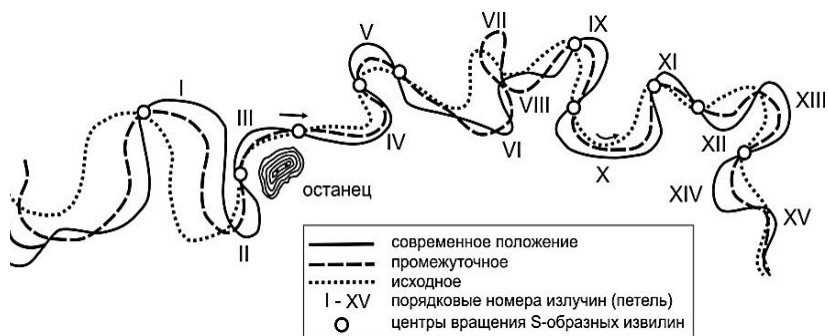


Рис. 9. Три положения русла, восстановленные по аэрофотоснимкам

### Анализ восстановленных положений русла

Сопоставление восстановленных по аэрофотоснимкам последовательных положений русла дает возможность, применительно к исследованной реке, получить ряд сведений, характеризующих происходившие на реке переформирования русла. Полученные таким путем сведения приведены ниже.

Ширина полосы или пояса меандрирования. Ширина полосы меандрирования обычно определяется как расстояние между линиями, огибающими вершины излучин, обращенных выпуклостью вправо и влево. Она характеризует отклонения вершин излучин или петель от сглаженной линии направления реки в данный момент.

По аэрофотоснимкам оказывается возможным определить также ширину части дна долины по следам перемещения русла и тем самым возможные крайние прежние положения русла, увязывающиеся с современными.

Эта часть дна долины определяется шириной полосы, занятой веерами перемещения русла, очертания которых увязываются с очертаниями современного русла. Она расположена, как указывалось, на наименьшей высоте над современным уровнем воды в реке и, следовательно, в ее пределах и возможны наиболее интенсивные переформирования русла. Ширина полосы вееров, увязывающаяся с очертаниями современного русла, в рассматриваемом случае составляет в среднем всего 16% от общей ширины поймы или равна 5-6-кратной ширине реки. В пределах этой полосы наибольшие отклонения русла, восстановленного по веерам перемещения от его современного положения, составляют 8-9 его ширин.

Изменения длины русла. Длина русла при положении, принятом за исходное, составляет около 38 км, при промежуточном – 47 км и при современном – 52 км (см. рис. 9). Таким образом, за период от исходного положения к современному, река удлинилась в 1,35 раза. Следовательно, даже в пределах «современных» вееров возможны весьма крупные изменения длин реки, происходящие естественным путем.

Изменение кривизны русла. Сопоставление кривизны русла по трем его положениям удобно сделать, пользуясь графиком обеспеченности кривизны, предложенным О. В. Макриновой и С. И. Пиньковским [Макринова, Пиньковский, 1954]. График этот строится следующим образом. По оси ординат откладывается плановая кривизна русла, которая для возможности сопоставления разной величины дается в виде безразмерного выражения  $B/R$ , где  $B$  – ширина русла,  $R$  – радиус кривизны осевой линии русла. По оси ординат откладываются отношения суммы длин всех участков, для которых  $B/R$  имеют значения меньше данного к общей длине участка  $L$ .

Этот график позволяет наглядно видеть распределение по длине реки прямых участков и участков разной кривизны.

Для удобства сопоставления графики кривизны для всех трех восстановленных по аэрофотоснимкам положений русла совмещены на одном чертеже (рис. 10). Кроме того, для возможности анализа распределения левых и правых поворотов были построены совмещенные графики отдельно для правых и левых поворотов реки (рис. 11).

Сопоставляя изменение кривизны русла по трем его положениям – современному, промежуточному и исходному<sup>1</sup> – можно сделать следующие выводы.

а) Река за период своего развития от исходного положения к современному увеличила суммарную длину прямых участков от 20,6% от общей длины русла при исходном положении до 28,6% при современном (рис. 10). Это мало повлияло на суммарную длину участков средней кривизны, но привело к увеличению суммарной длины участков с большой кривизной.

При этом наиболее существенное изменение кривизны произошло не в начале рассматриваемого периода, а в конце его.

---

<sup>1</sup> Наиболее удаленное от современного русла его положение, которое удалось восстановить по аэрофотоснимкам для всего 65-километрового участка. Для отдельных петель и излучин восстановлено до 9 прежних положений.

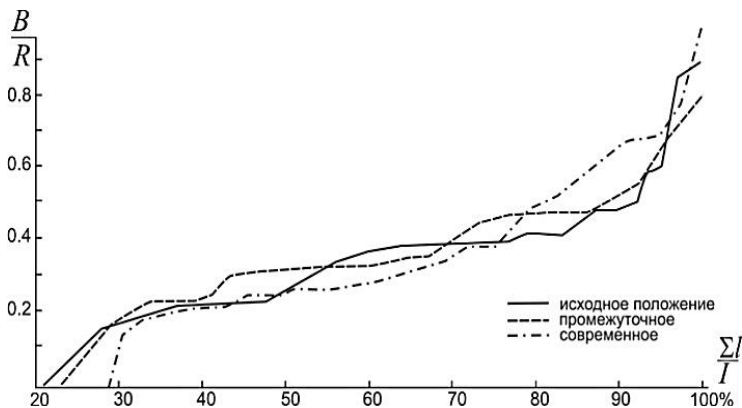


Рис. 10. Совмещенный график распределения кривизны по длине реки для разных положений русла, восстановленных по аэрофотоснимкам

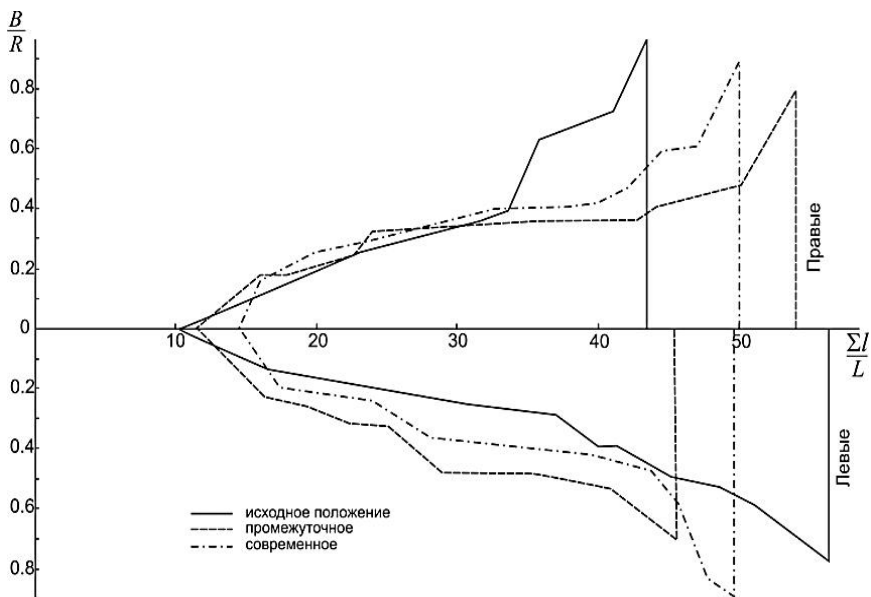


Рис. 11. Совмещенный график распределения кривизны левых и правых поворотов русла для разных положений русла

Представляет также интерес рассмотреть, как шло изменение распределения кривизны левых и правых поворотов реки.

При исходном положении длина правых поворотов составляла 33% от общей длины реки, левых – 47%, при промежуточном положении – соответственно 43 и 35% и при современном – соответственно 36 и 36%.

Следовательно, при изменениях плановых очертаний русла от исходного к промежуточному положению произошло увеличение длин правых поворотов и сокращение левых, а от промежуточного положения к современному – длина правых поворотов сократилась, а левых несколько увеличилась и распределение этих длин стало равномерным.

Таким образом, процесс изменения плановых очертаний русла происходил не односторонне. Равновесие в развитии левых и правых поворотов нельзя рассматривать как устойчивое, поскольку такое состояние русла, по-видимому, наблюдалось неоднократно. Так как в настоящее время длины правых и левых поворотов оказываются равными, то можно предположить, что в дальнейшем вновь начнется преобладание одностороннего развития излучин и петель.

Рассчитывать на дальнейшее значительное увеличение длин левых поворотов, как это было при переходе от исходного положения к промежуточному, при настоящем положении трудно, так как река прижата к левому склону долины. Однако наличие стариц и вееров блуждания, свидетельствующих о том, что в прошлые времена река занимала еще более близкое положение к левому склону долины, позволяет предположить, что развитие левых поворотов возможно лишь в небольших размерах, после чего русло начнет перемещаться вправо.

### *Изменение длин и шага отдельных излучин*

Методика работы была следующей. Сопоставлялась ширина излучин между точками перегиба русла, а для выраженных петель – ширина перешейка, т. е. величина наибольшего сближения русла. Длина излучины и петли определялась по руслу между указанными точками.

Обработанные по этому принципу данные (табл. 3-4) позволяют прийти к следующим выводам в дополнение к тем, которые были получены при анализе кривой обеспеченности кривизны русла.

Табл. 3. Изменение ширин перешейков и длин левых излучин

№ излучины	схемы излучин	Ширина перешейков при различных положениях русла, м			Изменение ширины перешейков, м			Длина излучин при разных положениях русла, м			Изменение длины, м		
		исходное	промежуточное	современное	от исходного к промежуточному	от промежуточного к современному	от исходного к современному	исходное	промежуточное	современное	от исходного к промежуточному	от промежуточного к современному	от исходного к современному
I		2590	1970	1760	-620	-210	-820	4720	5540	5950	+680	+550	+1330
III		3400	2520	2380	-880	-140	-1020	3930	3100	3150	-830	+50	-780
V		1180	920	590	-260	-330	-590	1760	2450	3700	+690	+1250	+1940
VII		620	80	0	-540	-80	-620	1100	3200	-	2100	-	-
IX		1130	1160	790	+30	-370	-340	1900	2550	3550	+650	+1000	+1650
XI		1050	940	530	-110	-410	-520	1400	1650	2300	+250	+650	+900
XIII		1160	1050	970	-110	-80	-190	1950	2700	4680	+750	+1980	+2730
XV		1270	1470	710	+200	-760	-560	1350	1100	1100	-250	0	-250

При наличии общей тенденции изменения длин излучин (в данном случае их увеличение) отдельные излучины ведут себя отлично от этой общей тенденции. Так, правые излучины при общей тенденции к росту длин из 7 случаев укоротились в одном случае. Из 8 левых излучин при той же тенденции к удлинению также только одна излучина сократила свою длину. При этом все излучины, изменявшие свои длины отлично от

общей тенденции, не являются смежными, т. е. не образуют S-образную извилину.

Табл. 4. Изменение ширины перешейков и длин правых излучин

№ излучины	схемы излучин	Ширина перешейков при различных положениях русла, м			Изменение ширины перешейков, м			Длина излучин при различных положениях русла, м			Изменение длины, м		
		исходное	промежуточное	современное	от исходного к промежуточному	от промежуточного к современному	от исходного к современному	исходное	промежуточное	современное	от исходного к промежуточному	от промежуточного к современному	от исходного к современному
II		1780	940	460	-840	-480	-1320	3500	4300	4450	+800	+150	+950
IV		680	1570	1670	+890	+100	-990	1100	2200	3250	+1100	+1050	+2150
VI		1350	2240	540	+890	-1700	-810	2100	3450	1130	+1350	-2320	-970
VIII		1270	1160	-	-110	-	-	1430	2150	-	+1720	-	-
X		1840	1760	1350	-80	-410	-490	3500	4050	6550	+550	+2500	+3050
XII		1280	1620	1620	+340	0	+340	1450	2050	2430	+600	+380	+980
XIV		1560	1160	1460	-400	+300	-100	1750	2350	3200	+600	+850	+1450

При общей тенденции к удлинению излучин шаг левых излучин, в том числе и ведущих себя отлично от этой тенденции, сократился. Прорыв петли имел место только в одном случае. У правых излучин изменение ширины

перешейков представляет значительно более пеструю картину (табл. 4): в 3 случаях ширина увеличилась, а в 4 – сократилась.

На основании приведенных данных можно утверждать, что общее увеличение длины русла реки, на что указывалось выше, произошло главным образом за счет удлинения излучин. При этом увеличение длин прямых участков произошло преимущественно в пределах излучин за счет их вытягивания, в то время как кривизна излучин в вершинах сохранялась почти постоянной. Таким образом, развитие излучин в данном случае происходило за счет их вытягивания влево и вправо от прямолинейных участков реки между ними. То обстоятельство, что ширины перешейков правых излучин сохранялись примерно постоянными, а у левых излучин сокращались, указывает на то, что вершины левых петель при их удлинении сдвигались вниз по течению интенсивнее, чем вершины правых излучин.

О формах перемещения излучин разных очертаний. В пределах исследуемого участка можно обнаружить излучины различных очертаний. Наиболее распространенным типом излучин являются S-образные извилины. Веера, образованные на выпуклых берегах этих излучин, обычно хорошо выражены и их гребни в большинстве случаев хорошо сопрягаются с гребнями соседних вееров. Этим облегчается восстановление последовательных положений S-образных излучин. В результате этого оказывается возможным сделать следующие выводы о формах их плановых изменений.

Перемещение двух смежных излучин, образующих фигуры S-образных очертаний, осуществляется путем вращения их вокруг довольно устойчивого центра, расположенного на переходном участке от одной излучины к другой (рис. 12). При этом вращении наибольшее нарастание (намыв) выпуклого берега излучины происходит в направлении, почти перпендикулярном середине ее низовой части (ниже ее вершины). Таким образом, извилины постепенно приобретают вид полуовала.

В верхних половинах верховой и низовой частей S-образной извилины вследствие менее интенсивного роста выпуклого берега и перехода течения от одного берега к другому, часть веера оказывается как бы срезанной. Вследствие этого на аэрофотоснимках почти всегда четко прослеживается несхождение линий веера в верховых частях излучин. Это обстоятельство и приводит к тому, что широкой частью веер всегда встречает течение.



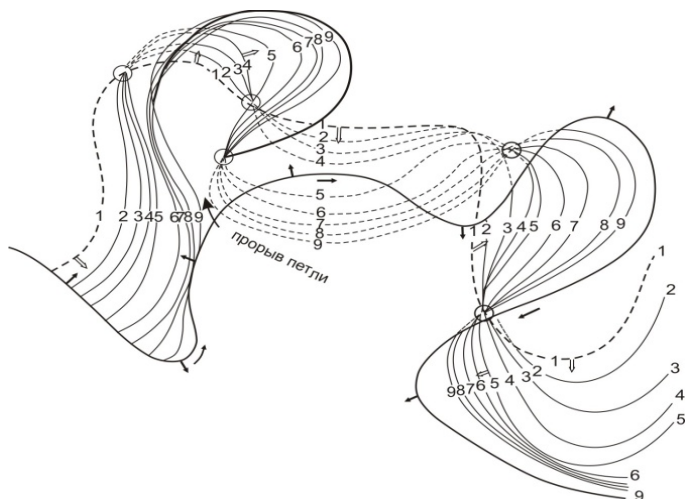


Рис. 12. Схема последовательных положений русла одного из узлов, восстановленная по аэрофотоснимкам

Следует отметить, что в некоторых S-образных извилинах нарастание выпуклого берега верховой ее части, по-видимому, идет быстрее и может продолжаться более длительное время, чем нарастание выпуклого берега низовой части такой извилины. Об этом свидетельствует разное число гребней в пределах верхнего и нижнего закруглений S-образной излучины. Вследствие этого при восстановлении прежних положений русла по рисункам вееров блуждания часть линий гребней, расположенная вдали от реки, у основания излучины в таких случаях не может быть использована и, следовательно, наиболее древние положения русла полностью восстановить не всегда удается.

Сформировавшаяся петлеобразная излучина округлых очертаний, судя по рисункам вееров, в дальнейшем может развиваться несколькими путями.

Такие петли чаще всего образуются в составе S-образной извилины, а также в результате развития поворотов русла, образующих хорошо выраженный угол; к образованию такой петли может привести обтекание рекой останца (рис. 13).

Как уже указывалось, гребни и ложбины на выпуклом берегу образуют в петлях овальных очертаний два типа рисунка. В одних случаях все гребни внутри петли оказываются

выгнутыми параллельно линии выпуклого берега низовой части петли (рис. 12), в других они, следуя направлению линии выпуклого берега, в верховой и низовой частях петли образуют полностью развернутый веер (рис. 12).

В первом случае такой рисунок веера мог образоваться только в результате смещения петли вниз или несколько в сторону от общего направления русла за пределами петли, при этом продвижение ее шло широким фронтом.

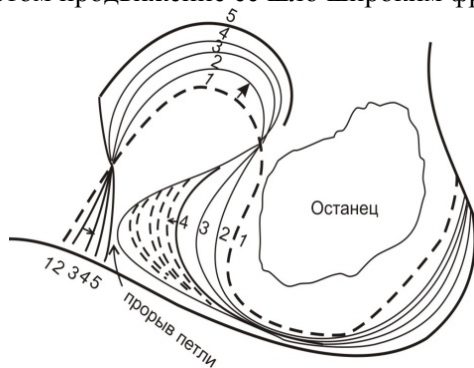


Рис. 13. Схема развития петли ниже останца. Пунктиром показано положение русла

Во втором случае происходит вращение петли, при котором наиболее выпуклая ее часть, продвигалась более узким фронтом, описывая в пределе половину окружности и стремясь приблизиться к руслу на его участке выше или ниже петли.

Если при этом происходит прорыв в основании петли, то такой рисунок сохраняется полностью; если же прорыва не происходит, то веер верхней части излучины размывается и сохраняется только веер нижней ее части, имеющий такой же вид, как и в указанном выше первом случае, т. е. все гребни веера внутри петли параллельны выпуклому берегу низовой части излучины.

Таким образом, перемещение петли может осуществляться как путем ее постепенного сползания вниз по течению в направлении, почти параллельном руслу, так и путем сползания, при котором вершина петли описывает дугу и стремится приблизиться к руслу. В первом случае петля способна значительно удлиниться, во втором – ее развитие заканчивается прорывом без существенного удлинения.

Анализ восстановленных прежних положений русла позволяет также проследить развитие прорыва и характер переформирования прилегающих к нему участков реки.

В рассматриваемом случае (рис. 12) прорыв произошел после интенсивного увеличения кривизны русла в пределах

петли и после ее прорыва знак плановых деформаций изменился. Действительно, в левой части рис. 12 видна старица, существующая в настоящее время. Она показана сплошной жирной линией. Эта старица образовалась в результате развития излучины, имевшей в начале плавные очертания (жирная пунктирная линия). Вершина этой излучины начала развиваться сначала в сторону от реки, затем в направлении вниз по течению. При резком увеличении кривизны произошел прорыв сформировавшейся таким путем петли. Нижний участок русла в период формирования этой петли развивался так же, как нижняя часть обычной S-образной извилины в направлении вогнутого берега (положение 1-9). После прорыва знак перемещения русла изменился на обратный и развитие русла на этом участке пошло таким образом, что первоначально образовавшийся здесь веер перемещения русла начал размываться. В настоящее время от него сохранились только наиболее древние (далеко отстоящие от русла) гребни (1-4).

Продвижение русла после прорыва происходило весьма интенсивно. Об этом свидетельствуют широкие косы у современного выпуклого берега, хорошо видные на аэрофотоснимке (см. рис. 2).

На рис. 2 можно видеть излучины с хорошо выраженными двумя вершинами, свидетельствующими о том, что в процессе формирования петли могут быть случаи, когда вершина ее начинает развиваться в направлении как вверх, так и вниз по течению реки. Можно предположить, что такая форма излучины, т. е. с двумя вершинами, не является устойчивой. По мере удлинения такой излучины вследствие появления в ее пределах все более длинных прямолинейных участков эрозионная работа потока сосредотачивается на участках наибольшей кривизны и постепенно один из них всегда может начать изменять свои очертания особенно интенсивно.

При наличии прямолинейного участка на подходе к крутой излучине и по выходе из нее, последняя имеет тенденцию интенсивно удлиняться в направлении, близком к перпендикулярному, по отношению к основному направлению русла, что приводит обычно к петле П-образных очертаний. Такая петля перемещается параллельно самой себе, сползая вниз по течению, без существенного сокращения перешейка в основании петли.

В случае если в пределах дна долины ниже такой петли имеются участки трудно размываемых пород, занимающие значительную ширину по дну долины, то происходит сравнительно равномерное сужение перешейков такой излучины по всей длине петли, т. е. она сохраняет П-образные очертания, но постепенно сжимается. Деформацию П-образной петли можно проследить на рис. 9.

Судя по рисункам вееров на исследуемом участке, отчленение такой петли от русла происходит в обоих случаях. В первом случае, когда П-образная петля перемещается без существенного сокращения перешейка, отчленение ее от главного русла происходит путем заноса верховой части петли и возобновления стариц в ее основании.

Во втором случае, когда перешеек П-образной петли постепенно уменьшается, имеет место прорыв его. Образующиеся при этом старицы могут иметь весьма удлиненные овальные или П-образные очертания, либо от них сохраняются только отдельные участки прямолинейных очертаний.

Наконец, представляет интерес рассмотреть изменение излучин при обтекании рекой останца.

Наличие останца округлых очертаний (рис. 13) привело к образованию излучины также округлых очертаний. В процессе своего развития эта излучина постепенно развилась в типичную овальную петлю, которая в результате прорыва образовала старицу с низовой части останца. Затем началось образование за останцом новой петли и появление в результате ее прорыва новых стариц и т. д. Судя по тому, что рисунок веера гребней, образованного такой петлей, менее крупный, чем в S-образных извилинах, процесс деформации ее проходил весьма интенсивно.

Общие выводы о переформировании русла.

Полученные данные о плановых перемещениях русла позволяют высказать некоторые общие суждения о его формировании.

1. Современные переформирования русла охватывают не всю ширину дна долины одновременно, а происходят только на определенной ее части, которая как указывалось выше, составляет для исследованной реки всего около 16% от общей ширины дна долины. В пределах полосы, в которой происходили переформирования русла, наблюдается попеременное развитие то

правых, то левых извилин и петель, а также известное равновесное соотношение между ними.

2. Развитие отдельных петель заканчивалось их прорывом и образованием стариц, т. е. не происходило их удлинения на всю ширину долины. Это вполне понятно потому, что поток способен скорее размыть узкий перешеек петли, нежели провести огромную работу по размыву длинного участка при перемещении от одного склона долины к другому. Поэтому нет оснований предполагать, что возможно одностороннее непрерывное перемещение русла от одного склона долины к другому.

3. Явление сползания излучин и сохранения рекой извилистости синусоидального типа на сколько-нибудь значительный период обнаружить не удалось. Две смежные излучины, образующие S-образную извилину, развивались путем вращения их вокруг довольно устойчивого центра, расположенного на переходе от одной излучины к другой, т. е. на перекатном участке.

4. Наличие указанных выше центров вращения извилин свидетельствует о том, что на реке имеются весьма устойчивые участки, существующие, несмотря на значительную подвижность русла, вне их пределов. Этим в значительной мере объясняется широко известный факт устойчивости местоположения многих перекатных участков и вторичное образование нового переката на месте сползшего прежнего.

Приведенные выше выводы относятся только к исследованному участку, т. е. к местным конкретным условиям, и отнюдь не претендуют на универсальность. Вместе с тем они также, по-видимому, не исчерпывают еще всех возможностей такого приема анализа. Однако такая задача в настоящей статье и не ставилась. Целью ее являлось показать возможность применения материалов аэрофотосъемки для изучения русловых процессов на меандрирующих реках. Следует полагать, что на примере приведенного анализа вееров большие возможности такого приема изучения натуральных материалов подтверждаются достаточно убедительно, по крайней мере, в отношении определения тенденции развития отдельных форм русла и целых его участков.

Дальнейшие исследования в этом направлении должны заключаться в обработке массового материала и выяснения на этой основе закономерностей формирования различных форм речных русел применительно к различным природным

условиям, т. е. закономерностей, имеющих более общее, универсальное применение. В данном исследовании и показывалась возможность оценки тенденции развития тех или иных форм русла по материалам аэрофотосъемки, но вопрос о сроках формирования этих форм практически еще не затрагивался. Между тем это вопрос чрезвычайной важности и является необходимым условием для возможности полноценного использования выводов, получаемых таким путем для расчетов и прогнозов русловых деформаций.

Решение задачи о сроках формирования гребней и образуемых ими вееров требует не только широкого привлечения крупномасштабных съемок различных лет и, следовательно, трудоемкой камеральной обработки, но и постановки специальных полевых работ.

Каковы же те предпосылки, которые могут быть положены в основу схемы решения задачи о сроках формирования береговых валов.

### ***Соображения о возможности определения сроков формирования береговых валов***

В начале статьи, при рассмотрении вопроса о происхождении отдельных гребней и образуемых ими вееров, указывалось, что согласно данным по р. Чулым образование гребня на этой реке происходит ежегодно.

Такое предположение ни в какой мере не может служить основанием для распространения этого вывода на другие реки. Интенсивность формирования береговых валов, образующих веера перемещения, должна быть настолько же различна, насколько различна на реках интенсивность русловых переформирований, зависящая от водности реки, твердого стока, от типа ее режима (формы гидрографа) и состава грунтов ложа.

Сроки формирования берегового вала могут отличаться друг от друга даже в пределах одной и той же реки и ее участков и вопрос об этих сроках должен решаться в каждом случае отдельно.

Сличение материалов аэрофотосъемки речного русла рек, протекающих в северной половине Европейской части СССР, со сроками их производства, разнящимися на 6-8 лет, не позволяет обнаружить на крупных реках образования новых гребней, хотя плановые деформации отдельных участков русла прослеживаются достаточно отчетливо. Это дает основание

предположить, что формирование берегового вала может представлять собой многолетний процесс.

Подойти к решению вопроса о сроках формирования береговых валов можно, оценив скорость плановых перемещений русла, на основе сопоставления карт разных лет съемки.

Для исследуемой реки имелась лоцманская карта 1879 г. и плановая аэрофотосъемка 1945 г. Совместить эти карты для всего участка, по которому производилось восстановление прежних положений русла, оказалось затруднительным как вследствие неравноценной точности карт, так и из-за значительных плановых переформирований. Поэтому пришлось прибегнуть к оценке скорости плановых смещений на основе сопоставления ширин перешейков для наиболее хорошо выраженных петель, опознанных на карте и планшетах аэрофотосъемки.

Такое сопоставление для наиболее хорошо выраженных 5 петель показывает, что за период в 66 лет сокращение ширины перешейков составляет в среднем 174 м, или 2,6 м в год. Поскольку размыв перешейка идет с двух его сторон, то грубо, для оценки плановых смещений, эту величину надо разделить пополам. Таким образом, величина планового смещения русла составит около 1,3 м в год. Это смещение можно считать близким к среднему.

Дальнейшей задачей являлось определение среднего расстояния между гребнями с тем, чтобы, зная его и величину плановых смещений в год, подсчитать число лет, требующихся для сформирования гребня.

Для определения среднего расстояния между гребнями было подсчитано число гребней в веерах различного рисунка, приходящееся на единицу длины плана, в данном случае на каждые 270 м (1 см).

Очевидно, что если число гребней на единицу длины подсчитывать в разных частях веера, то благодаря тому, что в концевых частях веера гребни сжаты, а в срединной его части расширены, можно получить несопоставимые данные.

Если же подсчет произвести по линии наибольшего нарастания веера, то такие данные уже могут быть сопоставлены между собой.

Подсчет числа гребней, приходящихся на единицу длины по 25 веерам различного рисунка в условиях исследуемой реки, показал, что на каждый 1 см плана (270 м на местности) в

среднем приходится около 15 гребней. Наибольшее число гребней в 1 см оказалось равным 18, наименьшее – 13.

Расстояние между гребнями оказывается в среднем  $270/16=18$  м.

Таким образом, при годичном смещении русла около 1,3 м в год, получаем, что на образование одного гребня в среднем требуется около 14 лет.

Если попытаться оценить среднюю скорость нарастания гребня в высоту, то оказывается, что в данном случае при высоте гребней в 2-4 м, или в среднем около 3 м, нарастание в год составляет около 21 см. Эта цифра при сопоставлении ее с величиной наилка, откладывающегося за период весеннего половодья вблизи русла (около 6 см), оказывается значительной. Однако надо иметь в виду, что рост берегового вала в начальный период его формирования идет, по-видимому, очень интенсивно. Причленение к выпуклому берегу кос, о чем указывалось выше, формирующихся не за счет наилка, а за счет русловых процессов, может сразу привести к росту вала на значительно большую величину, чем среднее его нарастание в год.

Размеры тела гребня, как следует из анализа аэрофотоснимков, могут значительно варьировать, отражая водность периода или отдельных крупных половодий, наблюдавшихся в этот период.

Таким образом, следует полагать, что нарастание гребней может осуществляться и не ежегодно. Вместе с тем оно может продолжаться и на гребнях, отошедших от русла, т. е. расположенных вдали от реки, при прохождении по пойме высоких вод и, очевидно, с разной интенсивностью, в зависимости от характера расположения гребня по отношению к оси потока. При этом ложбины между гребнями могут заноситься наносами и таким образом выполаживаться.

Поэтому современные береговые валы (идущие вдоль бровки современного русла) на участках русла большой кривизны нередко оказываются больших размеров, чем гребни, расположенные в глубине выпуклого берега.

Такое явление, по-видимому, можно объяснить и тем, что по мере снижения базиса эрозии участка глубинная эрозия ослабевает и начинает преобладать боковая. Это происходит при приближении продольного профиля к профилю равновесия.

Ускоряя боковой размыв, поток стремится сохранить прежние соотношения морфометрических элементов русла, и



при увеличении интенсивности размыва вогнутого берега начинается усиленное отложение наносов на выпуклом берегу, что и приводит к расширению берегового вала. Вместе с тем, при замедлении сработки продольного профиля большая часть половодий получает возможность принимать участие в формировании берегового вала, в силу чего он приобретает большие размеры.

Получив цифры, характеризующие сроки формирования отдельных гребней, можно грубо приближенно оценить периоды времени, которые удалось охватить при восстановлении различных положений русла по современным веерам перемещения.

Среднее перемещение русла, определенное по линии наибольшего нарастания выпуклых берегов, от положения, принятого за исходное, к современному (рис. 9) составляет для участка величину 2,9 см плана, или около 780 м в натуре.

При скорости бокового смещения русла в 1,3 м в год, среднюю продолжительность периода, прошедшего от исходного положения к современному, можно оценить примерно в 590 лет.

Тот факт, что число гребней, приходящихся на единицу длины по всей ширине долины, разнится незначительно (см. выше), приводит к выводу о том, что современное дно долины выработано рекой, мало изменявшей свою водоносность. В дальнейшем, по-видимому, может оказаться возможным по размерам валов судить о смене маловодных и многоводных периодов, т. е. об изменении водного режима.

Следует еще указать на другие возможности, вытекающие из анализа частоты расположения гребней веера. Например, частота расположения гребней веера на единицу длины может характеризовать интенсивность русловых процессов и устойчивость грунтов дна долины. Таким образом, располагая аэрофотоснимками с изображением вееров перемещения по различным рекам, можно путем подсчета числа вееров на единицу длины приближенно оценить степень устойчивости дна долины, по которой протекает река.

Заканчивая рассмотрение вопроса о сроках формирования поймы, необходимо еще раз подчеркнуть иллюстративный характер излагаемого материала и местное значение сделанных выводов. Для уверенного и полноценного решения вопроса о сроках формирования береговых валов, как уже упоминалось

выше, необходима постановка специальных полевых наблюдений. Эти наблюдения должны заключаться в производстве нивелировочных работ для получения точных данных о размерах современных и древних береговых валов, об их высотах по отношению к современному руслу. Параллельно с этим необходимо поставить работы по анализу грунтов, слагающих пойму, как в отношении их физико-механического состава, так и порядка напластования с тем, чтобы иметь возможность восстановить процесс формирования береговых валов.

Необходимо также поставить стационарные наблюдения за нарастанием береговых валов как современных, так и древних, расположенных в глубине выпуклого берега, проследить и оценить воздействие растительности на нарастание гребня вала, проследить за процессами уплотнения намывтого материала и т. п. с тем, чтобы судить о характере воздействия на формирование вала половодий различной величины.

Одновременно должны быть поставлены наблюдения за плановыми смещениями берегов русла на различных по кривизне участках. Наряду с этим для оценки плановых смещений необходимо широко использовать инструментальные крупномасштабные съемки речных участков за разные годы. Должна быть также усовершенствована и методика оценки размеров микрорельефа по аэрофотоснимкам, которая должна найти себе применение не только в рассматриваемых целях, но также и для ряда других вопросов, например таких, как анализ деформации волны половодья по длине реки, для оценки процессов затопления и освобождения поймы от воды, для оценки глубины залегания уровня грунтовых вод на различных участках поймы и для многих других целей.

Должное место при решении всего комплекса вопросов должны найти и лабораторные исследования по воспроизведению меандрирования речных русел и созданию различных его форм, способные, как показывает уже накопленный опыт, существенно продвинуть решение поставленной задачи.

Наличие всех указанных выше материалов должно позволить разработать полноценные схемы расчета и прогноза русловых деформаций и моделирования русловых процессов, основанные на действительно существующих в природе закономерностях переформирования речных русел.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бронзов А. Я. Типы лугов по р. Мологе. – Труды Гос. лугового института, т. I, М., 1927.
2. Просолов Л. И., Соколов Н. Н. Почвы пойм в районе р. Волхова и оз. Ильмень. – Матер, по исслед. р. Волхова и его бассейна, т. XVI, Л., 1927.
3. Вильямс В. Р. Почвоведение, вып. 3, М., 1919.
4. Личков Б. Л. Некоторые черты и характеристика геоморфологии южного Полесья. – Изд. Геолкома, 1929.
5. Мизеров Б. В. К материалам по строению пойм рек Западно-Сибирской равнины. – Труды Томского ун-та, т. 124, серия геологическая, 1953.
6. Польшов Б. Б. Пески Донской области, их почвы и ландшафты. Почвоведение, № 3-4, 1924.
7. Щукин И. С. Общая морфология суши, т. I, ОНТИ НКТП, 1934.
8. Никифоров Д. И. Применение аэрофотосъемки в гидрологических исследованиях. – Редиздат ЦУЕГМС, Л., 1936.
9. Берг Л. С. Географические зоны Советского Союза. – ОГИЗ, Географгиз, 1947.
10. Гроссэт Г. Э. О пограничном горизонте пойм как о новом доказательстве существования суббореального ксеротермического периода. Землеведение, т. XXXIX, вып. 2, 1937.
11. Афанасьева Е. А. Почвы нижней части долины р. Мологи и прилегающих частей Молого-Шекснинской низины. – Труды Почвенного института им. В. В. Докучаева, т. XVI. Изд. АН СССР, 1940.
12. Грабовская О. А. Почвы нижнего течения долины р. Шексны. – Труды Почвенного института им. В. В. Докучаева, т. XVI. Изд. АН СССР, 1940.
13. Ансберг Е. А. Материалы к изучению режима верхнего горизонта грунтовых вод, Молого-Шекснинского междуречья. – Труды Почвенного института им. В. В. Докучаева, т. XV. Изд. АН СССР, 1937.
14. Васильев И. С. Водный режим главнейших почвенных разностей Молого-Шекснинского междуречья. – Труды Почвенного института им. В. В. Докучаева, т. XV. Изд. АН СССР, 1937.
15. Горецкий Г. И. Из наблюдений над молодыми террасами среднего течения р. Чусовой. – Труды Института географии АН СССР, вып. 39, 1948.
16. Ламакин В. В. Динамические фазы речных долин и аллювиальных отложений. – Землеведение. Новая серия, т. II (XLII), М., 1948.
17. Макринова О. В. и Пиньковский С. И. Измеритель плановой кривизны русла. – Труды ГГИ, вып. 44 (98), 1954.
18. Жуковский Н. Н. Обзор основных явлений естественного формирования речного русла. Сб. «Вопросы гидротехники свободных рек». – Изд. МРФ СССР, М., 1948.
19. Шарашкина Н. С. Лабораторные исследования русловых процессов. – Сб. «Проблемы русловых процессов» (осн. материалы Всес. Совещ. по проблеме русловых процессов). – Гидрометеиздат. Л., 1953. – Труды ГГИ, вып. 49/103, 1955.

## **РУСЛОВЫЕ ПЕРЕФОРМИРОВАНИЯ ВОЛГИ НА УЧАСТКЕ ВОЛГОГРАД–АСТРАХАНЬ**

В статье излагается опыт применения принципов и приемов гидролого-морфологического анализа к конкретному объекту. Эти принципы и приемы разработаны в Отделе русловых процессов ГГИ, в частности, автором. В статье выделяются типы руслового процесса, свойственные р. Волге на рассматриваемом участке (ограниченное меандрирование, побочневой процесс), дается их качественная и количественная оценка, выявляются основные факторы руслообразования, оценивается влияние на ход переформирования русла и поймы выполненных на участке гидротехнических мероприятий, и высказываются соображения о дальнейшем ходе руслового процесса. Ожидается уменьшение многорукавности, нивелирование отметок дна плесов и перекаатов, уменьшение подвижности крупных побочней, появление вторичных, менее крупных побочней. Указывается на возможность отхода Волги от Волгограда, обсыхание пойменных протоков.

### ***Задачи работы***

На участке р. Волги между Волгоградом и Астраханью расположена Волго-Ахтубинская пойма, представляющая собой крупный резерв плодороднейших земель, которые в настоящее время предполагается освоить, осуществив целый комплекс водохозяйственных мероприятий. Волго-Ахтубинская пойма представляет собой также важное звено в рыбном хозяйстве Каспия.

Сама Волга на описываемом участке является крупнейшей судоходной магистралью и, кроме того, ее воды должны широко использоваться для орошения левобережья Сарпинской низменности.

Для планирования, проектирования и осуществления всех указанных водохозяйственных мероприятий, а также для обеспечения бесперебойной работы гидротехнических сооружений и транспорта необходимы сведения о русловом процессе. Эти сведения особенно важны потому, что русла рек Волги, Ахтубы многочисленные протоки Волго-Ахтубинской поймы отличаются значительными и быстрыми деформациями. При этом регулирование стока, осуществляющееся системой волжских водохранилищ, вносит существенные изменения в ход русловых и пойменных образований, развивавшихся в условиях естественного режима.

Оценка руслового процесса может быть осуществлена на основе гидролого-морфологического анализа. Принципы и приемы его проведения были предложены в монографии «Русловой процесс» [Кондратьев, 1959] и в книге автора [Попов, 1961]. Поэтому, не останавливаясь на них подробно, отметим только, что ключом к гидролого-морфологическому, анализу является знание морфологических закономерностей руслового процесса, т. е. форм его проявления и связей этих форм с определяющими их факторами: водным режимом, твердым стоком и ограничивающими условиями [Попов, 1961]. Это открывает возможность предвидения хода процесса, как на коротких участках, так и на участках большого протяжения по следующей схеме:

- 1) выявление связи типа руслового процесса с определяющими его факторами в естественных условиях и оценка изменений этих факторов под воздействием гидротехнического строительства и прежде всего в условиях регулирования стока;
- 2) оценка влияния измененных факторов на ход руслового процесса в частности оценка возможности изменения типа процесса.

Гидролого-морфологический анализ значительно облегчается наличием типизации руслового процесса, которая позволяет использовать минимум внешних признаков процесса для получения суждения о закономерностях деформаций и тенденциях их развития и тем самым выявить основные ведущие элементы процесса, подлежащие наиболее детальному изучению, участки с резкими отклонениями хода переформирований от преобладающего, а возможно, и произвести ограничение участков полевых наблюдений типичными и т. п.

Таким образом, гидролого-морфологический анализ может быть осуществлен на основе широко распространенных стандартных картографических, аэрофотосъемочных, гидрологических и геологических материалов. Вместе с тем он обеспечивает получение многих данных, удовлетворяющих требованиям перспективного планирования гидротехнического строительства, а также задачам, возникающим на ранних стадиях проектирования. В частности, знание морфологических закономерностей обеспечивает возможность обоснованного выбора наиболее благоприятных в отношении переформирований мест расположения сооружений и разработку наиболее эффективных мероприятий. Использование в этих целях гидравлического

расчета представляет значительные трудности, так как для этого необходимо получение многих расчетных характеристик, требующее производства специальных, обычно дорогостоящих и весьма трудоемких работ, к тому же на участках большого протяжения.

Можно отметить, что даже при проведении специальных работ по существующим программам результаты этих работ все же часто оказываются недостаточными для надежного детального расчета, а поэтому при производстве расчета приходится прибегать к грубой схематизации явления. В результате этого данные расчета нередко сильно отличаются от фактически происходящих процессов. В значительной мере это обусловлено тем, что обычно исследуются не столько сами деформации, сколько их косвенные гидравлические показатели (взвешенные наносы, скорости течения и т. п.) в виде осредненных значений, а морфологическая основа либо вовсе отсутствует, либо представлена крайне грубыми схемами. Все эти обстоятельства еще раз подчеркивают важность морфологического анализа руслового процесса, как дающего самостоятельный выход, так и обеспечивающего наибольшее соответствие натуре данных гидравлического расчета. Производство последнего малорентабельно на ранних стадиях проектирования, и его следует осуществлять лишь для наиболее важных и ответственных участков реки и водных узлов, по которым требуются особенно детальные данные.

Исходя из указанных предпосылок, при постановке настоящей работы преследовалась цель получить характеристики руслового процесса для участка реки с интенсивным и широким хозяйственным использованием для того, чтобы дать народно-хозяйственным организациям наиболее полное представление о ходе русловых и пойменных образований. Это важно как для планирования и проектирования сооружений и мероприятий по освоению Волго-Ахтубинской поймы, так и для планирования производства полевых работ на участке, а также для детальных расчетов деформаций русла и поймы.

Кроме того, в статье высказаны соображения об ожидаемом дальнейшем ходе русловых и пойменных деформаций в условиях регулирования стока.

## ***II. Гидролого-морфологическое описание р. Волги на участке Волгоград–Астрахань***

### ***1. Основные морфологически однородные участки***

Описание реки ведется по участкам, характеризующимся общностью типов русловых и пойменных деформаций и определяющих их факторов.

На р. Волге между Волгоградом и Астраханью выделено четыре морфологически однородных участка (рис. 1, 2). Первый участок протяженностью 45 км расположен между створом ГЭС имени XXII съезда КПСС и г. Красноармейском (нижняя оконечность о. Сарпинский). Он выделен вследствие того, что находится непосредственно под влиянием водохранилища ГЭС, в том числе и под влиянием суточного регулирования, а также обладает рядом морфологических особенностей, обусловленных нахождением участка в начале расширения долины Волги.

Второй морфологически однородный участок длиной 90 км находится в границах г. Красноармейск–с. Каменный Яр. Он характеризуется увеличением русловой многорукавности, появлением осередков и широкой возвышенной малопроточной поймой (протоки на пойме реки, действуют только при высоких половодьях).

Третий морфологически однородный участок длиной 120 км, занимающий протяжение реки от с. Каменного Яра до с. Никольского, отличается появлением пойменной многорукавности и уменьшением ширины поймы.

Четвертый морфологически однородный участок от с. Никольского до Астрахани длиной 235 км характеризуется увеличением числа крупных рукавов, большими, чем в межень, уклонами водной поверхности в половодье, переуглублением русла, наличием лишь одиночных крупных плесов и перекатов. Эти особенности реки отображают влияние моря, стабилизирующего уровень воды при любом ее расходе.

Поскольку факторы, обуславливающие русловую процесс на всех выделенных морфологически однородных участках, имеют много общего, а влияние регулирования стока постепенно ослабевает по длине реки, то, прежде чем рассматривать выбранные участки, следует дать общую характеристику Волги и Волго-Ахтубинской поймы на протяжении реки от створа ГЭС имени XXII съезда КПСС до Астрахани.

Описание развития руслового процесса на выделенных морфологически однородных участках в естественных условиях ведется по следующей схеме:

- 1) дается общее гидролого-морфологическое описание участка и факторов руслообразования;
- 2) рассматриваются русловые деформации.

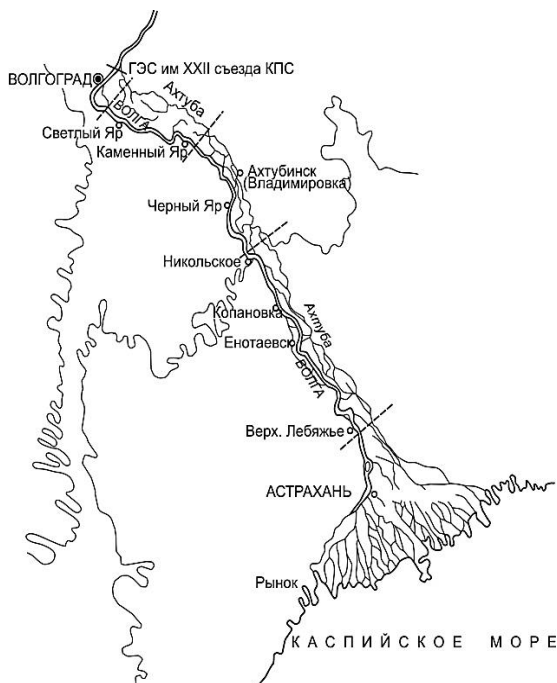


Рис. 1. Схема участка Волгоград–Астрахань с указанием границ морфологически однородных участков

## **2. Общая гидролого-морфологическая характеристика участка и факторов руслообразования**

Река Волга, выходя у Волгограда в расширенную долину (ниже г. Красноармейска ширина достигает 32 км), приобретает многорукавный характер (рис. 1), причем главное русло реки почти на всем протяжении проходит у правого склона долины,

Соображения об ожидаемом ходе руслового процесса выделены в самостоятельный раздел. В нем дается оценка общих тенденций руслового процесса и соображения о ходе переформирования русла и поймы на каждом из выделенных морфологически однородных участков.



крутого, высотой 25–30 и 50 м, сложенного осадочными породами: песчаниками, глинами, суглинками, лессовидными суглинками и лишь в районе Волгограда породами континентального происхождения. Река либо непосредственно подмывает правый склон долины, образуя откосы большой крутизны (яры), либо протекает, несколько отступая и оставляя между руслом и склоном долины отдельные массивы поймы шириной до 5 км (рис. 2), которые по своему происхождению являются причленившимися островами или сильно разросшимися побочными. Основная пойма, развитая по левому берегу, пересечена рядом пойменных протоков. Наиболее крупным из этих протоков является р. Ахтуба, которая протекает в притеррасной части поймы у левого крутого склона долины высотой 25–30 м в начале участка и 10–16 м у Астрахани. Ограниченная справа р. Волгой, а слева р. Ахтубой пойма на участке получила название Волго-Ахтубинской. Площадь Волго-Ахтубинской поймы, включая поверхность расположенных на ней притоков и озер, составляет 7500 км<sup>2</sup>. Водная поверхность поймы в межень занимает 900 км<sup>2</sup>.

Долина Волги ниже Волгограда проходит по Каспийской низменности, т. е. по территории, подвергавшейся неоднократным наступаниям и отступаниям моря (Каспийские трансгрессии и регрессии). История формирования самой речной долины остается еще не вполне ясной, однако в настоящее время распространено мнение, что Волго-Ахтубинская пойма представляет собой видоизмененные остатки древней дельты Волги. Некогда морской край дельты проходил у Волгограда, затем по мере отступления моря он выдвигался и, наконец, достиг современного положения.

Многорукавность Волго-Ахтубинской поймы в известной мере является унаследованной. Однако и ныне действующие факторы благоприятствуют формированию многорукавного русла. Расширение долины Волги приводит к уменьшению амплитуды колебания уровня воды в реке примерно на 1,6 м по сравнению с той, которая наблюдалась в естественных условиях выше Волгограда. Снижение амплитуды колебаний уровня воды в реке способствует образованию крупных скоплений наносов. Вследствие того, что поток получает лишь весьма мелкие фракции донных наносов, эти скопления оказываются относительно подвижными и происходят их частые отторжения, ведущие к образованию русловой многорукавности.

Об общей подвижности русловых образований свидетельствуют частые изменения числа перекатов на участке. Так, по съемке 1913 г. число перекатов между Волгоградом и Астраханью составляет 33, а перевалов 38. На съемке 1940 г. показано 47 перекатов (увеличилось на 14), а число перевалов составляет 24 (уменьшилось на 14).

Приведем некоторые количественные показатели русла реки, водного потока и речной поймы.

### ***3. Описание русла и поймы реки***

Основные морфологические характеристики русла и поймы р. Волги на участке от створа ГЭС имени XXII съезда КПСС до Астрахани показаны на рис. 2. На этом рисунке видно, что ширина русла между бровками меженных берегов сильно колеблется по длине реки. Кроме того, здесь характерно наличие расширенных (до 3 км, кое-где до 7 км) и относительно узких и длинных участков. Местами ширина реки составляет всего лишь 450 м (г. Красноармейск).

Глубины на перекатах, сосредоточенных в верхней половине участка между створом ГЭС и с. Никольским, составляют в межень около 2,5-3,0 м местами падают до 1,7 м; глубины на плесах достигают 8-10 и 38 м. Ниже с. Никольского перекаты редки, глубины значительно увеличиваются. Это переуглубленный участок русла, и отметки дна здесь оказываются пониженными по сравнению с отметками базиса эрозии (среднего уровня Каспийского моря) примерно на 30 м.

Высота правого склона долины над поверхностью поймы в общем уменьшается вниз по течению, составляя в Светлом Яру 21,8 м, в Каменном Яру 20,5 м, в Черном Яру 16,0 м, в Грачах 27,0 м, в Ветлянской 15,2 м, в Копановке 15,5 м, в Енотаевске 12,5 м, в Сероглазовке 8,8 м.

Высота пойменных берегов главного русла над меженным уровнем в северной части поймы в среднем равна 7-9 м, в южной – 3-5 м. Высота пойменных берегов Ахтубы меньше, чем Волги. Поверхность широкой центральной части поймы в среднем расположена на 5-6 м над меженью в северной части поймы и на 2-2,5 м в южной. Отметки гребней пляжей и побочной в главном русле Волги обычно выше меженного уровня на 2-3 м.

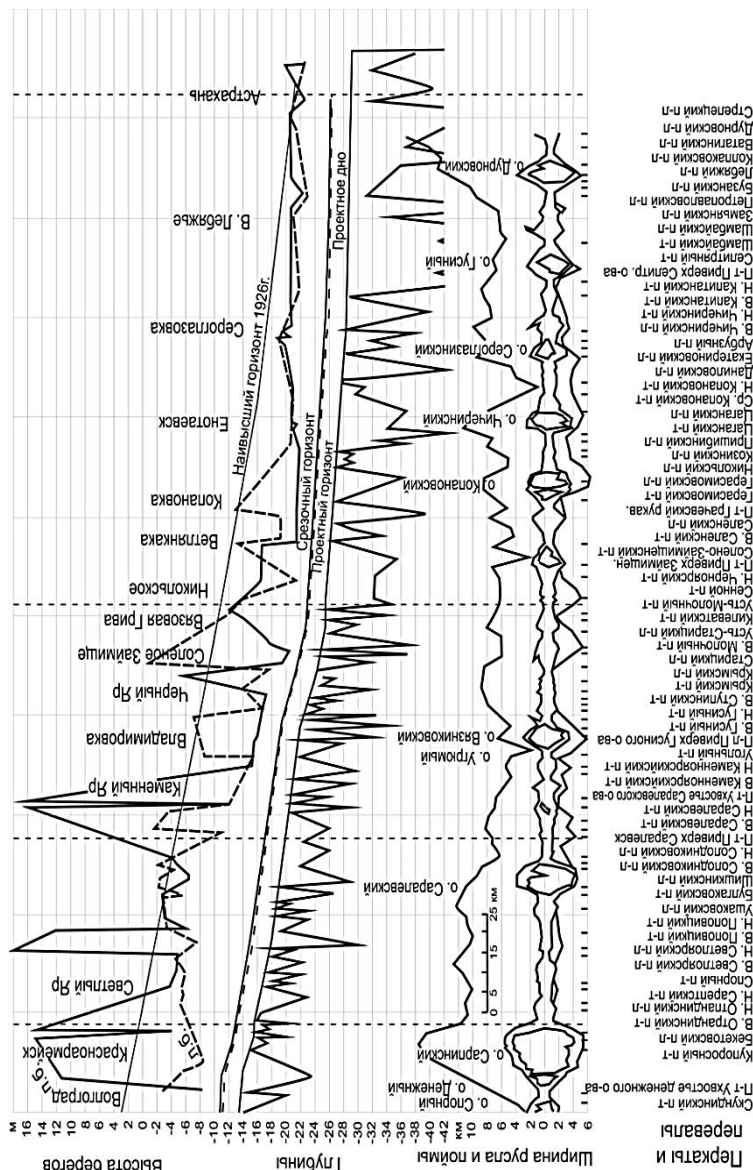


Рис. 2. Основные морфометрические показатели русла и поймы р.Волги на участке Волгоград-Астрахань

Общее падение реки в межень на участке Волгоград – Астрахань в 1955 г, составило 15,2 м, что соответствует сред-

нему уклону свободной водной поверхности 0,04 ‰. При проектном горизонте (профиль 1942 г, см. рис. 2) падение составило 14,27 м. Средний уклон поверхности поймы 0,05 ‰. Меженные уклоны свободной водной поверхности распределяются по длине реки неравномерно. В общем отмечается их убывание вниз по течению. Однако в продольном профиле свободной водной поверхности имеются перегибы. Они ясно выражены на рис.2 и в табл.1, показывающих распределение продольных уклонов в 1955 г.

Табл. 1. Уклоны водной поверхности в разные фазы режима (1955 г.)

Участок	Длина, км	Межень (28/IX)		На подъеме половодья (20/V)		На спаде половодья (20/VI)	
		падение, м	уклон, ‰	падение, м	уклон, ‰	падение, м	уклон ‰
Волгоград – Светлый Яр	47	2,68	0,057	2,68	0,057	2,15	0,046
Светлый Яр – Каменный Яр	95	2,92	0,031	3,33	0,035	3,04	0,032
Каменный Яр – Никольское	111	5,95	0,054	6,17	0,056	5,54	0,050
Никольское – Сероглазовка	139	3,00	0,022	5,36	0,039	4,98	0,036
Сероглазовка – Верхн. Лебяжье	57	0,17	0,003	1,27	0,022	1,38	0,024
Верхн. Лебяжье – Астрахань	50	0,47	0,009	1,47	0,030	1,58	0,032

В половодье уклоны свободной водной поверхности на участке между Волгоградом и Никольским в общем остаются приблизительно такими же, как в межень, а ниже Никольского и до Астрахани уклоны в половодье возрастают по сравнению с меженными, особенно резко на участке Сероглазовка–Астрахань. Как уже отмечалось, увеличение уклона в половодье объясняется неизменностью уровня воды в устье реки при любом расходе. С этим же связано и переуглубление русла на преддельтовом участке (ниже с. Никольского).

Ширина Волго-Ахтубинской поймы у Волгограда равна 32 км, далее к Черному Яру она уменьшается до 12-15 км и

вновь увеличивается только в конце участка, ниже с. Верхне-Лебяжьего, достигая у Астрахани 30-50 км.

Со стороны рек Волги и Ахтубы пойма ограничена современными береговыми валами этих рек, возвышающимися, как указывалось, в начале участка в среднем на 7-9 м, а в конце на 3-5 м над меженным уровнем воды. При этом береговые валы Ахтубы несколько ниже, чем валы главного русла Волги, Береговые валы на многих участках не затоплялись. Отмечается зависимость высоты берегов от ширины поймы: чем шире пойма, тем меньше высота берегов.

По мере удаления от берегов русла высота валов уменьшается, и здесь располагаются обширные плоские равнины центральной поймы, поверхность которых возвышается над меженным уровнем воды на 5-6 м в северной и на 2-2,5 м в южной частях поймы. Относительно ровная поверхность центральной части поймы нарушается гривами и ложбинами между ними, образованными береговыми валами пойменных протоков и речек.

Типичные поперечные профили поймы приведены на рис. 3.

Гидрографическую сеть Волго-Ахтубинской поймы можно подразделить на ряд основных морфологических звеньев. Среди них в первую очередь можно выделить русловые рукава, т. е. рукава, образовавшиеся в ходе общих плановых деформаций русла главным образом в результате отторжения прибереговых скоплений наносов или участков поймы, в вершинах излучин (промыв поверхности поймы за современными береговыми валами). В отличие от русловых рукавов, можно выделить группу пойменных рукавов, образовавшихся и развивающихся вне зависимости от местных плановых деформаций главного русла. Среди этих рукавов можно выделить крупные длинные протоки, являющиеся очень древними рукавами Волги (они сосредоточены главным образом в нижней части участка, между Черным Яром и Верхне-Лебяжьим), и протоки, образовавшиеся вследствие промывов пониженной притеррасной части поймы или в результате отторжения больших массивов поймы по линиям крупных ложбин и понижений.



Другую группу образований составляют ерики-протоки вторичного происхождения, которые характеризуются незначительной шириной, большой извилистостью, нередко наличием интенсивного меандрирования и являются результатом промывов поверхности поймы по местным межгрядным понижениям, происходящих в период затопления поймы. Подобные образования обычно бывают направлены от главного русла, проходят по притеррасной части поймы и вливаются в рукава, значительно удаленные от Волги. Иногда старые ерики могут впадать и в главное русло.

Относительно происхождения р. Ахтубы можно высказать ряд предположений. По мнению Бэра Ахтуба является очень древним руслом Волги, которое некогда проходило у левого склона долины. Однако вероятнее всего, что от некогда существовавшего здесь потока осталось только выработанное притеррасное понижение, а современная Ахтуба является вторичным образованием, существующим благодаря наличию по этому понижению стока воды в половодье, вследствие чего она является как бы сборным каналом для потоков, устремляющихся вглубь Волго-Ахтубинской поймы при ее затоплениях. Во всяком случае, извилины современной Ахтубы намного мельче извилин главного русла Волги и, по-видимому, соответствуют расходу воды, который пропускает эта река в настоящее время. Для р. Ахтубы характерен развитый процесс меандрирования. В межень Ахтуба, во многих местах пересыхает.

Следующая группа протоков на Волго-Ахтубинской пойме – прорывы, или прораны – представляет собой короткие и обычно мощные протоки, образовавшиеся в результате прорывов междрукавных участков поймы. Если проран выходит в проток менее мощный, чем тот, из которого он берет начало, в устьевой части прорана нередко образуется конус выноса. Если проток впадает в более мощный проток, этого образования не бывает.

Особую группу представляют собой озерки на пойме. Некоторые из них являются старицами, образовавшимися в результате заноса русловых рукавов, который обычно начинается с верхнего конца, либо старицы представляют собой участки русла, отчленившиеся в ходе меандрирования пойменных рукавов и ериков. Подобные старицы имеют серповидные очертания. Наконец, озерки могут образоваться в результате задержки воды в местных понижениях поймы после разлива.

Общее направление течения гидрографической сети Волго-Ахтубинской поймы может устанавливаться только в период половодья. В межень направление течения в рукавах может не совпадать с наблюдавшимся в половодье и меняться в течение межени.

Пойма сложена песчано-глинистыми современными аллювиальными отложениями, залегающими на размытой толще мощных (до 100 м) древнеаллювиальных песчаных осадков. Последние, в свою очередь, залегают на каспийских (хазарских), а местами на плиоценовых бакинских глинах и более древних третичных отложениях – темно-зеленых глинах.

У Волгограда мощность современного аллювия около 15,5 м. Под ним на глубине 9 м залегают пески с галькой и зернами кварца, далее 4,5 м занимает толща мелкозернистых песков, лежащих на бакинских глинах, сменяющихся на глубине темно-зелеными глинами. Наблюдается смена грунтов и в плане. Здесь выделяется русловой аллювий – мелкие и среднезернистые кварцевые пески, формирующие подвижные скопления наносов в русле реки. Их мощность по линии Черный Яр–Владимировка составляет 10 м, и они занимают 1/6 площади поймы. Далее выделяется прирусловой аллювий, слагающий ближайшие к реке современные береговые валы. Он состоит из чередующихся прослоек (иногда до 100) мелкозернистого глинистого песка, супеси, суглинков и песчаных глин. Мощность этих отложений 6-7 м, а занимаемая площадь составляет 1/3 площади поймы. Благодаря выносам песка ветром с обширных побочней и пляжей, обсыхающих в межень, на поверхность береговых валов эта типично аллювиальная толща может быть завалена частицами песка по крупности такими же, как в русле реки. В русловых и прирусловых песках наиболее распространены частицы крупностью 0,25-0,55 мм. Аллювий центральной (пониженной) поймы представлен глинистыми отложениями мощностью 3-4 м (пойменная фация), залегающими на русловых песках. Наиболее часто встречаются частицы 0,005-0,05 мм, т. е. пылеватые и илистые.

На поверхности участков поймы, расположенной у подножий склонов долины (притеррасные участки), обычны делювиально-аллювиальные отложения.



Приведем общую характеристику затопляемости Волго-Ахтубинской поймы при естественном водном режиме. Затопление поймы начинается задолго до выхода воды через бровки берегов главного русла Волги. Вода проникает на пойму по ерикам и другим протокам. На наибольший срок (около трех месяцев) затопляется примерно 40 % площади поймы, на средние сроки (две-три недели) – 30 % и кратковременно (на одну неделю) – 20 %. Совершенно незатопляемая площадь составляет около 10 %. Приведенные цифры, весьма приближенные и в основном характеризуют низовые участки Волго-Ахтубинской поймы.

Уже указывалось, что высота подъема уровня при выходе Волги в расширение ее долины уменьшалась в среднем на 1,6 м. Высота подъема уровня над наинизшим меженным ниже Волгограда приводится в табл. 2.

Табл.2. Подъем наивысших уровней над наинизшим уровнем летней межени за 1877–1955 гг.

Пункт	Подъем уровней, см			Абсолютная амплитуда за период, см
	средний	наивысший	наинизший	
Волгоград	773	912	506	1053
Черный Яр	858	1131	643	1327
Еногаевск	693	829	443	937
Верхне-Лебяжье	464	547	352	593
Астрахань	346	457	213	544

Из данных табл. 2 видно, что высоты подъема уровня от Волгограда к Черному Яру повышались в среднем на 85 см, что объясняется наличием на этом участке относительно высокой и малопроточной поймы. Ниже по течению, к Астрахани, они убывали в среднем на 5,12 м. Это убывание в начале участка Черный Яр–Астрахань связано с увеличением в течение всего года числа проточных рукавов Волги, а в конце участка – с резким расширением всей поймы и влиянием моря.

В табл. 3 приведены отметки выхода воды на пойму в створах водомерных постов

Табл. 3. Отметки выхода воды на пойму в створах водомерных постов

Водомерный	Отметка над	Водомерный	Отметка над
------------	-------------	------------	-------------

пост	нулем графика, см	пост	нулем графика, см
Дубовка	850—900	Черный Яр	790
Красноармейск	800—850	Никольское	960
Светлый Яр	800—850	Енотаевск	760
Солодники	820—870	Сероглазовка	530
Каменный Яр	850—900	Верхне-Лебяжье	330

В естественных условиях в многоводный год пойма на участках подмываемых берегов затоплялась на всем протяжении участка на глубину от 0,5 до 4,0 м. В средний по водности год пойма на многих участках не затоплялась (особенно между Черным Яром и Енотаевском). На затопляемых площадках слой воды составлял всего 2—3 см. В маловодный год затопление поймы наблюдалось только ниже Енотаевска, причем лишь в верховьях дельты; слой затопления составлял величину порядка 0,5 см. Оценка средней глубины затопления и процент затопления на основе данных по отдельным характерным поперечным профилям приводится в табл. 4 .

Табл. 4. Затопляемость Волго-Ахтубинской поймы по отдельным профилям [Филиппов, 1958]

Створ	Средняя глубина затопления (м) / процент затопления по створу	Глубина затопления при наивысшем уровне в 1926 г. (м) / процент затопления по створу	Глубина затопления в 1931 г. (м) / процент затопления по створу
Светлый Яр	2,2/90	3,5/99	—
Каменный Яр	0,9/97	3,8/100	1,6/98
Ступино	1,6/100	3,1/100	1,7/100
Старица	1,9/90	3,4/99	1,5/85
Грачевская	1,9/98	4,0/100	1,7/80
Ветлянская	0,8/53	2,8/100	0,9/76
Копановка	0,2/76	2,5/100	0,6/84
Косиха	1,6/94	3,3/100	1,8/97
Сероглазовка	1,0/90	2,7/100	0,4/61

Регулирующее влияние поймы сказывается на распределении стока по долине реки и во времени. Среднегодовой сток от Волгограда уменьшается к Верхне-Лебяжьему в среднем (за пе-

риод 1939-1953 гг.) с 248,3 до 243,7 км<sup>3</sup>/год, т. е. на 4,6 км<sup>3</sup>/год. На подъеме половодья (апрель–май) среднемесячный сток у Верхне-Лебяжьего на 20-30 % меньше, чем у Волгограда, а в период спада больше на 11 % в июне и на 31 % в июле в связи с отдачей воды поймой. В сентябре вода, накопившаяся на Волго-Ахтубинской пойме, полностью исчезает. При осеннем паводке сток у Верхне-Лебяжьего меньше, чем в Дубовке. В ноябре сток у Верхне-Лебяжьего больше, чем в Дубовке, но в декабре и январе в связи с потерями на ледообразование сток к Верхне-Лебяжьему вновь убывает. Состав взвешенных наносов характеризуется данными, приведенными в табл.5.

Табл. 5. Распределение взвешенных наносов по крупности г. Волгоград (Дубовка)

Крупность фракций, мм	<0,5	0,5-0,2	0,2-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	0,001
Процентное содержание	4	3	13	10	32	12	19	7

К с. Верхне-Лебяжьему процент наносов крупных фракций (0,05-0,5 мм) убывает до 2-3 %. Имеются и различия во внутригодовом ходе стока взвешенных наносов. У Дубовки на спаде половодья процентное содержание мелких фракций уменьшается от 25-40 до 5 %, а у Верхне-Лебяжьего увеличивается от 25 до 50 %. Уменьшается и крупность донных отложений (табл. 6).

Табл. 6. Процентное содержание наносов различной крупности

Пункт	Крупность наносов, мм				средний диаметр
	>0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01 и меньше	
Волгоград	59	35	6	1,0	0,4
Астрахань	32	60	7,5	1,0	0,17

Как следует из данных табл. 6, процентное содержание в донных отложениях крупных фракций(>0,25 мм) на участке от Волгограда до Астрахани уменьшается почти вдвое, а содержание более мелких фракций (0,25–0,05 мм) во столько же раз увеличивается. Содержание очень мелких фракций (0,05–0,01 и

<0,01 мм) остается почти неизменным. Средний диаметр донных отложений убывает с 0,4 до 0,17 мм.

Приведенные ниже характеристики плановых деформаций берегов русла и островов и сведения о высотах берегов позволяют приблизительно оценить объемы местного поступления и расходования наносов в ходе плановых деформаций русла в среднем за период с 1913 по 1940 г.

Объем размыва, берегов, приходящийся на 1 км длины участка между Волгоградом и Красноармейском (45 км), составлял 135 тыс. м<sup>3</sup>/год, а на 1 км длины размываемых участков – около 500 тыс. м<sup>3</sup>/год.

Между Красноармейском и Каменным Яром (95 км) объемом размыва соответственно равен 50 и 342 тыс. м<sup>3</sup>/год, между Каменным Яром и Копановкой (165 км) – 95,5 и 226 тыс. м<sup>3</sup>/год и между Копановкой и Астраханью – 24,1 и 82,3 тыс. м<sup>3</sup>/год.

Таким образом, интенсивность размыва убывает в направлении к Астрахани, т. е. вниз по течению, причем особенно резко это наблюдается ниже Каменного Яра.

На большинстве участков между Волгоградом и Астраханью основное поступление материала происходит за счет размыва правого берега (345 тыс. м<sup>3</sup>/год на 1 пог. км длины размываемых участков между Волгоградом и Красноармейском, 220 тыс. м<sup>3</sup>/год на 1 пог. км между Красноармейском и Каменным Яром и 47 тыс. м<sup>3</sup>/год на 1 пог. км длины размываемых участков между Копановкой и Астраханью). Исключение представляет только участок Каменный Яр–Копановка, на котором основной объем материала поступает от размыва левого берега (127 тыс. м<sup>3</sup>/год на 1 пог. км длины размываемых участков).

Объемы намыва берегов русла и островов распределяются по длине участка иначе: они возрастают до Копановки от 81 тыс. м<sup>3</sup>/год между Волгоградом и Красноармейском до 164,5 тыс. м<sup>3</sup>/год между Красноармейском и Каменным Яром и до 182 тыс. м<sup>3</sup>/год на 1 пог. км длины намываемых участков между Каменным Яром и Копановкой. К Астрахани объем намыва берегов русла и островов, приходящийся на 1 км длины намываемых участков, уменьшается до 103 тыс. м<sup>3</sup>/год.

Сопоставление суммарных объемов местного поступления наносов с измеренными объемами твердого стока показы-

вает, что объем поступающих взвешенных наносов через верховой створ (Дубовка) в естественных условиях можно оценить в 14 млн. м<sup>3</sup>/год, объем донных наносов – в 0,2 млн. м<sup>3</sup>/год (см. ниже); поступающие наносы от местных размывов берегов русла и островов (взвешенных и русловых) составляют около 43 млн. м<sup>3</sup>/год. Таким образом, суммарный приход наносов на участок можно оценить величиной порядка 57 млн. м<sup>3</sup>/год. Вынос наносов через замыкающий створ участка можно оценить по гидрометрическим данным в 14 млн. м<sup>3</sup>/год. На намыв берегов русла и островов расходуется 21 млн. м<sup>3</sup>/год и, следовательно, на пойме должно осаждаться около 22 млн. м<sup>3</sup>/год, что дает ежегодный слой наилка на поверхность поймы порядка 2-3 мм/год.

О фактических измерениях наилка имеются только отрывочные данные. Так, по обследованию Волгоградской ГМО, выполненным в 1956 г., на поверхности прирусловой части Сарептского полуострова слой отложений после половодья составил 0,5-2,0 см. По данным ГОИНа (Байдин и др., 1956), ежегодное нарастание высоты береговых валов в дельте составляет 4,3-25,0 см/год, а в отдалении от русла толщина годового наилка не превышает нескольких миллиметров. Учитывая, что в глубине поймы слой наилка должен быть значительно меньшим, приведенную выше среднюю толщину наилка в 2-3 мм можно считать приемлемой.

Из приведенных цифр видно, что основным источником поступления наносов в естественных условиях являются местные деформации русла, дающие 75 % суммарного прихода, в то время как поступление наносов через верховой створ участка составляет только 25 % суммарного прихода. Примерно 40% полученных потоком наносов расходуется на намыв берегов (формирование прирусловых участков поймы), 40 % на наилок на пойме и 20 % наносов выносятся в дельту.

Данные по объему местного поступления и расходования наносов иллюстрируются интегральными кривыми на рис. 4.

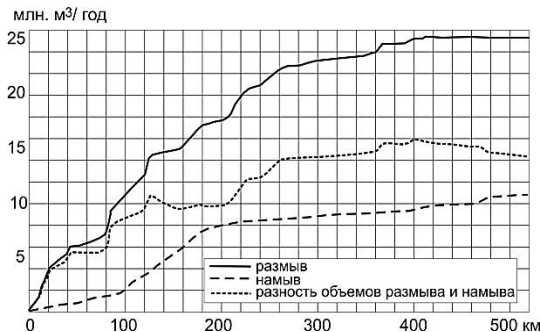


Рис. 4. Интегральные кривые среднегодовых объемов размыва и намыва берегов (среднее за период 1913-1940 гг.)

#### 4. Русловые деформации в естественных условиях

Сопоставление лоцманских карт Волги за период 26 лет (с 1913 по 1940 г.) позволяет выявить преобладающие типы русловых переформирований и приблизительно оценить средние значения плановых деформаций.

В главном русле Волги основным видом общих плановых деформаций является ограниченное меандрирование, в ходе которого отдельные участки русла искривляются, а затем происходят отторжения прирусловых участков поймы выпуклых берегов, ведущие к образованию островов.

Наряду с этим отмечается достаточно интенсивное сползание побочней, также сопровождающееся нередко их отторжениями и образованием низких песчаных островков-осередков. Последние в дальнейшем могут разрастаться и также формировать острова. Таким образом, типичной формой перемещения донных наносов является сползание крупных гряд —побочней, образующих перекааты.

Как удается проследить по картографическим материалам, наиболее развитые побочни, а следовательно, и наиболее трудные перекааты расположены на подходах к вершинам излучин русла. Это, по-видимому, объясняется тем, что на этих участках в результате подпоров, создаваемых поворотом русла, происходит замедление транспорта наносов и вследствие этого развиваются особенно большие побочни. Так как наносы относительно мелкие, а скорость течения значительна, то побочни даже в этих условиях оказываются все же достаточно подвиж-

ными и испытывают существенные переформирования. В частности, особенно хорошо выражены отторжения побочней.

Сползающий побочень, достигнув вершины излучины, постепенно замедляет движение и наконец, останавливается, занимая довольно устойчивое положение в плане. При этом обмен наносами продолжается, побочень непрерывно деформируется и часть его, срабатываясь, уносится потоком в низовую часть излучины. Здесь по выходе из излучины начинают вновь формироваться подвижные гряды-побочни, которые на подходах к ниже лежащей излучине вновь замедляют свое сползание и формируют сложные перекааты.

Подробные данные о перекаатах приведены в описаниях по участкам. Всего на участке от Волгограда до Астрахани располагается 11 крупных излучин главного русла. При общей протяженности участка 495 км длина этих излучин составляет 231 км, а остальная протяженность реки 264 км (т. е. несколько больше половины длины участка) приходится на относительно прямолинейные отрезки русла, преимущественно со сползающими и отторгающимися побочнями. Средняя длина излучин – их шаг  $\lambda$  – составляет 21 км при крайних значениях 37 и 9,5 км. Ширина пояса меандрирования в среднем равна 9 км (крайние значения 12,5 и 4,2 км) средняя ширина русла  $b=3,3$  км (наибольшая 7 км, наименьшая 0,4 км). Из этих данных видно, что длина (шаг) излучин  $\lambda$  в среднем только в 2,5 раза больше ширины пояса меандрирования, а последняя только в 3,4 раза превышает ширину русла. Эти количественные показатели характерны для ограниченного меандрирования [Попов, 1961].

Средняя площадь островов в русле реки (из 28 измеренных) на описываемом участке Волги составляет в межень  $8,8 \text{ км}^2$  (наибольшая  $44 \text{ км}^2$ , наименьшая  $0,7 \text{ км}^2$ ), при этом острова занимают в среднем половину площади русла на участке образования (крайние значения 0,9 и 0,1). Определенной тенденции в распределении величин параметров излучин и размеров островов по длине реки не обнаруживается.

Величины деформаций характеризуются следующими цифрами. При длине участка 498 км суммарная длина размываемых участков берегов русла составляет 213 км, намываемых – 142 км. Средняя длина размываемых участков, которых всего насчитывается 67, составляет около 3 км (наибольшая 9 км, наименьшая 0,8 км). Намываемых участков 48, средняя их дли-

на также около 3 км (наибольшая 5,2 км, наименьшая 0,5 км). Большинство размываемых участков приурочено к вогнутым берегам излучин, намываемых – к выпуклым. При этом длина размываемых участков правого берега (120 км) больше, чем на левом (90 км). Длина намываемых участков распределена по обоим берегам равномерно на левом берегу она оказалась равной 70 км, на правом – 73 км.

Плановые смещения бровок берегов русла в пределах размываемых участков составляют около 14 м/год, меняясь по длине участка от 15,2 м/год на первых 180 км (Ступино) до 10 м/год на последующих 190 км (до Енотаевска) и 12 м/год на участке Енотаевск – Астрахань (145 км) при наибольших величинах соответственно 50, 35 и 30 м/год (рис. 5). На этом рисунке совпадение участков размыва и намыва на одном и том же берегу обусловлено сложностью очертания береговых линий (затоны, коса и т. п.).

Перемещение берегов на намываемых участках составляет порядка 15 м/год, при этом на первых 370 км оно равно в среднем 17 м/год, а далее до Астрахани (145 км) 11 м/год при наибольших величинах 50 м/год на первых 370 км от ГЭС и 26 м/год на участке от Енотаевска до Астрахани (рис. 5).

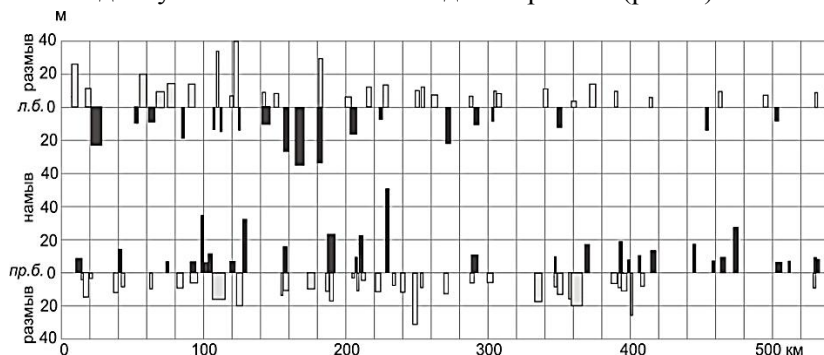


Рис. 5. Диаграмма распределения плановых смещений по длине р.Волги

Смещение островов за тот же период в среднем может быть равно приблизительно 15 м/год. Наибольший размыв берегов островов составляет 36 м/год, намыв 43 м/год.



Деформации островов проходят достаточно разнообразно. Острова, образовавшиеся путем отторжения участков поймы на выпуклых берегах, имеют характерную полулунную или серповидную форму в плане и смещаются в поперечном направлении, преимущественно влево. Из 28 крупных островов таких оказалось 10. Островов, образовавшихся путем отторжения побочней, насчитывается 15, они большей частью сползают вниз, одновременно смещаясь в поперечном направлении также преимущественно влево.

Поперечные смещения островов свидетельствуют о том, что при образовании рукавов последние обычно начинают меандрировать. В ходе этого меандрирования новообразовавшиеся рукава обычно разрабатываются, и по ним проходит главное русло, а прежнее главное русло мелеет и превращается в воложку.

При сопоставлении съемок 1913 и 1960 гг. обнаружен случай, когда относительно крупный остров (364,5 км от ГЭС) оказался полностью размыт, и случай, когда остров (383 км от ГЭС) подвергся размыву по всей своей периферии. Подобные случаи расчленения островов бывают на Соленском гидроузле и на других участках реки.

### ***5. Изменения основных факторов руслообразования в условиях регулирования стока***

Изменения водного режима. Годовые объемы стока в нижнем бьефе ГЭС им. XXII съезда КПСС в результате его регулирования останутся близкими к наблюдавшимся в естественных условиях, уменьшаясь с 248,3 до 239,3 км<sup>3</sup>/год, т.е. всего на 4%. Однако произойдет существенное внутrigодовое перераспределение стока в размерах, показанных на рис. 6 и в табл. 7.

Из таблицы 7 следует, что сток весеннего половодья в результате регулирования уменьшится на 23%:. Основная часть задержанного стока (21,2%) пойдет на повышение уровня в период зимней межени и лишь очень небольшая часть (2%) будет израсходована на повышение уровня в период летне-осенней межени.

В отношении изменения среднемесячных расходов воды могут быть приведены данные, рассчитанные Гидропроектом (1959 г.) за период 1914-1940 гг. для первого этапа регулирования (в условиях работы Волгоградской, Куйбышевской, Горьковской, Рыбинской, Угличской и Ивановской ГЭС) и для расчетного этапа регулирования (после ввода Чебоксарской и

Саратовской ГЭС на Волге, Боткинской и Нижне-Камской ГЭС на Каме, Советской ГЭС на Вятке).

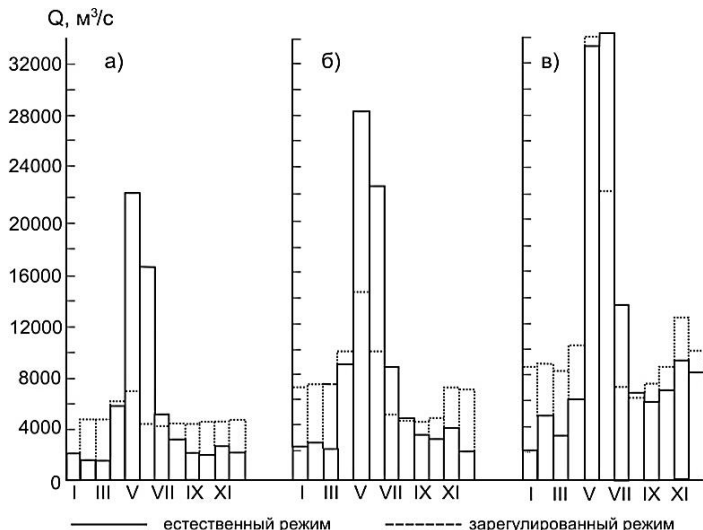


Рис. 6. Среднемесячные расходы воды в естественном состоянии и при регулировании стока водохранилищами Волжской ГЭС им. Ленина и Волжской ГЭС им. XXII съезда КПСС в маловодный (а) средний (б) и многоводный (в) годы

Табл. 7. Сток за основные сезоны года в естественных и зарегулированных условиях (средний за период 1914-1940 гг.)

Период	Бытовой сток		Сток в условиях регулирования		Изменение стока, %
	км³	%	км³	%	
Весеннее половодье (март – июль)	151,2	60,9	89,6	37,4	-23,5
Летне-осенняя межень (июль – ноябрь)	65,7	26,5	68,9	28,8	+2,3
Зимняя межень ноябрь-март)	31,4	12,6	80,8	33,8	+21,2
За год	248,3	100	239,3	100	-

На рис. 6, и из данных табл. 7 и 8 видно, что в результате регулирования стока наибольшие среднемесячные расходы воды будут резко уменьшаться. Для расчетного этапа регулирова-

ния эти расходы уменьшатся в среднем примерно в два раза. При этом высокие значения наибольших среднемесячных расходов уменьшатся примерно в 0,8 раза, а низкие значения уменьшатся весьма значительно (до трех раз). Расходы воды летней межени несколько возрастут, и лишь расходы зимней межени повысятся в три-пять раз.

Табл. 8. Среднемесячные расходы воды ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) в нижнем бьефе ГЭС им. XXII съезда КПСС (по данным Гидропроекта)

Среднемесячные расходы воды	Наибольший расход воды в половодье			Наименьшие расходы воды					
				в период навигации			зимние (декабрь-февраль)		
	Естественные условия	зарегулиро- ванный		Естественные условия	зарегули- рованный		Естественные условия	зарегулиро- ванный	
		первый этап	расчетный этап		первый этап	расчетный этап		первый этап	расчетный этап
Средний	28843	19714	14970	3696	4661	4873	1830	5109	6978
Наибольший	44345	35807	32183	6571	7639	7444	3440	7163	9326
Наименьший	19730	9086	5704	1176	4000	4079	913	3761	4000

В отдельные периоды половодье может не наблюдаться в течение ряда лет. В годы с высоким половодьем величины расходов воды будут в основном уменьшаться на спаде (июнь–июль), а в годы с низким половодьем расходы воды будут меньше естественных почти в два раза и составят 4–8 тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$ , но окажутся в два раза больше расходов воды летне-осенней межени и в четыре раза больше зимних. Лишь в средний по водности год зарегулированный сток будет близок к естественному. Средние наибольшие расходы половодья составят 15 тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$ , в межень 7 тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$ . По данным Гидропроекта, в результате аккумуляющего влияния поймы среднемесячные расходы воды в конце участка (Верхне-Лебяжье) уменьшатся от 35-36 до 26-27 тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$ , а на расчетном этапе от 32 до 26 тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Следует отметить, что в результате регулирования стока обеспеченность наибольших расходов у Верхне-Лебяжьего значительно уменьшается (в два-три раза).

Предполагающаяся переброска вод северных рек (40 км<sup>3</sup>/год), по-видимому, существенного увеличения полово-

дья не вызовет, так как сток будет сбрасываться. Описанная выше схема регулирования волжского стока, разработанного Гидропроектом, должна быть несколько изменена в связи с проектирующимся вододелителем в верховьях дельты для ее обводнения.

По имеющемуся проекту в результате постройки вододелителя в главный рукав дельты – Бузан должен быть направлен расход воды в период половодья, равный 8-9 тыс. м<sup>3</sup>/сек., а в западную часть дельты равный 2-3 тыс. м<sup>3</sup>/сек. Для этого необходимо, чтобы расход воды в створе Верхне-Лебяжье на период половодья составлял 11-12 тыс. м<sup>3</sup>/сек.

На первом этапе регулирования такой расход может быть обеспечен в 17 случаях, а на расчетном этапе в 14 случаях из 26. Таким образом, ежегодного и полного затопления дельты водой добиться вряд ли удастся.

Новым явлением, возникающим при всех вариантах регулирования стока, является суточное регулирование. О длине зоны влияния суточного регулирования можно судить по следующим данным. По данным Гидропроекта, колебания уровня воды в результате суточного регулирования должны составить в осенний период в начале участка около 2 м, а в 60 км ниже (Светлый Яр) – 0,4 м. В летний период (июнь) колебания уровня воды должны быть равны 1,3 и 0,3 м соответственно. Данные влияния суточного регулирования по длине зоны особых сомнений не вызывают.

Фактические данные по работающим ГЭС показывают, что зона влияния суточного регулирования ГЭС имени Ленина (Куйбышев) при амплитуде колебаний в начале участка около 1,5 м распространяется примерно на 174 км. На Нижне-Камской ГЭС длина этой зоны при амплитуде около 1 м в начале участка распространяется примерно на 90 км, на р. Свири при амплитуде 3,5 м в 57 км ниже створа Нижне-Свирской ГЭС суточные колебания оказываются равными 0,5 м. На р. Тверце при амплитуде около 2 м суточные колебания сглаживаются в 45 км ниже створа Ново-Тверецкой ГЭС.

Уменьшение расходов воды половодья приведет к резкому снижению высот подъема уровня.

Судя по кривой зависимости расходов и уровней, снижение половодья вызовет уменьшение подъемов уровня в Волгограде в средний по водности год на 3,45 м, в многоводный на 1,14 м, в маловодный на 3,3 м.

В конце участка, у Астрахани, отметки наивысших уровней в средний по водности год будут примерно на 2 м ниже, чем в естественных условиях (см. табл. 4), а уровни осенне-зимней межени окажутся на 1 м выше естественных уровней.

Существенные изменения претерпит и твердый сток. Можно считать, что все руслообразующие наносы будут задерживаться в водохранилище, через которое пройдут только наносы крупностью меньше 0,005 мм.

### III. Участок волжской ГЭС имени XXII съезда КПСС (Волгоград—Красноармейск)

#### 1. Общее описание участка и факторов руслообразования

На участке Волгоград—Красноармейск длиной 45 км русло Волги пересекает Волго-Ахтубинскую пойму, расположенную слева по течению, и проходит у подножья правого крутого склона долины высотой от 25-30 до 50 м, сложенного преимущественно лессовидными суглинками (рис. 7).



Рис. 7. Схема участка Волгоград—Красноармейск

Русло Волги на участке Волгоград—Красноармейск характеризуется развитием крупных русловых рукавов, образующихся в результате отторжения побочной или реже – вследствие от-

торжения прирусловых участков поймы (в конце участка). Пойменный берег высотой от 5-8 до 10-12 м над меженью затоплялся только при очень высоких половодьях, а пойма на прилегающих к руслу участках расчленилась сетью небольших узких пойменных протоков (ериков), действующих в период половодья.

Река Волга на всем протяжении до Красноармейска находится в зоне наиболее интенсивного воздействия регулирования стока водохранилищем ГЭС.

В период строительства ГЭС верхняя часть участка подвергалась переустройству в связи с отводом р. Ахтубы и рядом мероприятий в нижнем бьефе ГЭС: строительством котлована, подходного канала, созданием временных перемычек: в рукавах, берегоукрепительными работами и т. п. (рис. 8 и 9). Строительные работы и сооружения ГЭС вызвали размыв дна под воздействием сужения русла (1952-1958 гг.) и сбросов через водосливную часть плотины (позднее октября 1958 г.).

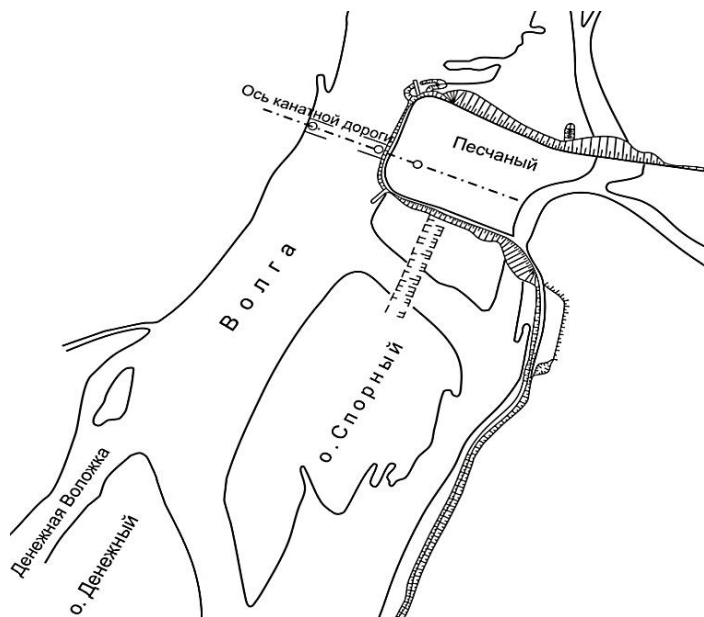


Рис. 8. Схема расположения перемычек в период строительства ГЭС им. XXII съезда КПСС

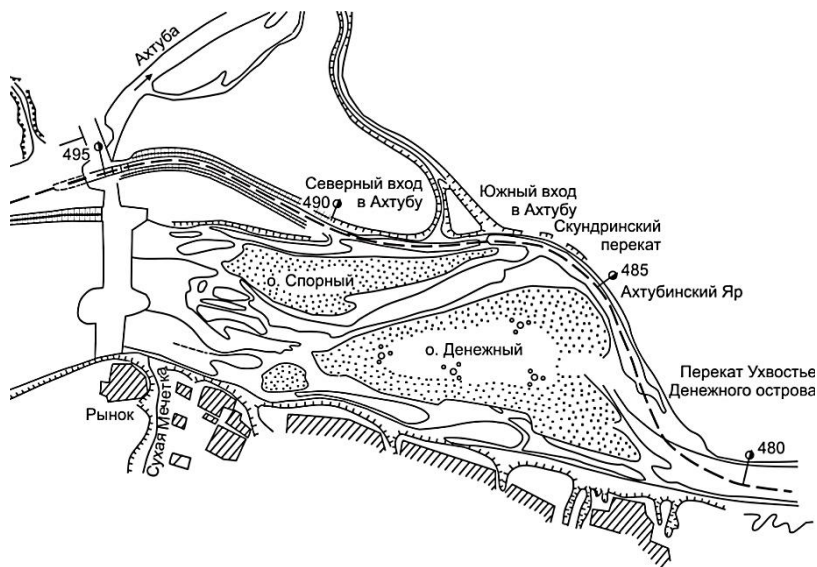


Рис. 8. Схема нижнего бьефа ГЭС им. XXII съезда КПСС

После начала регулирования стока все протяжение участка будет находиться в зоне суточного регулирования, которое, как отмечалось, в начале участка будет вызывать колебания уровня около 2 м в сутки, а у Светлого Яра (60 км ниже плотины) около 0,4 м в сутки.

Условия для развития на участке подвижных форм скоплений наносов и переформирований русла благоприятны, поскольку в его пределах значительны уклоны свободной водной поверхности и скорости течения, а грунты дна и берегов представлены относительно мелкими фракциями наносов. Наряду с этим, на участке наблюдались и будут наблюдаться значительные колебания уровня воды.

Средние уклоны водной поверхности в главном русле Волги на участке длиной 65 км от Волгограда до Светлого Яра (20 км ниже Красноармейска) по данным измерений 1955 г. составляли в межень (28/IX) 0,057 (падение 2,68 м), на подъеме половодья (20/V) 0,057 (падение 2,68 м), на спаде половодья (20/VI) 0,046 (падение 2,15 м).

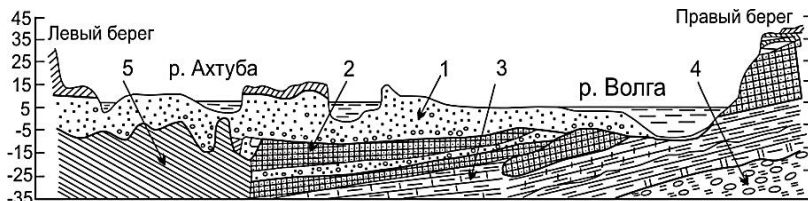
Из приведенных цифр видно, что уклоны в межень на участке такие же, как и уклоны, наблюдающиеся в половодье.

Приведем данные о скоростях течения. Средние скорости течения на участке в межень составляли около 0,5 м/с, в половодье 0,8 м/с. На перекатах наибольшие скорости течения в половодье нередко достигали 2-2,5 м/с.

Преобладающей фракцией донных отложений на участке являются частицы крупностью 0,25-0,5 мм (средний диаметр 0,40 мм). В нижних слоях песчаных отложений имеются гравелисто-галечные включения. Содержание гравия и гальки в этих слоях составляет в среднем 30–60%. Пески с высоким содержанием гравия и гальки наиболее близко к поверхности дна русла залегают под Денежной воложкой. Они препятствуют размывам дна этого важного рукава Волги, проходящего непосредственно у Волгограда.

Пески подстилаются слабо сцементированной песчано-алевролитной толщей с прослойками крепкого песчаника и слабых песчаников. Под этой толщей залегают хорошо сопротивляющиеся размыву алевролиты.

Порядок напластования пород показан на рис. 10.



1- пески серовато-белые, кварцевые, 2 - песчаники, 3 - алевролиты крепкие, 4 - породы песчано-алевролитовые, переходящие в глинистые пески с линзами, 5 - глина слоистая

Рис. 10. Геологический разрез по створу плотины ГЭС им. XXII съезда КПСС (по Россинскому)

По данным К. И. Россинского [Россинский, 1961], песчаная толща размывается при скоростях течения 0,65 м/с, алевролиты – при 1,4 м/сек (глубина песчаной толщи и алевролитов должна составлять примерно 1 м).



Как видно из данных о фактически наблюдающихся скоростях течения, размывающих скоростях, крупности и составе грунта, донные отложения не являются устойчивыми, вследствие чего в русле и образуются крупные и подвижные скопления наносов. Их наличие вместе с тем обуславливает появление на отдельных участках сложных течений, в том числе и обратных (водоворотов), а также частых изменений положения динамической оси потока и, как следствие этого, изменений плановых положений и глубины судовых ходов.

Изменениям положения динамической оси потока способствуют и довольно значительные колебания уровня воды Волги. Как упоминалось, уровни весеннего половодья в Волгограде в среднем более чем на 7 м превышают меженные. Наибольшая годовая амплитуда колебания уровня составляет 12 м (1955 г.) и 12,5 м (1926 г.).

Принос взвешенных наносов в естественном состоянии через верховой створ участка составлял по данным гидрометрического створа в Дубовке в среднем 890 г/с, или 14 млн. м<sup>3</sup>/год. Среднегодовой объем донных наносов, поступающих на участок, по данным измерений донным батометром можно грубо оценить в 200 тыс. м<sup>3</sup>/год, или 1,5 % от взвешенных наносов.

Сопоставление съемок 1913 и 1940 гг. (период 26 лет) позволяет приблизительно оценить объем наносов, поступающих от местного размыва берегов русла и островов. Он составляет величину порядка 6,2 млн. м<sup>3</sup>/год, из которых на размыв берегов русла приходится: левого 2,5 млн. м<sup>3</sup>, правого 2,7 млн. м<sup>3</sup>, т. е. всего 5,2 млн. м<sup>3</sup>/год, а на размыв островов около 1,0 млн. м<sup>3</sup>/год (см. рис. 6). Таким образом, суммарное поступление наносов составляет около 20 млн. м<sup>3</sup>/год.

Этот объем наносов состоит, из взвешенных и донных наносов. Взвешенные наносы в основном идут транзитом и расходуется на отложение наилка на пойме, донные наносы принимают участие в формировании русловых образований. Предположить, что на участке может наблюдаться массовое осаждение взвешенных наносов в русле, нет оснований.

Вынос взвешенных наносов за пределы участка можно приблизительно оценить в 18 млн. м<sup>3</sup>/год, т.е. на 4 млн. м<sup>3</sup>/год больше, чем поступление наносов через верховой створ (14 млн. м<sup>3</sup>/год). Следовательно, это дополнительное количест-

во наносов поток должен получать за счет местных размывов берегов и поверхности поймы (приточность отсутствует).

Так как суммарный объем размыва берегов составляет около 6,2 млн. м<sup>3</sup>/год, из которых 4 млн. м<sup>3</sup>/год взвешенных наносов выносятся потоком за пределы участка, а 0,7 млн. м<sup>3</sup>/год русловых наносов идет на намыв берегов, то правомерно предположить, что остающиеся примерно 1,5 млн. м<sup>3</sup>/год наносов могут являться только взвешенными. Они выносятся на пойму и откладываются на ней, формируя наилок. Указанный объем наносов, выносящихся на пойму, должен образовывать средний ежегодный слой наилка на ее поверхности порядка 0,2 мм.

Приведённые данные и подсчеты, конечно, очень приближены, но, совпадая с тенденциями процесса, обнаруженными морфологическим анализом, могут считаться правомерными.

Во всяком случае, есть основания принять, что объемы местных переформирований русла Волги в пределах рассматриваемого участка составляют примерно 30 % общего объема поступления наносов, а принос наносов через верховой створ участка дает около 70% суммарного поступления. Следовательно, прекращение переноса наносов в связи со строительством водохранилища на реке должно вызвать существенные изменения в характере русловых и пойменных деформаций.

## ***2. Русловые деформации в естественных условиях***

Съемки русла р. Волги позволяют достаточно уверенно проследить деформации русла начиная с 1897 г.

Рассмотрим деформации русла, происходившие в естественных условиях, т. е. до 1952 г., когда началось сооружение перемычек ГЭС.

Как показывают съемки 1897, 1913, 1940, 1950, 1952 гг., за период до конца 1952 г., или за 55 лет, в русле Волги у начала р. Ахтубы (так называемый приплотинный участок) сформировалось три больших острова (рис. 11), занявших участок реки протяжением примерно в 15 км. Эти острова образовались в результате разрастания и отторжения крупных песчаных побочных.

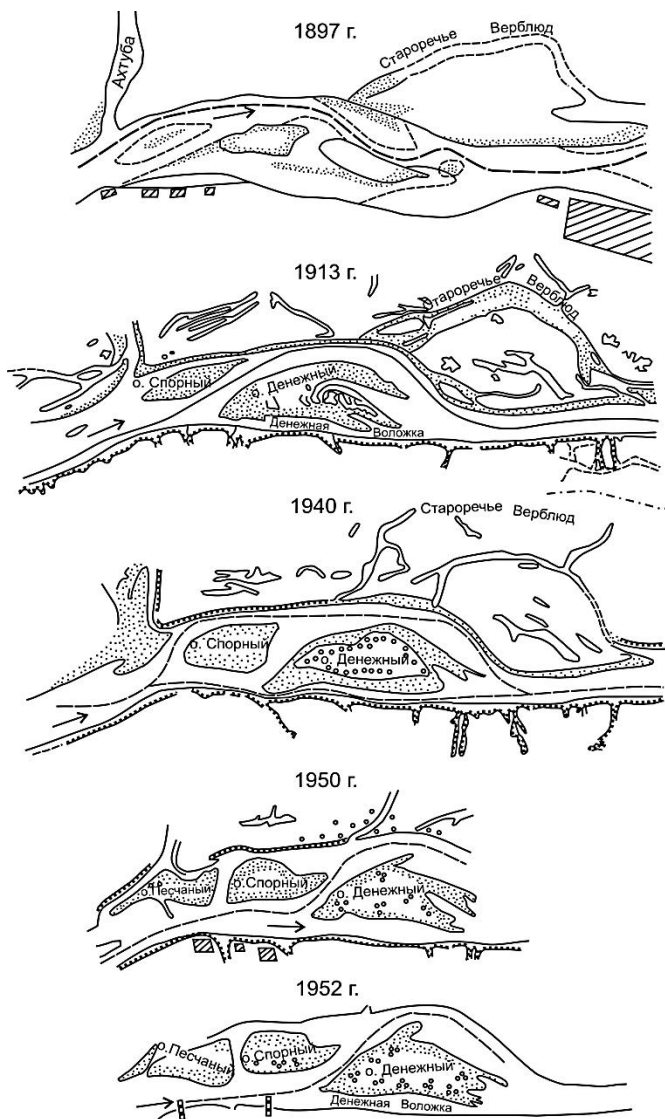


Рис. 11. Сопоставленные планы р. Волги за характерные годы периода 1897-1952 гг. (естественный режим)

В указанный период имело место усиленное поступление наносов на участок в связи с прохождением ряда высоких поло-

водий. Они наблюдались в 1914–1917, 1919, 1926 и 1929 гг. Подъемы уровня при этих половодьях составили 9,3–9,7 м над нулем графика Волгоградского водомерного поста при обычной высоте подъема 7–8 м. Изложенное выше дает основание полагать, что русло Волги в указанный период не могло справиться с транспортированием поступающих на участок наносов.

Достаточным объяснением формирования скоплений наносов у берегов на описываемом участке служит наличие на нем процесса побочного типа, при котором побочни, перемещаясь вниз по течению, могут появляться на любом участке реки.

Съемка реки, выполненная в 1897 г., дает возможность обнаружить на участке правого берега за поворотом долины обширное скопление наносов типа побочня. Этот побочень интенсивно разрастался при высоких половодьях и наконец оказался отторженным. Его наиболее возвышенная часть сформировала о. Денежный, который достаточно четко обнаруживается на карте 1897 г., а на съемке 1913 г. его поверхность показана уже закрепленной кустарниковой растительностью.

Расположенный выше этого острова осередок, показанный на съемках 1897, 1913, 1940 гг., на съемках 1950 г. обозначен уже как о. Спорный.

Отторжение побочня на левом берегу у истоков р. Ахтубы привело к образованию о. Песчаный. Этот побочень впервые показан на съемке 1940 г., а как остров нанесен уже на съемке 1950 г.

Остров Сарпинский (Заумор) (рис. 12) представляет собой отторженный участок левобережной поймы, ныне отделенный от основного массива протокой Куропаткинская воложка, по которой в настоящее время проходит около 25% стока Волги. Благоприятные условия для отторжения поймы в месте образования о. Сарпинский, т. е. в конце участка, обусловлены резким поворотом реки влево, вследствие чего поток, пересекая в половодье выпуклый участок левобережной поймы, имеет возможность производить на ее поверхности значительные размывы. Вместе с тем прирусловая часть поймы вследствие обилия материала, который может быть израсходован на намыв берегов (перемещение крупных донных скоплений), повышена, что в свою очередь соз-

дает благоприятные условия для отторжений. Таким образом, для участка реки характерны тесно связанные между собой процессы нарастания прибреговых скоплений наносов и их последующее отчленение, после которого идет усиленная разработка образовавшегося протока и отмирание старого русла.

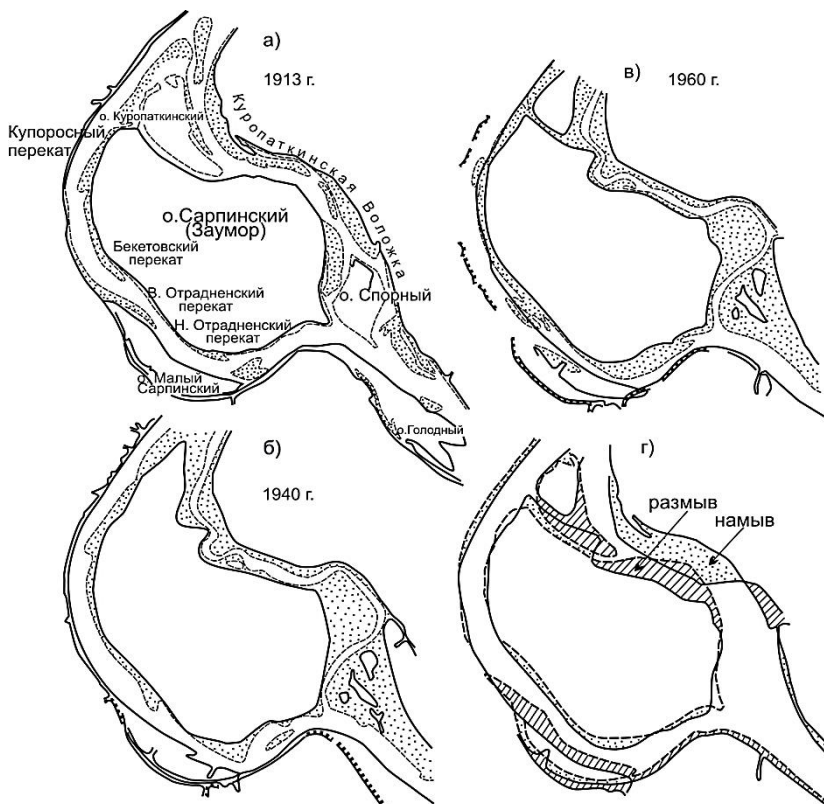


Рис. 12. Сопоставленные планы (а,б,в) и схема переформирования берегов (г)

В ходе описанных деформаций острова, образовавшиеся в результате отторжения побочней, претерпевают существенные переформирования: происходят плановые перемещения островов в связи с образованием вдоль их берегов побочней и вместе с тем возможно их расчленение в результате отторжения этих побочней; кроме того, наблюдается сползание островов. Одновременно с этим происходят крупные деформации остров-

ных и внешних берегов русла. В конечном итоге островные участки реки достаточно быстро переформируются, коренным образом изменяя свои плановые очертания.

За время с 1913 по 1952 г. о. Денежный сместился вниз по течению примерно на 1 км. За этот же период левый внешний вогнутый берег русла у этого острова на участке длиной 9 км размылся и сместился на 1800 м, т. е. в среднем за год на 45 м. Соответственно с этим левый берег острова намывался примерно с такой же скоростью, а правый (со стороны Денежной воложки) размывался, однако значительно меньше.

Деформации о. Сарпинский за период с 1913 по 1952 г. в основном выражались в местных переформированиях его берегов; общего смещения острова не наблюдалось (рис. 12). Можно отметить следующие переформирования. Приверх острова с 1913 по 1940 г. намывался, а бровка берега на этом участке перемещалась вверх по течению.

За период 1913 по 1952 г. происходили довольно значительные переформирования левого протока Волги Куропаткинской воложки. В верхней его части, примерно на протяжении 10 км от начала размыва, русло протока смещалось вправо, т. е. размывался берег о. Сарпинский и намывался берег реки. Перемещение берега русла в результате намыва шло сплошным широким фронтом и достигло 1,2 км за указанный период, или около 35-40 м в год. Перемещение берега острова (размыв) шло на отдельных участках и составило также около 1,0 км за период, или 30-40 м в год. В нижней части Куропаткинской воложки наблюдался аккумулятивный процесс, в результате которого к 1940 г. произошло объединение осередков и небольших побочней в два крупных побочня – левобережный и правобережный, в результате чего многорукавное в межень русло стало однорукавным и S-образно изогнутым. В конце Куропаткинской воложки происходит размыв ее правого берега и намыв левого со скоростью 20-30 м в год на участке длиной более 1 км.

В главном русле Волги у о. Сарептский происходил небольшой намыв берега острова (правого) и наблюдался размыв правого склона долины (его подножия) у которого имеются обширные, причленившиеся к берегу накопления наносов. Перемещение бровки этого берега составило 200–300 м за период

1913-1940 г., т. е. примерно 10 м в год. Размыв этого участка правого берега угрожает ряду сооружений у г. Красноармейска, в частности, сооружениям канатного завода; на участке велись берегоукрепительные работы. Следует также упомянуть о заносе Щучьего прорана, пересекающего оголовков о. Сарпинский, в период 1913-1940 гг.

Наряду с указанными выше основными крупными аккумулятивными образованиями в русле реки имеются отдельные более мелкие осередки и побочни, приводящие к появлению перекатов. По своему происхождению перекаты на участке различны, но среди них преобладают перекаты, образованные относительно небольшими сползающими побочнями, причем иногда односторонними (левобережными), как, например, на Купоросном перекате.

Можно выделить также перекаты, образовавшиеся вследствие заноса песком подводных каменистых гряд (Сарептский перекат). Большинство перекатов отличается значительной подвижностью.

В целом перекаты сползают, однако некоторые из них могут в отдельные годы развиваться регрессивно. На рис. 13 показан совмещенный продольный профиль р. Волги на описываемом участке по съемкам 1954 и 1956 гг., позволяющий проследить характер смещения перекатов.

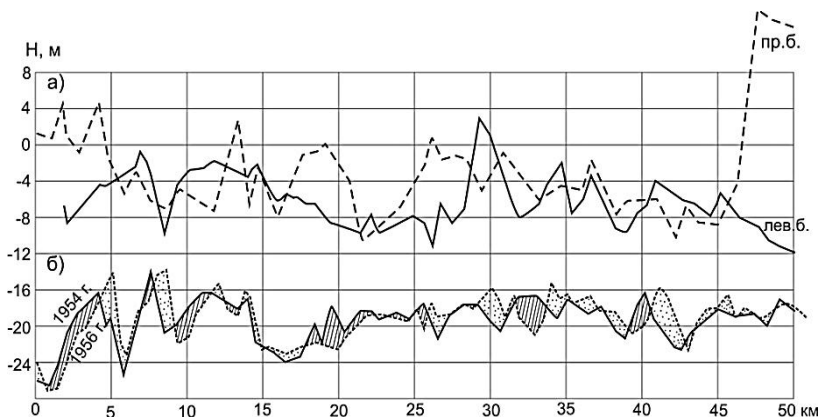


Рис. 13. Совмещенный продольный профиль берегов (а) и дна русла р. Волги по фарватеру (б) за 1954-56 гг.

В естественных условиях особенно затруднительных мест для судоходства на участке не было. Наиболее трудным был Отрадненский перека́т, расположенный в главном русле Волги, у нижней оконечности о. Сарпинский. Кроме него, известные ограничения для судоходства представляли перека́ты Купоросный и Бекетовский, расположенные также в главном русле Волги, на участке, огибающем о. Сарпинский.

Купоросный перека́т образован ухвостьем одностороннего левобережного побочня в главном русле Волги, примерно в середине участка реки, огибающего справа о. Сарпинский. Гребень Купоросного перека́та вместе с побочнем постепенно перемещался вниз по реке. С 1913 по 1940 г. он сместился на 3 км.

Бекетовский перека́т образован двусторонними побочнями. На этом участке сползание побочней еще более интенсивное, чем на Купоросном перека́те. С 1913 по 1940 г. перека́т сместился на 5,5 км. Сползание побочней на этом участке сопровождалось отторжением слишком выросших кос, что привело к образованию осередков, еще более осложняющих судоходство, и к появлению неустойчивого в плане фарватера.

Отрадненский перека́т представляет собой более сложное образование, чем Купоросный и Бекетовский перека́ты. Он сформирован тремя шахматно расположенными побочнями и поэтому разделяется на Верхний и Нижний. Общая длина Отрадненских перека́тов 4 км (между 461 и 457 км от устья Волги). Гребень Верхне-Отрадненского перека́та за период с 1913 по 1940 г. сместился вниз по течению на 2,5 км. Одновременно со сползанием изменялись и общие плановые деформации русла. Верховой левобережный побочень расширялся, а правый противоположный берег реки размывался. В результате интенсивного разрастания низовой части побочней вследствие отторжения участка низовой косы образовался подводный осередок. Гребень перека́та, таким образом, соединяет оконечность левобережного побочня с подводным осередком, а далее выходит к верховой оконечности ниже расположенного правобережного побочня. Обвалы правого берега, вызывающие нередко обрушение его полосы шириной 70–100 м, приводят к суще-



ственным засорению русла, и судовой ход проходит слева от подводного осередка.

Наиболее подвижен верховой (левобережный) побочень. Нижне-Отраденнский пережат в период между 1940 и 1960 гг. сработался и превратился в перевал (съёмка 1960 г.). В общем режим деформаций русла на Отраденском пережатке такой же, как обычно наблюдающийся на большинстве подобных образований. Пережаток начинает намываться на подъеме половодья, когда происходит интенсивное перемещение по руслу крупных песчаных гряд. На участках наибольших глубин и скоростей течения высота этих гряд достигала 1,5 м, в среднем составляя около 1 м (1957 г.). На спаде половодья начинается размыв корыта пережатка и интенсивное перемещение наносов на ниже лежащий плес.

Систематические промеры, выполненные техучастком в межень 1952–1956 гг., дают возможность оценить общие деформации всего участка пережатка длиной 3,8 км по годам (табл. 9). Промеры показали, что на участке существуют отдельные места размывов и отложений.

Табл. 9. Деформации русла на участке Отраденского пережатка за период 1952–1956 гг. (длина участка 3,8 км)

Годы	Деформации русла, тыс, м <sup>3</sup>		Средний годовой расход воды, м <sup>3</sup> /сек
	намыв	размыв	
1952–1953	328	385	8800
1953–1954	255	747	6900
1954–1956	995	282	9760
1952–1956	1577	1415	6660

### ***3. Ход русловых деформаций, вызванных строительством и эксплуатацией Волжской ГЭС имени XXII съезда КПСС***

Изменения в ходе руслового процесса появились с октября 1952 г., когда началось перекрытие русла Волги и переустройство входа в р. Ахтубу (см. рис. 8). В 1958 г. Волга была полностью перекрыта плотиной ГЭС (см. рис.9) и началось наполнение водохранилища.

Волгоградской гидрометеорологической обсерваторией накоплен значительный материал собственных исследований за

период 1952–1961 гг, а также собраны материалы работ других учреждений (Гидропроект, техучастки БУП и др.). Эти материалы позволяют в первом приближении оценить изменения в ходе руслового процесса на приплотинном участке, т. е. на первых 20 км от створа ГЭС, как в условиях строительства, так и в условиях эксплуатации ГЭС.

Обобщение данных по систематическим промерам русла и съемкам берегов, а также по измерениям скоростного поля потока показывает, что за исключением непосредственно прилегающего к плотине участка протяжением примерно 10 км тип процесса после строительных работ и в ходе эксплуатации ГЭС коренных преобразований пока не претерпел. Однако указанные работы оказали существенное воздействие на интенсивность руслового процесса при сохранении прежних тенденций его развития.

Деформации русла, вызванные строительными работами. Рассмотрим переформирования русла за период 1952-1957 гг., обусловленные строительными работами, главным образом сужением русла Волги перемычками (см. рис. 8)

1. В результате стеснения русла временными перемычками начала формироваться зона местного размыва на участке перемычек. Наблюдения показывают, что глубина ямы размыва достигла в этот период 6–10 м, после чего размыв практически прекратился, так как река, вынеся всю толщу аллювия, встретила твердые породы – алевролиты, а кроме того, яма размыва загроужалась крупным камнем. Основной размыв произошел в первое же половодье, т. е в 1953 г.

Размыв, начавшийся в створе наибольшего стеснения русла перемычками (см. рис. 8) и обусловленный резким сужением русла (его живое сечение уменьшилось до 60 % по сравнению с естественным), в первый же год работ (1952–1953 гг.) распространился на участок длиной около 2,5 км ниже створа ГЭС. При этом произошел размыв оголовка о. Спорный (см. рис. 8). Зона размыва охватила почти всю ширину русла и неразмытым оказался только его участок вдоль перемычки, соединяющей острова Песчаный и Спорный.

В следующий период (1953-1954 гг.) нижняя граница зоны размыва сместилась вниз по реке примерно на 0,4 км, а за

последующие годы (1954-1956 гг.) она сместилась еще на 1,6 км. Таким образом, нижняя граница зоны размыва, вызванного стеснением русла, охватив значительную часть ширины русла, распространилась вниз от перемычки на 4,5 км, достигнув оголовка о. Денежный (см. рис. 8).



Рис. 14. Схема деформаций р. Волги на приплотинном участке за период строительства и первых лет эксплуатации ГЭС 1952-60 гг. (по Россинскому)

Размытый материал сносился вниз по течению и образовывал зону намыва. При этом основная часть этого материала откладывалась в главном русле между островами Спорный и Денежный.

Среднюю скорость перемещения зон размыва и намыва можно приблизительно оценить в 200 м/год.

В ходе формирования ямы размыва началось усиленное разрастание осередка в начале Денежной воложки; по ней двигались гряды-побочни. По мере сползания этих побочней правый берег острова Денежный подмывался и зона подмыва берега смещалась вниз по течению (в 1960 г. она находилась в средней части воложки). Результат размыва берега ликвидируется наполнением скоплений наносов, поступающих через верхнюю часть воложки (рис. 14).

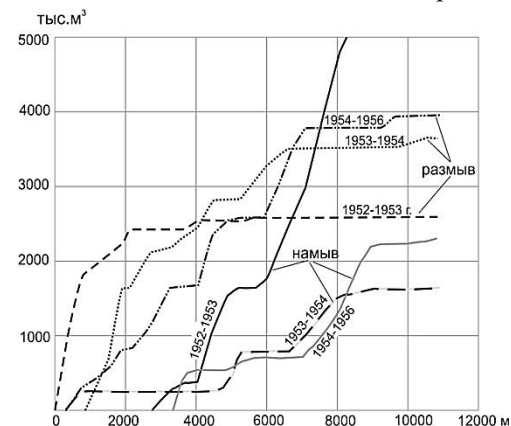
По данным Россинского [Россинский, 1961], определенных тенденций в деформациях русла Денежной воложки не обнаруживается. По данным же Волгоградской ГМО, в период 1952-1956 гг. на ней все же преобладал размыв, и объем размытого материала составил 2,5 млн. м<sup>3</sup>/год (1952-53 гг. – 1260 млн. м<sup>3</sup>, 1953-54 гг. – 406 тыс. м<sup>3</sup> и 1954-56 гг. – 863 тыс. м<sup>3</sup>).

Об объемах деформаций в главном русле Волги дают представление следующие цифры, полученные на основе сопоставления поперечных профилей разных лет.

За 1953 г. с участка, непосредственно прилегающего к плотине и являющегося зоной местного размыва, вынесено 5,5 млн. м<sup>3</sup> грунта. В 1954 г. размывы были, как указывалось, незначительными. В 1955 г. они происходили только на участке

ниже перемычек. За период с 1954 по 1958 г. здесь было вымыто 6,5 млн. м<sup>3</sup> грунта.

Объем материала, намытого за этот же период перед входом в Денежную воложку и вдоль перемычки, соединяющей острова Песчаный и Спорный, оценивается Гидропроектом в 7 млн. м<sup>3</sup> [Росинский, 1961].



На рис. 15 показаны интегральные кривые объемов размыва и намыва главного русла Волги за период 1952-

1956 гг. (по данным Волгоградской ГМО).

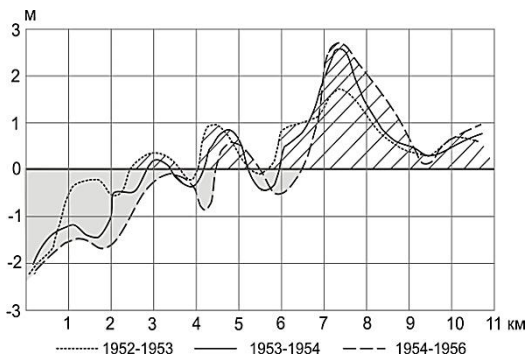


Рис. 15. Интегральные кривые объемов намыва и размыва в главном русле р. Волги на плотинном участке длиной 12 км

и намыва за тот же период показан на рис. 16 в виде графика хода изменений среднего слоя смываемого и намываемого грунта в

главном русле Волги по длине реки и во времени (по данным Волгоградской ГМО).

Рис. 16. Изменения слоя намыва и размыва р.Волги на приплотинном участке, вызванные строительными работами за период 1952-1956 гг.

Слой размывов и намывов вычислялся как частное от деления объемов размывого (намытого) материала за период 1952-1956 гг. на площадь поверхности русла на участке.

О скорости смещения крупных подвижных скоплений наносов (побочней, островов, перекават) могут быть приведены следующие цифры .

Ухвостье о. Спорный сползло вниз по течению за период 1952-1956 гг. на 3,0 км, т. е. в среднем за год перемещалось на 600 м.

Побочень на о. Денежный в левом рукаве реки за указанный период сполз на 1 км, т. е. перемещался со скоростью 200 м/год. Одновременно со сползанием побочень расширился со скоростью 200 м/год, а ухвостье его сползло с еще большей скоростью – 400 м/год. В целом на участке от Волгограда до Красноармейска скорость сползания перекават может быть оценена в среднем в 170 м/год (см. рис. 13, 16).

2. Кроме формирования зон размыва и намыва русла Волги в результате строительных работ, описанных выше, следствием этих же работ явилось усиление размыва левого пойменного берега Волги на участке от южного входа в р. Ахтубу до нижней оконечности о Денежный ( см. рис. 14).

Как уже указывалось при описании деформаций русла Волги в естественных условиях, размыв левого берега на участке от южного входа в р. Ахтубу до нижней оконечности о. Денежный происходил до строительства ГЭС и наблюдался еще в 1913 г.

По данным измерений 1959 и 1960 гг., распределение стока по рукавам ниже ГЭС следующее: по протоку, идущему слева от о. Спорный (луговой проток), проходило в 1959 г. 26 % годового стока, в 1960 г. – 22 %. Остальной сток распределялся между Денежной воложкой, по которой в 1959 г. проходило 26 %, а в 1960 г. – 22 % стока, и главным руслом, огибающим о. Денежный слева. В нижней части этого главного рукава проходило 75–80 % годового стока Волги, и именно на этом участке и происходили наибольшие размывы.

С началом строительства ГЭС размывы этого участка на левом берегу усилились. Для оценки скорости деформаций левого берега Волги на рассматриваемом участке можно привести следующие данные.

По материалам наблюдений Гидропроекта среднегодовая скорость смещения левого пойменного берега Волги на участке от южного входа в Ахтубу до нижней оконечности о. Денежный (см. рис. 14) за период 1952-1955 гг. составила 70 м, т. е. была почти в два раза больше среднегодовой величины (45 м), наблюдавшейся в естественных условиях за период 1913-1952 гг.

Специальные наблюдения показали, что донные скорости на этом участке равны или иногда больше поверхностных. Придонные течения, подмывая берег, образуют ниши. Последние, разрастаясь, нередко достигают 100 м в длину. Их обрушение приводит к резким перемещениям береговой линии на участке 30–40 м.

Повышенные донные скорости отмечаются и в межень, поэтому размыв берега оказывается достаточно большим не только в период половодья и попусков, но и при низких уровнях. Так, например, в летнюю межень 1954 г. и осенне-зимний период 1954–1955 гг. полоса размыва берега достигла в ширину 40 м, т. е. была почти такая же, как и величина среднегодовых смещений береговой линии за период 1913-1952 гг.

Данные об измеренных плановых смещениях левого пойменного берега по материалам Гидропроекта приведены в табл. 10.

Табл. 10. Данные о плановом смещении левого берега Волги на участке от южного входа в Ахтубу до оконечности о. Денежный

Период наблюдений	Ширина полосы размыва, м			
	на протяжении 2 км от южного входа в Ахтубу вниз по течению		на протяжении последних 1,5 км	
	средняя	наибольшая	средняя	наибольшая
август 1952 – март 1954	60	90	40	50
март 1954 – июль 1954	75	110	40	50
июль 1954 – октябрь 1954	–	до 40	15	20

октябрь 1954 – апрель 1955	–	до 40	20	25
апрель 1955 –июль 1955	90	120	95	120
за период с августа 1952 по июль 1955 г.	225		210	

В 1955 г. были произведены работы по капитальному креплению берега русла на участке, указанном на рис. 14. Береговой откос крепился железобетонными плитами и каменной отсыпкой, а дно - хворостяными тюфяками, загружаемыми бутовым камнем.

Однако после половодья 1956 г. на целом ряде участков крепление было разрушено. Несмотря на последующие ежегодные восстановительные работы, разрушение креплений продолжается. Зона размыва распространилась вниз по течению примерно на 1,5 км, до оконечности о. Денежный.

Наиболее вероятной причиной усиления деформаций левого берега русла после возведения перемычек является обстоятельство, приведенное ниже.

Сооружение перемычек, в том числе и продольной, закрывавшей в период строительства ГЭС проток между островами Песчаный и Спорный ( см. рис. 8), должно было увеличить уклон на участке главного русла между островами Спорный и Денежный и, следовательно, способствовать отвлечению в него больших, чем раньше, масс воды.

Деформации в период эксплуатации ГЭС. После перекрытия реки осенью 1958 г. деформации русла по данным Россинского [Россинский, 1961], происходили следующим образом.

Для пропуска половодья 1959 г. дно русла непосредственно ниже плотины было расчищено на участке длиной 1,5 км и шириной около 1 км. При этом приверх о. Спорный был срезан и сделаны две прорези, направляющие поток после прохождения расчищенного участка с северо-востока на юго-запад, т. е. в направлении к началу Денежной воложки. Объем выемок составил около 7 млн. м<sup>3</sup> грунта.

При сбросах воды в нижнем бьефе появились местные размывы глубиной до 20 м, однако остались и неразмытые участки, располагавшиеся против не работавших при пропуске половодья отверстий.

Размыву подвергся также приверх о. Спорный. Левая протока у этого острова начала размываться. Вместе с тем справа от него толщина отложений достигла 9 м.

По подсчетам Гидропроекта, за 1959 и 1960 гг. из зоны размыва вынесено 26,5млн. м<sup>3</sup> наносов, т. е. примерно в пять раз больше, чем за первые 2 года существования перемычек (1953-1954); 12 млн. м<sup>3</sup> наносов отложилось в зоне намыва.

Деформации в главном русле Волги носили тот же характер, что и в 1952-1957 гг. разрасталось ухвостье о. Спорный, сползал побочень о. Денежный и размывался левый пойменный берег реки. По Денежной воложке продолжали перемещаться крупные скопления наносов. По данным Гидропроекта смещение левого берега на неукрепленном участке составило за период 1958-1960 гг. около 100 м.

Влияние русловых переформирований на судоходство. Активизация руслового процесса в рукаве Волги, огибающем слева о. Денежный, привела к ухудшению его судоходных условий. Ниже южного входа в р. Ахтубу сформировался Скундринский перекат. Быстро разрастающийся побочень на левом берегу о. Денежный сужает фарватер, прижимая его к левому берегу. Формирование скоплений наносов у левого берега Волги ниже о. Денежный и их сползание угрожает занесением входа в Волгоградский затон.

Режим перекатов. Для суждения о влиянии строительства ГЭС и регулирования водного режима на перекаты, расположенные ниже о. Денежный в частности в главном русле р. Волги у о. Сарпинский, фактических данных еще мало, и они не позволяют выявить существенные отличия в деформациях этих перекатов по сравнению с теми, которые наблюдались в естественных условиях.

#### ***IV. УЧАСТОК г. КРАСНОАРМЕЙСК — с. КАМЕННЫЙ ЯР***

##### ***1. Общее описание участка и факторов руслообразования***

Непосредственное влияние сооружений ГЭС на описываемом участке должно значительно ослабевать. Ослабевает и влияние на русловой процесс выхода реки в расширенную долину. Последнее обстоятельство сказывается на морфологическом облике участка достаточно отчетливо. В русле реки более четко, чем на предыдущем участке, выражено меандрирование, и, хотя река по-прежнему в основном прижата к правому скло-



ну долины, все же появляются относительно узкие (до 5 км) полосы правобережной поймы, огибаемые излучинами реки.

Излучины русла не получают полного развития вследствие отторжения побочной или участков поймы за первыми от реки береговыми валами. Это ведет к разветвлению русла на относительно короткие русловые протоки. Число этих протоков значительно увеличивается по сравнению с предыдущим участком, а размеры их уменьшаются. В русле встречается множество осередков, образовавшихся из отторженных и расчленившихся побочной. Ширина полосы побочной нередко занимает в межень  $2/3$  ширины русла. Столь большие площади, занятые обнаженными песками, обуславливают формирование в прибрежной полосе эоловых (дюнных) образований, существенно видоизменяющих обычные формы скоплений русловых наносов, в частности поперечные и продольные профили пляжей, побочной, береговых валов. Поэтому, например, высота некоторых из этих образований может оказаться большей, чем высота подъема уровня воды в половодье.

На большей части участка поймы сохраняет примерно такой же вид, как и на предыдущем. Ее ширина остается большой — 25-30 км, а затем уменьшается к концу участка до 12-14 км, высота пойменных берегов (левого и правого), равная на большей части участка 10-12 м, в начале и конце снижается на коротких расстояниях до 4-5 м. Малопроточная пойма только в период высоких половодий затопляется, и на ней возникают сложные местные течения по густой сети ериков. В большом количестве встречаются небольшие озера.

Морфометрические характеристики русла приведены на рис. 2.

Обращает на себя внимание большое число перекатов. Глубина на них 3-4 м. Они группируются в соответствии с общими плановыми очертаниями излучин в три основных перекатных участка разделяющихся короткими плесами (см. рис. 2) с глубинами до 12 м. В каждую группу входит пять-шесть перекатов, и только самая нижняя по течению группа состоит из двух перекатов.

Наличие столь большого числа перекатов в пределах излучин связано с тем, что наряду с общими плановыми деформациями русла наблюдается более быстрое перемещение по нему крупных песчаных скоплений, подвижных гряд, побочной. Поэтому образуемые ими перекаты располагаются не только на

перегибах русла, но и на других участках, причем преимущественно в верховых частях излучин. Приуроченность групп перекатов к верховым частям излучин, по-видимому, следует связать с тем, что на этих участках в период половодья создается подпор, скорости течения ослабевают и транспорт наносов замедляется. Это способствует формированию на этих участках особенно обширных скоплений наносов в виде побочной и осередков. При этом наиболее подвижные из них образуются на подходах к вершинам излучин, ниже которых перенос наносов вновь ускоряется.

Так же, как и на предыдущем участке, средние по длине уклоны свободной водной поверхности в межень и в половодье примерно одинаковы: в верхней половине участка они составляют 0,56-0,54 ‰, в нижней половине 0,32-0,40 ‰. Однако абсолютные значения уклонов по сравнению с предыдущим участком уменьшаются. Особенно заметно уменьшение абсолютных значений меженных уклонов в нижней половине участка (см. рис. 2). В этой же части участка отмечается наибольшее количество и разнообразие форм скоплений наносов.

Крупность донных отложений наносов уменьшается вниз по течению. Преобладающей их фракцией являются частицы крупностью 0,25 мм (на предыдущем участке средний диаметр донных отложений был 0,4 мм).

Высота подъема уровня воды в половодье увеличивается вниз по течению в среднем от 7,7 м у Волгограда до 8,6 м у Черного Яра, расположенного уже в пределах последующего участка. Высота поймы также увеличивается вниз по течению. Это приводит к тому, что затопляемость ее несколько уменьшается в этом же направлении (вниз по течению). На предыдущем участке и в начале описываемого (Светлый Яр) слой затоплений при средних половодьях составлял в естественных условиях 2,2 м, к Каменному Яру (конец участка) он уменьшался до 0,9 м. Однако процент затопленной площади увеличивается от 90 до 97 %. Наименее подвержены затоплению прирусловые береговые валы у главного русла.

Сложный рельеф поймы, представленный многочисленными ериками, текущими в самых различных направлениях, а

также гривами (старыми береговыми валами), обуславливает сложный порядок затопления поймы.

## 2. Русловые деформации

Рассмотрим подробнее режим перекаатов на участке.

К числу наиболее крупных и сложных деформирующихся перекаатов относятся Поповицкие и Солонниковские.

Поповицкие перекааты расположены в слабоизогнутой извилине (рис. 17), в начале которой расположен Верхне-Светлоярский перевал, образованный слабовыраженным левобережным побочнем и осередком, представляющим собой размывающуюся низовую косу этого побочня. Длина перевального участка около 5 км. Ниже Светлоярского перевала имеется крупный правобережный побочень, расположенный в верхней половине упомянутой выше извилины. Гребень переката проходит в подвалье правобережного побочня, образуя Верхне-Поповицкий перекаат. Судовой ход резко изогнут вправо. Ниже переката русло переходит к излучине противоположной кривизны, т. е. направленной вершиной не влево, а вправо. Существующий здесь левобережный побочень значительно уступает по своим размерам правобережному. В его вершине расположен Нижне-Поповицкий перекаат.

Этот побочень сформировался очень давно. Еще задолго до 1913 г. он отторгся, и образовалась протока Поповицкого переката (рис. 17). Вместе с тем побочень продолжал расширяться и смещаться влево. Прибереговые его части задерновывались и превращались в пойму. Затем (также до 1913 г.) произошло отчленение части побочня и превращение отторгнутой части в о. Бельский. В 1913 г. в нижнем конце этого острова образовался широкий побочень с закрепленной дерном центральной частью. К 1940 г. промыв был почти занесен, закрепившаяся часть увеличилась по площади. В 1960 г. весь описанный выше новообразовавшийся у о. Бельский побочень представлял собой крупный массив песков, значительно сползший вниз по течению.

Река Волга на Верхне-Поповицком перекаате в межень имеет ширину около 700 м, а в его подвалье расширяется до 2,5 км. На Нижне-Поповицком перекаате ширина реки в межень около 1 км. Поповицкие перекааты получают основное питание

наносами, по-видимому, от двух источников. Часть наносов поступает на участок в виде относительно крупных подвижных скоплений сверху по реке, часть образуется за счет подмыва берегов и склонов долины. Судя по тому, что правобережный побочень интенсивно нарастает в ширину, о чем свидетельствуют образующиеся в ходе его деформаций затоны, объем размыва берегов должен быть значительным. Это подтверждается и данными сопоставления карт различных лет съемки (см. ниже).

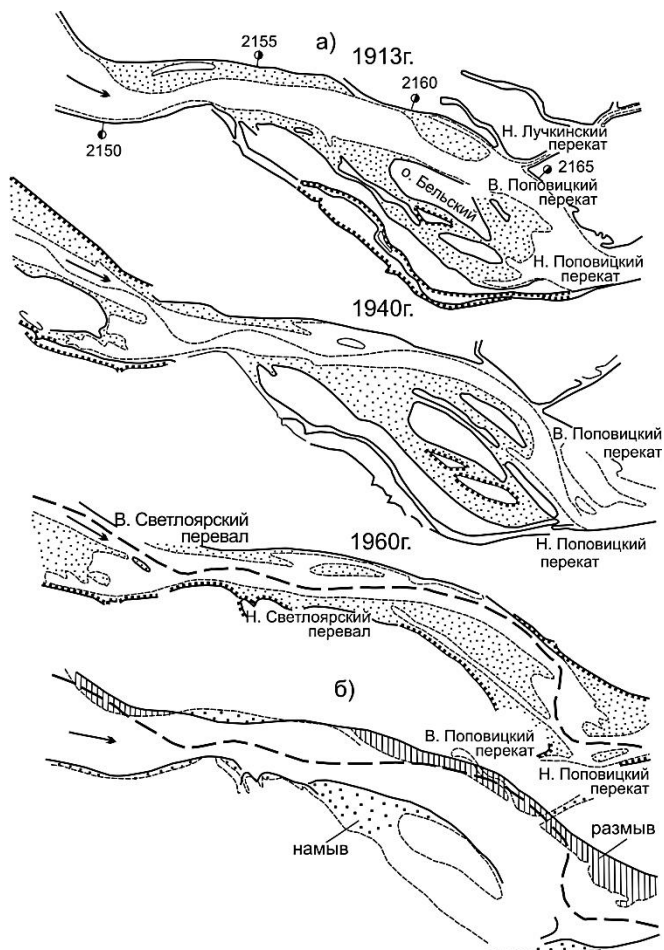


Рис. 17. Сопоставленные планы (а) и схема плановых деформаций берегов (б) на участке Поповицких пережатов за период 1913-1960 гг.

Находясь в пределах излучины, Поповицкие пережатки в общем не изменяли своего местоположения с 1913 г., однако конфигурация и размеры побочней, особенно правобережного, существенно меняются от года к году. Так, например, по материалам натуральных исследований Волгоградской ГМО видно, что в 1956 г. правобережный побочень представлял собой крупный

массив песков шириной около 1 км и длиной до 2 км и был относительно низким.

В 1957 г. на его поверхности в половодье сформировался ряд параллельных глив, которые в последующую межень подвергались размыву. На спаде половодья здесь были отмечены скорости около 1,5 м/сек, и можно было видеть сплошной слой наносов, двигавшихся по поверхности побочня. Толщина слоя движущихся сплошным слоем наносов составляла 0,1-0,2 м. Перемещающиеся по побочню наносы, откладываясь в расширении реки ниже подваля, образовали песчаный осередок и частично переносились к низовому, левобережному побочню. Общие размеры побочня при этом изменились следующим образом: ширина побочня достигла 2 км, а длина – 4 км.

Натурные наблюдения за деформациями бровки левого берега (против правобережного побочня), проводившиеся техникумком в 1954-1957 гг, показали, что размыв в этот период на многих участках составил свыше 100 м, а местами достигал 260 м. Намыв был выражен менее четко, и лишь местами берег переместился за указанный период на 20-40 м и только в одном случае на 440 м.

Наблюдался также и размыв правого берега реки. Размыв был менее значительным и составлял на разных участках 10-50 м (преобладающий 30 м); лишь на одном участке он был равен 140 м. Длина участка размыва левого берега составляла 6,2 км, правого – 8,5 км, т. е; в последнем случае фронт размыва был более рассредоточенным.

Наряду с непосредственным подмывом правого берега имеет место довольно интенсивное разрушение правого склона долины в результате промыва его бровок поверхностными водами, приводящего к образованию оврагов и конусов выноса из них. Это дает, по-видимому, местное пополнение транспорта наносов.

Обильное местное поступление наносов, вероятно, и приводит к тому, что поток, не справляясь с выносом наносов, вынужден непрерывно их переоткладывать. В результате этого происходит значительное переформирование русла.

О многолетнем режиме переката подробных данных нет, но имеются сведения, что в 1956-1957 гг. на Поповицком пере-

кате преобладала аккумуляция. В итоге на нем за этот год отложилось около 3,2 млн. м<sup>3</sup> наносов.

Известно также, что особенное ухудшение судоходных условий, начавшееся с 1950 г., вынудило принять ряд местных мер. Кроме ежегодных землечерпательных работ, было сделано крепление левого берега, а на участке подвалья переката, т. е. на участке наибольшей ширины русла (рис. 17), были построены три струнаправляющие дамбы с целью сужения межженного русла. Сооружение этих дамб привело к еще большей кривизне фарватера и способствовало росту левобережного побочня. Таким образом, эти мероприятия эффекта не дали.

В нижней половине участка наиболее трудными и сложными являются Солодниковские перекаты (рис. 18). Как и Поповицкие, Солодниковские перекаты представляют группу из трех перекатов: Верхнего, Среднего и Нижнего. Все эти перекаты расположены ниже точки перегиба большой пологой излучины русла, хорошо видной на съёмке 1960 г.

Выше этой излучины расположен относительно прямолинейный участок русла Волги со слаборазвитыми скоплениями наносов. Длина этого прямого участка около 5 км. Участок непосредственно примыкает к расположенному выше Поповицкому перекату. Так как в пределах последнего, как было показано, имеется тенденция к аккумуляции наносов, то, по видимому, указанный выше прямолинейный участок русла лишен развитых скоплений наносов вследствие того, что последние задерживаются на Поповицком перекате. Образование крупных скоплений наносов на участке Солодниковских перекатов вызвано рядом причин. Ниже излучины, в которой расположены Солодниковские перекаты, находится крупная петля русла. Резкое уменьшение уклонов, обусловленное этой петлей, создает благоприятные условия для аккумуляции или по крайней мере для замедления транспорта наносов на подходе к ней, т. е. на участке Солодниковских перекатов. В результате этого здесь сформировался крупный и высокий побочень на левом берегу и вместе с тем образовались обширные скопления наносов выше этого побочня в русле Волги. Вероятно, можно предположить, что образованию этих скоплений способствует также и поступление наносов от размыва левого пойменного берега (рис. 18б), наблюдающегося на всем его протяжении выше перекатов.

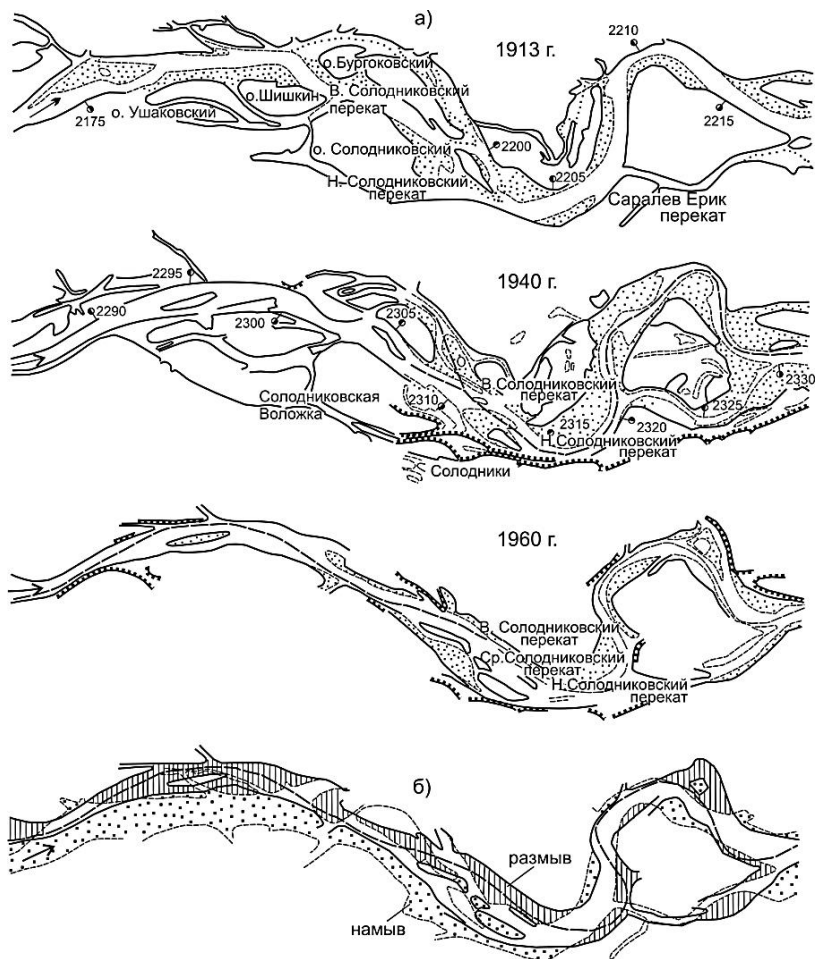


Рис. 18. Сопоставленные планы (а) и схема плановых деформаций берегов (б) на участке Солодниковских перекатов за период 1913-1960 гг.

Кроме того, можно отметить также следующее. Участок современного главного русла Волги, расположенный непосредственно выше перекатов, проходит по спрямленному руслу, образовавшемуся в результате отторжения крупного правобережно-



го побочня, находившегося на выпуклом берегу реки несколько выше с. Солодники. Не исключено, что образованию этого спрямления способствовало появление Саралевской воложки в основании петли русла реки, располагающейся ниже Солодниковских перекатов. Это произошло задолго до 1913 г. На съемке 1913 г. (рис. 18) старое русло спрямившейся излучины выше с. Солодники еще показано равноценным с новым спрямившимся, но уже в 1940 г. старое русло оказывается в значительной мере занесенным, а спрямление разработавшимся. Образование спрямления русла должно было повести к усиленному выносу по нему наносов, которые, накапливаясь ниже по течению способствовали образованию Солодниковских перекатов.

Значительная расчлененность массива поймы, образующей выпуклый (правый) берег этой излучины, и обилие расчленяющихся осередков и островков на участке Солодниковских перекатов показывают, что процесс переформирования идет интенсивно и весь участок находится в состоянии неустойчивого равновесия.

Скорость перемещения бровок берегов на участке за период 1913-1940 г.г. колебалась от 7 до 40 м, достигая наибольших значений на участке S-образной петли, т.е. ниже Солодниковских перекатов, в то время как на участке самих перекатов общие плановые деформации невелики (7-10 м/год) и все переформирования идут за счет перемещений скоплений наносов в русле, сопровождающихся размывом одних из них и намывом других.

По съемкам 1954-1957 г.г. можно проследить следующие деформации русловых скоплений наносов.

Постепенный размыв Верхне-Солодниковского и Средне-Солодниковского перекатов и образование между ними большого осередка.

Интенсивное нарастание ухвостья левобережного побочня, которое постепенно перекрывает главное русло Волги и усиливает подпор на Нижне-Солодниковском перекате.

Гребень Нижне-Солодниковского переката только за 1957 г. сместился вниз по течению примерно на 1 км. В июне 1957 г. (в этот год было высокое половодье) он лимитировал судоходство.

В связи с резким поворотом Волги влево интенсивно размывается правый берег у начала Саралевской воложки. Размыв идет на участке длиной около 4 км. Принимались меры по ук-

реплению этого берега. За период 1954-1957 гг. годовое смещение берега достигало 50 м.

Среднегодовой объем наносов, поступающих в поток от размывов берегов в ходе общих плановых деформаций русла, составляет около 5 млн. м<sup>3</sup>/год, а объем намыва берегов около 1,4 млн. м<sup>3</sup>/год. Так как при подмыве берегов в поток поступают не только наносы, формирующие русловые их скопления, но и взвешенные, поступающие в транзит, то делать вывод о явном преобладании на участке аккумуляции наносов нельзя. Можно только утверждать, что объемы размыва берегов дают не менее 1,4 млн. м<sup>3</sup>/год русловых наносов.

## ***V. УЧАСТОК с. КАМЕННЫЙ ЯР—с. НИКОЛЬСКОЕ***

### ***1. Общее описание участка и факторов руслообразования***

Меандрирование на данном участке значительно ослабевает (рис. 19), и преобладающее развитие получает русловой процесс побочного типа, при котором скорость переформирования побочной больше, чем скорость смещения берегов, т. е. общих плановых деформаций русла. Интенсивное переформирование скоплений наносов в русле реки часто приводит к развитию русловой многорукавности, образующейся в результате отторжения побочной и образования островов и осередков. Наибольшее число островов приурочено, так же как и на предыдущем участке, к верховым частям имеющихся здесь слабо-изогнутых излучин. В этих местах располагается наибольшее число неустойчивых перекатов, характеризующихся частым смещением фарватера в плане.

Существование на участке руслового процесса побочного типа, по-видимому, связано с некоторым общим увеличением уклонов свободной водной поверхности, ведущим к увеличению подвижности скоплений наносов в русле. В начале участка меженные уклоны составляют 0,4 ‰, в нижней половине 0,8 ‰. В половодье их величины примерно такие же.

Средняя ширина главного русла составляет 1,4 км, наибольшая – 2,2 км, наименьшая – 0,9 км. Глубина русла в



межень на перекатах 2,5 м, на плесах до 15 м, т.е. примерно такая же, как на предыдущих участках. Ширина поймы уменьшается до 12-15 км. На предыдущем участке ширина поймы составляет 25 км.

Высота поймы, так же как и ширина, на участке Каменный Яр-Никольское значительно уменьшается (до 4-6 м). Однако здесь резко увеличивается ее проточность – появляются крупные пойменные рукава, действующие круглый год и постоянно соединяющие Волгу с Ахтубой.

В связи с общим сужением поймы высота подъемов уровня воды продолжает нарастать по длине участка, увеличиваясь в среднем от 7,7 м у Волгограда до 8,6 м у Черного Яра т.е. почти на 1 м. Наивысшие подъемы соответственно составляют 9,1 и 11,3 м, наинизшие – 5,1 и 6,4 м. Средняя глубина затопления поймы увеличивается от 0,9 м у Каменного Яра до 1,9 м у сел Ступино и Грачи (нижняя часть участка). Процент затопляемости поймы составляет около 98 (по характерным профилям).

## ***2. Русловые деформации***

Меандрирование, на фоне которого развивается русловой процесс побочного и слабовыраженного осередкового типа, носит ограниченный характер – излучины русла в ходе его общих плановых деформаций не доходят до состояния петли. Цикл их развития заканчивается появлением отторжений (промылов) прирусловых участков поймы, а также появлением протоков в притеррасной ее части. Это ведет к формированию не только островов в русле реки, но и значительных пойменных массивов, отчлененных от него длинными протоками. Эти процессы можно особенно отчетливо наблюдать на участках реки выше сел Ступино и Грачи.

У с. Ступино (рис. 19), судя по рисунку рельефа поймы, можно предполагать существование излучины, которая была направлена вершиной вправо. Затем произошло отчленение всего огибаемого ею массива поймы, и река спрямилась. Таким образом, весь участок современного русла Волги от с. Каменный Яр до с. Ступино длиной 15 км представляет собой развившееся спрямление некогда существовавшей здесь излучины.

Садковская воложка на правом берегу является еще более поздним формированием, возникшим благодаря промывам поймы между старыми береговыми валами.

В настоящее время участок русла вновь начинает искривляться в сторону правого берега, т. е. излучина повторяет цикл своего развития, сохраняя прежнее направление плановых деформаций. В соответствии с этим левый берег Волги является намываемым, правый – размываемым, а Садковская воложка в связи с отклонением потока вправо должна развиваться.

В период существования излучины, обращенной вершиной вправо, сформировалась излучина, огибающая в настоящее время о. Тренин (Гусиный) и обращенная вершиной влево. Впоследствии в связи со спрямлением излучины на участке от Каменного Яра до о. Верхне-Гусиный в излучине огибающей о. Тренин, также произошли отторжения в вершине излучины, образовавшие о. Нижне-Гусиный. Промывы, возникшие в ее основании, привели к образованию Ступинской воложки. Таким же преобразованием подвергся в этот период и о. Безымянный (Ступинский), который также сформировался в результате отторжения имевшейся здесь излучины.

Таким образом, весь участок р. Волги между Каменным Яром и Старицей характеризуется тем, что современное русло проходит по разработанным прорывам ранее существовавших здесь излучин, а старые русла занесены или подвергаются интенсивному заносу. Не исключено, что образование системы протоков на участке от о. Воловий до с. Черный Яр связано с явлениями отторжений в массиве поймы, огибаемой некогда существовавшей излучиной идущей в направлении от о. Воловий по современной Молочной (Кадышевской) воложке и далее к Черному Яру т. е. по современному весеннему судовому ходу (рис. 19 и 20 в). Участок поймы, огибаемой этой крупной излучиной, занявшей почти всю ширину долины Волги ниже г. Ахтубинска (Владимировка), в дальнейшем был промыт на участке, где в настоящее время проходит главное русло реки (рис. 19), и подвергся расчленениям, приведшим к образованию островов Вязниковский и Угрюмый (рис. 20). При этом старое русло, по-видимому, подверглось интенсивному заносу, особенно в верховой части, что привело к причленению о. Угрюмый к основному массиву поймы. Впоследствии этот занесенный участок излучины подвергся промыву, приведшему к образованию Пшеничного програна и вторичному отделению о. Угрюмый (рис. 20 в).

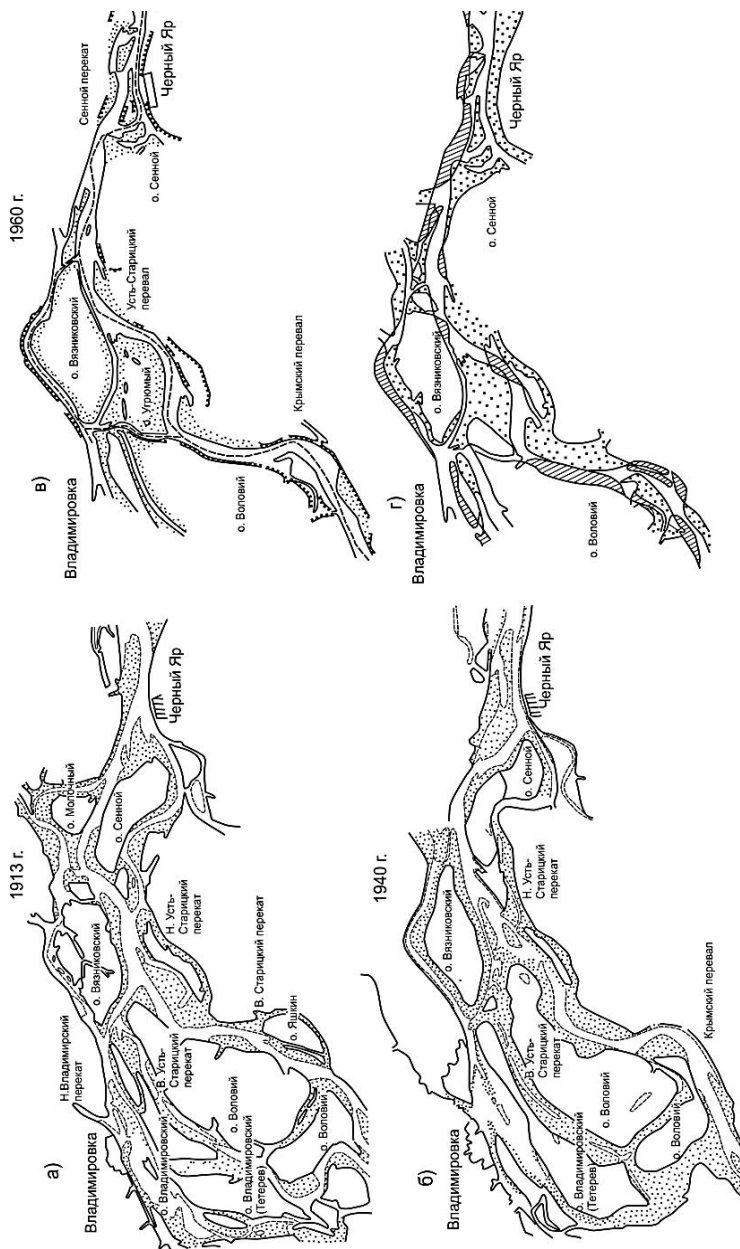


Рис. 20. Сопоставленные планы (а, б, в) и схема плановых деформаций берегов (г) на участке у г. Ахтубинска за период 1913-1960 гг.

Можно также, вероятно, предположить, что в период существования этой крупной излучины и произошло соединение Волги с Ахтубой ниже г. Ахтубинска (Владимировка), которое способствовало поддержанию системы рукавов после заноса верховой части излучины.

Рукав Кадышевский на участке, где он огибает о. Владимирский, по-видимому, является результатом промыва в основании также крупной излучины, в вершине которой находится в настоящее время о. Воловий. Протоки, называемые реками Герасимовкой (ниже Молочной воложки) и Винокуровкой, были результатом промыва пониженных участков, поймы, но происходившего уже без непосредственной связи с существованием и развитием излучин главного русла.

Примером расчленяющейся излучины служит также поворот реки у с. Грачи, в верхней части которого расположен так называемый Соленский водный узел - участок, весьма неблагоприятный для судоходства (рис. 21). На этом участке также когда-то существовала большая излучина (см. рис. 19), которая была обращена вершиной вправо. Затем последовали промывы в ее основании, и русло пришло к своему современному положению. Не исключено, что именно эти промывы способствовали возникновению пойменных протоков – Герасимовки и Винокуровки. В последующем началась разработка русла и его перемещение уже не вправо, а влево. Следы этого меандрирования отчетливо видны на местности в виде крупных гряд (старые береговые валы) и ложбин между ними. По этим ложбинам и произошли затем промывы, приведшие к образованию Фурского протока (см. рис. 19). Наряду с этим по старому занесенному руслу, когда-то обращенному вершиной своей излучины вправо, образовалась Грачевская воложка, начавшая затем меандрировать.

При общем числе перекатов, равном 18, на участке наиболее сложными являются перекаты так называемого Соленского водного узла, расположенные в конце участка.

Перекаты Соленского водного узла, как и большинство других перекатов участка, образованы крупными сползающими побочными, нередко отчленяющимися и превращающимися в низкие намывные острова, в дальнейшем расчленяющиеся и иногда объединяющиеся в более крупные. Наряду с этим на участке имеют место образования относительно небольших осередков. Общие плановые очертания русла меняются значи-

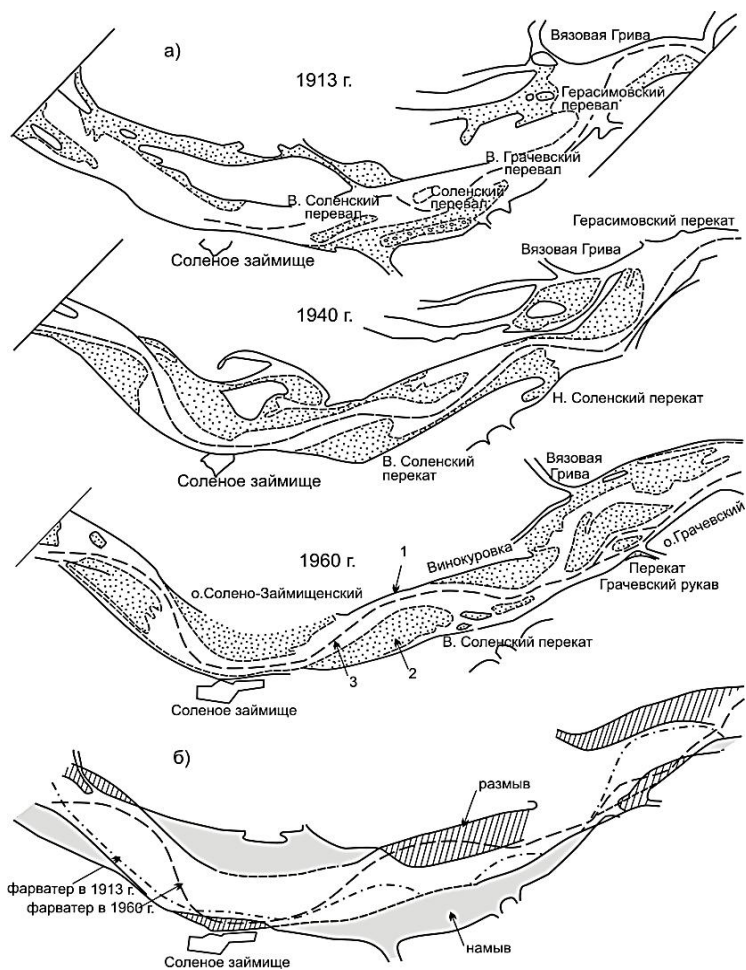


Рис. 21. Сопоставленные планы (а) и схема плановых деформаций берегов (б) на участке Солёнского водного узла за период 1913-1960 гг.: 1 – положение хорошо выраженных и закреплённых растительностью бровок берегов, 2 – песчаные отложения, 3 – фарватер

тельно медленнее. Общая длина участка около 30-35 км. По морфологическим признакам участок включает в себя Приверх Займищенский перевал, Солёно-Займищенский перевал, Верх-



не-Соленский пережат, Соленский перевал, пережат Грачевский рукав и Герасимовские пережаты (съёмка 1960 г.). Совмещенные съёмки Соленского водного узла с 1913 по 1960 г. показаны на рис. 21.

На участке от Черноярского пережата до Герасимовского пережата произошли следующие изменения. В период с 1913 по 1940 г. крупный правобережный отторженный побочень, расположенный между селами Черным Ярмом и Соленым Займищем, сполз на 5 км. При этом он значительно расширился. В последующем, до 1960 г., побочень мало изменял свои общие очертания и его сползания не наблюдалось. С 1913 по 1940 г. верховая часть берега о. Солено-Займищенский, расположенного у противоположного (левого) берега и отделенного от основного пойменного массива полузанесенной Солено-Займищенской воложкой, размывалась. Продукты размыва этой части острова складывались в средней части его береговой линии, которая вследствие этого смещалась вправо (остров расширялся). С 1940 по 1960 г. низовая часть острова оставалась стабильной и постепенно закреплялась растительностью.

Обширный, сильно вытянутый правобережный побочень, расположенный ниже с. Соленого Займища и о. Солено-Займищенский, показанный на съёмке 1913 г., в последующие годы претерпел значительные переформирования. Верховая часть этого побочня к 1940 г. существенно расширилась и образовала Верхне-Соленский пережат, а низовая часть, отчленившись от основного скопления, сместилась вниз по течению примерно на 5-6 км, образовала обособленный побочень, а затем сформировала Нижне-Соленский пережат. В ходе деформаций этого побочня, а также в результате поступления наносов от развивающегося о. Солено-Займищенский у противоположного левого берега сформировался побочень. На съёмке 1913 г. на этом участке показан осередок, а в 1940 г. – сильно вытянутый вниз по течению побочень. Крупные переформирования произошли и в самом нижнем участке Соленского водного узла, напротив с. Вязовой Гривы. Имевшиеся здесь крупные скопления наносов у левого берега между 1913 и 1940 гг. значительно разрослись и сместились вниз по течению на 2-3 км. В период с 1940 по 1960 г. продолжались крупные переформирования.

Правобережный побочень ниже с. Соленого Займища распространился вниз по течению. Между 1948 и 1957 гг. низовая часть этого побочня отторглась и он превратился в остров.

В 1958 г. приверх этого острова, несмотря на укрепления берегов, был размыт при проходе половодья, а сам остров расчленился на два острова. В 1960 г. судовой ход проходил там, где был приверх острова.

Перемещавшиеся в результате размыва этого острова наносы сформировали в период между 1948 и 1960 гг. крупный побочень у правого берега. Левобережный побочень у с. Вязовой Гривы между 1940 и 1960 гг. размывался. В результате судовой ход, проходивший в 1940 г. у правого берега, в 1960 г. располагался у левого.

Описываемый правобережный новосформировавшийся побочень в период между 1948 и 1960 гг. отторгся и образовал о. Малый Грачевский (по судоходной карте 1960 г.), или Матвеевский, и судовой ход прошел по новому рукаву, получившему название Грачевского, который продолжает развиваться. В средней части этого рукава образовался небольшой осередок. Суда обходят его и справа и слева. Этот участок Грачевского рукава называется «перекат Грачевский рукав» (лоцманская карта 1960 г.).

Общие плановые деформации русла (смещение бровок берегов) за период 1913-1960 гг., т. е. за 47 лет, составили приблизительно 1100 м, или 23-25 м/год. При этом в верхней половине участка отмечается перемещение русла преимущественно вправо, а в нижней половине участка влево, причем здесь размыву подвергается выпуклый левый берег, а намыв сосредоточивается у правого, относительно вогнутого берега. Это показывает, что в целом излучина русла, в пределах которой расположены основные перекаты Соленского водного узла, сползает вниз по течению.

По данным гидрометрических работ, выполненных Волгоградской ГМО в 1959 и 1960 гг., распределение стока воды в рукавах Соленского водного узла в межень следующее.

Если принять расход воды, проходящий по однорукавному участку русла выше Верхне-Соленского переката, за 100 %, то по протоку, идущему справа от остатков размытого острова ниже Верхне-Соленского переката, проходит 20,8 %. По Грачевскому рукаву протекает 57,7 % расхода воды, из которого 16,4% уходит в Фурский рукав, огибающий справа о. Грачев-

ский, По рукаву, огибающему о. Малый Грачевский (Матвеевский) слева, проходит 42,3 % расхода воды.

В среднем за период 1913-1940 гг. поступление наносов от однонаправленного размыва берегов в ходе общих плановых деформаций русла на участке от Черноярского переката до Герасимовского, т. е. на протяжении 25 км, составляло за период 1913-1940 гг. около 3 млн. м<sup>3</sup>/год, а намыв 779,4 тыс. м<sup>3</sup>/год. Это дает основание предположить, что в дополнение к наносам, поступившим на участок через его верховой створ, добавлялось около 2 млн. м<sup>3</sup>/год наносов за счет местных переформирований берегов русла. Часть этих наносов (руслевая фация, поступающая при размыве пойменных берегов) идет на построение русловых образований, часть же (взвешенные наносы) выносятся за пределы участка.

## ***VI. УЧАСТОК с. НИКОЛЬСКОЕ — г. АСТРАХАНЬ***

### ***1. Общее описание участка и факторов руслообразования***

Ниже с. Никольского (рис. 22) резко изменяется соотношение в продольных уклонах реки в половодье и в межень. Если на предыдущих участках уклоны в половодье и в межень были примерно одинаковыми, то на рассматриваемом участке уклоны в половодье существенно превышают меженные. Меженные уклоны в среднем равны 2 см/км, в половодье — 4 см/км. Увеличение уклонов в половодье связано с выклиниванием продольного профиля вследствие приближения реки к своему базису эрозии — уровню Каспийского моря.

Морфологическим эффектом стабилизирующего влияния моря на уровень воды в Волге является переуглубление русла, при котором длина плесовых участков резко увеличивается, а глубина на них достигает 20-25 м; перекаты не являются лимитирующими и располагаются не группами, как на предыдущих участках, а носят одиночный характер.

Ширина русла изменяется по сравнению с предыдущими участками относительно мало и в среднем составляет 1,4 км при наибольшей — 2,0 км и наименьшей — 0,4 км.

Ширина поймы на большей части протяжения участка составляет 15 км, к концу участка она увеличивается до 50 км. Средняя высота над меженным уровнем уменьшается до 2-4 м. Этим объясняется увеличение проточности поймы. Пойма в период половодий ежегодно затоплялась, за исключением не-

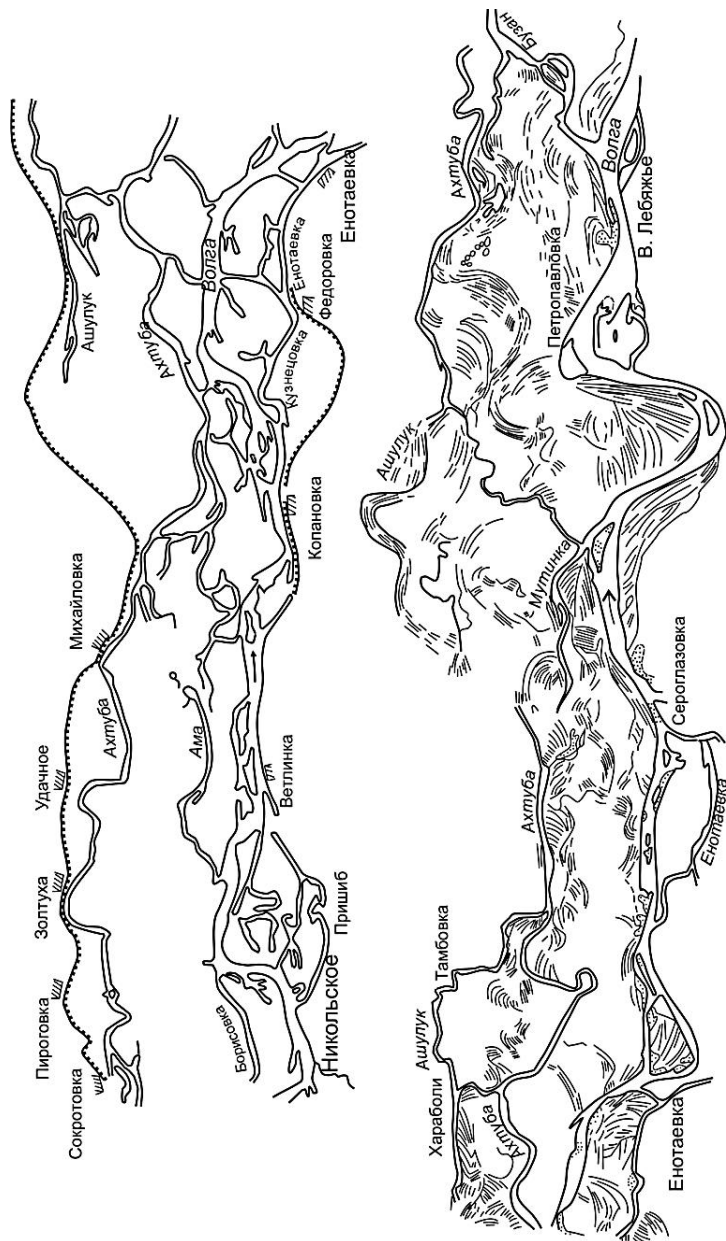


Рис. 22. Общая схема участка с. Никольское–г. Астрахань. В нижней половине участка хорошо виден сложный грядистый микрорельеф поймы

больших возвышенных участков, расположенных преимущественно ниже с. Сероглазовки (Бэровские бугры). Вследствие переуглубления русла меженные скорости течения в русле уменьшаются с 0,5 м/с на предыдущих участках до 0,25 м/с у Астрахани. В пойменных протоках скорости течения бывают большими (до 0,9 м/с), причем в зависимости от высоты стояния уровня течения меняют свое направление, в результате чего вода течет то в направлении главного русла, то в обратном. В половодье скорости течения у Астрахани превышают 2 м/с. Высота подъемов уровня уменьшается по длине участка. Подъем наивысшего уровня в Черном Яру над наимизшим летним, как указывалось, составлял в среднем 8,58 м, в Енотаевске он равен 6,93 м, в Верхне-Лебяжьем – 4,64 м и у Астрахани – 3,46 м (см. табл. 4). Крупность донных отложений убывает по длине участка от 0,4 до 0,17 мм.

## **2. Русловые деформации**

На участке с. Никольское–г. Астрахань так же, как и на других участках, русловые деформации развиваются на фоне повышенного меандрирования, в ходе которого заключительным этапом развития излучины является отторжение побочней или участков поймы вблизи ее вершины. Однако темпы меандрирования замедляются, а наряду с подвижными побочнями существенное развитие получают осередки. Если на предыдущем участке многие рукава образовались в ходе меандрирования и переформирования излучин, то на данном участке появление подавляющего большинства рукавов, связанное уже не с русловым, а с пойменным процессом, является результатом промывов поверхности поймы не в непосредственной близости от главного русла. Отмечается наличие довольно крупных пойменных речек, имеющих самостоятельные водосборы (например, реки Ашулук, Криуша и др.).

Ограниченное меандрирование наиболее слабо выражено на участке от с. Никольского до г. Енотаевска, в пределах которого русло имеет сравнительно прямолинейные очертания. Наиболее четко процесс меандрирования обнаруживается на участке от с. Сероглазовки до г. Астрахани.

Подвижность донных форм скоплений наносов оказывается значительной. В то же время общие плановые деформации русла на участке ослабевают и составляют в среднем 10 м/год при наибольших плановых деформациях, достигавших

26 м/год, против 17 и 50 м/год, наблюдавшихся в верхней, половине участка.

## ***VII. СООБРАЖЕНИЯ О ДАЛЬНЕЙШЕМ РАЗВИТИИ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА***

### ***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 следующих общих тенденций в развитии руслового процесса.

1. Русловые и пойменные деформации под воздействием регулирования стока в конечном итоге должны ослабевать, что обуславливается 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 даже 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 и 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 затоплений 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 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 выровненным 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 плесов и перекатов. В зависимости от местных условий упомянутая общая 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 приблизительно оценить изменения в отметках дна плесов и перекатов и изменения в затопляемости поймы. Эти расчеты выполнены для настоящего прогноза И. И. Якуниным. В основе расчетов лежат следующие положения.

1. Для оценки направленности руслового процесса, т. е. для суждения о том, по какому типу будет деформироваться русло, можно использовать зависимости, предложенные Л. Леопольдом и М. Вольманом [Леопольд, Вольман, 1957]. Эти авторы на основе массового материала установили наличие связи между типом русла, водностью реки и ее уклоном. Ими выде-

лены две основные группы речных русел: однорукавные извилистые и многорукавные.

Аналитическое выражение кривой, разделяющей области распространения указанных выше типов русла, имеет вид:

$$I = 0,011Q^{-0,44}$$

где  $I$  – уклон водной поверхности в ‰ при руслоформирующем расходе  $Q$ , выраженном в м<sup>3</sup>/с. Руслоформирующим принят расход воды, соответствующий отметкам выхода воды на пойму.

По расчетам Якунина оказывается, что в условиях зарегулированного режима точки, выражающие связь уклонов и расходов воды, отклоняются по сравнению с естественным режимом в область однорукавных русел.

2. Оценка вероятных значений глубин при зарегулированном режиме стока может быть сделана также на основе гидроморфологических зависимостей.

Расчет велся по формулам, предложенным Якуниным [Русловой процесс, 1959]. 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 плесах и перекатах определялись по кривым обеспеченности Пирсона типа III. Параметры этой кривой вычислялись по формулам:

$$C_v = a_2 \left( \frac{P}{H'} \sqrt{\frac{Dh'_a}{I_n}} \right)^2$$

$$C_s = 4,75 e^{0,005 K} (C_v + 0,085 K^{0,37} - 0,59)$$

В приведенных выше формулах  $H'$  – средняя глубина реки на фарватере на практически бесприточных участках в метрах,  $Q$  – протекающий расход воды в м<sup>3</sup>/с;  $B$  – ширина реки при расчетном расходе в метрах;  $I$  – уклон водной поверхности при расчетном расходе, вычисляемый как отношение падения к длине реки по фарватеру;  $I_n$  – уклон водной поверхности в по-



ловодье, вычисляемый как отношение падения реки к длине оси долины;  $C_v$  – коэффициент вариации глубин на фарватере различного участка;  $P$  – характеристика режима стока, вычисляемая как отношение среднего расхода за предшествующее половодье к среднему многолетнему расходу;  $D$  – средняя крупность донных отложений в метрах;  $h_6$  – средняя высота поймы на расчетном участке в метрах;  $C_S$  – 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:

$$a_1 = 0.71 - 0.15 \lg \left( \frac{Q}{BVT} \right), \quad n_1 = 0.28 + 0.11 \lg \left( \frac{Q}{BVT} \right)$$

$$a_2 = 0.57 - 0.089 K^{0.222} \quad n_2 = 0.00222 K - 1.61$$

В табл. 11 помещено вероятное распределение глубин по фарватеру при зарегулированном режиме в многоводные и маловодные годы.

Из данных табл. 11 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. 11, глубины на плесах (обеспеченность 1 %) могут достигать в многоводные годы 31 м и 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.

3. Для приближенной оценки возможной высоты подъема уровня воды над меженью в условиях регулирования стока можно использовать полученную Якуниным зависимость

Табл.11. Вероятные значения глубин на фарватере р.Волги ниже Волжской ГЭС им.ХХП съезда КПСС при зарегулированном режиме стока в многоводные и маловодные годы

Границы участка	Характерный год	Расчетный расход, м <sup>3</sup> /сек.	Обеспеченность глубин, %												
			1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	99	99,9
Волгоград (ГЭС) — с. Светлый Яр	Многоводный Маловодный	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
		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 Маловодный	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
		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 Маловодный	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
		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 Маловодный	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
		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 Маловодный	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
		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 Маловодный	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
		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 Маловодный	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
		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. Ямного	Многоводный Маловодный	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
		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

между высотой подъема уровня воды  $h_n$  при прохождении различных расходов воды и морфометрическими характеристиками русла. Общий вид этой зависимости выражается формулой

$$h_r = 0,4 \frac{\eta^{0,54} \chi^\beta D^{0,91}}{I_n \bar{B}_n} \quad (1)$$

где  $h_n$  – средняя высота подъема воды на участке в метрах;  $\eta$  – водность участка, равная отношению протекающего расхода воды к среднему многолетнему;  $\chi$  – относительная кривизна русла на участке, определяемая как отношение длины реки по руслу к длине реки по оси долины;  $I_n$  – средний уклон водной поверхности при расчетном расходе;  $\bar{B}_n$  – относительная ширина русла,  $\beta$  и  $n$  – показатели степени, равные:

$$\beta = 0,23\eta^{0,49} \quad n = 0,058\eta + 0,40$$

Формула (1) 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 приведенного расчета следует, что в маловодные годы пойма на всех участках затопляться не будет, так как отметки высоты подъема уровня воды 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.

## 2. Ожидаемый ход реформирования на участке

### Волжская ГЭС им. XXII съезда КПСС — г. Красноармейск

Оценка дальнейшего хода деформаций русла 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 рассматриваемом участке, несомненно, будут проводиться различные гидротехнические мероприятия по его реконструкции (берегоукрепительные работы, землечерпание и др.). Кроме того, размеры и характер деформаций русла Волги на приплотинном участке будут в значительной мере зависеть от режима работы сбросных сооружений ГЭС. Учсть 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. 23).

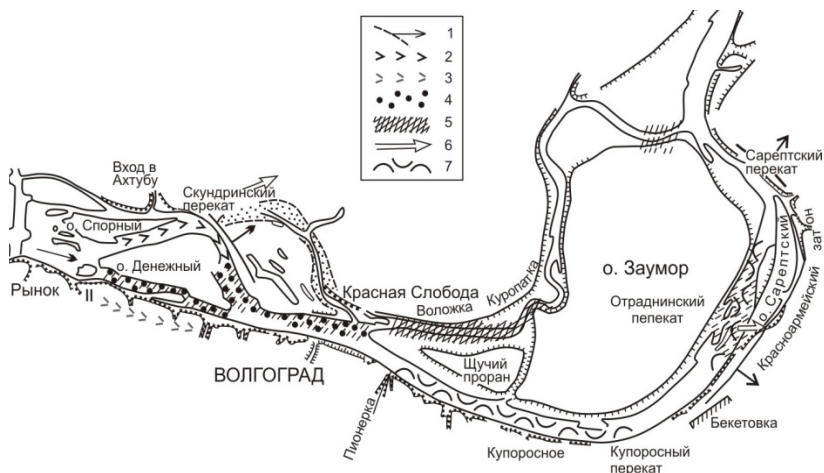


Рис. 23. Ожидаемые тенденции переформирования русла р. Волги на участке Волгоград – Красноармейск: 1 – тенденция к смещению берегов русла в направлении, показанном стрелкой, 2 – тенденция, к размыву дна русла, 3 – тенденция к смыву скоплений наносов, 4 – вероятность усиленной аккумуляции наносов в русле 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 побочной и осередков).

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 участок русла выше нижней границы этой зоны должен переходить к состоянию статического равновесия.

Наносы, поступающие в поток из зоны размыва, должны выноситься им без образования зоны аккумуляции за нижней границей зоны размыва, так как объем этого поступления не будет больше, чем в естественных условиях, когда река справлялась с транспортом наносов. Однако возведение плотины ГЭС и производящиеся сбросы воды приводят к возникновению ниже плотины зоны повышенных скоростей и, следовательно, к усилению размывов. Это обуславливает 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 или достижения потоком базального горизонта. Отложения на участке временной аккумуляции начнут размываться. Именно таково происхождение участка аккумуляции в рукаве Волги, огибающем о. Денежный слева. 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 (см. выше), можно оценить в 150-200 м/год. Так как в настоящее время тенденция к размыву русла ощущается на участке протяжением примерно 4,5 км, от плотины ГЭС до оголовка о. Денежный, то появление тенденции однонаправленного размыва рукава, огибающего о. Денежный слева, в нижней части, 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.

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 надвиге зоны размыва условия судоходства будут улучшаться. Однако нельзя 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.

Сработка зоны намыва может привести к формированию временных аккумулятивных русловых образований типа побочной ниже о. Денежный, у левого берега Волги. Так как на этом участке наблюдаются относительно повышенные скорости течения, то эти скопления будут довольно интенсивно сползать и смогут существенно ухудшить 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 существенно большей и аккумуляция их на входе в затон может происходить в значительно более короткие сроки.

По предположениям Россинского [Россинский, 1961], разрушение о. Спорный должно привести к образованию у левого берега главного русла, напротив о. Денежного, сползающего побочня, который, достигнув крутого поворота реки, либо распылится, либо причленится к пойме.

Решение вопроса о возможности причленения 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, требующих дополнительных землечерпательных работ, вполне возможно.

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 когда-то существовавшего на участке протока р. Волги в месте расположения староречья Верблюд, в низовой части которого расположен Волгоградский затон.

В настоящее время длина рукава Волги, огибающего о. Денежный слева (10 км), такая же, как и длина староречья Верблюд, а кривизна несколько большая (наименьшие 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 сползание, заняв положение о. Крит, когда-то 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 на перемещение этого берега влево на 4-4,5 км, не учитывая 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.

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что в ходе плановых переформирований рукава Волги, огибающего о. Денежный слева, возможен промыв перешейка, отделяющего Волгу от верховой оконечности староречья Верблюд. В этом случае правомерно ожидать быстрой разработки этого староречья и поступления в него значительной части стока Волги. Это может привести к существенному изменению условий перемещения масс наносов и в левом и в правом рукавах у о. Денежный.

Возможность упомянутого 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 значение для обеспечения нормального судоходства на всей Нижней Волге.

Деформация Денежной воложки будет определяться рядом факторов: режимом работы сбросных сооружений, ходом переформирований главного русла (рукава, огибающего о. Денежный слева), возможностью возобновления староречья Верблюд.

В отношении влияния режима работы сбросных сооружений ГЭС пока можно 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 протоки и в виде крупных сползающих побочней в срединной части.



Так как указанные выше образования довольно быстро перемещаются по руслу (см. рис. 14), то пока нет явных признаков того, что Денежная воложка начала интенсивно заноситься. Однако при дальнейшей разработке левого рукава 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 Денежной 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 том случае, если при плановых деформациях русла перешеек, отделяющий р. Волгу от вершины староречья Верблюд, будет промыт, и поток устремится в это староречье.

Упомянутое выше явление еще раз указывает на важность крепления левого берега Волги на участке от южного входа в р. Ахтубу до оконечности о. Денежный.

Как отмечалось, рукав Волги, огибающий о. Денежный слева, в дальнейшем должен заноситься. Занос его будет способствовать разработке Денежной воложки. Таким образом, занесение Денежной воложки будет носить временный характер. Однако процесс этот, как упоминалось, будет очень длительным (см. п. 4), а поэтому необходимо считаться с возможностью занесения Денежной воложки.

Режим перекатов, расположенных ниже о. Денежный в правом рукаве Волги, огибающем о. Сарпинский, должен быть, по-видимому, следующим:

1) вследствие снижения высот половодий деформации побочной, образующих эти перекааты, будут более медленными (см. выше);

2) влияние суточного регулирования не должно внести существенных изменений в условия судоходства на перекатах. Суточные попуски должны слабо влиять на общие деформации плесов и перекаатов, 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 большими, 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, следовательно, будут развиваться тенденции к заносу этой воложки по мере уменьшения доли расхода, поступающего в Куропаткинскую воложку (в настоящее время ее сток составляет 25% расхода Волги). Перекаты в главном русле – Купоросный, Бекетовский, Отрадненский – должны стабилизировать свое положение вследствие замедления сползания побочной.

Так как сползание побочной 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

### ***3. Ожидаемый ход русловых переформирований на участке г. Красноармейск — с. Каменный Яр***

Основное влияние на ход русловых деформаций в условиях регулирования стока должно оказывать снижение уровня воды в период половодья.

В результате регулирования стока правомерно ожидать, что на двух главных группах перекатов – Поповицких и Солодниковских – вследствие снижения уровня будет наблюдаться занос второстепенных русловых протоков и сосредоточение потока в одном рукаве. Развитие старых (существовавших при естественном режиме) побочной должно приостановиться. Однако возможно образование вторичных побочной и осередков, которые будут менее крупными, чем существовавшие в естественных условиях. Все это приведет к закреплению общих пла-

новых очертаний речного русла. Но наряду с этим здесь появляются более мелкие извилистость и разветвленность, которые могут ухудшить условия судоходства.

В верхней части участка на протяжении 15-20 км от его начала будет ощущаться влияние суточного регулирования стока, что должно оказать влияние на условия судоходства, подобное тому, которое было описано для предыдущего участка. Однако это влияние будет несущественно. Следует также иметь в виду, что через длительное время на участке появится однонаправленная тенденция к размыву русла в связи с перемещением зоны размыва, появившейся непосредственно у плотины ГЭС. Эта тенденция затем сменится состоянием статического равновесия.

Если попытаться оценить скорость перемещения этой зоны по подвижности крупных русловых скоплений наносов (см. рис. 13), то период времени, который потребует для появления однонаправленных размывов в начале участка при скорости сползания 200 м/год, составит, считая от положения нижней границы этой зоны в 1957 г. ( 6 км от ГЭС), 195 лет, т. е. практически его можно было бы не учитывать. Однако следует иметь в виду, что уменьшение многорукавности и отмирание протоков и рукавов, в частности Куропаткинской воложки, могут привести к существенному ускорению сползания русловых скоплений наносов и, следовательно, к появлению однонаправленных тенденций (размыва) на описываемом участке в сроки, которые грубо можно оценить несколькими десятилетиями. Решение этого вопроса требует дополнительных расчетов а возможно, и моделирования процесса.

#### ***4.Ожидаемые русловые переформирования на участке с. Каменный Яр — с. Никольское***

Предвидеть все детали переформирований главного русла и пойменных протоков затруднительно, однако можно высказать следующие соображения:

При наличии общих тенденций к уменьшению русловой и пойменной многорукавности в связи со снижением высоты поймодий можно ожидать следующих переформирований, соответствующих особенностям данного участка (рис. 24).

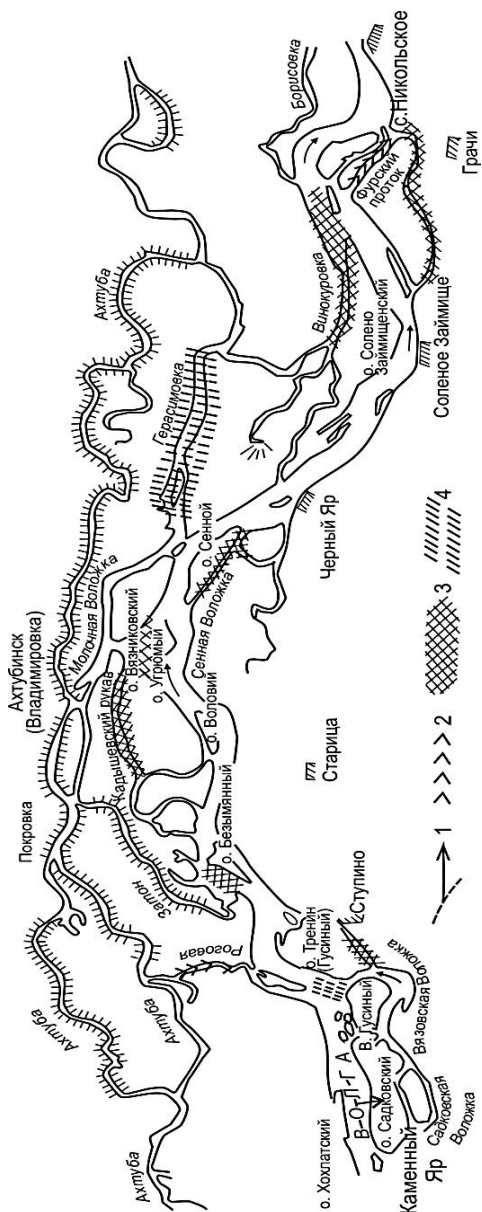


Рис. 24. Ожидаемые тенденции перестроения русла р. Волги на участке Каменный Яр–Никольское: 1 – тенденция к смещению берегов русла в направлении стрелки; 2 – размыв русла; 3 – занесение русла вследствие понижения уровня воды и уменьшения скоростей течения; 4 – обсыхание протоков из-за ослабления затоплений поймы

1. Участок главного русла Волги выше с. Ступино между островами Хохлатский и Садковский будет сохранять проявившуюся тенденцию к смещению русла вправо при увеличении его кривизны. Это будет способствовать общему отклонению потока вправо и может привести к сохранению Садковской и Вязовской воложек.

Вместе, с тем поступление материала, размываемого главным потоком, может обусловить занесение протока между островами Садковский и Верхне-Гусиный. Вероятно, что продукты размыва русел Садковской и Вязовской воложек будут выноситься и откладываться в главном русле и в верхней части Ступинской воложки. Это должно вызвать ухудшение условий судоходства на участке между островами Нижне-Гусиный и Тренин. Вероятно, произойдет причленение о. Нижне-Гусиный к островному массиву левобережной поймы, что несколько ослабит аккумуляцию в главном русле.

2. Возможно ожидать также причленения о. Безымянный (Ступинский) к левобережной пойме. Однако этот процесс будет относительно ослаблен благодаря сбросу воды из р. Ахтубы по впадающему здесь с левого берега протоку (затону). Это обусловлено тем, что на Ахтубе по проектным предположениям водный режим должен сохраняться близким к естественному.

3. Следует ожидать постепенного занесения Кадышевского рукава, которое начнется с низовой его части, пересыхающей в настоящее время в межень полностью.

4. Пшеничный проран вследствие имеющейся тенденции к разрастанию правобережного побочня в главном русле против о. Угрюмый должен сохраниться, а проток между островами Угрюмый и Вязниковский должен заноситься. В связи с сосредоточением потока в одном русле в результате заноса указанных рукавов (Кадышевского и между островами Угрюмый и Вязниковский), а также вследствие того, что поступление воды из р. Ахтубы будет происходить в прежних размерах, Молочная воложка будет находиться в современном состоянии еще длительное время.

5. Сенная воложка вследствие отвлечения воды в Молочную воложку может приобрести тенденцию к занесению.

6. Река Винокуровка, впадающая на участке Соленского водного узла, в связи с общей тенденцией к обмелению пойменных протоков вследствие снижения высоты уровня при раз-

ливах начнет заноситься. Занос, по-видимому, начнет развиваться в низовом ее конце и перемещаться вверх по течению.

7. Занесение р. Винокуровки может вызвать подпор на р. Герасимовке и ее обмеление.

8. Следует ожидать полного заноса проток у Солено-Займищенского острова.

9. Должна подвергаться заносу и протока Грачевская воложка. Фурский проток, пропускающий в настоящее время 17% расхода Волги, должен иметь тенденцию к разработке. Проток, огибающий о. Матвеевский слева, вероятно, будет заноситься из-за накопления масс наносов в устье р. Винокуровки. Преобладающее развитие получит здесь правый проток.

10. Так как процесс разработки Фурского протока будет идти длительное время, тенденция к смещению главного русла в излучине, огибающей о. Грачевский слева, будет сохраняться. В ходе ее перемещения в результате размыва левого берега возможен промыв перешейка и усиленная разработка русла р. Борисовки (занесенного староречья на левом берегу против с. Никольского). В связи с этим возможно обмеление русла у с. Никольского.

11. В деформациях р. Ахтубы на участке Каменный Яр – Никольское правомерно ожидать следующих тенденций. Можно ожидать, что в результате значительного снижения уровня воды в половодье, вызванного регулированием стока, проток, соединяющий правый рукав р. Ахтубы с Волгой (р. Роговая), будет интенсивно разрабатываться путем пятящейся эрозии. Не исключена возможность, что в дальнейшем по этому разработавшемуся рукаву пройдет основная часть стока р. Ахтубы. Это приведет к обмелению р. Ахтубы на всём ее остальном протяжении ниже г. Ахтубинска, а также к уменьшению поступления воды в Молочную воложку, которая в этом случае в дальнейшем может ослабить свои деформации, и процесс ее разработки замедлится (см. п. 4),

### ***5. Ожидаемый ход русловых переформирований русла на участке с. Никольское — г. Астрахань***

Общие тенденции в деформациях русла, ожидаются такими же, как на предыдущих участках, а именно: ожидается

уменьшение русловой и пойменной многорукавности, обусловленное снижением уровня воды.

В первую очередь должны отмирать пойменные протоки, расположенные на правобережном пойменном массиве между селами Никольским, Ветлинской (Водяная воложка и др.), левобережные протоки Цаган-Аман и Аман, Слюнявая, Даниловка, правобережные протоки Кузнецовская и Енотаевка, а также правобережные воложки ниже сел Сероглазовка, Петропавловка и у с. Верхне-Лебяжьего (рис 25, а и б). В связи с обсыханием протоков, соединяющих Волгу с р. Ахтубой, водоносность последней значительно уменьшится, так как собственный водосбор этой реки на участке относительно невелик. Отмирание Ахтубы в свою очередь приведет к пересыханию питающихся из нее таких протоков, как Кирпичный, Мутинка, Ашурук (ниже с. Селитренного) и др. (рис. 25,б).

Во вторую очередь начнется занесение русловых протоков. При этом на протоках, спрямляющих русло, по-видимому, еще длительное время будет сохраняться тенденция к их разработке, хотя она и будет ослаблена по сравнению с интенсивностью процесса, наблюдавшегося в естественных условиях. В частности, такая тенденция будет сохраняться длительное время в левой протоке у о. Шапошниковский, ниже г. Енотаевска. В то же время левый проток у о. Круглый и Гусиная воложка (Петропавловка), а также правый проток у о. Дурновский (Дурновская воложка) между Верхне-Лебяжьим и Астраханью должны заноситься. По-видимому, значительно ухудшатся условия входа в проток Бузан и в начале его следует ожидать тенденции к обмелению.

Вследствие того что снижение высоты подъема уровня в результате регулирования будет уменьшаться, по длине реки произойдет относительное уменьшение продольных уклонов и, следовательно, скоростей течения. Результатом этого может явиться некоторое общее ослабление русловых деформаций. Поэтому процесс описанных выше переформирований должен развиваться медленнее, чем на предыдущих участках, на которых уклоны в условиях регулирования стока будут сохраняться примерно такими же, как в естественных условиях.





**6. Ожидаемые тенденции в развитии русловых деформаций р. Волги в случае создания водохранилища Нижне-Волжской ГЭС (район г. Енотаевска)**

Одновременно с созданием водохранилища Нижне-Волжской ГЭС предполагается от створа ГЭС до Волгограда соорудить левобережную земляную дамбу длиной 275 км, которая позволит значительно сократить площади затопления поймы. В результате строительства указанных сооружений участки русла Волги выше г. Енотаевска будут превращены в водохранилище. Следовательно, полностью прекратится затопление поймы при попусках, и вода будет подаваться на орошение поймы по специальной оросительной сети. Таким образом, описанные в п. 1–4 ожидающиеся деформации русла у г. Енотаевска происходить не будут. В этом случае главное внимание следует уделить вопросам переработки берегов будущего водохранилища.

Деформации в нижнем бьефе Нижне-Волжской ГЭС должны претерпеть существенные изменения по сравнению с деформациями, указанными в п. 4. Так как в результате попусков амплитуда колебаний уровня может оказаться более значительной, чем в естественных условиях, когда она была весьма невелика, то правомерно ожидать значительной активизации русловых процессов.

Задержание наносов в водохранилище приведет к тому, что происходящие в русле Волги размывы не будут компенсироваться приносом материала по реке и на участке появится однонаправленная тенденция к размыву русла.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Русловой процесс./ Под ред. Н. Е. Кондратьева. – Гидрометеиздат, 1959.
2. Попов И. В. Методические основы исследований руслового процесса. – Гидрометеиздат, 1961.
3. Филиппов И. И. Природные условия и мелиорация Волго-Ахтубинской долины и дельты Волги. – Уч. зап. Саратовского гос. пед. ин-та, вып. 31, 1958.
4. Байдин С. С, Линберг Ф. Н., Самойлов И. И. Гидрология дельты Волги. – Гидрометеиздат, 1956.
5. Россинский К. И. Деформации русла Волги в нижнем бьефе Волгоградского гидроузла. – Гидротехническое строительство, № 10, 1961.
6. Леопольд Л. Б., Вольман М. Г. Типы речных русел: разветвленный, меандрирующий и прямой. – Geological Survey Professional Paper, No 282-B, 1957.

## КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА РАЗЛИЧНОГО ТИПА

### *Введение*

#### *Постановка задачи*

Гидролого-морфологический подход к изучению руслового процесса, как было показано в монографии «Русловый процесс» [Кондратьев и др., 1959] и в ряде работ автора [Попов 1961, 1962, 1963], имеет первостепенное значение для развития методов расчета и прогноза русловых переформирований, особенно возникающих в условиях регулирования стока.

Для наиболее полноценного применения гидролого-морфологического анализа к решению задач расчета и прогноза русловых деформаций требуется получение определенных количественных показателей, с помощью которых можно было бы строить методы расчета и прогноза, основанные на количественной связи морфометрических характеристик и характеристик определяющих их факторов. Это существенно расширяет возможности применения этого анализа в инженерных целях.

Поскольку в основе гидролого-морфологического анализа лежит типизация форм проявления руслового процесса, а, как было показано в предыдущих работах [Попов 1961, 1962, 1963], каждому типу русла свойственны и свои закономерности и виды деформаций, то, очевидно, оказывается необходимым разработать такую систему количественных показателей, которая позволяла бы в наиболее компактной форме характеризовать основные особенности переформирований, свойственные тому или иному типу руслового процесса, причем сразу для участков большого протяжения.

Подробный обзор существующих морфометрических зависимостей, а также зависимостей, связывающих размеры русла с водным режимом и получивших название гидроморфологических, дан в монографии «Русловый процесс» [Кондратьев и др., 1959]. Кроме того, вопросы морфометрии речного русла широко и комплексно рассмотрены Н. А. Ржаницыным [Ржаницын, 1960]. При этом им предложен ряд новых показателей и их связей с водным режимом.

Итоги зарубежных исследований обобщены как в упомянутых отечественных работах, так и в ряде работ зарубежных

специалистов, например, Леопольда и Вольмана [Leopold, Wolman, 1957], Дьюри [Dury, 1960] и др.

Оценивая существующие морфометрические и гидро-морфологические характеристики и признавая их полезность при решении многих практических задач, все же нельзя не указать на то, что они не учитывают многообразия форм проявления руслового процесса и дают о нем слишком осредненное представление.

Действительно, в существующих разработках оперируют обычно с морфометрическими показателями, входящими в тождество  $BHV = Q$ , иногда вводя в зависимость также уклон свободной водной поверхности, оценивается радиус кривизны излучин [Ржаницын, 1960, Маккавеев, 1955 и др.]. Кроме того, обычно рассматриваются только особенности распределения этих параметров в пространстве. Во времени обычно исследуются не их изменения, связанные с формированием русла, а только обусловленные разным наполнением его. Совершенно не освещаются вопросы плановых деформаций русла, хотя этот вид переформирования неразрывно связан с деформациями его дна.

Пожалуй, впервые плановые показатели речных русел (шаг меандр) применены в расчетах Инглисом. Леопольдом и Вольманом делается интересная попытка получения количественных характеристик, свойственных трем основным разновидностям русел – прямым, извилистым и разветвленным. Дьюри широко пользуется зависимостями между шагом меандр и расходом воды в палеогидрографических целях.

### ***Принятые показатели типов руслового процесса***

В работе [Попов, 1961] были выделены следующие типы руслового процесса (рис. 1).

I. Немеандрирующие русла с ленточными грядами. Основные переформирования русла при этом типе процесса выражаются в сползании ленточных гряд. Последние представляют собой крупные, образованные донными наносами одиночные гряды, занимающие всю ширину русла. Плановые деформации русла при этом типе руслового процесса ничтожны и переформирования его вызывают только периодическое изменение глубин и иногда общее врезание русла.

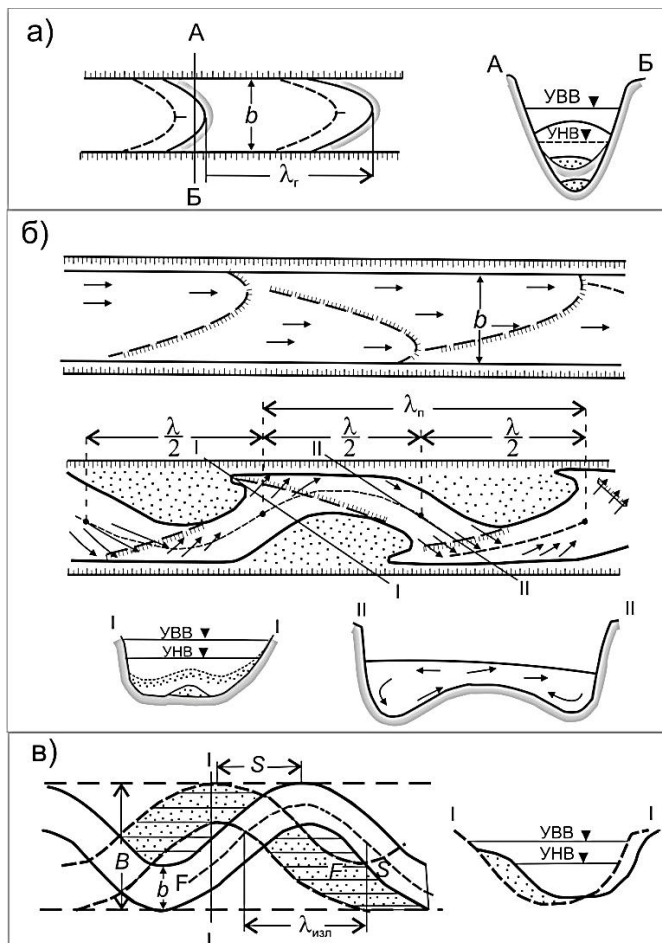


Рис 1а,б,в. Основные типы руслового процесса на равнинных реках СССР:  
 а) – немеандрирующие русла с ленточными грядами,  $\lambda_r$  – шаг гряды,  $\lambda_r/b$  – относительный шаг гряды,  $b$  – ширина русла между бровками межених берегов,  $C_r$  – скорость сползания гряды;  
 б) – побочный тип процесса (вид русла в половодье и в межень,  $\lambda_n$  – шаг побочня,  $\lambda_n/b$  – относительный шаг побочня,  $C_n$  – скорость сползания побочня, I-I и II-II – сечения русла, схема течений и схема деформаций в них;  
 в) – ограниченное меандрирование,  $\lambda_{изл}$  – шаг излучины,  $\lambda_{изл}/b$  – относительный шаг излучины,  $B/b$  – относительная ширина пояса меандрирования,  $C_u = F/(B-b)T = S/T$  – скорость сползания излучины, I-I – схема деформаций в поперечном сечении русла

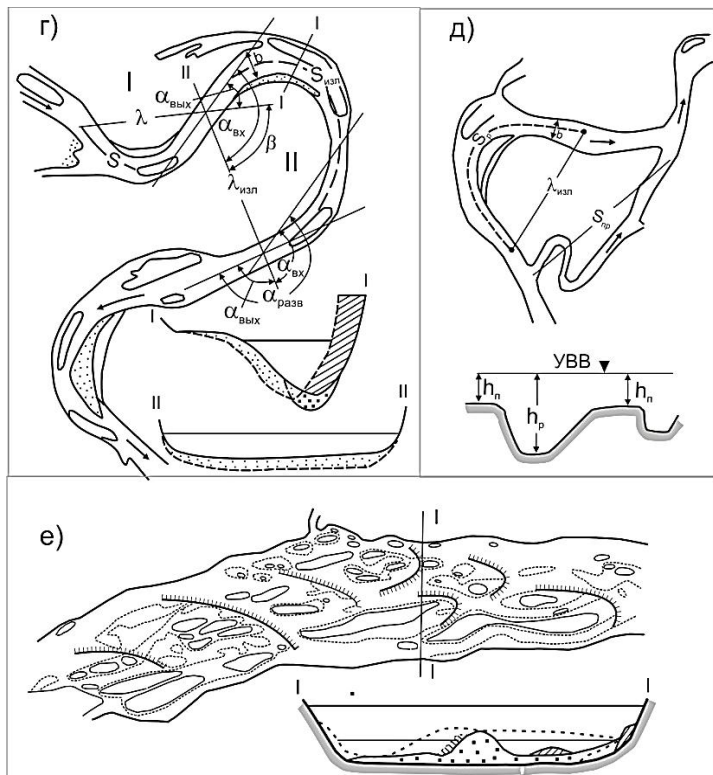


Рис 1 г,д,е. Основные типы руслового процесса на равнинных реках СССР:

г) – свободное меандрирование,  $\lambda_{\text{изл}}$  – шаг излучины,  $\lambda_{\text{изл}}/b$  – относительный шаг излучины,  $S/\lambda_{\text{изл}}$  – показатель развитости излучины,  $\alpha$  – угол разворота излучины,  $\alpha_{\text{вх}}$  – угол входа,  $\alpha_{\text{вых}}$  – угол выхода,  $\alpha_{\text{вх}}/\Delta T$ ,  $\alpha_{\text{вых}}/\Delta T$ ,  $\alpha/\Delta T$  – скорость плановых смещений,  $\beta = \alpha_{\text{вых}} - \alpha_{\text{вх}}$  – угол сопряжения, равный разности углов выхода предшествующей излучины и угла входа последующей;

д) – незавершенное меандрирование,  $S_p/S_p$  – коэффициент незавершенности,  $h_n/h_p$  – коэффициент затопляемости поймы, остальные показатели те же, что при свободном меандрировании;

е) – осередковый тип процесса

II. Побочневый тип процесса. Характерно отсутствие общих плановых деформаций берегов русла и пойменного процесса. В половодье происходит сползание и перекося крупных ленточных гряд, в результате которого они занимают шахматное взаиморасположение, в межень – обсыхание одной прибереговой части гряд, образующее неподвижный в этот период

побочень, размыв пониженной части гряды у противоположного берега, образование извилистого фарватера и типичных перекатов, представляющих собой гребень размывтой части гряды, и плесов (подвалье гряды и побочня).

III. Ограниченное меандрирование. Наблюдается систематическое сползание слабо выраженных излучин, при сохранении ими форм своих плановых очертаний. Появляется слабо развитый пойменный процесс (аккумуляция взвешенных наносов на пойме, вновь поступающих в поток в ходе сползания излучин).

Пойма представлена обособленными, чередующимися по берегам реки массивами. Ограниченное меандрирование развивается обычно при наличии факторов, ограничивающих свободное развитие излучин (ограничение плановых деформаций склонами долины и т. п.).

IV. Свободное меандрирование. Плановые переформирования русла выражаются в развороте двух смежных участков, противоположно направленных вершинами излучин вокруг фиксированной в плане точки (перегиба средней линии русла), с одновременным увеличением кривизны излучин и их удлинением. Развитие излучин заканчивается образованием петель русла и прорывом перешейков этих петель. После этого цикл развития повторяется. Таким образом, процесс свободного меандрирования характерен стадийностью русловых переформирований. Наблюдается интенсивный обмен наносами между поймой и руслом. Характерны сильно развитые поймы, ширина которых иногда в несколько раз превышает ширину пояса меандрирования, с гривистым рельефом поверхности (веера перемещения русла). Гривы – это береговые валы, отошедшие вглубь поймы в ходе плановых деформаций русла. Этим поймам свойственно наличие двучленного современного аллювия в разрезе (нижние слои – крупнозернистая русловая фация, верхние слои – мелкозернистая, пойменная). В развитии смежных излучин русла (макроформ) наблюдается тесная взаимосвязь. Например, прорывы петель русла могут вызвать нарушение нормального хода развития процесса на смежных излучинах и изменение темпов их переформирований. По этой причине даже на относительно коротких смежных участках русла можно встретить различные общие тенденции и темпы переформирований речного русла. Каждая излучина на всех стадиях своего развития ограничивается сверху и в низовых частях перекатами, располагающимися на перегибах

русла. В начальных стадиях развития излучин между этими перекатами располагается плес. В ходе последующего развития излучины возможно расчленение этого плеса и образование в ее пределах 2-3-х и более плесов.

Перекаты при свободном меандрировании образуются так же, как при побочном типе процесса (см. выше), т. е. представляют собой крупные перекошенные гряды. Обсыхающие в межень прибереговые части этих гряд представляют собой те же побочни, но отличающиеся относительной неподвижностью; они сползают только вместе с перемещением берегов в ходе плановых смещений излучин, и их следует называть пляжами.

В чистом виде свободное меандрирование должно заканчиваться прорывом перешейка петли русла вследствие сближения в ходе плановых деформаций берегов русла, находящихся по обеим сторонам этого перешейка. Однако подобные случаи встречаются довольно редко, и разрушение перешейка петли происходит путем промыва его с поверхности, т. е. в результате не русловых, а пойменных деформаций, что свойственно уже другому типу процесса – незавершенному меандрированию.

Так как прорывы перешейков, как указывалось, встречаются редко, то к свободно меандрирующим излучинам можно отнести и такие случаи, когда они, превращаясь в петли, отчлениются путем не прорыва, а промыва перешейка, а к незавершенному меандрированию относить случаи, когда этот промыв происходит до достижения излучиной состояния петли.

V. Незавершенное меандрирование. В условиях пойм, затапливаемых на большую глубину, цикл развития излучин, деформирующихся в начале своего развития по схеме свободного меандрирования, как указывалось, может оказаться незавершенным вследствие образования спрямляющего потока до достижения излучиной состояния петли. Это ведет к разветвлению русла на два рукава. В последующем спрямляющий поток разрабатывается и становится главным руслом, а прежнее главное русло отмирает. В ходе меандрирования нового главного русла появляются и новые спрямляющие потоки. Спрямление может развиваться в основании излучины и близ ее вершины, за первыми от реки береговыми валами. Иногда эти спрямления наблюдаются одновременно, что придает руслу большую разветвленность.

VI. В работе автора [Попов, 1961] был выделен также осередковый тип руслового процесса. При значитель-

ном объеме переносимых потоком наносов и в условиях, благоприятствующих относительно замедленному их транспорту (например, в результате уменьшения уклонов свободной водной поверхности), образуется широкое распластанное русло, по которому сползают не одиночные гряды, занимающие всю ширину русла, как при ленточных грядах, а ряды также крупных разобщенных гряд. Их обсыхание в межень приводит к образованию осередков, т. е. крупных грядообразных сползающих скоплений наносов в центральной части русла.

Если обсохшие в межень гряды долгое время не покрываются водой (низкая длительная межень), то осередки получают возможность закрепляться растительностью, способствующей усилению отложений на них наносов, превращаются в острова и составляют островную часть поймы. Образующиеся между этими островами протоки обычно начинают меандрировать и острова могут смещаться в поперечном к реке направлении. Кроме того, вследствие намывов и размывов их приверлов и ухвостей выражены продольные перемещения островов (сползание и регрессивное, пятающееся перемещение). В ходе своих перемещений острова могут причленяться к пойме в результате заноса более длинного протока, вклинившегося в пойму. При очень высоких половодьях занесенные протоки могут возобновляться, и происходит отчленение островов.

В качестве самостоятельного типа руслового процесса выделялись также процессы формирования пойменной многоорукавности. Поскольку при осередковом типе процесса деформации русла происходят и по схеме развития ленточных гряд, и по схеме меандрирования (деформации отдельных протоков), а при пойменной многоорукавности также можно выделить фрагменты свободного и незавершенного меандрирования и других описанных типов процесса, в подобных случаях следует заняться фрагментированием и применением измерителей, предлагаемых для соответствующих типов процесса.

Даже из приведенного краткого описания типов руслового процесса видно, что охарактеризовать особенности общих деформаций русла, свойственных каждому типу процесса, с помощью только обычно используемых в морфометрических и гидроморфологических зависимостях характеристик – ширины и глубины русла, нельзя.

Выше было указано, что основные переформирования русла при наличии в нем правильных ленточных гряд и при по-



бочневом режиме (движение перекошенных ленточных гряд) сводятся к смещению этих форм скоплений наносов.

Это дает основание считать, что для количественного выражения руслового процесса этих типов наиболее существенно иметь характеристики основных форм его проявления, т. е. требуется установить основные параметры крупных гряд.

Для ленточных гряд, прежде всего, следует определить их шаг  $\lambda_c$  как расстояние между гребнями двух смежных гряд или в безразмерном выражении относительный шаг гряд  $\lambda_c/b$ , где  $b$  — ширина русла реки, а также скорость сползания гряд  $C_c$ . Способы определения этих измерителей ясны из рисунка 1.

При побочневом типе руслового процесса — перекошенных обсыхающих ленточных грядах, благодаря перекосу этих гряд создаются как бы две системы образований — побочни левого и побочни правого берега. Из рисунка 1 видно, что если шаг побочней определять по одному из берегов, то он будет в два раза превышать шаг ленточных гряд. Так как главной задачей является выделение не побочней, а перекошенных ленточных гряд, то шаг побочня  $\lambda_n$  правильнее определить как расстояние по прямой между точками перегибов русла, образующихся в межень при обтекании побочней потоком (рис. 1б).

При ограниченном меандрировании (рис. 1в) основным видом общих переформирований русла является сползание излучин при сохранении ими своих очертаний. Поэтому важно учесть параметры формы излучин — ее шаг  $\lambda_{изл}$ , относительный шаг  $\lambda_{изл}/b$ , степень выраженности излучин  $B/b$  и скорость их сползания  $C_{изл}$ . Здесь  $\lambda_{изл}$  является расстоянием по прямой между точками перегиба средней линии русла,  $b$  — шириной русла,  $B$  — шириной пояса меандрирования (расстояние между касательными, проведенными через вершины противоположно направленных излучин).

Для свободного меандрирования (рис. 1г) характерно изменение формы излучин, появление их асимметрии. Поэтому кроме шага излучины  $\lambda_{изл}$  и его безразмерного выражения  $\lambda_{изл}/b$  — относительного шага, следует учесть такие изменяющиеся во времени параметры, как показатель ее развитости  $S_{изл}/\lambda_{изл}$  и углы разворота  $\alpha$ , входа  $\alpha_{вх}$  и выхода  $\alpha_{вых}$ . Скорость развития излучины  $C_{изл}$  целесообразно выразить через скорость ее разворота  $\Delta\alpha/\Delta T$ ,  $\Delta\alpha_{вх}/\Delta T$ ,  $\Delta\alpha_{вых}/\Delta T$ , т. е. через взаиморасположение смежных излучин можно оценить углом сопряжения излучин, т. е.

путем вычисления угла  $\beta = \alpha_{\text{выхл}} - \alpha_{\text{вхл}}$ , равного разности углов выхода верховой излучины и входа низовой.

Это позволяет выразить плановую схему взаиморасположения излучин на участке реки. Для незавершенного меандрирования (рис. 1д), кроме показателей, предлагаемых для учета закономерностей свободного меандрирования, существенно оценить степень незавершенности процесса и степень затопляемости пойм. Это можно сделать, определив коэффициент незавершенности процесса – отношение длины спрямленного русла  $S_{\text{пр}}$  к длине излучины между началом и концом этого спрямления  $S_P$ , т. е.  $S_{\text{пр}}/S_P$ , и коэффициент затопляемости поймы – отношение глубины воды назатопленной пойме  $h_n$  к глубине, устанавливающейся в этот же момент в главном русле  $h_p$  или  $(h_n/h_p)$ .

Получение перечисленных выше основных параметров различных типов руслового процесса может быть выполнено по аэрофотоснимкам или по крупномасштабным съемкам речного русла. Из рисунка 1 видно, что определение этих параметров достаточно просто и вместе с тем определено.

### **Методика обобщений**

Полученные по картам и аэрофотоснимкам значения показателей руслового процесса различного типа были подвергнуты статистической обработке, целью которой являлось выяснить характер распределения полученных величин по длине рек и во времени, соотношения, создающиеся между отдельными морфометрическими характеристиками в ходе развития руслового процесса, а также соотношения между морфометрическими и гидрологическими характеристиками. Работа велась по практическим бесприточным участкам.

Закономерности распределения величин отдельных морфометрических характеристик по длине рек анализировались с помощью кривых обеспеченности. Связи между морфометрическими и гидрологическими характеристиками выявлялись с помощью обычных графических построений.

Обобщения, полученные указанными приемами, освещают вопросы многолетних (вековых) распределений величин морфометрических характеристик и их связей с определяющими факторами. Вопросы внутригодовой изменчивости характеристик руслового процесса представляют собой задачу само-

стоятельного исследования и требуют значительно более подробных материалов.

Полученные выводы следует рассматривать как подлежащие дальнейшему уточнению на массовом материале. Они представляют собой только первую попытку получения эмпирических количественных характеристик предложенных измерителей руслового процесса различного типа, попытку, показывающую широкие возможности подобного приема анализа.

### *Количественные характеристики ленточных гряд*

#### *Особенности исследованных участков и способов измерений*

При русловом процессе, выражающемся в сползании ленточных гряд или побочней, представляющих собой обсыхающие в межень части перекошенных ленточных гряд, массовый материал можно получить только для шагов ленточных гряд и побочней.

Данные о шагах ленточных гряд можно получить по аэрофотоснимкам для участков с просвечивающим дном русла. При побочневом типе процесса часть побочней можно определить по лоцманским картам.

Определения шагов ленточных гряд были произведены для р. Оки на участках суммарным протяжением в 276 км, в пределах которых измерено 430 гряд. На Оке участки с ленточными грядами располагаются в верховьях реки. Всего выделено 8 бесприточных участков с ленточными грядами.

Для всех них характерно отсутствие сколько-нибудь ясно выраженных плановых деформаций русла. Об этом свидетельствуют хорошо задернованные берега с отсутствием явных следов подмыва и прибереговых скоплений наносов. Вместе с тем русло глубоковрезанное, слабо извилистое, причем извилины его обычно повторяют извилины долины и лишь на коротких участках не полностью согласуются с последними.

Отсутствие следов плановых деформаций позволяет заключить, что извилистость русла является унаследованной потоком и сформировалась в прошлые более многоводные периоды, т. е. никак не связана с современным типом процесса.

Все эти обстоятельства дают основание полагать, что перемещение ленточных гряд на этих участках является основным способом транспортирования донных наносов.

Типичный вид русла р. Оки на участках с ленточными грядами показан на рис. 2; основные морфометрические и гидрологические данные по ним приведены в табл. 1.

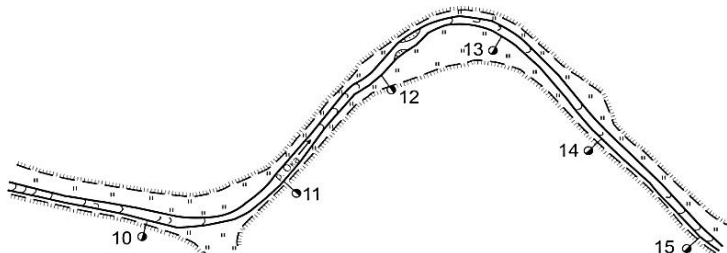


Рис. 2. Типичный вид русла р. Оки на участках с ленточными грядами

На рис. 3 показано распределение основных характеристик стока воды по длине рассматриваемых участков реки.

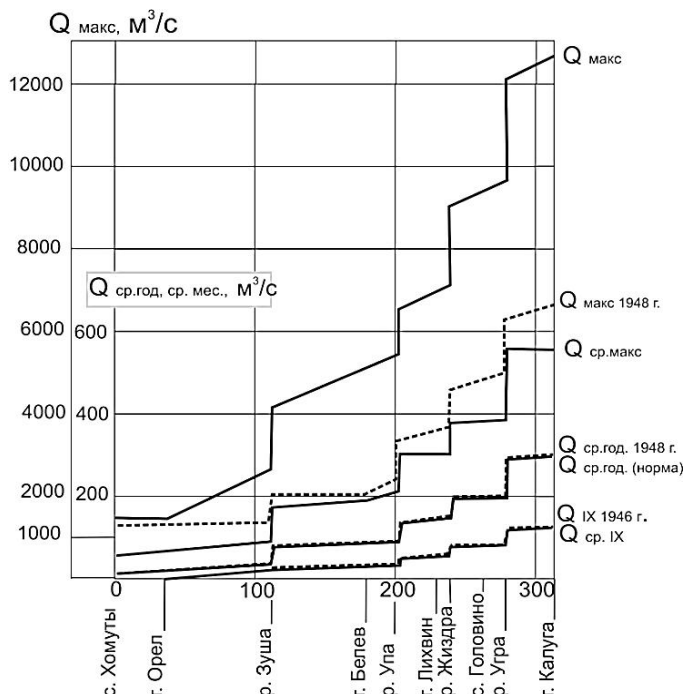


Рис. 3. Распределение по длине р. Оки основных характеристик стока воды

Табл. 1. Характеристики ленточных град р. Оки на участке Хомуты – устье р. Угры, определенные по аэрофотоснимкам (среднее значение по практически бесприоточным участкам) 1946 г.

Участки, км от с. Хомуты	Q <sub>ср.год</sub>	Q <sub>ср.макс.</sub>	Q <sub>макс.макс</sub>	Q <sub>макс.1946 г.</sub>	Q <sub>ср.1946 г.</sub>	Q <sub>ср.19</sub>	I ‰	λ <sub>ср.</sub> , м	b, м	λ/b	λ <sub>чизл.</sub> , м	S, м	S/λ	C <sub>и,гр</sub>
I 0,080-38,980	17,7	623,1	1513	1370	4,0	3,0	0,29-0,16	216,5	46,5	4,69	904	1043	1,14	0,360
II 38,980-56,780	24,2	733	1702	1370	8,2	7,2	0,17-0,09	259	45	5,77	1658	2205	1,32	0,497
III 56,780-70,480	27,3	781	1979	1370	13,5	11,5	0,12-0,09	241	40	6,02	960	1135	1,14	0,302
IV 70,480-97,130	30,2	825	2215	1370	16,4	14,4	0,17-0,14	303	40	7,57	837	1344	1,48	0,325
V 97,130-114,080	35,7	913	2626	1370	21,1	19,0	0,47-0,08	263	47	5,60	1066	1172	1,12	0,379
VI 114,080-200,780	85,3	1841	4744	2115	35,0	32,7	0,15-0,06	426	64	6,77	1732	2415	1,32	0,321
VII 200,780-236,80	137,3	3000	6800	3530	56,0	53,2	0,11-0,08	722	94	7,72	1650	2735	1,62	0,383
VIII 236,80-275,370	194,1	3800	9311	4761	83,4	75,2	0,29-0,03	740	130	5,84	1929	2282	1,27	0,418

Ленточные гряды обнаруживаются практически повсеместно. Они имеются и на прямых участках, и на подходах к вершинам вынужденных поворотов русла, в вершинах этих поворотов и на выходе из них, т. е. расположение гряд не приурочено к определенным плановым очертаниям русла. Однако все же можно отметить, что на самом верхнем участке, между с. Хомуты и устьем р. Зуши, большинство гряд (206 из 232) располагаются в пределах поворотов русла и их очень мало на прямых участках. На самом нижнем участке (с. Головино–устье р. Угры) большинство гряд встречается на прямых участках и лишь иногда гряды обнаруживаются в пределах криволинейных участков русла.

Аэрофотоснимки позволяют обнаружить не все гряды, имеющиеся в русле, так как часть из них не видна из-за недостаточной прозрачности воды (глубоководные участки), или неблагоприятных условий освещенности водной поверхности (блики) в момент производства аэрофотосъемки. При определении шагов гряд принимались в расчет только хорошо выраженные парные гряды, просматриваемые на снимках на всем их протяжении.

Процент длины участков с грядами по отношению к общей длине участков реки, отнесенных к данному типу руслового процесса, колеблется от 10 до 57%.

### ***Распределение величин шагов ленточных гряд и их связь с факторами процесса***

#### ***Вариации шагов ленточных гряд р. Оки***

На рис. 4 показаны кривые обеспеченности шагов ленточных гряд, построенные по практически бесприточным участкам р. Оки (изменение среднего годового расхода в пределах 10%). Устойчивость величин шагов ленточных гряд в среднем оценивается коэффициентом вариации 0,373, при крайних его значениях для отдельных практически бесприточных участков 0,302 и 0,497.

Кривая обеспеченности относительных шагов ленточных гряд, в общем, также показывает устойчивость шагов гряд по длине реки (рис. 5). В 50% случаев шаг гряд составляет величину порядка 8 ширины русла между бровками смежных берегов. В 25% случаев эта величина равна 9,4, а в

75% случаев – 6,8 ширины русла. Крайние значения шагов гряд составляют 13 и 2 ширины.

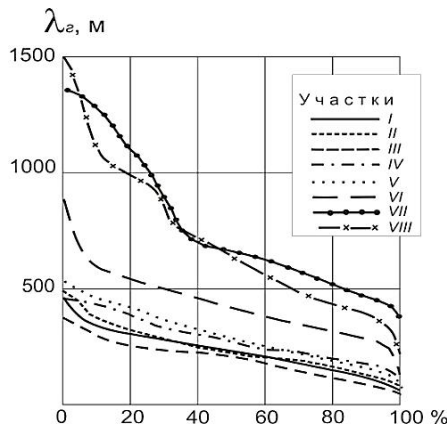


Рис. 4. Кривые обеспеченности шагов ленточных гряд для бесприточных участков р.Оки (см. табл.1)

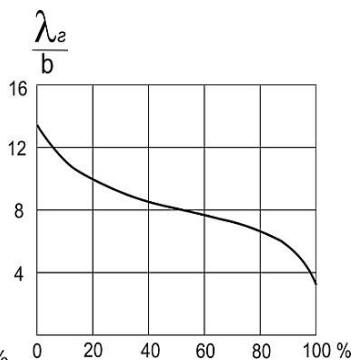


Рис. 5. Кривая обеспеченности относительных шагов ленточных гряд на р.Оке

### Связь шагов ленточных гряд с характеристиками стока

Так как в пределах бесприточных участков шаг гряды оказывается довольно устойчивой величиной, то, очевидно, местные случайные факторы оказывают меньше влияния на его размеры, чем факторы, закономерно изменяющиеся по длине реки. Сопоставление шагов гряд на смежных бесприточных участках р. Оки показывает довольно закономерное увеличение шагов с увеличением размеров потока.

В качестве показателя крупности реки могут быть приняты различные характеристики размеров русла или водности потока. Например, в качестве показателя крупности потока может быть принят средний годовой расход воды, максимальные расходы, объемы половодья и др.

В качестве показателя крупности русла можно принять, например, ширину русла и другие морфометрические показатели.

При выборе показателя крупности реки для установления его связи с шагом гряд прежде всего необходимо выбрать такие из этих показателей, которые имеют наибольшие значения для формирования данного руслового образования, в нашем случае – основное грядобразующее значение.

Вопросом об определении этих расходов занимались ряд отечественных и зарубежных ученых, так как их вычисление весьма важно для гидротехнических расчетов. Однако вопрос этот единого решения не получил и имеются различные предложения.

В гидротехнической практике и у нас, и за рубежом в качестве основного, имеющего наибольшее значение для формирования рельефа речного русла, принимается расход воды, соответствующий уровню ее выхода из бровок берегов. В частности, именно так определял его В. Г. Глушков [Маккавеев, 1955], также вычисляют его и зарубежные исследователи, например: Леопольд и Вольман [Leopold, Wolman, 1957], Дьюри [Dury, 1960] и др. Этот расход обычно называют «руслоформирующим».

Имеются и другие предложения по определению этого расхода. Так, еще Н. С. Лелявский считал, что основные формы рельефа дна русла создаются не в половодье, а в межень по Лелявскому, половодье только разрушает созданные за предшествующую межень формы русла, а последующая межень их восстанавливает [Маккавеев, 1955]. Шаффернак предлагал рассчитывать «руслоформирующий» расход воды как расход, соответствующий максимуму влекущей силы потока, определяемой как произведение его глубины на уклон свободной водной поверхности. По вычислениям Шаффернака, максимум влекущей силы приходится на расход, обеспеченный 7,5 дней в году, т. е. близкий к максимальному [Маккавеев, 1955].

Людин (1932 г.) определяет этот расход как расход воды, работа которого по транспортированию наносов эквивалентна в среднем годовом разрезе сумме работ всех фактически наблюдавшихся расходов воды [Маккавеев, 1955].

Н. И. Маккавеев, принимая принципы Людина, ставит величину «руслоформирующего» расхода воды в зависимость от степени устойчивости русла и типа связи уклонов и уровней воды и получает, что на одних реках эти расходы соответствуют средним многолетним максимумам половодья (реки лесной и степной зон, обеспеченность расхода в году 1–6%), на других – расходам воды 25–45%-ной обеспеченности в году (реки лесотундры и лесостепи). В первом случае расходы соответствуют отметкам выхода воды на пойму, во втором случае – отметкам гребней побочной [Маккавеев, 1955].

С нашей точки зрения, определение этой характеристики безотносительно к тому, какие именно русловые образования



подлежат расчету, неправомерно. Даже если этот расход оценивается для русла в целом, то и в этом случае его значение, прежде всего, будет зависеть от типа руслового процесса, поскольку макроформы рельефа речного русла, свойственные каждому типу процесса, складываются из различных по своим размерам, способам образования и характеру движения русловых образований, требующих и различных расходов воды, и определенных их комбинаций с характеристиками наносов и особенностями ограничивающих условий.

К сожалению, детальных данных о развитии ленточных гряд в природе практически нет. Поэтому, для того чтобы выяснить, в какую фазу гидрологического режима существуют оптимальные условия для их развития, пока приходится ссылаться на результаты лабораторных опытов, а также основываться на теоретических гидродинамических и морфологических построениях.

Так как никаких следов работы потока в половодье не обнаружено и ленточные гряды являются наиболее крупными русловыми образованиями (формами подвижных скоплений наносов), можно предполагать, что они являются единственным видом транспорта донных наносов на данном участке и в половодье, и в межень. Действительно, судя по крупности наносов (песок, гравий) и данным о скоростях течения, предполагать наличие в период половодья гладкой фазы движения наносов трудно и, следовательно, ленточные гряды должны были сформироваться именно в период половодья. В период межени перемещение этих гряд могло прекратиться. Но так как в этот период в русле могут перемещаться более мелкие формы, а они повсеместно обнаруживаются в виде мелких гряд на поверхности крупных, то правомерно предположить, что их перемещение может приводить и к смещению ленточных гряд, благодаря тому, что небольшие грядки будут всплывать по верховому откосу, а затем накапливаться в подвалье. Если бы роль перемещения мелких форм была значительной, то оно могло бы приводить к расчленению ленточных гряд или даже к их полной сработке. Однако этого не обнаруживается и, следовательно, можно утверждать, что сползание мелких гряд в межень приводит лишь к медленному перемещению и ленточных гряд за счет накопления малых форм на их низовом откосе. Тогда, по видимому, шаг ленточных гряд, зафиксированный на аэрофотоснимке, не будет сильно отличаться от того, который устано-

вился в период наибольшего развития гряды, т. е. в половодье, и его правомерно связать с характеристиками водности всего года.

Обобщения лабораторных и некоторых натуральных материалов, выполненные Н. С. Знаменской [Знаменская, 1962], также показывают, что наиболее крупные гряды, т. е. гряды, имеющие наибольшие плановые размеры, а, следовательно, и шаги, образуются в условиях, когда числа Фруда достигают наименьших значений, т. е. при расходах, близких к максимальным. Выясняется также, что гряды наибольшей высоты создаются при наибольших глубинах. Вместе с тем обнаруживается, что чем крупнее наносы, тем длиннее бывают гряды, а следовательно, больше их шаг. Однако вопрос о том, какой именно фактор – размер половодья или крупность наносов – является ведущим в отношении создания шага гряд, еще подлежит выяснению.

Как видим, морфологические признаки и результаты лабораторных и теоретических разработок свидетельствуют о том, что ленточные гряды в случае, когда они являются основной формой транспорта донных наносов, в условиях отсутствия очень резких изменений в их крупности образуются в период половодья и, во всяком случае, не являются чисто меженным образованием.

Можно было бы попытаться связать шаг гряд, определенный по аэрофотоснимкам, с различными характеристиками водности и выяснить, с какими из них эта связь оказывается наиболее тесной. Однако в данном случае это сделать нельзя потому, что в пределах исследуемых участков имеют место довольно устойчивые внутригодовые колебания стока и соотношения между отдельными его характеристиками по этой причине также отличаются большой устойчивостью; поэтому теснота связи будет одинаковой для самых различных характеристик стока. Это наглядно иллюстрируется рис. 6, на котором приведены связи шагов гряд со средними и наибольшими минимальными расходами, с максимальным расходом года, в который измерены шаги гряд (1946 г.), а также со средним многолетним годовым расходом (нормой стока), средним годовым расходом 1946 г. и среднемесячными расходами — средним многолетним и на момент съемки (IX 1946 г.), по которой определены шаги гряд.

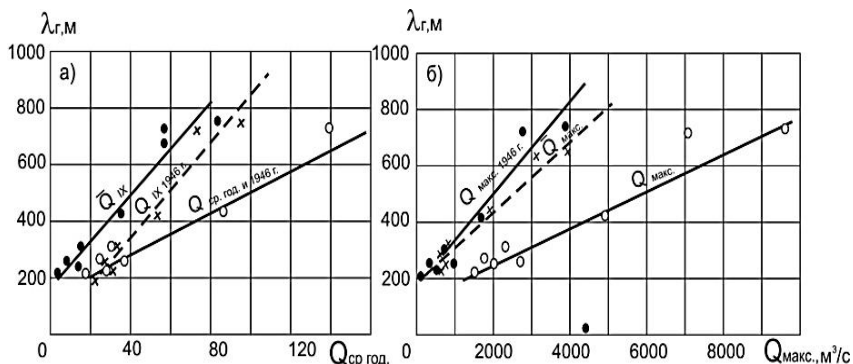


Рис. 6. Связь средних по бесприточным участкам шагов ленточных гряд с различными характеристиками стока – средними (а) и максимальными {б)

Связь эта представляет интерес с той точки зрения, что она показывает возможность в подобных условиях оценивать средние размеры шагов гряд на бесприточных участках по данным о самых распространенных характеристиках водного режима, например, по норме стока. Следует также иметь в виду, что при хорошо выраженном половодье и низкой межени среднегодовой расход определяется в основном объемом весеннего половодья и, следовательно, наличие хорошей связи расходов, межени со средним шагом гряд на бесприточных участках не противоречит положению о том, что гряды в основном формируются в период половодья. Надо также отметить, что в рассмотренных случаях норма стока близка к расходам воды, соответствующим отметкам ее выхода на пойму.

### ***Зависимость шага ленточных гряд от морфометрических характеристик русла***

Уже указывалось, что шаг гряд зависит не только от водности реки, но и от ряда других факторов. Поэтому связь между шагом гряд и характеристиками водности реки при нанесении не осредненных значений, а всех данных, полученных при измерениях, показывает значительно большее рассеяние точек (рис. 7)

Как указывают Леопольд и Вольман, а также Дьюри, связь между шагом меандр и шириной русла реки более тесная, чем между шагом меандр и расходами воды.

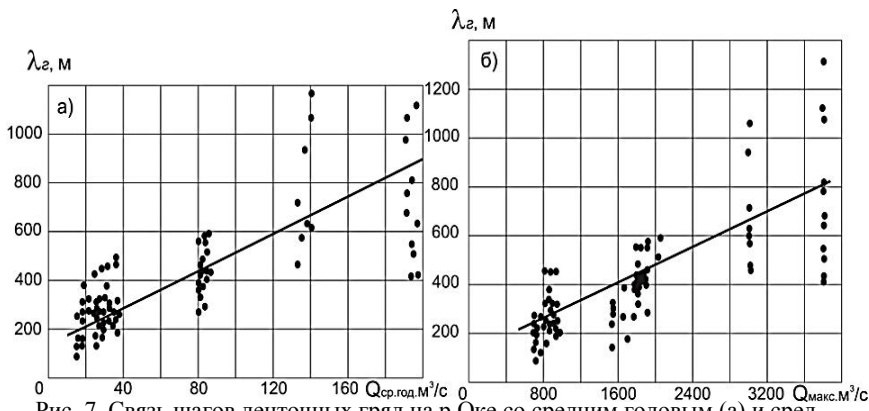


Рис. 7. Связь шагов ленточных гряд на р.Оке со средним годовым (а) и средним максимальным (б) расходом воды по данным всех измерений шагов

В нашем случае для шагов гряд замена расхода воды данными о ширине русла существенного улучшения не вносит (рис. 8). Однако она достаточно отчетлива и ею можно пользоваться

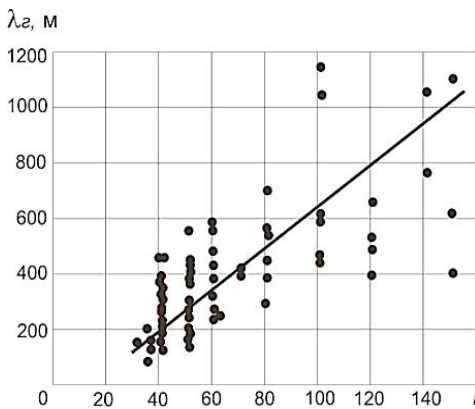


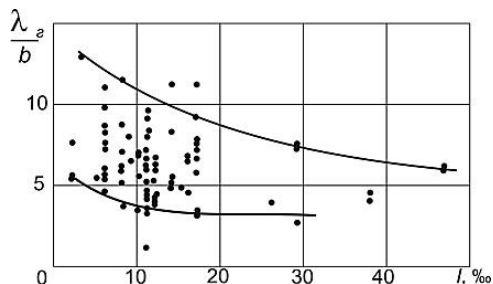
Рис. 8. Связь шагов ленточных гряд ( $\lambda_g$ ) на р.Оке с шириной русла ( $b$ )

при отсутствии надежных данных о величине расходов воды. Представляет интерес выявить влияние других факторов на шаг гряд. Данных о скоростях течения в пределах рассматриваемых участков не имеется, но можно попытаться оценить влияние на шаг гряд уклонов свободной водной поверхности.

Учитывая относительно слабую извилистость русла и отсутствие резких расширений и сужений поймы, можно предположить, что существенной разницы в уклонах в период половодья и в межень не должно быть.

Связь относительного шага гряд ( $\lambda_r/b$ ) с меженными уклонами (рис. 9) получилась не слишком отчетлива. Можно

лишь видеть, что с уменьшением уклона относительный шаг гряд увеличивается. Поскольку на участках с ленточными грядами имеется унаследованная потоком извилистость русла, не связанная с данным типом процесса, можно попытаться учесть влияние на шаг гряд извилистости русла, т. е. обусловленных ею особенностей протекания



потока.

Рис. 9. Связь относительных шагов ленточных гряд на р. Оке с уклонами свободной поверхности в межень

В принятой системе морфометрических параметров типов руслового процесса извилистость можно выразить показателем степени развитости излучин  $S/\lambda_{изл}$ . Влияние степени развитости излучин на шаг ленточных гряд можно проследить по графику, помещенному на рис.10. Из этого графика видно, что с увеличением извилистости русла до известных пределов, в данном случае до отношения 2 (длина излучины в два раза превышает ее шаг), пределы изменения шага гряд уменьшаются. Так, если при прямом русле ( $S/\lambda_{изл}=1$ ) шаг гряд колеблется в зависимости от различных факторов примерно от 2 до 12 ширины рек, то при значении  $S/\lambda=1,5$  он меняется от 3,8 до 10,5 раз, а при  $S/\lambda=2$  только от 6 до 8 раз.

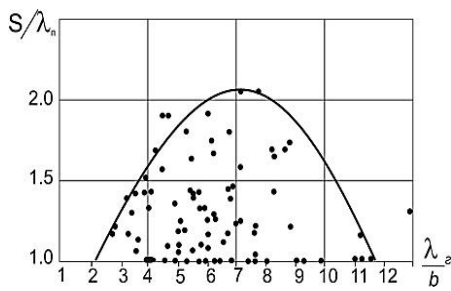


Рис. 10. Связь относительных шагов ленточных гряд на р. Оке со степенью выраженности излучин

В излучинах с параметром  $S/\lambda_{изл}>2$  гряды встречаются редко. В этих случаях излучины являются обычно меандрирующими, гряды оказываются приуроченными к перегибам русла и представляют собой уже не сползающее образование,

а устойчивый перекат, плановые деформации которого происходят только по мере развития всей излучины.

### **Количественные характеристики руслового процесса побочного типа**

#### **Общие сведения об участках**

Измерение шагов побочной производилось на примере рек Вислы и Оки.

В наиболее чистом виде побочный тип процесса прослеживается на р. Висле в нижнем ее участке, в районе г. Хохфлюг (рис. 11). Средний годовой расход воды в пределах данного бесприточного участка составляет  $1010 \text{ м}^3/\text{с}$ . Участок, на котором определялись побочни, характерен тем, что на всем его протяжении русло реки очень слабо извилистое. Берега русла сопровождаются часто расположенными струенаправляющими дамбами. Их сооружение привело к тому, что в русле реки, в зоне между концами дамб, расположенных по обоим берегам, образовались отторженные побочни, сохраняющие шахматное взаиморасположение.

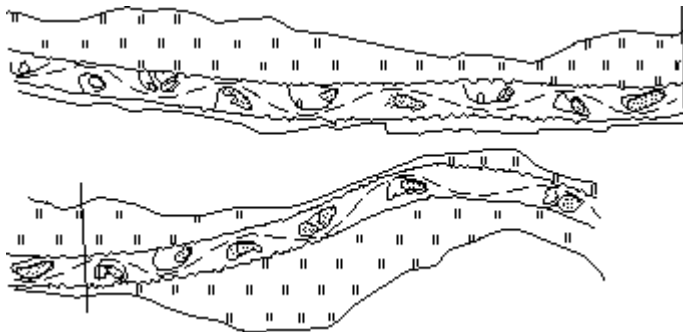


Рис.11. Участок р. Вислы с отторженными побочнями

Бесприточность участка, равномерная ширина активной части потока, установившаяся благодаря сооружению струенаправляющих дамб, и отсутствие извилистости привели к тому, что шаг побочней на всем протяжении исследованного участка отличается исключительным постоянством, что видно из рис. 11, а также из кривой обеспеченности абсолютных и относительных шагов побочней (рис. 12)

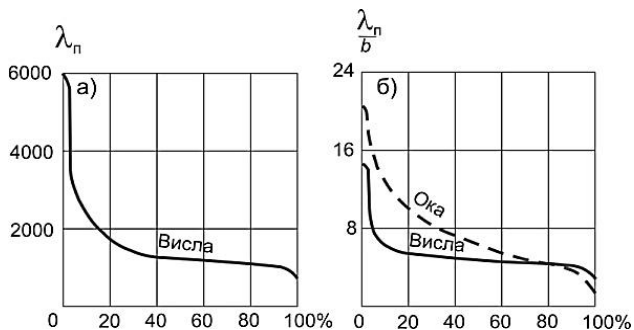


Рис. 12. Кривые обеспеченности шагов побочней на р. Висле (а) и относительных шагов побочней на реках Висле и Оке (б)

На схеме, составленной по аэрофотоснимкам, показаны и надводные, и подводные части побочней, заметные благодаря наличию просвечивающего сквозь толщу воды дна русла. Участки между струенаправляющими дамбами, как видно из схемы, к моменту съемки оказались почти полностью занесенными, и поток при протекании в русле испытывает относительно небольшие и весьма равномерно распределенные по его длине сопротивления. Средний уклон на участке  $0,173\%$ . Грунты дна – мелкий песок.

На всех участках р. Оки, для которых производились измерения шагов побочней, характерно развитие побочневого процесса в извилистом русле. Побочни обнаружены на участках с ограниченным меандрированием при очень слабо размываемых берегах и при свободном меандрировании в стадии спрямленного русла, т. е. в условиях, характеризующихся еще слабо развитыми плановыми деформациями.

Участки с побочневым типом процесса располагаются непосредственно ниже описанных выше участков, на которых развит транспорт донных наносов в виде сползающих ленточных гряд. Первые три бесприточных участка с побочнями не прерываются участками с другим типом процесса. А затем побочни исчезают, сменяются свободным меандрированием и вновь встречаются много ниже по реке при спрямленном в ходе свободного меандрирования русла. Здесь имеются 3 бесприточных участка с побочнями. Можно отметить, что появление участков с побочневым типом процесса сопровождается

существенным (примерно на 1/3 среднегодовой нормы) увеличением водности реки (впадение р. Угры)

Суммарная длина участков, в пределах которых обнаружены побочни, составляет 675 км. Побочневый процесс, развивающийся на фоне ограниченного меандрирования, занимает участок длиной 253 км (два бесприточных участка по 126 и 127 км). Длина непосредственно ниже следующего участка, на котором побочневый процесс протекает на фоне свободного меандрирования в стадии спрямленного русла (также бесприточный участок), равна 235 км. Общее число побочней, измеренных на этих трех участках, составляет 86. Так как побочни встречаются не на всем протяжении каждого участка, то средний их шаг вычислять путем деления длины участков на число побочней нельзя.

Основные морфологические и гидрологические характеристики перечисленных участков р. Оки помещены в табл. 2. Как видно из таблицы, эти участки по сравнению с теми, на которых наблюдались ленточные гряды, отличаются значительно меньшими уклонами свободной водной поверхности, но увеличением размеров русла и стока воды. Расходы взвешенных наносов по длине всех участков с побочнями меняются относительно мало, убывая с 46 до 34 кг/сек.

Табл. 2. Основные данные по участкам р. Оки с побочневым типом руслового процесса

Границы участков	Длина участка, км	Средний годовой расход воды, м <sup>3</sup> /с	Средний годовой расход взвешенных наносов, кг/с	Уклон свободной водной поверхности	Число измеренных побочней
р.Угра — р. Протва	126	296	46	0,00005	29
р.Протва — р. Москва	127	382	46	0,00007	32
р.Москва—р. Проня	235	480	36	0,000035	25
с.Рубецкое—р. Мокша	100	720	35	0,00005	8
с.Нарышкино —с. Окшово	39	860	35	0,00004	11
с.Окшово—с.НовоАзовка	48	905	34	0,00003	5

Три бесприточных участка с побочнями, обнаруженные в нижнем течении р. Оки между с. Рубецкое и с. Ново-Азовка, таковы. На первом из них длиной в 100 км побочни встречаются

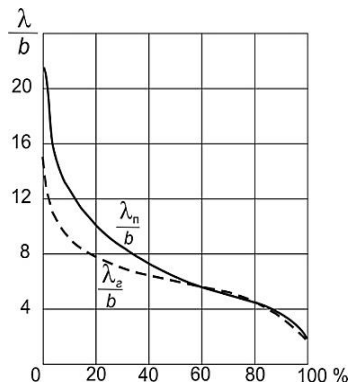


ся на фоне ограниченного меандрирования, обусловленного стеснением потока склонами долины. Этот участок прерывается хорошо развитым на протяжении 100 км свободным меандрированием, в пределах которого побочни отсутствуют. Два нижних участка (с. Нарышкино – с. Окшово и с. Окшово – с. Ново-Азовка), на которых вновь встречены побочни, являются непосредственно следующими друг за другом участками, спрямленными в ходе свободного меандрирования.

### Распределение величин шагов побочней

Как и следовало ожидать, на участке р. Вислы с укрепленными недеформируемыми берегами и малой извилистостью шаг побочней оказался очень устойчивым (рис. 12). Коэффициент вариации  $C_{v\lambda\text{поб}}$  составил 0,32. Значительно сложнее распределение шагов побочней оказалось на р. Оке, где они, как указывалось, обнаруживаются на фоне руслового процесса других типов.

Ввиду малого числа измерений по каждому бесприточному участку р. Оки рассмотрим распределение относительных шагов побочней, т. е. выражение  $\lambda_n/b$  (рис. 12). Кривая обеспеченности относительных шагов побочней на участках р. Оки



выявляет относительно большую изменчивость этого показателя по сравнению с шагом ленточных гряд, обнаруженных на этой реке (рис. 13), и по сравнению с шагом побочней на р. Висле. Коэффициент вариации ленточных гряд на р. Оке оценивался в 0,37, а  $C_{v\lambda\text{поб}}=0,58$ . На Висле  $C_{v\lambda\text{поб}}$  как указывалось, был равен 0,32.

Рис. 13. Кривые обеспеченности относительных шагов гряд и побочней на р. Оке

Обнаруживается, что если шаг ленточных гряд колеблется от 2 до 13 ширин русла, то шаг побочней меняется от 1 до 20 и более ширин русла. В табл. 3 помещены значения относительного шага ленточных гряд и побочней р. Оки до одинаковых процентов обеспеченности.

Табл.3. Значения относительного шага ленточных гряд и побочней р. Оки

Показатель	Обеспеченность, %		
	25	50	75
$\lambda_{л}/b$	9,4	8	6,8
$\lambda_{поб}/b$	9,4	6	4,6

Из таблицы видно, что порядок величин относительных шагов ленточных гряд и побочней на р. Оке близок, что еще раз подтверждает высказанное выше положение о том, что побочни представляют собой обсохшие в межень части ленточных гряд, перемещающихся по руслу в период половодья и приостанавливающих сползание в межень. Вместе с тем все же оказывается, что в среднем шаг побочня несколько меньше, чем шаг ленточной гряды (для побочней он равен 6-ти ширинам русла, для ленточных гряд – 8-ми ширинам русла).

Это обстоятельство может быть случайным, поскольку для определения средних значений шагов побочней использовано относительно небольшое число измерений (немногим более 100), однако оно может обуславливаться и тем, что на участках с побочнями местные влияния в данном случае оказываются более существенными. Действительно, на участках с ленточными грядами плановые деформации и извилистость русла р. Оки, как указывалось, были небольшими. На участках же с побочнями были одновременно развиты и другие типы процессов – ограниченное и свободное меандрирование, в ходе которых плановые деформации могут существенно влиять на скорость сползания и размеры побочней.

Наконец, не исключено, что в связи с увеличением приточности и объемов поступления материала из овражной сети и в результате подмыва склонов долины на участках, в пределах которых обнаружены побочни, увеличивается и одновременно замедляется транспортирование потоком донных наносов, что может привести к увеличению числа их подвижных скоплений.

Для сопоставления величина относительных шагов побочней рек Оки и Вислы приведена табл. 4, в которой выписаны значения  $\lambda_{поб}/b$  для указанных рек при равных процентах обеспеченности. Относительный шаг побочней на р. Висле оказывается меньшим, чем на р. Оке, что может свидетельствовать о большем расходе донных наносов или их большей крупности.

Табл.4. Сопоставление относительных шагов побочной  $\lambda_n/b$  рек Вислы и Оки

Река	Обеспеченность, %				
	25	50	75	наибольший	наименьший
Ока	9,4	6	4,6	22	2,0
Висла	5,1	4,6	4,2	15	3,0

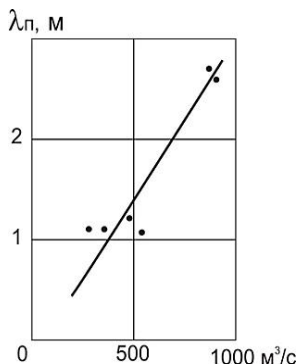
В данном случае, по-видимому, имеют место оба фактора. Известно, что русло Вислы на многих участках выше и ниже исследуемого – разветвленное (осередковый тип процесса и незавершенное меандрирование), что указывает на наличие повышенных расходов донных наносов. Берега реки на этом участке неустойчивые, сложены мелким песком и супесями, легко подмываются и обваливаются в воду. Вместе с тем известно, что в русле имеется и окатанная галька диаметром до 1 см. Уклоны Вислы более чем в 3 раза превышают уклоны р. Оки на рассмотренных участках. На Оке они составляли около 0,00005, на Висле – 0,00017.

#### ***Связь шагов побочной с морфометрическими и гидрологическими факторами***

При сопоставлении средних на бесприточных участках значений относительного шага побочной по длине р. Оки обнаруживается тенденция к их уменьшению вниз по течению реки. Так, если на верхних участках р. Оки с побочными относительный их шаг составляет в среднем 8 ширин русла, то на нижних участках он часто равен 4 ширинам русла. В то же время абсолютные значения средних шагов побочной по бесприточным участкам нарастают в соответствии с увеличением среднегодовых расходов воды по длине реки. Это позволяет предположить, что ширина русла реки в данном случае возрастает по длине реки более интенсивно, чем увеличиваются расходы воды.

При типизации руслового процесса было обнаружено, что русла потоков, несущих большое количество донных наносов, обычно оказываются сильно распластанными. Именно такими сильно распластанными руслами отличаются участки с осередковым типом процесса, располагающиеся большей частью при выходе рек с гор на равнину и характерные большим количеством переносимых потоком донных наносов. Увеличение объема переносимых потоком донных наносов обнаруживается и на

нижних участках р. Оки с побочным типом процесса. Как указывалось, эти участки располагаются в спрямленном в ходе свободного меандрирования русле. На подобных участках создаются обычно благоприятные условия для увеличения объемов переносимых потоком донных наносов в связи с их интенсивным поступлением в спрямление при промывах и прорывах перешейков петель. Кроме того, в данном случае спрямление



привело к тому, что река оказалась в непосредственной близости от коренного склона долины и объем материала, поступающего в поток, мог значительно увеличиться (подмыв склонов, овражные выносы, оползни и т. п.).

Общий характер связи шагов побочной и расходов воды виден из рис. 14, на котором показана связь между средними значениями шага побочной и нормой годового стока.

Рис. 14. Связь шагов побочной р. Оки с нормой годового стока

Так как побочный тип процесса на р. Оке развивается на фоне извилистого русла, то представляется возможным оценить связь шагов побочной с извилистостью русла. Такая зависимость была обнаружена для шагов ленточных гряд и выявляется в данном случае. Она приведена на рис. 15, на котором показана связь между средними значениями относительного шага побочной и степенью выраженности излучин – отношением их длины к шагу, т. е. показателем  $S/\lambda_{изл}$ .

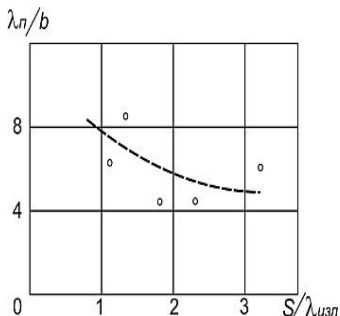


Рис. 15. Связь относительных шагов побочной на р. Оке со степенью выраженности излучин русла

Связь эта получилась очень ненадежной, но все же известная тенденция на ней прослеживается. Применить ее в данном случае нельзя, так как наименьший шаг побочной наблюдается на наиболее прямых участках и, следовательно, связан с

другими факторами, вероятнее всего с особенностями стока наносов.

### **Количественные характеристики ограниченного меандрирования**

#### **Общие сведения об участках**

Рассмотрим показатели ограниченного меандрирования сначала на примере р. Оки, по которой выше анализировались количественные характеристики ленточных гряд и побочней.

Ограниченное меандрирование на р. Оке, как указывалось, является основным фоном, на котором развивается перемещение ленточных гряд и побочней. Оно распространено преимущественно в пределах верхних участков р. Оки и обусловлено главным образом воздействием ограничивающих условий – наличием на этих участках еще не разработанной, относительно узкой долины, склоны которой препятствуют развитию плановых деформаций. Только один участок протяжением 100 км расположен в среднем течении, между с. Рубецкое и устьем р. Мокши, но и в этом случае ограниченное меандрирование обусловлено узостью долины.

Основные характеристики участков с ограниченным меандрированием приведены в табл. 5.

Табл.5 Основные характеристики участков р. Оки ограниченным меандрированием

Границы участков	Длина участка, км	Средний годовой расход воды, м <sup>3</sup> /с	Средний годовой расход взвешенных наносов, кг/с	Уклон свободной водной поверхности	Число измеренных побочней
р.Угра — р. Протва	126	296	46	0,00005	15
р.Протва — р. Москва	127	392	46	0,00007	8
с.Рубецкое–р. Мокша	100	720	35	0,00005	8

Типичный вид русла на каждом из этих участков показан на рис. 16. Случаи, когда извилистость русла обусловлена обтеканием меандр долины, т. е. имеет место вынужденный изгиб, в расчет не принимались.

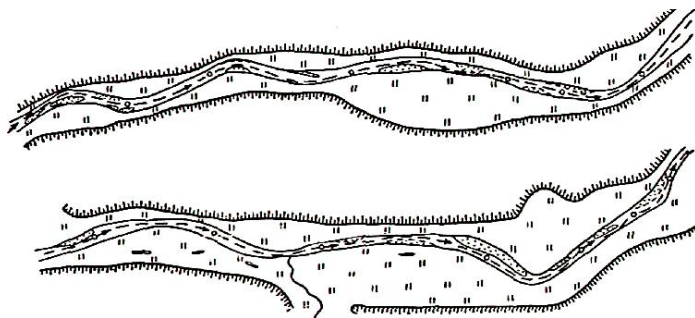
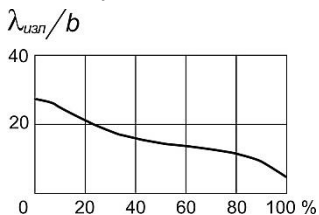


Рис. 16. Участки р. Оки с ограниченным меандрированием

### Распределение величин параметров излучин

Ввиду малого числа измерений проанализировать значения величин шагов излучин по каждому бесприточному участку не представляется возможным. Поэтому, так же как в случае с побочными на р. Оке, рассмотрим кривую обеспеченности относительных шагов излучин (рис. 17), для построения которой, как следует из таблицы 5, можно использовать 31 измерение.



Изменчивость относительного шага ограничено меандрирующих излучин р. Оки оценивается коэффициентом вариации 0,33.

Рис. 17. Кривая обеспеченности относительных шагов излучин р. Оки на участках с ограниченным меандрированием

В 50% случаев шаг ограничено меандрирующих излучин составил 14 ширин русла, в 25% – 18 и в 75% – 11 ширин русла; при крайних значениях – 6 и 25 ширин русла. Если шаги ленточных гряд и побочной были близки между собой и составляли в среднем соответственно 8 и 6 ширин русла, то шаг ограничено меандрирующих излучин р. Оки превышает их примерно в 2–3 раза.

Степень выраженности излучин можно охарактеризовать двумя показателями – отношением ширины пояса меандрирования к ширине русла  $B/b$  и показателем, принятым для свободного меандрирования, выражающим отношение длины излучины к ее шагу, т.е.  $S/\lambda_{изл}$ . На р. Оке показатель  $B/b$  оказался очень

близким по всем трем участкам ограниченного меандрирования и изменялся в пределах 2,5–3,2.

Кривая обеспеченности параметра  $S/\lambda_{изл}$ , приведенная на рис. 18, также показывает большую устойчивость формы ограниченно меандрирующих излучин по длине рассматриваемых участков и слабую выраженность подобных излучин р. Оки.

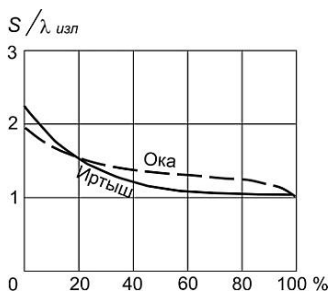


Рис. 18. Кривая обеспеченности степени выраженности ограниченно меандрирующих излучин рек Оки и Иртыша

Величина  $S/\lambda_{изл}$  колеблется в пределах 1,2–2,0. Среднее значение  $S/\lambda_{изл}=1,4$ . Для ограниченно меандрирующих излучин р. Оки были определены углы их входа и выхода, т. е. измерители, рекомендуемые для свободного меандрирования. Сопоставление этих углов позволило определить асимметричность излучин. Для всех участков ограниченного меандрирования, обнаруженных на р. Оке, средние значения углов входа и выхода по бесприточным участкам оказались очень близки, т. е. формы излучин оказались симметричными.

На самом верхнем участке, р. Угра–р. Протва, углы входа и выхода соответственно равны 50 и 49°, на следующем участке, р. Протва–р. Москва, 43 и 39° и на нижнем участке, с. Рубецкое–р. Мокша, 54 и 58°.

Кроме р. Оки, параметры ограниченного меандрирования были определены по двум смежным участкам р. Иртыша, а именно между устьями рек Курчум и Нарым и между впадениями рек Нарыма и Бухтармы. На первом участке ограниченное меандрирование встречается в сужении долины, перемежаясь с участками свободного меандрирования, приуроченными к ее расширениям. Основные характеристики участков видны из табл. 6. Так же как и для р. Оки, вынужденные изгибы русла в расчет не принимались.

Как видно из рисунка 19, так же как на р. Оке, шаги всех 44-х измеренных на Иртыше излучин мало отличаются друг от друга. При крайних значениях 1,6 и 5,2 км в 50% случаев шаг излучин составил 2,4 км, в 25% – 3 км и в 75% – 2,2 км.

Таблица 6. Основные характеристики участков р. Иртыша с ограниченным меандрированием

Границы участков	Длина участка, км	Средний годовой расход воды, м <sup>3</sup> /с	Средний годовой расход взвешенных наносов, кг/с	Уклон свободной водной поверхности	Число измененных побочней
р.Курчум–р.Нарым	126	372	(5,5)	0,021	19
р.Нарым–р.Бухтарма	90	380	-	0,038	25

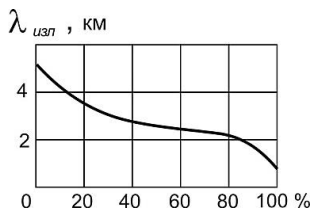
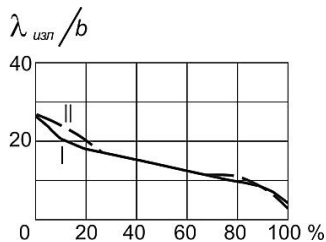


Рис. 19. Кривая обеспеченности шагов ограниченно меандрирующих излучин Иртыша



Кривая обеспеченности относительных шагов излучин р. Иртыша дана на рис. 20. По своему ходу она совпадает с подобной же кривой, построенной для р. Оки. Изменчивость относительных шагов излучин р. Иртыша оказалась такой же, как на р. Оке,  $C_{V_{\lambda_{изл}/b}} = 0,33$ .

Рис. 20. Кривая обеспеченности относительных шагов ограниченно меандрирующих излучин Иртыша

В 50% всех случаев шаг излучин р. Иртыша составляет 13 ширин русла, в 25% случаев – 17 и в 75% случаев – 10 ширин русла, при крайних значениях 7 и 25 ширин русла. Сравнение со значениями относительного шага излучин р. Оки приводит к выводу о том, что относительный шаг излучин на р. Иртыше примерно такой же, как на р. Оке.

Степень выраженности ограниченно меандрирующих излучин р. Иртыша (показатель  $S/\lambda_{изл.}$ ) очень близка к наблюдающейся на р. Оке (рис. 18). Для участка р. Оки между с. Рубецкое и р. Мокша имелась возможность сопоставить съемки русла р. Оки, выполненные в 1879, 1926 и 1946 гг., и оценить



изменение параметров ограниченного меандрирования во времени.

Так как на этом участке имеется всего 8 ограниченно меандрирующих излучин, для характеристики изменения их параметров каких-либо общих сведений и закономерностей на основе этого материала выявить нельзя и можно только проанализировать ход деформаций отдельных излучин.

Величины основных параметров ограниченного меандрирования по состоянию на указанные выше годы приведены в табл. 7.

Как видно из этой таблицы, значения всех относительных показателей излучин отличаются исключительным постоянством за весь период с 1879 по 1946 г., что еще раз подтверждает положение о том, что при ограниченном меандрировании излучины сползают, не меняя практически своих плановых очертаний.

Абсолютные значения шагов излучин и их длины также довольно устойчивы, а небольшие изменения их величин во времени закономерны, что свидетельствует о достаточной надежности выполненных измерений, осуществленных по съемкам разного масштаба и качества (лоцманские карты и аэрофотоснимки).

Наибольшие изменения происходили в средней по длине излучин ширине русла, но и этот показатель изменялся во времени довольно закономерно, поскольку относительные измерители оставались достаточно устойчивыми.

Эти небольшие переформирования плановых очертаний ограниченно меандрирующих излучин в данном случае следует, по-видимому, связать, прежде всего, с тем, что на этих же участках одновременно развивался другой тип процесса – побочный, т. е. перемещение в русле относительно крупных скоплений наносов, особенно развитый на излучинах № 5-8, подвергавшихся наибольшим изменениям.

В ходе сползания побочной было возможно периодическое изменение ширины русла и некоторых других параметров излучин. Можно также отметить, что излучина № 8, отличающаяся относительно большими изменениями своих параметров, находится на переходном к свободному меандрированию участке р. Оки. Об этом, кроме всего прочего, свидетельствует хорошая выраженность этой излучины ( $S/\lambda_{изл}=1,5$ ).

Табл. 7. Параметры ограниченного меандрирования на участке р. Оки с. Рубецкое – р. Мокша

№ излучины	Ширина русла $b$ , м			Шаг излучины $\lambda$ , км			Длина излучины $S$ , км			$l_{изл}/b$			$S/\lambda_{цел}$			$\alpha_{вх}$			$\alpha_{вых}$					
	1879 г.	1926 г.	1946 г.	1879 г.	1926 г.	1946 г.	1879 г.	1926 г.	1946 г.	1879 г.	1926 г.	1946 г.	1879 г.	1926 г.	1946 г.	1879 г.	1926 г.	1946 г.	1879 г.	1926 г.	1946 г.			
1	275	300	285	2,1	2,1	2,1	2,2	2,2	2,2	7,7	7,0	7,4	1,02	1,02	1,02	15	15	15	35	35	35	82	82	82
2	-	-	-	2,95	2,95	2,95	3,7	3,7	3,7	-	-	-	1,25	1,25	1,25	78	78	78	82	82	82	82	82	82
3	370	370	370	2,4	2,4	2,4	2,8	2,8	2,8	6,5	6,5	6,5	1,16	1,16	1,16	55	55	55	35	35	35	35	35	35
4	385	410	480	2,1	2,1	2,0	2,2	2,25	2,1	5,5	5,1	4,2	1,02	1,08	1,02	45	45	45	22	25	25	30	30	30
5	390	520	430	2,8	2,7	2,4	3,2	3,1	2,6	7,2	5,2	5,6	1,12	1,3	1,08	35	25	25	50	55	55	50	50	50
6	400	380	367	2,0	1,95	2,25	2,1	2,1	2,3	5,0	5,1	6,1	1,02	1,08	1,01	30	35	35	25	35	35	20	20	20
7	395	335	355	2,37	2,37	2,3	2,5	2,5	2,4	6,0	7,1	6,5	1,03	1,09	1,02	20	20	20	25	35	35	25	25	25
8	355	305	442	1,6	1,95	1,95	2,4	2,9	2,9	4,5	6,4	4,4	1,5	1,5	1,2	50	52	48	75	80	80	80	80	80

### ***Количественные характеристики свободного и незавершенного меандрирования***

Поскольку схема деформаций русла при свободном и незавершенном меандрировании длительное время сохраняется одинаковой и расходится только в конечных стадиях их развития, целесообразно рассмотреть количественные характеристики этих типов процесса совместно. Это дает возможность наиболее ярко показать и расхождения в ходе деформаций, возникающие на поздних стадиях их развития.

#### ***Шаг излучин***

Шаг излучин в условиях свободного меандрирования является величиной менее устойчивой, чем при ограниченном и незавершенном меандрировании, поскольку процесс этот развивается более сложно и влияние отчленения петель русла на смежные участки, а также возможные случаи объединения смежных петель в общую или раздвоение петель русла, иногда наблюдающиеся в ходе этого процесса, могут вносить значительные искажения в величины шагов. Однако, поскольку развитие излучин происходит путем разворота S-образных участков русла вокруг фиксированной в пространстве точки, располагающейся в центре этой фигуры, т. е. на перегибе русла в плане, и процесс меандрирования совершается обычно длительное время, можно рассчитывать, что шаг излучин все же представляет собой достаточно устойчивую во времени характеристику, дающую возможность установления связей с определяющими факторами, прежде всего с характеристиками водного режима.

На рис. 21 приведены кривые обеспеченности шагов излучин для 5-ти бесприточных свободно меандрирующих участков рек Оки и Иртыша в диапазоне среднегодовых расходов воды от 260 до 880 м<sup>3</sup>/с (р. Иртыш), а также для 4-х бесприточных участков (р. Иртыш, с. Батинская–с. Песчаная и р. Обь между Усть-Чарышской пристанью и устьем р. Чулым), характерных развитием в их пределах незавершенного меандрирования. Диапазон изменения среднегодовых расходов – от 372 до 3000 м<sup>3</sup>/с.

Подробные данные по всем этим участкам помещены в таблицах 8 и 9. Кроме того, были получены данные о нескольких свободно меандрирующих излучинах р. Оби на участке р. Чулым □с. Колпашево со среднегодовым расходом воды 4720 м<sup>3</sup>/с.

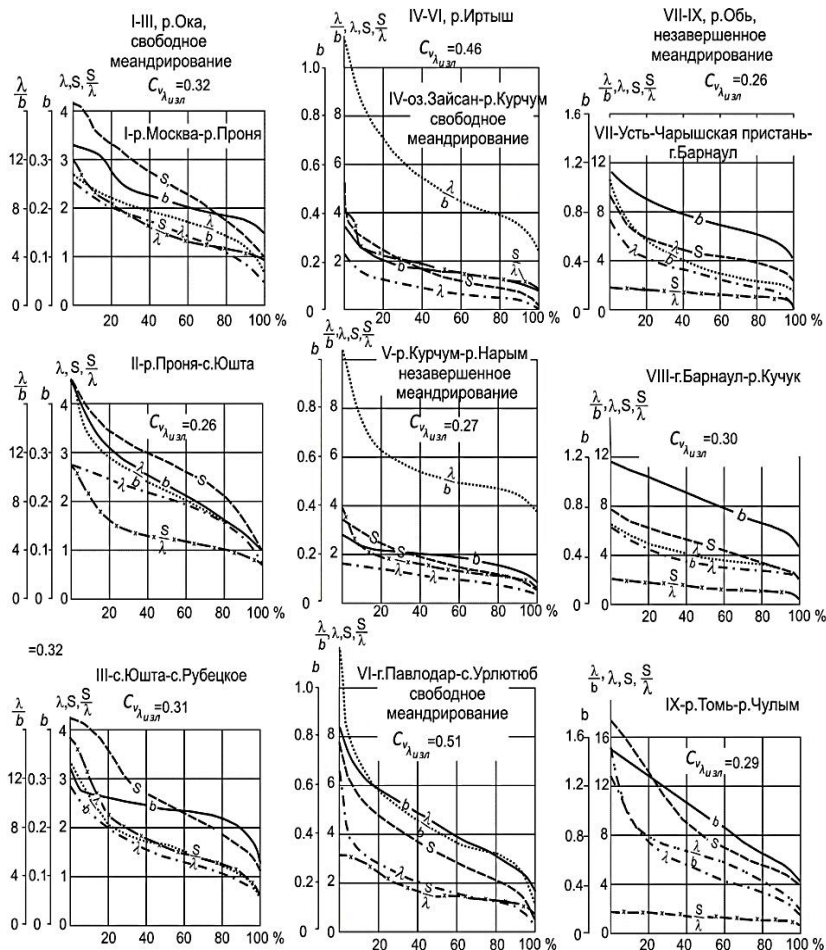


Рис. 21. Кривые обеспеченности параметров свободного и незавершенного меандрирования на бесприточных участках рек

Табл. 8. Основные морфометрические и гидрологические данные об участках со свободным и незавершенным меандрированием

№ п/п	Река	Участок	Длина участка, км	Средний уклон на участке, ‰	Амплитуда колебания уровней, м	Средний годовой расход воды, м <sup>3</sup> /с	Средний годовой расход взвешенных наносов, кг/с	Средний наибольший расход, м <sup>3</sup> /с	Продолжительность половодья, месяцы	Высота берегов над ср. макс. уровнем, м	Ширины поймы, км	Глубина затопления поймы, м
1	Ока	р.Москва-р.Проня	235	0,35	8	480	36	7150	2,5-3	5-7	10	1-4
2	Ока	р.Проня-с.Юшга	64	0,02	7-7,5	595	35	7400	2,5	4-6	16	1,5-3
3	Ока	с.Юшга-с.Рубецкое	100	0,03	7,5-8,5	625	35	7550	2,5	4,3-1,5	9	4-6
4	Иртыш	оз.Зайсан-р.Курчум	114	0,011	1,5-1,8	260	-	(400)	4-5	0,5-1,5	2-4	0,3-0,5
5	Иртыш	с.Батинская-с.Песчаная	126	0,68	1,8	372	-	(600)	4-5	1-2	2-5	1-2
6	Иртыш	г.Павлодар-г.Урлютоб	360	0,058	4,24	880	120	3420	4	1-1,4	9,0	3,5-1,5
7	Обь	прист.Усть-Чарышская-г.Барнаул	122	0,11	4,6-7,2	1330	240	5240	7	2-2,5	7-8	2,5-1
8	Обь	г.Барнаул-р.Кучук	125	0,08	6,3-7,2	1520	520	6340	7	3-3,7	15-27	0,5
9	Обь	р.Томь-р.Чулым	130	0,03	9,6	3000	350	29800	7	2-5	10-12	3,5

Табл. 9а. Основные показатели свободного и незавершенного меандрирования

№ п/п	акер	котсачУ	Тип меандрирования	λ, км				Cvλ <sub>изл</sub>	S, км					
				макс.	мин.	25	50		75	макс.	мин.	25	50	75
1	Ока	р.Москва-р.Проня	Свободное	2,5	0,9	2,0	1,6	1,2	0,313	4,1	1,3	3,2	2,5	1,9
2	Ока	р.Проня-с.Юшга	Свободное	2,5	0,75	2,35	2,0	1,6	0,255	4,5	1,10	3,25	2,75	2,25
3	Ока	с.Юшга-с.Рубецкое	Свободное	2,8	0,9	1,9	1,4	1,15	0,320	4,2	1,4	3,3	2,5	2,0
4	Иртыш	оз.Зайсан-р.Курчум	Свободное	2,4	0,45	1,2	0,8	0,65	0,463	5,0	0,5	2,2	1,4	1,1
5	Иртыш	с.Батинская-с.Песчаная	Незаверш.	1,62	0,75	1,4	1,1	0,9	0,27	3,55	0,88	2,4	1,7	1,3
6	Иртыш	г.Павлодар-г.Урлюгоб	Свободное	6,8	0,65	2,7	1,9	1,4	0,508	8,0	1,5	4,6	3,3	2,4
7	Обь	прист.Усть-Чарышская-г.Барнаул	Незаверш.	7,5	1,8	4,3	3,2	2,2	0,303	10,0	3,25	5,8	5,0	4,2
8	Обь	г.Барнаул-р.Кучук	Незаверш.	6,4	2,2	4,2	3,1	2,6	0,292	7,5	2,65	6,0	4,8	3,4
9	Обь	р.Томь-р.Чулым	Незаверш.	13,3	3,3	7,0	5,0	3,5	0,26	17,4	4,2	12,0	8,0	6,0

Табл. 96

№ п/п	акер	котсачУ	Тип меандрирования	b км				λ/b				S/λ						
				макс. мин.	25	50	75	макс. мин.	25	50	75	макс. мин.	25	50	75			
1	Ока	р.Москва-р.Проня	Свободное	0,32	0,175	0,25	0,21	0,9	10,5	2,9	8,3	7,5	6,3	3,00	1,17	2,0	1,5	1,25
2	Ока	р.Проня-с.Юшта	Свободное	0,45	0,125	0,29	0,23	0,17	19,0	5,34	11,0	8,6	6,5	2,64	1,04	1,4	1,25	1,0
3	Ока	с.Юшта-с.Рубецкое	Свободное	0,325	0,160	0,26	0,24	0,22	13,2	3,6	7,6	6,6	5,2	3,8	1,1	2,1	1,6	1,3
4	Иртыш	оз.Зайсан-р.Курчум	Свободное	0,352	0,116	0,20	0,17	0,14	10,6	2,67	0,65	0,50	0,41	4,0	1,1	2,2	1,7	1,4
5	Иртыш	с.Багинская-с.Песчаная	Незаверш.	0,285	0,140	2,2	2,1	1,8	10,3	4,25	6,0	5,2	4,8	3,95	1,12	2,0	1,6	1,3
6	Иртыш	г.Павлодар-г.Урлютоб	Свободное	0,85	0,25	0,57	0,44	0,34	11,5	1,87	5,4	4,2	3,4	3,17	1,11	2,2	1,6	1,4
7	Обь	прист.Усть-Чарыльская-г.Барнаул	Незаверш.	1,18	0,52	0,88	0,76	0,66	10,9	2,14	5,4	3,7	2,6	2,3	1,17	2,0	1,6	1,4
8	Обь	г.Барнаул-р.Кучук	Незаверш.	1,15	0,55	1,0	0,84	0,70	6,09	2,82	4,8	4,0	3,4	2,0	1,11	1,7	1,4	1,0
9	Обь	р.Томь-р.Чулым	Незаверш.	1,52	0,52	1,2	0,94	0,72	15,5	3,2	7,6	6,4	4,8	1,93	1,24	1,8	1,6	1,4

Табл 9в

№ п/п	акер	котсачУ	Тип меандрированя	α <sup>0</sup> вх				α <sup>0</sup> вых				α <sup>0</sup> сум							
				макс. мин.	25	50	75	макс. мин.	25	50	75	макс. мин.	25	50	75				
1	Ока	р.Москва-р.Проня	Свободное	142	32	80	68	56	56	117	40	80	68	56	233	77	165	136	108
2	Ока	р.Проня-с.Юшта	Свободное	120	20	64	43	32	105	30	74	46	34	181	50	145	92	70	
3	Ока	с.Юшта-с.Рубецкое	Свободное	145	32	70	55	42	170	25	80	64	50	225	57	150	120	100	
4	Иртыш	оз.Зайсан-р.Курчум	Свободное	150	20	102	80	56	115	20	90	70	46	240	43	186	150	110	
5	Иртыш	с.Багинская-с.Песчаная	Незаверш.	135	45	86	66	53	123	30	75	62	46	245	78	157	130	100	
6	Иртыш	г.Павлодар-г.Урлютоб	Свободное	175	40	95	80	60	118	40	87	72	60	225	73	180	153	126	
7	Обь	прист.Усть-Чарытская-г.Барнаул	Незаверш.	110	55	106	74	62	100	25	70	64	50	190	105	158	143	126	
8	Обь	г.Барнаул-р.Кучук	Незаверш.	102	30	73	54	38	108	38	70	56	42	182	80	136	118	93	
9	Обь	р.Томь-р.Чулым	Незаверш.	105	40	94	75	54	110	43	78	57	48	195	100	160	130	106	



Как видно из рисунка 21 и таблицы 9, шаги излучин на свободно меандрирующих участках меняются по длине этих бесприточных участков более значительно, чем на бесприточных участках с незавершенным меандрированием. Действительно, на свободно меандрирующих участках, например, р. Иртыша, коэффициент вариации шагов излучин оказался равным 0,46 (оз. Зайсан–р. Курчум) и 0,51 (г. Павлодар–г. Урлютюб), а на участке незавершенного меандрирования – только 0,27.

На всех трех участках незавершенного меандрирования на р. Оби  $C_{V_{\lambda_{изл}}}$  составил 0,26, 0,30 и 0,29. На р. Оке при наличии свободного меандрирования  $C_{V_{\lambda_{изл}}}$  оказался таким же, как на участках с незавершенным меандрированием, составив 0,32, 0,26 и 0,21. Связано это с тем, что в пределах каждого из этих участков наблюдается примерно одинаковая стадия развития свободного меандрирования.

Можно отметить, что при свободном меандрировании на данном бесприточном участке шаги излучин меняются в 3–4 раза (рис. 21), в то время как при незавершенном меандрировании они разнятся примерно только в 2 раза. При свободном меандрировании очень большие значения шагов излучин по сравнению с шагами 50%-ной обеспеченности имеют место в 10–18% всех случаев (резкий перелом в верхней части кривых), а очень малые шаги (перелом кривых в нижней их части) встречаются в 1–4% всех случаев. Весьма невелика разница в шагах излучин 25, 50 и 75%-ной обеспеченности (табл. 9). Все это показывает, что на бесприточных участках случаи, когда в их пределах распространена примерно одна и та же стадия меандрирования, по-видимому, достаточно часты. Это же обстоятельство позволяет предположить, что в конечной стадии свободного меандрирования прорыв или промыв какой-либо особенно хорошо выраженной петли влечет за собой подобные же явления на следующих, также хорошо выраженных петлях.

Малое число случаев очень малых значений шагов излучин (1–4% очень узких перешейков петель) и в то же время большое число отчлененных петель с широким перешейком дает основание предположить, что и в случае свободного меан-

дрирования отчленение петель происходит в основном не путем прорыва их перешейка, а в результате его промыва с поверхности в период затопления поймы.

Таковы первые выводы, которые можно сделать на основе анализа шагов свободно меандрирующих излучин. Их можно существенно развить при анализе других измерителей этого процесса. Однако вначале рассмотрим вопрос о связи шагов излучин с водностью реки.

### *Связь шагов излучин с водностью реки*

Исследования зависимости шагов излучин от расхода воды в реке, выполненные преимущественно зарубежными исследователями, например, Инглисом (1949), Леопольдом и Вольманом (1957), Дьюри (1960), привели к согласованному выводу о том, что

$$\lambda = aQ^m \quad (\text{Инглис, 1949}).$$

Инглис принимает значение  $a=3,6$  и  $m=0,5$  при  $a$ , выраженном в футах, и  $Q$  – в фут<sup>3</sup>/с.

Леопольд и Вольман замечают, что графики  $\lambda = aQ^m$  дают менее тесную связь, чем графики, изображающие функцию  $\lambda = ab^n$ , где  $b$  – ширина русла. Они полагают, что это происходит вследствие того, что ширина реки  $b$  является параметром русла, наиболее чутко реагирующим на изменения расходов воды. На основе измерений на реках (преимущественно протекающих по территории США), а также по лабораторным данным они получают следующее аналитическое выражение связи шагов излучин с шириной русла:

$$\lambda = 6,5b^{1,1}, \text{ фут.}$$

Дьюри делает попытку построения связи шага излучин с площадями водосбора (рис. 22). Он считает, что эта связь достаточно надежна как для очень малых водосборов, так и для больших. Отклонения дают только данные по рекам с особыми условиями стока, например с водосборы, на которых границы водоразделов почти совпадают с границами контуров долин, с обильным грунтовым питанием или оттоком подземных вод и т. п. При построении этой связи Дьюри использовал значительный материал по малым и большим рекам, в том числе рекам США, Англии, Дону, Днестру, Маасу и Мозелю.

Следует отметить, что в перечисленных работах ширина русла вычислялась соответствующей «руслообразующему» расходу, в качестве которого принимался расход воды, соответствующий отметкам выхода воды на пойму. Шаг излучин определялся как расстояние между точками перегиба

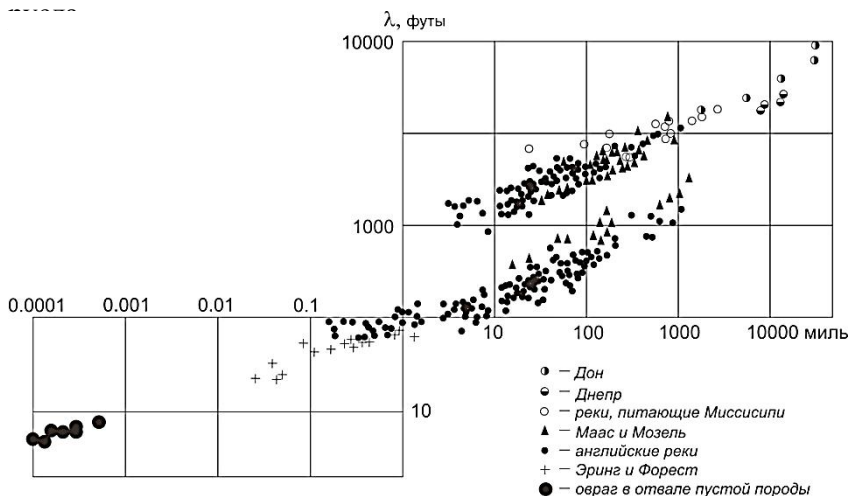
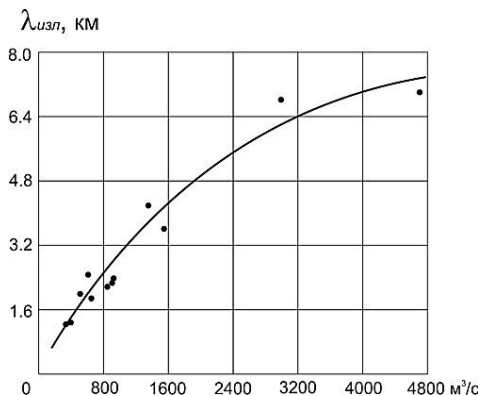


Рис. 22. Зависимость между шагом излучин и площадью водосбора для некоторых рек Европы и Северной Америки (по Дьюри)

При этом использовались данные только об отдельных излучинах на разных реках США, Индии и данные лотковых измерений, по которым определялись шаги не излучин, а побочней, причем обнаружилось, что они ложатся на ту же кривую связи  $\lambda_{изл} = f(b)$ , что и шаги излучин.

Каковы излучины, принятые для построения этих связей, неизвестно и нет уверенности, что все они принадлежат к свободно меандрирующим. По рекам Оке, Иртышу и Оби (табл. 9) измерения излучин производились не выборочно, а для всех свободно меандрирующих излучин в пределах данного бесприточного участка.

Расходы воды получены по данным гидрометрических створов с длительными рядами наблюдений, позволяющим вычислить норму стока. Ширина русла определялась между бровками меженных берегов. Кроме данных по 9 участкам с большим числом излучин, использовались также данные по не-



от 1,2 до 7 км.

Рис. 23. Связь средних шагов свободно меандрирующих излучин со среднегодовыми расходами воды

На рис. 24 показана связь шагов свободно меандрирующих излучин и излучин, развивающихся по схеме незавершенного меандрирования, со средней шириной русла в пределах данной излучины, построенная по всем точкам измерений, положенных в основу составления табл. 9. Точки, соответствующие свободно меандрирующим излучинам и излучинам с незавершенным меандрированием, в общем, располагаются довольно согласно. Можно только отметить, что шаги излучин с незавершенным меандрированием имеют тенденцию отклоняться влево от кривой.

На этом же графике для сопоставления показана и кривая  $\lambda_{изл} = f(b)$  полученная Леопольдом и Вольманом. Она располагается значительно левее кривой, построенной по данным табл. 9.

Так как в обоих случаях в расчет принималась не ширина реки, а ширина русла, то причины указанного расхождения в положениях кривых Леопольда и Вольмана и нашей, по-видимому, следует искать в принятых значениях шагов излучин. Способ определения шагов был одинаковым. Разница в подходе к их определению заключалась в том, что наши измерения производились только для свободно меандрирующих излучин и излучин с незавершенным меандрированием. Леопольдом же и Вольманом, по-видимому, использовались данные по любым поворотам рус-

большим группам смежных излучин, занимающим небольшие по протяжению участки рек Оки и Оби.

Зависимость средних по бесприточным участкам значений шагов излучин со среднегодовыми расходами воды показана на рис. 23. Она охватывает диапазон расходов от 316 до 4720 м³/с и средние значения шагов гряд

ла, в том числе и вынужденным, т. е. вызванным обтеканием потоком меандр долины.

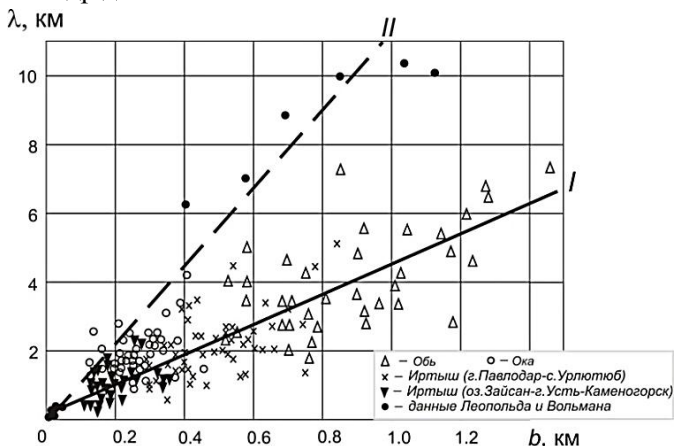


Рис. 24. Связь шагов свободно меандрирующих излучин со средней шириной русла в пределах данной излучины

В этом случае излучины не являются результатом плановых деформаций русла, а образуются вследствие обтекания потоком крупных, ранее созданных потоком большей водоносности меандр долины, т. е. дают отклонение кривой влево.

В частности, это предположение в известной мере подтверждается приводимой Леопольдом и Вольманом схемой типично меандрирующей реки (участок р. Попо-Эйджи близ Гудзона). Как видно из схемы (рис. 25), этот участок не только ограниченно меандрирует (он ограничен близко подходящими к реке террасами), но характерен также явлениями вынужденного обтекания и одновременно спрямлениями русла (незавершенным меандрированием).

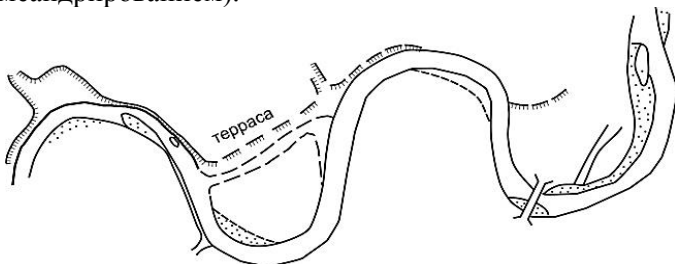
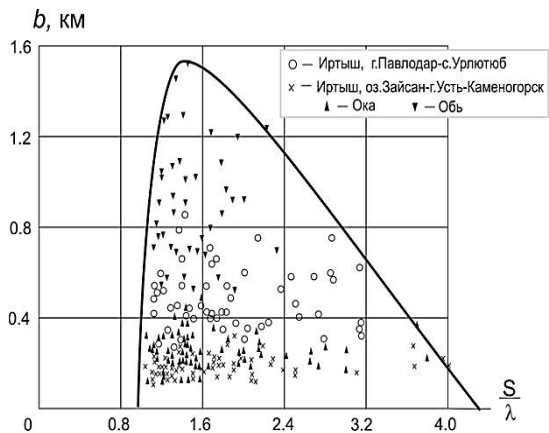


Рис. 25. Пример излучин, использованных Леопольдом и Вольманом для построения связи шагов излучин с руслоформирующими расходами и шириной русла

Можно также отметить, что к кривой  $\lambda_{изл}=f(b)$ , построенной Леопольдом и Вольманом, тяготеют точки кривой, построенной по отечественным данным, относящиеся к излучинам с незавершенным меандрированием, которые, как указывалось, имеют тенденцию отклоняться влево от нашей кривой вследствие завышения в этих случаях значений шагов излучин и уменьшения ширины главного русла в результате появления проток.

При анализе кривой  $\lambda_{изл}=f(b)$  существенно оценить, не меняется ли ширина русла в зависимости от стадий развития излучин. С этой целью была построена связь ширины русла между бровками меженных берегов с параметром, характеризующим выраженность излучины, а именно с отношением длины излучины к ее шагу. Как следует из рис. 26, связь между этими величинами не прослеживается. Однако можно отметить, что с увеличением отношения



с увеличением отношения  $S/\lambda_{изл}$ , т. е. с увеличением выраженности излучин, значения ширины русла приобретают большее постоянство, чем при малых отношениях  $S/\lambda_{изл}$ , т. е. при слабовыраженных излучинах. Таким образом, утверждение Леопольда и Вольмана о том, что с разви-

тием излучин ширина русла остается относительно устойчивой, не находит себе подтверждения.

Рис. 26. Связь между степенью выраженности излучин и шириной русла

Значительная вариация ширин русла при слабо выраженных излучинах может быть объяснена тем, что в этих условиях

на реках наиболее вероятно одновременное развитие руслового процесса другого типа, в частности, побочного, как это имело место на р. Оке, на участке спрямленного в ходе свободного меандрирования русла, а иногда и руслового процесса осередкового типа, как это наблюдается довольно часто на р. Оби.

Действительно, хорошая связь между шагом излучин и шириной русла, т. е. возможность замены в связи морфометрических показателей русла с крупностью рек расхода воды шириной русла, должна существовать только в условиях одного типа руслового процесса. Это обусловлено тем, что ширина русла зависит не только от водоносности реки, но и от объема твердого материала, который должен переносить поток и который обусловлен гидролого-геологическими условиями питающего его водосбора. Можно ожидать, что при равных расходах воды поток, который должен транспортировать большой объем донных наносов, будет иметь более распластанное и широкое русло, чем река, в которую поступает меньшее количество этих наносов. Именно поэтому осередковый тип руслового процесса, характерный широким и распластанным руслом, обычно оказывается приуроченным к участкам выхода реки из гор на равнину, т. е. участкам с резким выполаживанием продольного профиля реки и в связи с этим с резким увеличением объема донных наносов, которые должен транспортировать поток. Таким образом, кривой  $\lambda_{изл} = f(b)$  надо пользоваться осторожно и обязательно на основе тщательного гидролого-морфологического анализа.

### **Углы разворота и показатель развитости излучин**

Показатель  $S/\lambda_{изл}$ , выражающий степень развитости излучин, не позволяет судить о степени их плановой асимметрии — явлении, весьма распространенном при свободном меандрировании. Поэтому, кроме этого общего показателя, рекомендуется также использовать возможность определения угловых характеристик плановых деформаций излучин.

Можно различать, как указывалось, угол входа  $\alpha_{вх}$ , угол выхода  $\alpha_{вых}$ , а также угол разворота излучины  $\alpha$ . Сопоставление углов входа и выхода позволяет анализировать степень асимметрии излучин. С помощью угловых характеристик удобно вычислять скорость плановых деформаций излучин, относя разности углов, определяемые при сопоставлении съемок раз-

ных лет, к продолжительности периодов между этими съемками, т. е. определяя величины

$$\Delta\alpha/\Delta t, \quad \Delta\alpha_{\text{вх}}/\Delta t, \quad \Delta\alpha_{\text{вых}}/\Delta t.$$

Так как процесс развития свободного меандрирования характерен стадийностью, причем прорывы и промывы петель обычно ведут к нарушению хода развития смежных излучин (ускорение, замедление их развития, изменения направления деформаций), то на участках свободного меандрирования правомерно ожидать самых различных значений углов  $\alpha$ . Поскольку обнаруживается, что в ходе своего развития петли обычно приобретают асимметричность очертаний, то и углы входа и выхода также должны отличаться значительным разнообразием. Эти положения можно наглядно проследить на основе кривых обеспеченности углов входа  $\alpha_{\text{вх}}$  и выхода  $\alpha_{\text{вых}}$ .



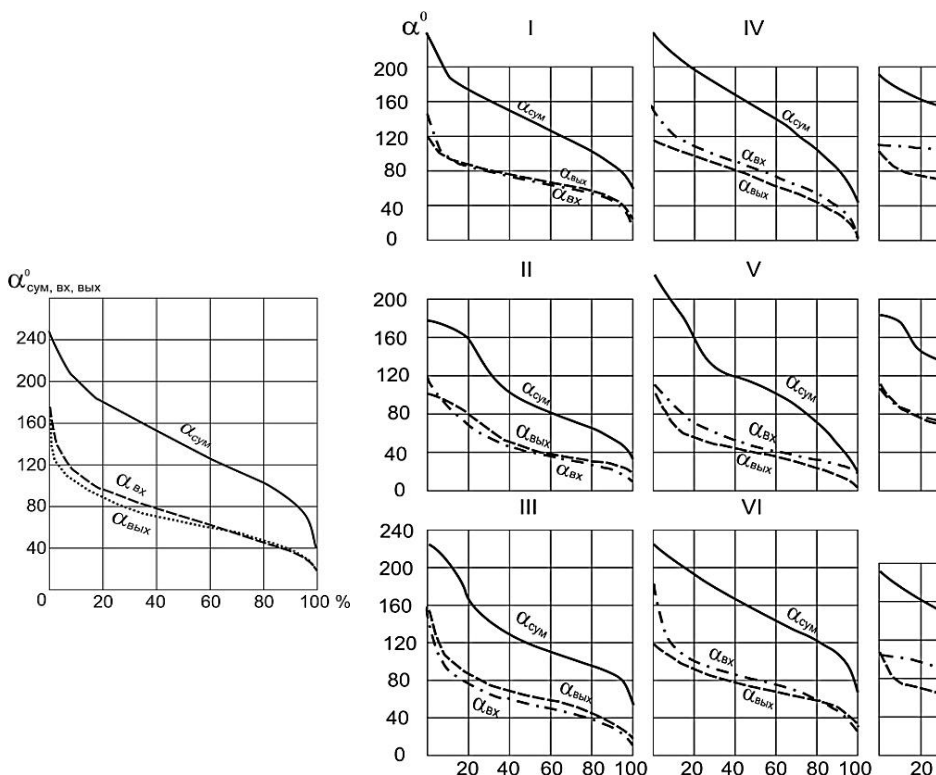


Рис. 27. Кривые обеспеченности углов разворота, входа и выхода свободно меандрирующих излучин рек Оки, Иртыша и Оби. I–IX – номера участков, соответствующие номерам по порядку в табл. 9

Кривые обеспеченности углов разворота излучин (рис. 27) были построены по всем бесприточным участкам со свободным меандрированием, которые использовались для анализа других показателей этого типа процесса (табл. 9).

Рассмотрим вначале общие характеристики углов разворота излучин. Как и предполагалось, кривые обеспеченности углов разворота излучин показывают значительное разнообразие величин этих углов. Это связано, прежде всего, с тем, что излучины, по которым производились измерения углов разворота, находились в разных стадиях развития.

В 50% всех случаев углы разворота излучин составили  $130^\circ$  при крайних значениях от  $0$  до  $245^\circ$ . В 25% случаев углы разворота превышают  $172^\circ$ , в 75% они меньше  $110^\circ$  (рис. 28).

Рис. 28. Обобщенные по рекам Оке, Иртышу и Оби кривые обеспеченности углов разворота, входа и выхода свободно меандрирующих излучин

На рис. 29 показана связь углов разворота со степенью выраженности излучин, т. е. с отношением  $S/\lambda_{изл}$ . Теснота связи углов  $\alpha$  и параметра  $S/\lambda_{изл}$  по мере возрастания степени выраженности излучин ухудшается.

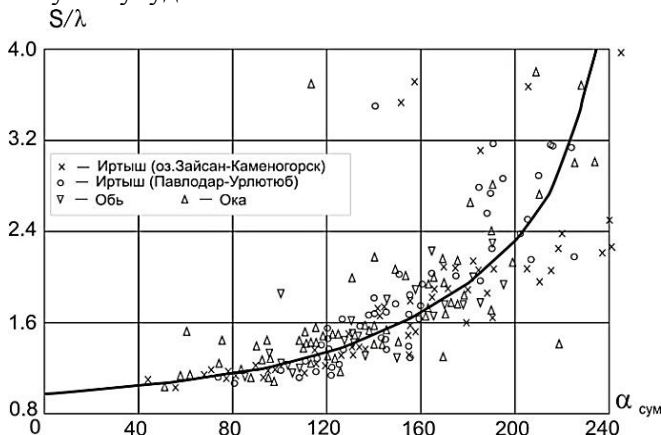


Рис. 29. Связь между углом разворота свободно меандрирующих излучин ( $\alpha$ ) и степенью их выраженности

Особенно большой разброс точек отмечается при углах больше  $180^\circ$  и отношении  $S/\lambda_{изл}$  больше 2, т. е. при переходе излучин к состоянию петли, когда углы входа и выхода начинают превышать  $90^\circ$ . В этих условиях удлинение русла с развитием извилистости происходит интенсивнее, чем увеличение углов, т. е. излучины начинают сильно вытягиваться, принимая нередко пальцеобразные очертания. В пределе может быть и такой случай, когда углы приобретают постоянное значение, а длина излучин ( $S$ ) сильно увеличивается.

Сопоставление кривых обеспеченности углов входа и выхода свободно меандрирующих излучин, обобщенных по всем рекам (рис. 28), показывает, что на исследованных реках при углах, меньших  $60^\circ$  (40% всех случаев), существенного разли-

чия в углах входа и выхода не обнаруживается, т. е. излучины оказываются симметричными. При значениях углов более  $60^\circ$  (60% случаев) углы входа оказались несколько большими, чем углы выхода, причем эта разница особенно значительна при углах больше  $300^\circ$  (разница более  $15^\circ$ ), а при углах порядка  $120^\circ$  доходит даже до  $30^\circ$ .

Наибольшие значения углов входа оказались равными  $175^\circ$ , выхода –  $170^\circ$ . Таким образом, полученные данные о значениях углов входа и выхода позволяют утверждать, что на исследованных реках асимметрия излучин появляется после достижения ими определенных стадий развития и увеличивается по мере дальнейшего развития и достижения ими состояния петли, т. е. конечной стадии развития.

Соотношения углов входа и выхода по отдельным бесприточным участкам исследуемых рек выглядят сложнее. Превышение углов входа над углами выхода отмечается на 5 участках из 9, причем это имеет место и при свободном, и при незавершенном меандрировании.

На свободно меандрирующем участке р.Оки между впадением ее притоков Москвы и Прони и на участке р.Оби между г. Барнаулом и впадением р. Чулым, на котором распространено незавершенное меандрирование, наблюдается совпадение величин углов входа и выхода. На двух других свободно меандрирующих участках р.Оки имеет место превышение углов выхода над углами входа, т. е. картина, обратная той, которую обнаруживает обобщенная кривая обеспеченности этих показателей. Эти отклонения от соотношений, выявленных обобщенными кривыми обеспеченности, по-видимому, связаны со стадиями развития излучин, распространенными на исследуемых участках, и характером чередования излучин с разной степенью развитости.

Как указывалось, в начальной стадии развития свободно меандрирующих излучин правомерно ожидать равенства углов входа и выхода, а в более поздних стадиях – его нарушения. При незавершенном меандрировании равенство углов входа и выхода может наблюдаться в тех случаях, когда спрямление излучин происходит в начальных стадиях их развития. Если же спрямления развиваются на поздних стадиях, соотношения величин углов входа и выхода могут быть разнообразными. Если в пределах исследуемого участка имеются излучины в разных стадиях развития или, что бывает достаточно часто, короткие участки сво-

бодного и незавершенного меандрирования чередуются, при обработке массового материала можно получить самые различные соотношения величин рассматриваемых углов.

Поэтому обнаруживаемое при сопоставлении обобщенных кривых обеспеченности превышение углов входа над углами выхода представляет собой лишь часто встречающийся случай и не является законом. На рассматриваемых участках рек Оки, Иртыша и Оби случаи совпадения углов входа и выхода наблюдаются при относительно малых углах разворота (р.Ока –  $136^\circ$ , р. Обь –  $118^\circ$ ). Превышение углов выхода над углами входа (р. Ока) наблюдается при еще меньших углах разворота ( $92$  и  $120^\circ$ ), но при неправильных формах излучин, обусловленных происшедшими на этом участке отклонениями петель. Случаи превышения углов входа над углами выхода наблюдаются при больших значениях углов разворота ( $150$ ,  $153$ ,  $143$  и  $130^\circ$ ). Причем достаточно часто встречаются излучины с углом разворота более  $200^\circ$ . На остальных участках подобные углы разворота встречаются редко—это только одиночные излучины.

Характер распределения излучин можно проследить по графику (рис. 30), показывающему распределение по длине участков р. Иртыша углов разворота и параметра  $S/\lambda_{изл}$ . Подобное же распределение характерно и для других рассматриваемых свободно меандрирующих участков рек. Из графика видно, что излучины русла располагаются группами, распределяющимися относительно прямыми участками. В каждую группу входит обычно 2-5 излучин, чаще всего 3-4, причем наибольшие из них чаще всего располагаются в центре группы. Наличие прямолинейных участков, разделяющих группы излучин, не позволяет найти точки перегиба русла верховых и низовых излучин, ограничивающих их группы. Поэтому фактически число излучин в группах следует увеличить на две. По этой же причине обнаружены и группы, состоящие из 2 излучин.

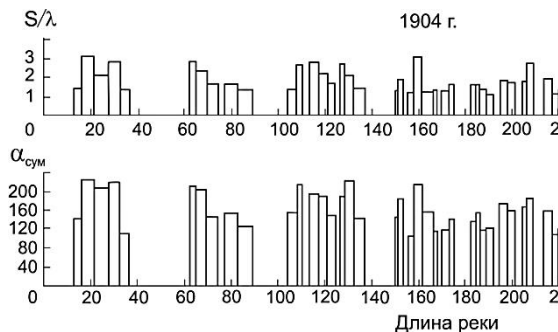
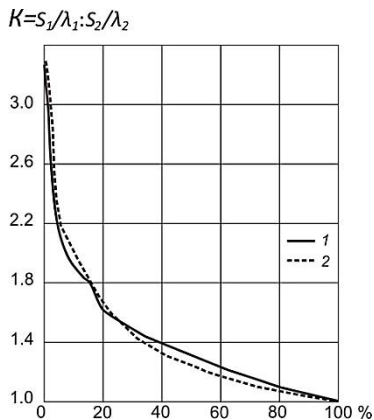


Рис. 30. Распределение углов разворота излучин и степени их выраженности по длине р.Иртыша (Павлодар-Урлютоб)

Связи, возникающие при развитии смежных излучин, можно попытаться выявить, используя в этих целях отношения показателей, характеризующих степень выраженности смежных излучин, т. е. выражение

$$K = \frac{S_1}{\lambda_1} : \frac{S_2}{\lambda_2}$$

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.

Поскольку  $S/\lambda$  хорошо выраженной излучины всегда больше, чем  $K$ , последний вычислялся всегда так, чтобы в знаменателе отношения  $S_1/\lambda_1 : S_2/\lambda_2$  всегда были меньшие значения  $S/\lambda$ . Затем были выделены случаи, когда  $S_1/\lambda_1 < S_2/\lambda_2$ , т. е. хорошо развитая излучина следует за выраженной слабее, и случаи, когда  $S_1/\lambda_1 > S_2/\lambda_2$ , или хорошо выраженная излучина предшествует менее выраженной, и для каждого из двух указанных случаев построены кривые обеспеченности  $K$  (рис. 31). Их соотношения показывают, в общем, отсутствие в данном случае (реки Ока, Иртыш, Обь) существенной разницы в степени выраженности излучин предшествующих хорошо выраженным и находящимся на выходе из них. Однако они все же позволяют предположить, что при большой разнице в степени их выраженности излучины, находящиеся на подходе к развитой петле русла,

меньше отличаются от нее, чем излучины, расположенные на выходе из петли. Для смежных излучин, находящихся примерно в одной стадии развития, вероятнее всего ожидать, что низовая излучина будет больше отличаться от расположенной выше, чем излучина, предшествующая данной.

Рис. 31. Кривые обеспеченности параметра  $K=S_1/\lambda_1:S_2/\lambda_2$ : 1-соотношение хорошо выраженной излучины с менее выраженной, расположенной выше нее, 2- то же с ниже расположенной излучиной

### **Скорость плановых деформаций и степень выраженности излучин**

Для участков рек Оки и Иртыша имелась возможность вычислить угловую скорость разворота излучин по съемкам разных лет и попытаться выявить связь между скоростью разворота и степенью развитости излучин, т. е. между показателями  $\Delta\alpha/\Delta t$  и  $S/\lambda$ .

Эти связи показаны на рис. 32. Они построены отдельно по бесприточным участкам, в пределах которых наиболее вероятно ожидать однородность природных условий. Эти связи показывают, что в начальных стадиях развития излучин (при  $S/\lambda$  примерно до 1,5–1,6) имеется тенденция к быстрому нарастанию скорости плановых деформаций излучин, а при дальнейшем увеличении степени выраженности излучин скорость их плановых смещений постепенно уменьшается.

Скорость разворота излучин в пределах каждого из проанализированных участков оказывается различной, однако в начальных стадиях развития, до  $S/\lambda_{изл}=1,5-1,6$ , все кривые оказываются довольно близкими и расходятся существенно только

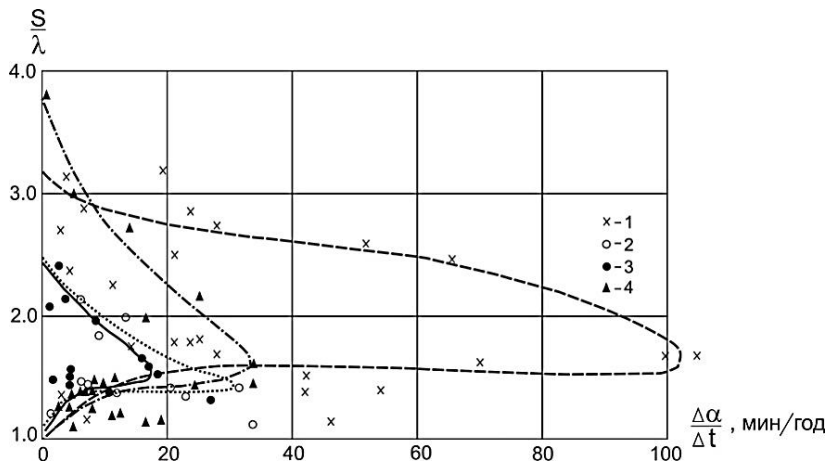


Рис. 32. Связь угловой скорости плановых деформаций свободно меандрирующих излучин со степенью их развитости: 1—р. Иртыш на участке Павлодар—Урлютоб, 2—р. Ока между Рязанью и впадением р. Прони, 3—р. Ока между р. Проней и с. Юшта, 4—р. Ока между селами Юшта и Рубецкое

при  $S/\lambda_{изл} > 1,5-1,6$ . Это, по-видимому, связано с тем, что в поздних стадиях развития излучин разница в грунтах русла оказывает все большее влияние на скорость деформаций.

Следует также отметить, что точки с незавершенным меандрированием, когда оно возникает на ранних стадиях развития излучин, группируются преимущественно в начале координат; это позволяет предположить, что возникновение спрямляющего протока существенно уменьшает скорость плановых деформаций главного русла.

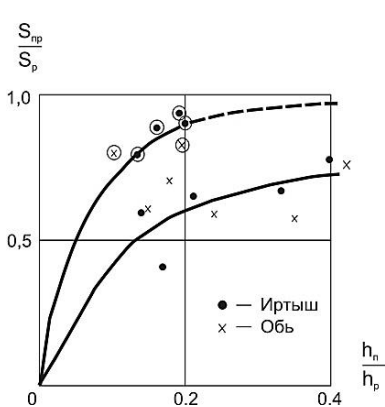
### **Зависимость процесса спрямления излучин от степени затопляемости пойм**

Незавершенное меандрирование, как указывалось, развивается в условиях большого затопления поймы.

Зависимость показателя незавершенности меандрирования, выражаемого отношением длины спрямляющего протока ( $S_{np}$ ) к длине главного русла ( $S_p$ ), т. е. показателем  $K = S_{np}/S_p$ , от степени затопляемости поймы, характеризуемой отношением глубины затопления поймы ( $h_n$ ) к глубине русла при затоплении ( $h_p$ ), или  $h_n/h_p$ , показана на рис. 33.

При отношении  $S_{np}/S_p$  близком к 1, длины спрямляющего протока и главного русла близки и образование спрямляющего протока происходит путем отторжения пляжа (побочня) или первых от реки береговых валов. При малых значениях  $S_{np}/S_p$  отторжения, очевидно, произошли в перешейках хорошо выраженных излучин.

Рис. 33. Связь показателя незавершенности меандрирования с затопляемостью поймы. Точки в кружках, относятся к случаям отторжения пляжей и первых от реки береговых валов



Малые значения  $h_n/h_p$  указывают на небольшую затопляемость поймы, большие — на значительную ее затопляемость. Кривая связи  $S_{np}/S_p = f(h_n/h_p)$  построена по данным об излучинах с незавершенным меандрированием, обнаруженным на реках Иртыше и Оби. Каждая точка на графике соответствует средним значениям  $S_{np}/S_p$  и  $h_n/h_p$  на данном бесприточном участке.

Несмотря на малое число точек, кривые, помещенные на рис. 33, представляют достаточно убедительными вследствие того, что их экстремальные значения в данном случае строго определены — кривые в начальной точке должны пересекать центр координат, а в верхней части оканчиваются при значениях  $S_{np}/S_p$  и  $h_n/h_p$ , равных 1. На графике связи  $S_{np}/S_p = f(h_n/h_p)$  выявляется возможность построения двух самостоятельных кривых, верхняя из которых соответствует случаю отторжения пляжей или первых от реки береговых валов, т. е. когда спрямление развивается на ранних стадиях меандрирования.

Нижняя кривая соответствует спрямлениям, происходящим в условиях, когда излучины русла оказываются достаточно хорошо выраженными. Легко видеть, что процесс спрямления в этих случаях и по гидравлической обстановке, и морфологически должен протекать по-разному. В первом случае он происходит под действием потока, сосредоточенного в русле реки, во втором случае спрямление возникает под воздействием пой-



менных течений, непосредственно не связанных с течениями в главном русле. Кроме того, и само спрямление должно развиваться медленнее, чем при отторжении пляжей. Таким образом, и интенсивность этих двух процессов должна быть различной. Об этом, в частности, свидетельствует то обстоятельство, что для осуществления спрямления при хорошо развитых излучинах, как это видно по кривым  $S_{np}/S_p = f(h_n/h_p)$ , требуется и большая затопляемость пойм.

### **Заключение**

Введение в гидролого-морфологический анализ количественных характеристик, освещающих основные особенности русловых и пойменных переформирований, свойственных различным типам руслового процесса, позволяет обнаруживать новые закономерности руслового процесса, обеспечивает возможность построения прогноза русловых деформаций, основанного на количественных связях измерителей руслового процесса с определяющими его факторами, расширяет возможности инженерного применения этого анализа. В частности, появляются возможности разработки на этой основе правил выбора мест расположения гидротехнических сооружений применительно к различным типам руслового процесса и создание наиболее экономичных и эффективных защитных мероприятий.

Количественные морфологические закономерности, выявляемые предлагаемым путем, должны найти широкое применение и в вопросах лабораторных исследований, и при моделировании русловых деформаций.

Следует особо подчеркнуть, что предлагаемые измерители руслового процесса можно получать по уже имеющимся широко распространенным материалам – лоцманским и топографическим картам, аэроснимкам. Это существенно расширяет возможности гидролого-морфологического анализа и позволяет оценивать основные особенности развития руслового процесса на участках проектирующихся сооружений и предвидеть возможные его изменения под влиянием этих сооружений уже на ранних стадиях проектирования. Тем самым можно существенно рационализировать и полевые изыскания.

Переходя к конкретным выводам, полученным в результате использования предложенной системы измерителей руслового процесса, можно отметить следующее.

1. С помощью предложенных измерителей обнаружены сходства и различия в развитии русла и русловых образований при разных типах руслового процесса, оценены характерные величины ряда элементов русла.

Так, например, выявляется устойчивость шагов гряд и побочней по бесприточным участкам рек, обнаруживается близость относительных шагов ленточных гряд и побочней, что подтверждает предположение об общности их происхождения. Выявляется устойчивость размеров и форм излучин в пространстве и времени при ограниченном меандрировании. Последовательные их изменения и закономерные группировки при свободном меандрировании, консервация при разработке спрямляющего потока при незавершенном меандрировании.

2. Поскольку рельеф речного русла определяется развитием различных форм русловых образований разного происхождения и с различной подвижностью, понятие «руслоформирующий» расход воды оказывается достаточно неопределенным. Связи размеров морфологических образований с показателями крупности реки должны устанавливаться отдельно для различных типов русловых образований, а, следовательно, для различных типов руслового процесса, например для ленточных гряд, побочней и излучин разного типа – ограниченно и свободно меандрирующих, с незавершенным меандрированием и т. п.

3. Выявляются новые связи между отдельными морфометрическими характеристиками русла. Например, обнаруживается тенденция убывания шагов ленточных гряд и побочней при увеличении извилистости русла и уклонов свободной водной поверхности при данной крупности донных наносов. Устойчивость характеристик крупных гряд уменьшается, если их перемещение развивается на фоне русловых процессов других типов.

4. При свободном меандрировании, как указывалось, наблюдается групповость в расположении излучин, причем наиболее развитые излучины обычно располагаются в центре этих групп, состоящих часто из 5-6 излучин. Если в группе имеется хорошо развитая излучина, выраженность примыкающей к ней верховой излучины оказывается большей, чем низовой. Если же в группе степень развитости излучин невелика, то не верховая, а низовая излучина, примыкающая к наиболее развитой, оказывается выраженной лучше. Это дает основание предположить, что наличие петли русла не способствует развитию примыкающей к ней низовой излучины.

5. С увеличением развитости излучин, а именно после достижения углом разворота  $60^\circ$ , появляется и растет асимметрия их форм. Часты случаи, когда углы входа оказываются большими, чем углы выхода излучин. Наибольшая на исследованных реках разница этих углов составила  $30^\circ$ .

6. В начальных стадиях свободного меандрирования до  $S/\lambda_{изл}=1,5 \div 1,6$  имеется тенденция к быстрому нарастанию скорости плановых деформаций излучины. При дальнейшем ее развитии скорость плановых деформаций начинает убывать. Надо также отметить, что в начальных стадиях развития излучин скорости их плановых деформаций разнятся по отдельным бесприточным участкам даже разных рек меньше, чем в поздних стадиях развития излучин. Это позволяет предположить, что разница в грунтах берегов русла наиболее существенно влияет на скорость плановых деформаций в поздних стадиях развития излучин, когда воздействия потока оказываются ослабленными из-за уменьшения уклонов.

7. При незавершенном меандрировании скорость разворота излучин после появления спрямления значительно уменьшается.

8. С увеличением затопляемости пойм спрямления излучин образуются на все более ранних стадиях их развития, но отторжения побочней происходят при меньшей затопляемости поймы, чем отторжения пойменных участков выпуклого берега излучин.

9. Полученные закономерности развития руслового процесса различных типов подтверждают предлагаемую его типизацию и значимость разработанной системы измерителей. Обоснование этих зависимостей более массовым материалом позволит широко использовать их в прогностических целях, а также для разработки правил выбора мест расположения сооружений на реках, систем защитных мероприятий и для нужд моделирования русловых деформаций.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Русловой процесс. Под ред. Н. Е. Кондратьева. - Л.: Гидрометеиздат, 1959.
2. Попов И. В. Методические основы исследований руслового процесса. - Л. Гидрометеиздат, 1961.
3. Попов И. В. Применение морфологического анализа к оценке общих русловых деформаций р. Оби. - Труды ГГИ, вып. 94, 1962.

4. Попов И. В. Принципы выбора мест водозабора и трасс перехода ЛЭП через реки. Доклады на науч.-техн. совещании по гидрометеорологическому обслуживанию тепловых электростанций и линий электропередач. – Изд. НТО энергетической промышленности, Львовское областное правление, Львов 1962.

5. Попов И. В. Руслыые переформирования р. Волги на участке Волгоград-Астрахань. – Труды ГГИ, вып. 108, 1963.

6. Ржаницын Н.А. Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. – Л. Гидрометеиздат, 1960.

7. Leopold L.B., Wolman M.G. River channel patterns: braided, meandering and straight. – U. S. Geol. Survey Professional Paper, No 282-B, 1957.

8. Dury G. H. Misfit stream: problem in interpretation discharge and distribution – Geol. rev., v. 50, № 2, 1960.

9. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне – Изд. АН СССР, М., 1955.

10. Знаменская Н. С. Расчет размеров и скорости перемещения песчаных гряд – Метеорология и гидрология, № 7, 1962.

## ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

На реках Советского Союза существуют десятки тысяч и ежегодно строятся сотни самых разнообразных сооружений, требующих учета руслового процесса (водозаборов, переходов трасс линий высоковольтных передач, газо и нефтепроводов, мостовых сооружений, набережных, причалов, русловыправительных сооружений и др.). В связи с огромными масштабами, которые приняли мероприятия по регулированию речного стока, неизбежно ведущие к изменению хода деформаций речных русел и пойм, их переформирования охватывают не только большие по протяжению участки рек с построенными на них водохранилищами, но также и системы притоков этих рек. Это обуславливает необходимость предвидения хода развития руслового процесса для речных участков протяжением в сотни километров, а иногда для целых речных систем. Потребность в подобных прогнозах руслового процесса становится особенно ощутимой вследствие усиления роли перспективного планирования гидротехнического и иного хозяйственного строительства и необходимостью комплексного решения задач.

Особенно важной оказывается оценка плановых деформаций речных русел, лежащая в основе выбора месторасположения сооружений и систем защитных мероприятий. Учет именно плановых деформаций, ведущих к переработке пойм – объектов большого сельскохозяйственного значения, – особенно необходим в связи с расширением фонда поливных и орошаемых земель. Смещения берегов русла в плане на средних реках в 10-15 м/год, а на крупных в 20 м/год и более, сползание крупных песчаных скоплений наносов в русле реки (побочней, осередков) со скоростью 200-300 м/год не представляет исключения и не считается ими нельзя.

Вместе с тем состояние теории руслового процесса и современные методы его расчета, удовлетворительно приспособленные к решению задач частного характера и для коротких участков и отдельных створов, оказываются весьма условными для решения проблем общего прогноза русловых переформирований.

Проследивая исторический ход развития теории руслового процесса, первоначально обслуживавшей преимущественно нужды судоходства, легко видеть, что намечаемое одним из ее основоположников В. М. Лохтиным (1895 г.) гармоническое развитие гидравлического и морфологического аспектов этой теории приобрело в дальнейшем сугубо гидравлический уклон при забвении вопросов морфологии – общих законов руслоформирования в природных условиях. Фактически это привело к разрыву между частными и общими закономерностями руслоформирования, к разрыву между изучением простых и сложных явлений в жизни реки, к отрыву проблемы от гидрологических основ. Вместе с тем, очевидно, что физическое объяснение процесса, раскрытие сути сложных явлений через простые реально возможно только при знании закономерностей развития как простых, так и сложных явлений, закономерностей далеко не тождественных и четко обособленных в таком сложном и дискретном процессе, каким являются русловые преформирования.

Такое положение в теории руслового процесса, по видимому, прежде всего, было связано с быстрым развитием смежных дисциплин гидравлического цикла, с необходимостью быстрого решения инженерных задач. Большую роль сыграло и интенсивное развитие землечерпания, оттеснившего русловыправительные работы. Полученные при этом решения на первых порах удовлетворяли запросам практики, имевшей дело с ограниченным числом объектов, короткими участками или даже отдельными створами.

Нисколько не отрицая огромных заслуг гидравлического направления, нельзя не отметить, что многообразие возникающих задач, резкие различия в формах проявления руслового процесса в разных природных условиях, необходимость предвидения хода руслового процесса уже на ранних стадиях проектирования, т. е. в условиях наличия крайне ограниченных исходных материалов, необходимость оценки русловых преформирований на участках большого протяжения – все это вынуждает одновременно с развитием гидравлических исследований форсировать и морфологическое изучение процесса.

Как бы совершенен не был метод расчета в гидравлическом отношении, если он основан на скудных гидравлических представлениях, с его помощью можно получить лишь очень грубые схемы развития руслового процесса, далекие от кон-

кретных условий, а иногда дающие искаженное представление о действительно происходящих в природе явлениях. Именно так, например, обстоит дело с расчетом размывов и намывов в речном русле, если не учитывается грядовой характер перемещения донных наносов и закономерности плановых деформаций русла и русловых образований, весьма различных в разных природных условиях.

Несовершенство теории руслового процесса в ее современном состоянии приводит к тому, что нормативные правила учета руслового процесса при выборе мест расположения сооружений на реках, выборе систем защитных мероприятий, оценке положительных и вредных воздействий новых сооружений на смежные объекты носят слишком общий характер.

Известны случаи проектирования и строительства в непосредственной близости друг от друга взаимоисключающих по своему воздействию на русловую процесс сооружений. Слабо применяются в защитных целях и для повышения эффективности искусственных воздействий, например, при землечерпани и русловыправлении, природные закономерности деформаций речного русла и поймы (закономерности развития излучин, их спрямлений, отторжений побочней, размывов и намывов пойм и др.). Не всегда удачным оказывается основанный преимущественно на опыте и интуиции проектировщиков выбор мест для сооружения водозаборов, переходов через реки линий электропередач, трасс трубопроводов и др. Иногда непродуманное нарушение местных базисов эрозии, снятие отморстки например, при добыче в русле реки гравия, приводит к нежелательной активизации руслового процесса и в связи с этим к обсыханию водозаборов, выносам наносов на пойму и т. п.

Пренебрежение морфологической стороной руслового процесса отрицательно сказывается и на методике проведения полевых работ, стоимость которых нередко составляет 50% стоимости всего проекта.

Обычно центр тяжести полевых работ переносится на получение данных для детального расчета деформаций непосредственно на коротком участке или даже в створе сооружения. Эти участки и створы бывают далеко не всегда типичными, и по данным о них нельзя выявить общие тенденции развития руслового процесса и особенности деформаций русла и поймы, необходимые для максимального соответствия данных расчета местным условиям, а также для прогноза деформаций. Более

того, при полевых исследованиях основное внимание часто уделяется не столько самим деформациям, сколько получению их косвенных показателей, состав которых далеко не всегда имеет определяющее значение в данных конкретных условиях и зависит от вида той или иной принятой проектировщиком расчетной формулы. Вместе с тем современные, чисто гидравлические методы расчета в лучшем случае позволяют только качественно оценить вероятное направление деформаций и получаемые расчетом цифры переоценивать не следует.

Подобные полевые работы весьма трудоемки и обычно требуют длительного времени. Поэтому неудивительно, что они проводятся на поздних стадиях проектирования либо тогда, когда встает задача осуществления защитных мероприятий.

Между тем в ряде случаев оценка тенденций деформаций может быть сделана относительно простыми приемами, основанными на гидролого-морфологическом анализе руслового процесса, причем на ранних стадиях проектирования, без осуществления трудоемких и длительных полевых работ.

В решении всех этих вопросов уже в настоящее время можно опираться на гидролого-морфологическую теорию руслового процесса, созданную в последние годы в Государственном гидрологическом институте. Основные ее положения сводятся к следующему.

Обычно русловой процесс трактуется как процесс взаимодействия потока и грунтов его ложа и тем самым подчеркивается только механическая сторона процесса. В нашем понимании [Кондратьев и др., 1959, Попов, 1962] русловой процесс трактуется шире. Он определяется как изменения морфологического строения русла, постоянно происходящие под действием текущей воды. В этом определении подчеркивается необходимость изучения как гидродинамических, так и гидролого-морфологических закономерностей руслового процесса. Важность учета гидролого-морфологических закономерностей видна из следующих соображений.

Как показал Н. Е. Кондратьев [Кондратьев и др., 1959], в руслах рек следует различать три группы морфологических образований, существование и развитие которых обусловлены воздействием различных факторов. Существование и развитие малых и средних форм (ряд различных типов) полностью определяется гидравликой потока. Объяснить же различия в типах строения и развития крупных форм, определяющих общий об-



лик русла (излучин, островных участков и т. п.), удается пока лишь при условии выявления их связей с природными особенностями всего водосбора реки. К ним, прежде всего, относятся особенности стока воды и наносов, а также факторы, ограничивающие свободное развитие деформаций русла, например геологические особенности строения речных долин, сооружения в русле, на пойме и водосборе реки, воздействующие на плановые и высотные деформации русла и определяющие их факторы – сток воды и наносов. Легко видеть, что русловые деформации в данном случае рассматриваются как формы транспорта наносов.

Таким образом, если в области изучения средних и малых форм должен преобладать гидравлический подход, то для изучения крупных форм русла, прежде всего, требуется гидролого-морфологический подход. Он дает непосредственный практический выход и служит основой для последующего гидродинамического расчета, задавая схему развития рассчитываемого явления. Объединение гидролого-морфологического и гидродинамического направлений исследования должно выразиться в создании гидродинамической теории конкретных русловых форм. Это необходимо для разработки надежных детальных инженерных методов расчета и прогноза руслового процесса.

Гидролого-морфологический анализ, прежде всего, заключается в выявлении общих закономерностей деформаций русла и поймы реки на основе натурных материалов и установлении связей с обуславливающими эти деформации факторами. Зная тип деформаций, связи их с обуславливающими факторами и ожидающиеся изменения этих факторов, можно составить и прогноз русловых переформирований.

Ключом к гидролого-морфологическому анализу является типизация процессов развития русловых и пойменных деформаций (макроформ речного русла).

В качестве основных типов русловых деформаций, типов руслового процесса, выделяются следующие их виды.

Немеандрирующие русла с ленточными грядами (рис. 1, I). Основные переформирования русла выражаются в сползании по нему крупных одиночных песчаных гряд, занимающих всю ширину русла. Скорости их сползания нередко достигают 200-300 м/год. Общие плановые деформации русла не характерны. По мере сползания гряд, в заданном створе происходит периодическое повышение, а затем снижение отметок

дна примерно на 1,5-2 м в течение года. Отличительные признаки для опознавания этого типа процесса на местности, по карте или по аэрофотоснимку – отсутствие явных следов подмыва берегов (отсутствие прибереговых скоплений наносов, хорошая задернованность). При просвечивающем дне хорошо заметны крупные гряды, занимающие всю ширину русла.

Побочневый тип процесса (рис. 1, II). Так же как и в предыдущем случае, характерно отсутствие заметных плановых деформаций русла и пойменных переформирований. В половодье происходит сползание и перекося крупных песчаных одиночных гряд, занимающих всю ширину русла. Их высота часто достигает 1,5-2 м, скорость сползания колеблется от десятков до сотен метров в год (на крупных реках). В результате перекося гряд они принимают шахматное взаиморасположение. В межень прибереговые, наиболее возвышенные части гряд обсыхают, образуя неподвижный в этот период побочень, и поток становится извилистым. Одновременно происходит размыв пониженной подводной части гряды, представляющей собой гребень перекося. Шахматное расположение всегда хорошо заметно побочных, не приуроченных к определенным очертаниям русла, позволяет легко обнаруживать этот тип руслового процесса.

Ограниченное меандрирование (рис. 1, III). Наблюдается систематическое сползание слабо выраженных излучин, образуемых неподвижными побочнями, при сохранении этими излучинами своих плановых очертаний. В ходе сползания излучин происходит обмен наносами между поймой и руслом. Пойма представлена перемыкаемыми при сползании излучин обособленными массивами, чередующимися по берегам реки. Ширина поймы равна ширине пояса меандрирования. Ограниченное меандрирование обычно развивается в условиях стеснения русла склонами долины или террасами и древними устойчивыми береговыми валами. Скорость сползания излучин на средних и крупных реках часто составляет 5-15м/год, а иногда и более.

Свободное меандрирование (рис. 1, IV). Плановые деформации русла происходят в виде разворота смежных участков двух противоположно направленных вершинами излучин вокруг фиксированной в плане точки (короткого участка, расположенного на перегибе средней линии русла, т. е. на перекосях) с одновременным увеличением кривизны излучин и их удлинением. Развитие излучин заканчивается образованием петли русла и последующим прорывом их перешейков, спрям-

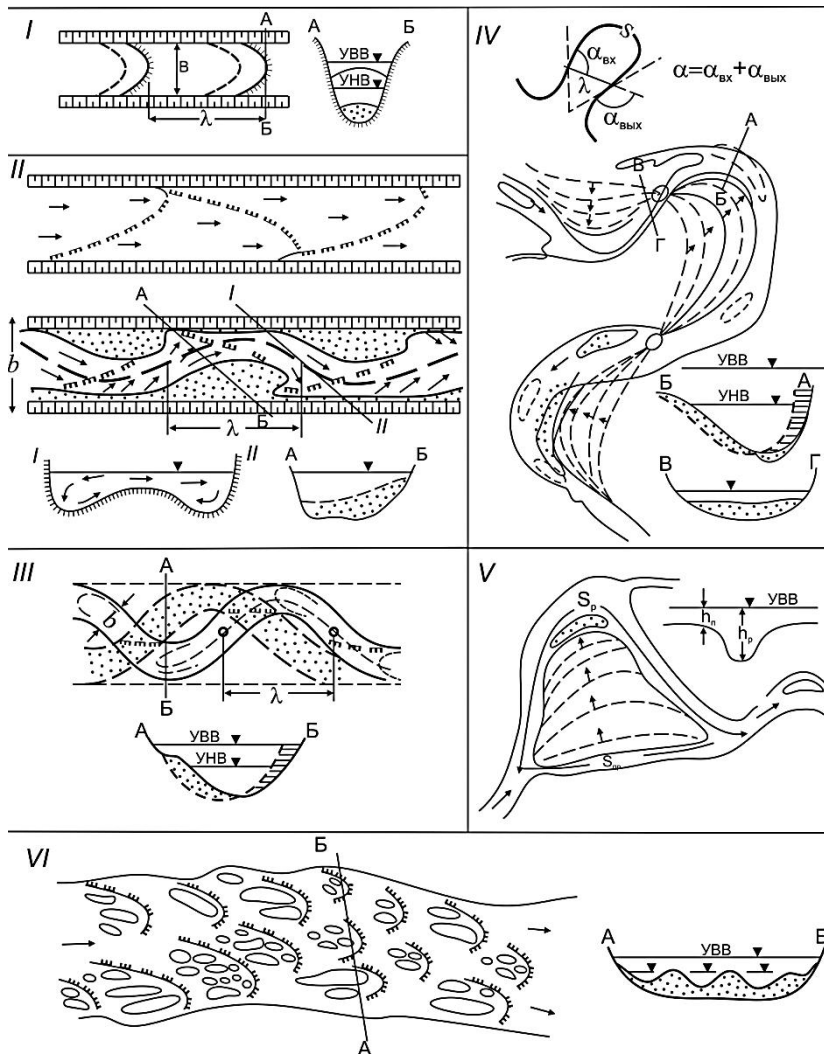


Рис. 1. Типы руслового процесса на равнинных реках СССР: *I* - немеандрирующие русла с ленточными грядами; *II* - побочный тип процесса; *III* - ограниченное меандрирование; *IV* - свободное меандрирование; *V* - незавершенное меандрирование; *VI* - осередковый тип процесса. На схемах показаны также основные морфометрические измерители, использованные при построении связей, представленных ниже на рис. 2

лением русла и образованием серповидных стариц. После этого цикл развития излучин повторяется. Таким образом, свободное меандрирование характерно стадийностью развития излучин. Поймы при свободном меандрировании широкие с характерным гривистым рельефом (серии дугообразно изогнутых грив – прежних береговых валов). Имеет место интенсивный обмен наносами между поймой и руслом, вследствие чего хорошо выражена дву-членность слагающего их аллювия (нижние слои – крупнозернистая, русловая фация, верхние – тонкозернистая, пойменная фация). Наблюдается тесная взаимосвязь в развитии смежных излучин, особенно ярко проявляющаяся после прорыва одной из них.

Ширина поймы обычно в несколько раз больше ширины пояса меандрирования. Наибольшая скорость смещения берегов русла в пределах излучины (в вершине ее) различна на разных реках и колеблется от метров до десятков метров в год (на крупных реках). Скорость плановых деформаций бывает наибольшей в начальной стадии развития излучин и ослабевает к их конечной стадии.

Незавершенное меандрирование (рис. 1. V). При хорошо затапливаемых поймах развитие свободного меандрирования заканчивается не прорывом перешейка петель в результате сближения берегов этого перешейка, а образованием спрямляющего протока часто еще на ранних стадиях развития излучин. Спрямляющий проток впоследствии разрабатывается и становится главным руслом, а прежнее главное русло отмирает. Развитие спрямляющего протока обычно идет постепенно, иногда десятилетиями, но переход в него главного русла может проходить и в течение одного половодья. Плановые деформации русла развиваются со скоростями, близкими к наблюдающимся при свободном меандрировании, но после спрямления в главном русле они резко уменьшаются.

Осередковый тип процесса (рис. 1, VI). Если поток транспортирует большое количество донных (влекомых) наносов, образуется широкое распластанное русло, по которому сползают не одиночные гряды, занимающие всю ширину русла, как ленточные или при побочном типе процесса, а ряды разобщенных, но также крупных гряд. Обсыхая в межень, они образуют осередки. При наличии длительной межени эти осередки могут закрепляться растительностью и превращаться в острова. Протоки между островами обычно меандрируют, что приводит к смещению островов не только вдоль по реке, но и в поперечном к нему направлении.

Возможно присоединение таких островов к пойме в ходе меандрирования протоков. При очень подвижных донных наносах формируются блуждающие русла с быстро сползающими и иногда обсыхающими грядами, с быстро смещающимися в плане стрежнями потоков. Скорость смещения осередков может составлять от десятков до сотен метров в год и более. Скорость смещения берегов русла и островов сопоставима со скоростями плановых деформаций при свободном меандрировании.

В ходе развития руслового процесса указанных типов могут образовываться многорукавные русла, однако многорукавность может формироваться и вне прямой зависимости от типа процесса в главном русле, возникая под влиянием расчленения поймы потоками, выходящими на нее со склонов долины и создающими достаточно устойчивые течения на пойме. Поэтому подобную многорукавность следует рассматривать как особый тип развития руслового процесса.

С. И. Пиньковским [Пиньковский, 1962, Кондратьев и др, 1959] сделана попытка оценить распределение основных типов руслового процесса по территории СССР, показавшая правомерность выделения этих типов руслового процесса.

Возможность инженерного применения гидролого-морфологического анализа существенно расширяется при введении количественных измерителей, с помощью которых можно охарактеризовать основные особенности общих деформаций речного русла при разных типах процесса. Такая система показателей разработана [Попов, 1962]. Оказалось возможным выявить типичные размеры ряда основных элементов русла и русловых образований применительно к разным типам руслового процесса и установить зависимости их от некоторых определяющих факторов. Суть этих проработок достаточно ясно показана на рис. 2.

Все эти проработки позволяют уже сейчас применять гидролого-морфологический анализ к решению задачи учета руслового процесса при выборе места расположения гидротехнических сооружений на реках, систем защитных мероприятий, методики производства полевых работ. В табл. 1 приведены некоторые предварительные наметки по вопросам размещения сооружений и их защиты. Хотя они и не являются окончательными рекомендациями, но достаточно хорошо показывают направление дальнейших разработок и возможности гидролого-морфологического анализа.

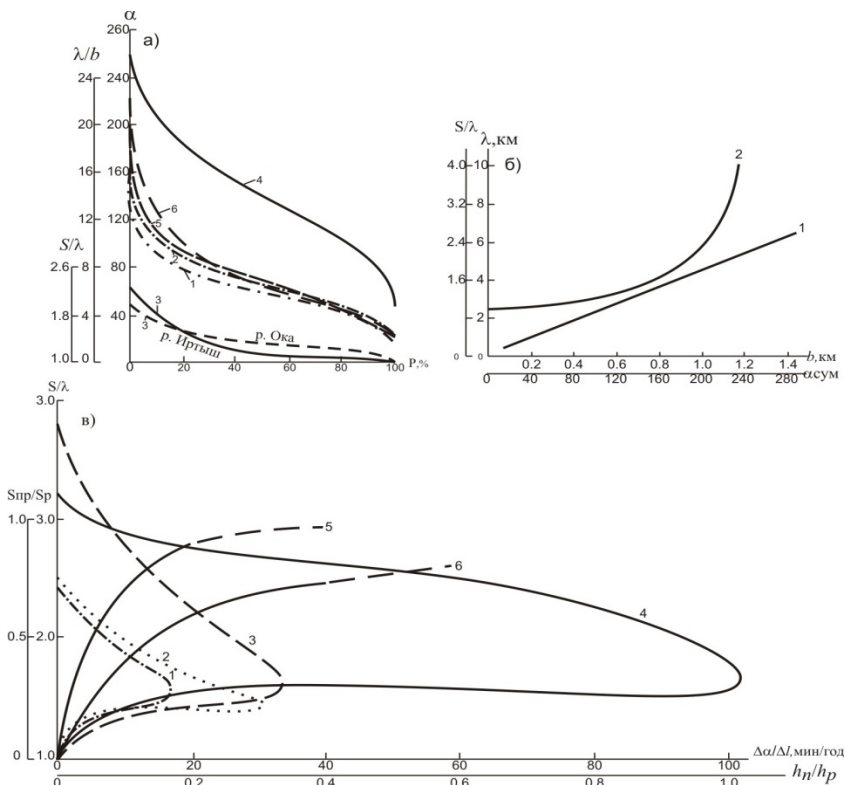


Рис. 2. Примеры морфометрических и гидроморфологических связей, свойственных разным типам руслового процесса, (способы определения принятых измерителей см. на рис. 1)

а – кривые обеспеченности, показывающие устойчивость-относительных шагов ленточных гряд (1), побочной (2), степени выраженности излучин при ограниченном меандрировании (3) и разнообразии углов разворота (4), углов входа (5) и углов выхода(6) излучин при свободном меандрировании,

б) – связь шагов свободно меандрирующих излучин с шириной русла (1) и степени выраженности излучин с углом их разворота (2). Связь (2) показывает, что при  $\alpha=180^\circ$  излучины удлиняются без существенного изменения углов разворота,

в) – характеристики скорости плановых деформаций свободно меандрирующих излучин  $\Delta\alpha/\Delta t$  и спрямлений при незавершенном меандрировании  $S_{np}/S_p$ . С развитием излучин скорость плановых деформаций вначале резко возрастает, а затем, по достижении показателем развитости излучин  $S/\lambda=1,5\div 1,6$  убывает. 1 – р. Ока между р. Проней и с. Юшта, 2 – р. Ока между Рязанью и впадением р. Прони, 3 – р. Ока от с. Юшта до с. Рубецкое, 4 – р. Иртыш между Павлодаром и Урлютобом. С увеличением затопляемости поймы спрямления русла при незавершенном меандрировании начинаются даже на слаборазвитых излучинах (5) и пляжах (6).

Табл. 1. Размещение и защита сооружений при различных типах руслового процесса

Тип процесса	Фактор, подлежащий первоочередному учету	Рекомендации по размещению сооружений	Средства защиты, хорошо согласующиеся с типом процесса
Врезанные русла с ленточными грядами (рис. 1.1)	Сползание гряд	1) Переходы линий электропередач (ЛЭП) – в любых местах; 2) Водозаборы – то же.	Требуются периодические расчистки дна у водозаборов или входов в подводящие каналы
Побочный тип (рис. 1.2)	Наползание побочной	1) Переходы ЛЭП в любом месте опоры за бровками берегов; 2) Водозаборы - в низовых концах плесовых ложин.	Отторжение выше лежащего побочня
Ограниченное меандрирование (рис. 1.3)	Размыв берега в ходе сползания излучин	1) Переходы ЛЭП: а) при медленном сползании – опоры за бровками берегов, вне пределов ожидаемого размыва; б) при быстром сползании излучин – опоры за пределами пояса меандрирования. 2) Водозаборы – в низовых концах плесов.	Для уменьшения скорости деформаций: при медленном сползании эффективно крепление берега на участке сооружения; при быстром сползании – отторжение побочня на противоположном берегу.
Свободное меандрирование (рис. 1.4)	Стадия развития излучин	1) Переходы ЛЭП – в точках перегиба русла (на перекатах); 2) Водозаборы – в хорошо развитых излучинах на слабоформируемых плесах.	Крепление берега у сооружения. Предотвращение отмирания петли крепления берегов перешейка. При сильно затопляемых поймах – возведение поперечных дамб на перешейке. При вынужденном расположении – отторжение пляжа противоположного берега.
Незавершенное меандрирование (рис. 1.5)	Стадия развития спрямления	1) Переходы ЛЭП: а) в отмирающих руслах – точках перегиба; б) в спрямлениях – в зависимости от типа развивающегося процесса (см. выше); 2) Водозаборы в плесе отмирающего рукава по рекомендациям для свободного меандрирования.	Для ослабления деформаций – стимулирование развития спрямлений с последующей его задержкой. При размещении опор на пойме желательно способствовать сосредоточению пойменных протоков при затоплениях в промежутках между опорами простейшими земляными дамбами.

Примечание. При осередковом типе процесса и наличии пойменной многорукавности выбор местоположения сооружений и защитных мероприятий следует осуществлять на основе фрагментирования – выделения участков реки с одним из типов процесса, указанных в таблице, и с учетом общих тенденций его развития, свойственных процессам деформаций осередков и пойменных протоков.

Применение этого анализа позволяет учесть основные особенности развития руслового процесса на ранних стадиях проектирования на основе уже имеющихся карт или лучше по аэрофотоснимкам, минуя трудоемкие детальные полевые работы. Это дает возможность выбрать оптимальные по развитию руслового процесса места расположения сооружений и заблаговременно предусмотреть наиболее эффективные в данных условиях защитные мероприятия. Тип сооружений и системы защитных мероприятий должны быть различными при разных типах руслового процесса.

Составление окончательных рекомендаций по учету руслового процесса при проектировании гидротехнических сооружений на реках требует тесной совместной работы гидрологов и гидротехников. Это должно принести большой экономический эффект.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Пиньковский С. И. Типы речных русел Средней и Южной Сибири. – Труды ГГИ, вып. 94, 1962.
2. Попов И. В. Методические основы исследований руслового процесса. – Гидрометеиздат: Л., 1962.
3. Русловой процесс. / Под ред. Н. Е. Кондратьева. – Гидрометеиздат: Л., 1959.



## ТИПЫ РЕЧНЫХ ПОЙМ И ИХ СВЯЗИ С ТИПАМИ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

### *1. Основные предпосылки*

Роль пойм при освоении рек неуклонно возрастает в связи с развитием сельскохозяйственного их использования, с необычайно большим развитием коммуникаций – дорог, трубопроводов разного назначения (водоводы от водозаборов, газо- и нефтепроводы и т. п.), линий связи и высоковольтных передач, а также вследствие все большего использования пойменных массивов для промышленного и гражданского строительства. Возникает потребность изучения пойм в целях оценки воздействия на них регулирования стока и, в частности, для прогнозов пойменных деформаций на участках зоны выклинивания водохранилищ и в нижних бьефах плотин, необходимых для решения многих вопросов их всестороннего освоения.

Пойменные процессы (процессы образования и развития речных пойм) являются неотъемлемой частью руслового процесса, поскольку современная пойма есть результат плановых деформаций речных русел.

По аналогии с тем, что в настоящее время удалось сделать для оценки деформаций русла (имеется в виду создание гидролого-морфологической теории руслового процесса [Кондратьев и др., 1959, Попов, 1965]), было бы крайне важно разработать типизацию пойм, увязанную с типами руслового процесса, которые удалось выделить при разработке упомянутой теории.

Типизация пойм позволила бы, так же как это удалось сделать для речных русел, создать ограниченное число решений задач, возникающих при освоении пойм. При этом если такая типизация будет отражать способ образования пойм и давать схемы их развития в условиях различных комбинаций природных или искусственно созданных факторов русло- и поймообразования, то появляется возможность облегчить задачу выбора оптимальных условий для размещения на пойме сооружений и систем наиболее эффективных защитных мероприятий. Возникает также возможность существенной рационализации полевых изысканий. Облегчается и задача составления прогноза пойменных деформаций, причем уже на ранних стадиях проектирования. Все это оказывается возможным потому, что выделение четких морфологических признаков пойм разных типов

допускает определение типа поймы по картографическим или аэрофотосъемочным материалам, сводя к минимуму полевые работы.

Рассматривая реальные возможности типизации пойм, необходимо отметить следующее.

Существует довольно большое число типизаций пойм, в том числе Р. А. Еленевского (Еленевский, 1936), В. Р. Вильямса (1949), Е. В. Шанцера (Шанцер, 1951), Н. И. Маккавеева (Маккавеев, 1955), гидрографическая типизация, изложенная в Наставлении по гидрографическим исследованиям рек (1949 г.), и др. Более подробный обзор этих типизаций дан в монографии автора [Попов, 1961]. Поэтому ограничимся здесь только общими выводами.

Все типизации пойм очень слабо учитывают тип руслового процесса либо его полностью игнорируют. Первым обращает на это внимание Шанцер [Шанцер, 1951] и предлагает деление речных пойм на два основных типа – поймы меандрирующих рек (сегментные) и поймы слабо меандрирующих рек (обвалованные). Им же выделяется переходный тип – параллельно гривистые поймы, происхождение которых остается не вполне ясным.

Автором [Попов, 1965] была сделана попытка более полно увязать типы речных пойм с типами руслового процесса, используя в этих целях его типизацию, разработанную в ГГИ, и большой материал о поймах, собранный Еленевским, выделившим 23 разновидности речных пойм [Еленевский, 1936].

Однако эта типизация, носившая предварительный характер, не рассматривала ряда важных характеристик пойм, в частности, вопросы формирования пойменных течений и их связей с особенностями строения поверхности пойм, что имеет первостепенное значение для оценки их устойчивости. В настоящее время в связи с получением дополнительных материалов по поймам, в том числе и результатов специальных полевых исследований, осуществленных сотрудниками русловой лаборатории ГГИ под руководством автора, появилась возможность внести коррективы и развить упомянутую выше типизацию.

## ***2. Типы речных пойм***

### ***а) Классификационные признаки***

Прежде всего, необходимо условиться о единице типизации. Речную пойму целесообразно представить состоящей из

отдельных массивов, и в качестве объекта типизации принять пойменный массив, т. е. такой участок поймы, который, с одной стороны, оконтуривается руслом реки, а с другой, внешней границей самого удаленного от русла транзитного потока, возникающего на пойме при ее максимальном затоплении.

При затоплении пойменного массива следует различать три основные фазы.

Первая фаза – выход воды на пойму, который обычно начинается с затопления наиболее пониженных ее участков, расположенных преимущественно в низовых частях излучин. Затем происходит выход воды на пойму через более высокие, верховые части излучин. После этого верховые и низовые границы разлива постепенно сближаются, и лишь после их слияния возникает общий спрямляющий транзитный поток.

Вторая фаза затопления поймы охватывает период существования этого спрямляющего 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.

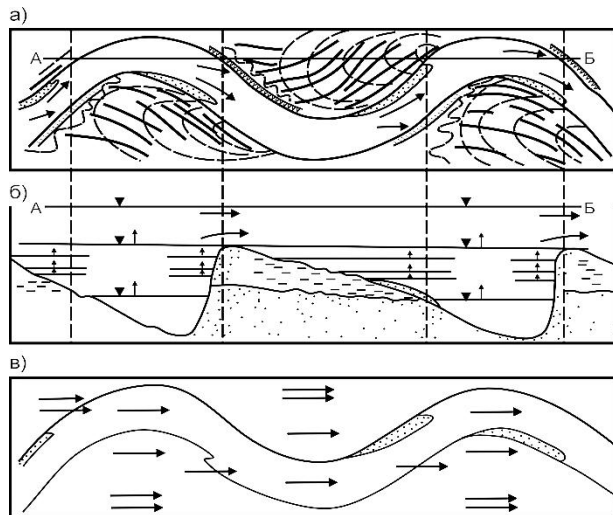
Итак, до появления транзитного потока верховые и низовые места проникновения воды на пойму работают в противоположных направлениях – вода распространяется от периферии пойменного массива к его центральной части. С момента установления транзитного потока эти участки береговой линии пойменного массива работают в одном направлении – через верховые участки вода поступает на пойму, а через низовые сливается с нее. С прекращением транзитного потока эти участки вновь начинают действовать разнонаправленно — обычно вода сливается с поймы в русло сначала через низовые ее участки, а затем и через верховые.

Таким образом, в пределах данного пойменного массива существуют своего рода водоразделы, лимитирующие возникновение и исчезновение спрямляющего транзитного потока, а места выхода и слива воды с поймы обычно носят сосредоточенный характер и часто бывают представлены эрозийными образованиями, особенно четко выраженными в верховой части пойменного массива.

Итак, при установлении границ пойменного массива существенно важно установить место начала и конца транзитных потоков и положение «водораздела» на его поверхности. Тем

самым облегчается задача установления возможного направления транзитного потока и определения внешней границы пойменного массива.

Наиболее просто выделить пойменный массив при ограниченном меандрировании. В этом случае он ограничен контуром излучины и внешней притеррасной границей поймы (рис. 1).



1. Рис. 1 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. 1 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 возникнуть сосредоточенные течения

Значительно сложнее выделить пойменный массив на свободно меандрирующей реке (рис. 2), где возможно возникновение транзитного потока на пойме, спрямляющего не одну, а несколько излучин. В этом случае пойменный массив может оказаться составленным из ряда частных массивов, каждый из которых на определенном этапе развития половодья может иметь свой спрямляющий транзитный поток, и лишь при максимальном затоплении образуется поток, спрямляющий не-

сколько излучин. Если такое явление имеет место, то под пойменным массивом в этом случае следует понимать участок поймы, огибаемый всеми излучинами, которые спрямляет этот поток, поскольку такой участок объединяется общностью гидравлической структуры транзитных потоков.

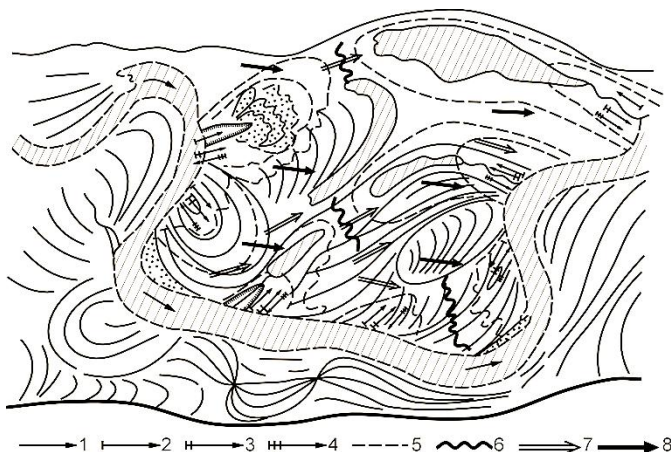


Рис. 2. Пойменный массив при свободном меандрировании: 1 – направление движения воды в местах ее входа и выхода с поймы; 2 – начало затопления; 3 – период существования транзитного потока; 4 – спад; 5 – границы затопления при подъеме уровня воды; 6 – границы встречи вод, поступающих с низовой и верховой 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

При пойменной многорукавности понятие пойменных массивов теряется. Они могут быть выделены только применительно к отдельным протокам.

Если в качестве основной цели поставить оценку степени устойчивости пойм, то при их типизации оказывается необходимым учесть следующие виды пойменных деформаций:

- деформации речных русел в плане, ведущие к плановым смещениям пойменных массивов (разрушению прибреговых участков и созданию новых участков пойм);
- деформации поверхности пойм потоком во время их затопления, выражающиеся в аккумулятивно-эрозионных явлениях на ней.

Для типизации плановых деформаций пойм, очевидно, требуется, прежде всего, установить тип руслового процесса, поскольку, как уже неоднократно указывалось, каждому типу процесса свойственны свои виды плановых деформаций русла (поймы).

Особенности деформаций поверхности поймы зависят, прежде всего, от глубины ее затопления, т. е. от водного режима. Они также зависят от строения поверхности поймы, по которой движется поток в период затопления. Таким образом, в конечном итоге, особенности деформаций поверхности поймы зависят от характера взаимодействия потоков, возникающих при ее затоплении, с поверхностью поймы. Характер этого взаимодействия оказывается различным в разные фазы половодья (паводков).

В начальные и конечные фазы подъема уровня особенно ярко должна проявляться зависимость пойменных течений от особенностей строения поверхности поймы, их подчиненность ориентировке основных аккумулятивных и эрозийных образований на пойме. При наибольших глубинах затопления поймы эта зависимость ослабевает или даже вовсе может исчезнуть, а направление и скорость течения будут определяться лишь разницей отметок уровня воды в начале и конце данного пойменного массива.

Поскольку рельеф поверхности поймы создается в ходе плановых русловых деформаций, то легко видеть, что и деятельность потоков, возникающих на ней в период затопления, в той или иной мере оказывается связанной с типом руслового процесса.

Таким образом, в качестве основных классификационных признаков для типизации пойменных массивов необходимо принять тип руслового процесса, определяющий особенности плановых деформаций этого массива и особенности взаимосвязи пойменных течений с характером строения его поверхности, влияющей на развитие эрозийно-аккумулятивных процессов на ней.

Так как современные поймы формируются и современным русловым аллювием, то при выделении типов пойменных массивов крайне важно учесть состав этого аллювия и прежде всего соотношение крупности транспортируемых потоком взвешенных и донных наносов, которые образуют основные фации его, слагающие пойму. Донные наносы образуют ее основание (фундамент) – русловую фацию, взвешенные – верхние

слои поймы – пойменную фацию аллювия. Подробно вопрос о влиянии состава наносов на тип поймы рассмотрен ниже.

### **б) Основные типы пойм**

Используя указанные выше признаки, можно выделить следующие основные типы пойм.

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 наибольшей мере, чем во всех других случаях совпадает со средней линией русла. Такое размещение пойменных течений обуславливает возникновение неровной или слабоволнистой (береговые валы вдоль русла) поверхности поймы и 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. 1).

Поймы свободно меандрирующих рек. Для них характерно значительно более сложное строение поверхности, рельеф которой представлен разновысотными системами вееров 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 приводит к появлению обособленного участка поймы, огибаемого старицей (действующей, с водой, или занесенной). Последующий повторяющийся цикл деформаций ведет к появлению новых систем вееров.

Легко заметить, что сложный рельеф поверхности поймы, создающийся при свободном меандрировании, обуславливает возникновение сложных течений в период ее затопления, и лишь при очень больших глубинах затопления влияние рельефа

поймы на структуру пойменных течений может значительно ослабевать 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 системы вееров перемещения русла и т. п.) (рис. 2).

Таким образом, при оценке взаимодействия рельефа поймы и пойменного потока необходимо оценивать его применительно к каждой фазе затопления.

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 из года в год намечаются постоянные пути движения воды по пойме и образуются русла этих пойменных потоков, в межень полностью высыхающих или сохраняющих обычно воду лишь в плёсах, 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.

Поймы рек с незавершенным меандрированием. При описании пойм свободно меандрирующих рек говорилось о существовании постоянных сосредоточенных потоков на затопленной пойме, образующихся при обтекании разновысотных сегментов поймы (вееров перемещения русла). Поймы рек при незавершенном меандрировании представляют собой дальнейшее развитие спрямляющих протоков, возникающих на участках с большой глубиной затопления поймы и превращающихся в постоянно действующие (в половодье и межень) спрямления



излучин (рис. 3). Однако, поскольку при незавершенном меандрировании в пределах данного массива поймы структура ее рельефа менее сложна, чем при свободном меандрировании, 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 вееров 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, 1965] было установлено, 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 ниже расположенным участкам реки.

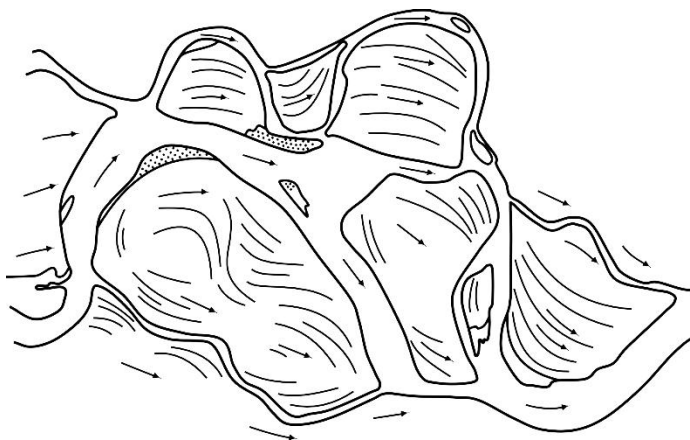


Рис. 3. Пойменный массив при незавершенном меандрировании. Течения на пойме согласуются с рельефом ее поверхности и направлением проток во все фазы развития транзитного потока

Таким образом, при незавершенном меандрировании течения на пойме, в общем, значительно менее сложны, чем при свободном меандрировании. Основные деформации поймы

проявляются в разрушении ее на подмываемых берегах излучин, в образовании новых участков на выпуклых берегах и в размывах поверхности, ведущих к появлению спрямляющих протоков. При этом указанные деформации длительное время происходят однонаправленно – 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 спрямляется. Старое же главное русло начинает постепенно заноситься, но еще длительное время может определять местные пойменные течения.

Поймы рек при пойменной многорукавности (рис. 4). На участках русла с поймой, затопляемой еще больше, чем при незавершенном меандрировании, последнее может привести к появлению сложной системы проток. 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.

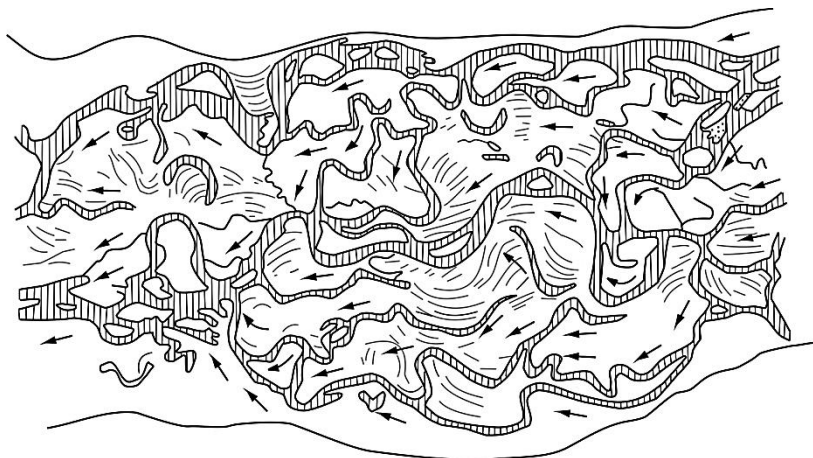


Рис. 4. Участок реки с пойменной многорукавностью. Течения на затопленной пойме хорошо согласуются с направлением протоков во все фазы половодья

Так, например, при перемещении по руслу крупных песчаных гряд они могут перекрывать начало меньших протоков, выпадающих в главную. По мере сползания этих гряд возможно возобновление течения в ранее перекрытых меньших протоках.

Каждый из пойменных протоков может развиваться и деформироваться по разным схемам. На одних могут возникать разновидности меандрирования, на других – побочный тип процесса и т. п. При пойменной многорукавности пойменные массивы, по-видимому, следует выделять по правилам, указанным для свободного меандрирования, ориентируясь при этом на русла главных протоков.

В целом на подобном участке основные течения обычно согласуются с направлением протоков. Лишь при очень высоких половодьях могут возникнуть течения, направление которых не согласуется с направлением протоков и определяется общей ориентировкой русла в речной долине, 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, согласные 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 протоков.

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. 5). Они обладают различной степенью подвижности – от песчаных или галечных отмелей с обнаженной поверхностью и неразвитой пойменной фацией аллювия и ежегодной большой подвижностью, до островов с развитой пойменной фацией, задернованных или даже облесенных, сохраняющихся от года к году, но претерпевающих большие переформирования при очень высоких половодьях, когда они, по сути дела, также представляют собой подвижные русловые образования.

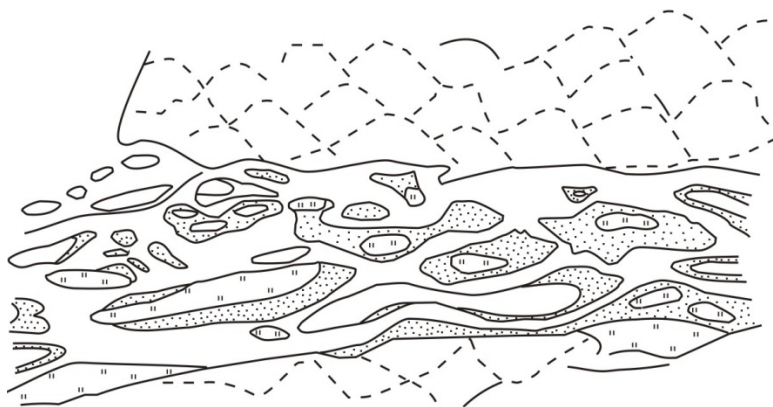


Рис. 5. Островная пойма, формирующаяся в ходе руслового процесса осередкового типа. Пунктиром показаны затесненные пойменные протоки

На такой пойме постоянно происходящее перераспределение стока между протоками создает особенно большую неустойчивость пойменных течений и возможность резкого изменения 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.

### ***в) Разновидности типов пойм***

В предыдущем разделе были выделены основные типы современных пойм, создавшиеся при русловом процессе разного типа.

Поскольку русловый 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

оказывало увеличение глубины и длительности затопления поймы, т. е. особенности водного режима. Главные особенности пойм при ограниченном меандрировании обуславливаются влиянием ограничивающего фактора, препятствующего развитию свободных меандр.

При осередковом типе руслового процесса наряду с указанными выше факторами ярко проявляются 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 и 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 недостаточно для формирования пойменной фации, поймы оказываются в общем пониженными, но при этом имеют резко выраженную верховую часть пойменного массива и сильно пониженную низовую; обычно имеются достаточно отчетливые ряды береговых валов, ориентированных согласно с положением излучины, и мелкие эрозионные образования на поверхности поймы. В случае же, когда существуют условия, благоприятные для формирования пойменной фации, разновысотность верховых и низовых частей пойменных массивов оказывается меньше, сами массивы в целом повышены, поверхность их выровнена и хорошо закреплена растительностью. При этом если река образует слабо выраженные 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, неразвитая пойменная фация аллювия; при наличии значительного содержания взвешенных наносов формируются так называемые глинистые поймы, характерные двучленным аллювием с сильно развитой пойменной фацией.

Песчаные поймы подразделяются на несколько разновидностей.

Песчано-гривистые поймы характеризуются следующими основными свойствами.

Русло подвержено интенсивным плановым деформациям, выражающимся в циклическом развитии излучин до состояния петель, завершающемся образованием стариц.

Благодаря частым и интенсивным переформированиям излучин и связанным с этим перемещением не только их, но и всего пояса меандрирования общая поверхность пойм 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. Для этой разновидности песчаных пойм 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, озерков и т. п. Гривистый рельеф будет сказываться на пойменных течениях главным образом в период начала подъема и в конце спада.

Этот тип пойм обычно встречается на реках с водосборами, слабо расчлененными, распаханными и имеющими песчаные покрытия.

Такими поймами обладает р. Днепр до Днепропетровска, р. Припять и многие крупные и средние реки этого бассейна.

Можно выделить и другие разновидности песчаных пойм, что связано с увеличением в объеме взвешенных наносов.

Ступенчато-гривистая пойма. Образование этой разновидности песчаных пойм связано, по-видимому, с появлением предпосылок к образованию надпойменной террасы: широкая долина с сосредоточием активной части потока в относительно узкой полосе, увеличение объемов взвешенных наносов, переносимых потоком, и формирующих наилок, способствующий закреплению поверхности поймы, снижение базиса эрозии, например, в результате спрямления петель снижения уровня воды в водоприемнике, сработки намеченных гряд и т. п.

В этих условиях создаются две возрастные ступени – пониженная, молодая гривистая пойма 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 в Сибири). 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 верхних течениях Печоры, Камы, Оби, Белой и других рек, особенно северных.

Останцево-гривистая пойма по Еленевскому представляет собой дальнейшую стадию развития ступенчато-гривистой поймы, обусловленную колебаниями базиса эрозии, ослаблением воздействия факторов, способствующих закреплению поверхности поймы, наконец, большой древностью существования речной долины. Еленевский указывает, что в лесной зоне часты ступенчато-гривистые поймы, в безлесной, более древней – останцево-гривистые.

Надо полагать, что отсутствие ступеней и переход к системе разновысотных плоскостей на поверхности поймы могут быть связаны и со смещениями пояса меандрирования, когда останцы представляют собой не остатки надпойменной террасы, а отключившиеся из плановых деформаций русла участки поймы, расположенные внутри отчленившихся староречий.

В этих условиях правомерно ожидать особенно сложные течения на 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 слабо развитой.

Иные типы пойм возникают в ходе свободного меандрирования, когда взвешенные наносы способны формировать мощный наилк – развитую пойменную фацию аллювия.

К ним принадлежат следующие разновидности пойм.

Возвышенная глинисто-гривистая пойма. Сохраняя основные черты песчаных пойм, глинистые типы обычно обладают большей высотой (накопление наилка), относительным ослаблением плановых деформаций и деформаций поверхности поймы течениями, возникающими на ней в период затопления.

Для возвышенной 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 поздними максимумами (май, июнь).

При этом типе пойм уровни грунтовых вод залегают глубоко (до 10 м на гривах); наблюдается разрыв с грунтовыми водами коренных берегов. Пониженная прирусловая часть пой-



мы 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 небольшой глубины затопления.

Пониженная суглинисто-гривистая пойма. Этот тип пойм связан как с укрупнением состава взвешенных наносов (образуют суглинки), так, возможно, и с уменьшением глубины и продолжительности затопления поймы (10-30 дней) и, по утверждению Еленевского, распространен больше, чем предыдущий. При этом типе пойма понижена. Повышена ее прирусловая часть, но в то же время имеется пониженная притеррасная, на которой возможен длительный застой воды, а в период половодья возникновение параллельных реке потоков.

Обычно пониженные суглинисто-гривистые поймы распространены на менее крупных реках, чем возвышенные глинисто-гривистые.

При незавершенном меандрировании различные соотношения между донными и взвешенными наносами также приводят к образованию разновидностей пойм.

Крупногривисто-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, знаменует собой переход 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 крупногривисто-песчаных пойм (см. выше) не образуют постоянной сети.

Что касается влияния соотношений взвешенных и донных наносов при других типах руслового процесса, то этот вопрос уже был рассмотрен выше.

Надо отметить, что существует ряд других факторов, оказывающих воздействие на формирование особенностей пойм. Так, Еленевский выделяет таежно-аласную пойму, образу-

щуюся в районах проявления термокарста, делювиально-овражную и скрытно-гривисто-болотную, занятую накоплениями торфа.

Легко заметить, 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 болотнообразовательного процесса. Явление термокарста способно вызвать появление протоков на пойме, не обусловленных особенностями водного режима или соотношением взвешенных и донных наносов.

Все эти факторы оказывают наибольшее влияние на поймах, образующихся на узких долинах, т. е. преимущественно в условиях ограниченного меандрирования.

Рассматривая типы речных пойм, необходимо остановиться на тех из них, которые могут быть названы унаследованными.

Под термином «унаследованные» следует понимать такие поймы, происхождение которых не обусловлено работой современного потока. Они могли создаваться в речных долинах, сформировавшихся в период сброса флювиогляциальных вод, причем часто могут быть не речного, а озерного происхождения. Такие образования могут называться поймой современной реки только потому, что представляют собой затопляемую 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 рек Припяти, Нижней Волги, Оки в пределах Мещерской низменности, Оби на участках многоорукавного русла и других, где общая ширина затопляемой части дна долины также составляет десятки километров.

В пределах этих участков рек современная пойма, т. е. созданная работой современного потока, занимает лишь небольшую часть затопляемого дна долины.

Унаследованная пойма может быть и на узких участках речных долин, но с недеформирующимся в плане руслом, т. е. может иметь небольшую ширину.

Таким образом, типы и размеры унаследованных пойм могут быть различными. Еленевским для случая отсутствия или слабого развития плановых деформаций выделяются две группы пойм. Первая из них названа им неразвитой, вторая – обвалованно-равнинной.

К неразвитым поймам отнесены такие, когда русло реки врезано в коренные, ледниковые, или древнеозерно-аллювиальные породы, или в торфяники. Вследствие врезанности русла в плохо поддающиеся размыву породы плановые деформации его отсутствуют. Пойма имеет плоский нерасчлененный рельеф, слабо развитую пойменную фацию аллювия, причем сосредоточенную в прирусловой части. Например, при протекании 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. Подобные поймы встречаются на малых и средних реках. Выделяются следующие их разновидности.

Надморенная пойма. Русло реки врезано в морену. Имеется небольшой береговой вал вдоль прямого, русла; тонкий суглинистый наилок. Характерна для узких долин (например, р. Волга до устья р. Унжи).

Надкоренная пойма. Русло врезано в коренные породы. Поверхность ровная, но благодаря бурным половодьям испещрена многочисленными эрозионными рывтинами, ничего общего не имеющими с гривами и ложбинами, наблюдающимися на реках с плановыми деформациями.

Древнеозерно-торфяная. 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, обычны травяные болота, иногда перекрытые глинистым наилком, представленным тонкими отложениями. Рост торфа приводит к появлению незатопляемых участков поймы. Такие поймы обнаруживаются на реках Пише, Сереже, Дубне, Яхrome и др.

Озерно-плавневая пойма. Подпруженная озером река с многочисленными протоками. Острова низкие, тростниковые; округлые зарастающие озера. На островах узкие прирусловые валики высотой 30-50 см; 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). Для этой поймы характерны три параллельные ступени вдоль путей стока.

Из приведенных описаний видно, что все разновидности неразвитых пойм являются типичными унаследованными поймами. 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 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 пониженным притеррасьем. Это повышение образует прибереговой обширный вал. В результате нарастания вала поток оказывается все более стесненным, вследствие чего активизируется и начинается вынос песчаных наносов на поверхность поймы. Такие поймы широко распространены в лесной и степной зонах.

Подтипы обвалованной поймы различаются главным образом по ее высоте.

Возвышенная равнинная пойма обычно наблюдается в сужениях долин до 3 км шириной и нередко достигает 6-10 м над меженью, часто распахана. В основании поймы глинистые отложения; с поверхности часты выносы песков слоем до 2-4 м вследствие интенсификации руслового процесса. В притеррасной части часты выносы делювия. Затопление кратковременное, не более 10 дней. Такие поймы имеют верхняя Ока, верхний Дон, верхняя Сухона, верхняя Печора.

Пониженная 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 часты топи, заросли ольхи, иногда солончаки.

Таковы поймы р. Волхова, 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, выделенные Еленевским обвалованные поймы, по-видимому, также могут быть отнесены к унаследованным, но подвергающимся более интенсивному воздействию современного руслового процесса, приводящему к образованию прибреговых повышенных их частей (прибрегового вала). Можно также предположить, что образование последней 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, Еленевским выделяется группа 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 слабо развитую пойменную фацию, представленную глинистым иллом.

По степени устойчивости островов выделяется стародельтовая пойма (верховья дельты, наиболее устойчивые острова), плавневая – неустойчивые, низменные (0,5-1 м над меженью) острова, недавно вышедшие из-под уровня моря, характерные повышенными берегами в верховой части и пониженным ухвостом, и подводная пойма — формирующиеся вдоль внешней морской окраины поймы подводные скопления наносов в виде песчаных затопленных отмелей.

Наконец, для завершения обзора типов речных пойм следует упомянуть о параллельно-гривистых поймах, выделяемых и Еленевским и Шанцером. Как указывалось ранее, происхождение этих пойм не вполне ясно. У Еленевского эти поймы названы 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 озера.

Основная толща поймы сложена русловым аллювием, песками. Пойменная фация развита слабо и представлена супесями и суглинками. Нередко на гребнях валов она отсутствует.

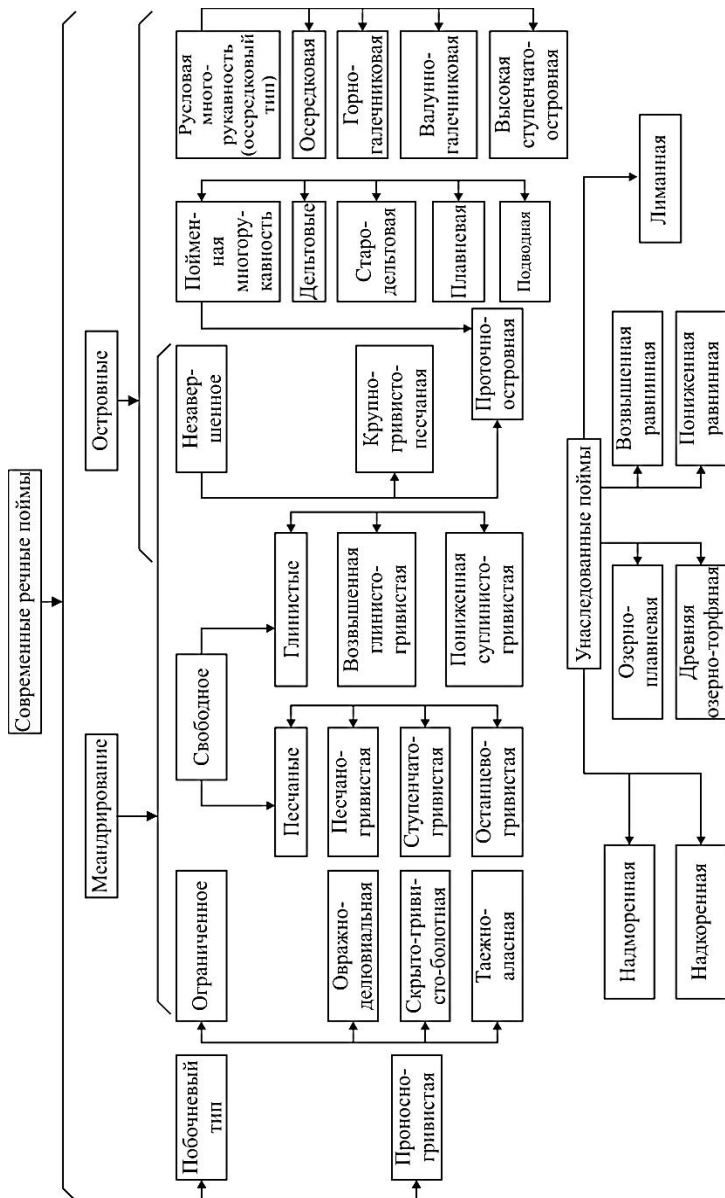


Рис. 6. Схема, показывающая связь разновидности пойм, выделенных Еленевским, с типами руслового процесса, предложенными ГГИ

Шанцер считает, что указанные гривы (валы) образуются в результате разрастания в длину побочной 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 процессе побочного 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 побочной 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 побочного типа можно только очень условно.

Все описанные выше типы пойм систематизированы в виде графической схемы, помещенной на рис. 6, иллюстрирующей их связи с типами руслового процесса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Еленевский Р.А. Вопросы изучения и освоения пойм. – М.: Изд-во ВАСХНИЛ, 1936.
2. Шанцер Е.В. Аллювий рек умеренного пояса и его значение для познания закономерностей строения и формирования аллювиальных свит – Труды Ин-та геологических наук АН СССР, вып. 135, сер геол. № 55, 1951.
3. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне – Изд. АН СССР, М., 1955.
4. Русловой процесс / Под ред. Кондратьева Н. Е. – Л.: Гидрометеоздат, 1959.
5. Попов И.В. Методические основы исследований руслового процесса. – Л.: Гидрометеоздат, 1961.
6. Попов И. В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство. – Л.: Гидрометеоздат, 1965.

## **О СЕТЕВЫХ РУСЛОВЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ**

Накопленный в Государственном гидрологическом институте многолетний опыт обеспечения строительного проектирования сведениями о русловом процессе показал чрезвычайную скудость данных о деформациях речных русел и пойм, особенно о смещениях бровок берегов русла в плане. Между тем именно эта характеристика имеет особенно важное значение при выборе места расположения сооружений на берегах рек и в поймах, оптимальных конструкций этих сооружений и наиболее эффективных средств их защиты. Недостаток натуральных данных о деформациях речных русел и пойм ограничивал в возможности дальнейшего развития гидроморфологической теории руслового процесса и основанных на ней методов расчетов и прогнозов русловых деформаций.

Все это побудило ГГИ поставить перед ГУГМС при Совете Министров СССР вопрос о необходимости организации и проведения сетевых русловых наблюдений.

Основной целью сетевых русловых наблюдений является получение фактических данных о деформациях речных русел и пойм, выявление режима этих деформаций как в разные по водности и стоку наносов годы, так и внутригодовых (сезонных). Одновременно с этим должны были получить характеристики факторов, определяющих деформации, и выявить связи между ними и гидравлическими и морфологическими характеристиками руслового процесса.

Методической основой проведения всех этих наблюдений является гидроморфологическая теория руслового процесса, разрабатываемая в ГГИ. В соответствии с этой теорией, которая в настоящее время широко использована при составлении нормативных документов, надлежит изучать деформации существующих в реках и на поймах морфологических образований. Эти морфологические образования достаточно разнообразны, развиваются по различным схемам и обладают различными закономерностями своего развития и взаимодействия с сопутствующей им гидрологической обстановкой. Выделенные при разработке гидроморфологической теории типы морфологических образований на реках имеют достаточно четкие внешние признаки. Обнаружение этих образований и знание схем их развития уже дает возможность предвидеть, как будут происходить переформирования речного русла, т. е. содержит элементы прогноза. При ис-



следованиях отдельных макроформ речных русел (типов морфологических образований, определяющих внешний облик русла) весьма существенно учитывать взаимодействие смежных форм русла, например, речных излучин, побочней и др., а также иметь возможность получать осредненные их характеристики.

По этим причинам русловые наблюдения должны охватывать участки рек значительного протяжения, от нескольких километров до десятков и сотен их в зависимости от размеров реки. Все эти принципы соблюдаются при производстве сетевых русловых наблюдений.

Исследование морфологических и гидравлических характеристик больших по протяжению участков – задача весьма трудоемкая. Поэтому необходимо различать два вида наблюдений – общие и детальные

При общих наблюдениях основной задачей является установление типов макроформ, их детальное описание и производство систематических наблюдений, в основном за их плановыми деформациями. Это достигается путем производства так называемой морфологической съемки – картирования на готовой картографической основе, например на аэрофотоснимках, изменений в положении макроформ. Такие съемки производятся один раз в год и дают возможность получить массовый материал о характере и размерах деформаций бровок берегов русла и русловых образований, а также дают возможность судить о влиянии водного режима на их размеры.

Иная задача стоит перед детальными наблюдениями. Они выполняются, как правило, на 2-3 смежных макроформах речного русла, наиболее типичных для участка общих наблюдений. Основной их задачей является выявление внутригодового режима деформаций и его связи с определяющими факторами – гидравлической и гидрологической обстановкой. Наблюдения производятся обычно пятью сериями в год, в разные фазы водного режима. В результате их проведения получают схемы деформаций макроформ, структуры скоростных полей потока, картограммы донных отложений, данные об уклонах свободной водной поверхности, о грядовом движении наносов и т. д.

И при общих, и при детальных наблюдениях ведутся также наблюдения за изменением характеристик водного режима и стока наносов, за ледовыми явлениями. Они осуществляются по обычным для гидрометстанций программам. Сами наблюдения

за русловым процессом осуществляются принятыми на сети этих станций приборами и оборудованием.

Таким образом, в результате сетевых русловых наблюдений впервые будут получены качественные и количественные суждения о режиме деформаций целостных морфологических образований – макро-, мезо- и микроформ речных русел в различных природных условиях, т. е. при разных типах руслового процесса, а также будут получены характеристики сопутствующих факторов. Это необходимо для дальнейшего развития теории руслового процесса и методов его расчетов и прогнозов. Очевидную инженерную ценность представляют и фактические данные, полученные при наблюдениях.

В соответствии с указаниями ГУГМС русловые наблюдения были начаты в 1971 г. в ограниченном числе УГМС с тем, чтобы до постановки широких исследований руслового процесса в натуре уже накопить опыт их организации и проверить разработанные ГГИ методические рекомендации по их проведению. К настоящему времени сетевые русловые наблюдения проводятся в 27 УГМС. Ниже приводятся краткие сведения о сетевых русловых наблюдениях по состоянию на 1976 г. Предварительно укажем, что выбор перечисленных ниже участков наблюдений производился УГМС в соответствии с требованиями, которым должны удовлетворять эти участки. Эти требования были сформулированы ГГИ и разосланы пятнадцати УГМС в виде методического письма. В 1971 г. при ГГИ был проведен семинар по организации и методам проведения сетевых русловых наблюдений. На этом семинаре были рассмотрены предложения УГМС по выбору участков наблюдений и для каждого из них разработаны программы производства работ.

В последующем наблюдения производились в соответствии с опубликованными ГГИ «Временными методическими указаниями по организации и производству сетевых русловых наблюдений» (Л., Гидрометеиздат, 1973).

В 1974 г. при ГГИ был проведен второй семинар, на котором исполнители работ доложили первые итоги их проведения. Положительные результаты этих работ и позволили поставить вопрос об издании в 1975 г. специального сборника в серии Трудов ГГИ, посвященного итогам сетевых русловых наблюдений.

Рассчитывать, что за столь малые сроки с момента начала наблюдений будут получены фундаментальные сведения о русловом процессе и так недостающие данные о режиме дефор-

маций, было бы неправомерно. Однако, учитывая острую потребность в натуральных материалах по русловому процессу на реках, как в естественных условиях, так и при регулировании стока воды и наносов – этих основных факторов руслового процесса, – имеет смысл получить данные, даже если они устанавливают только тенденции в развитии русловых форм.

1. Русловая станция Валдайской научно-исследовательской гидрологической лаборатории ГГИ на р. Поломети. Наблюдения начаты еще в 1955 г. Ведутся как общие, так и детальные наблюдения. Общая длина участка общих наблюдений составляет около 50 км. В верхней части этого участка, у с. Яжелбицы и в нижней его части у с. Зеленый Бор проводятся детальные наблюдения. У с. Яжелбицы исследовались деформации излучин и структура потока на поворотах русла, а также грядовое движение. Последнее изучалось с помощью специальной катушки установки, позволяющей охватить детальными наблюдениями движение гряд и структуру скоростного поля потока на участке длиной около 100 м. На нижнем участке детальных наблюдений, охватывающих 15 смежных свободно меандрирующих излучин, проводились наблюдения как за их деформациями, так и за строением скоростного поля потока в разные фазы водного режима. Многие работы станции, в частности производство морфологической съемки реки, легли в основу Временных методических указаний УГМС по организации и производству сетевых русловых наблюдений. Этой русловой станцией получен также ценный фактический материал по грядовому движению наносов и их связи с гидравликой русла и по гидравлике речных излучин, вносящий много нового в эти проблемы. В частности, исключительный интерес имеют полученные В. А. Виноградовым данные о зонах вихрей с вертикальной осью, возникающих на поворотах русла у вогнутого берега. Они образуют как бы вихревую подушку, отклоняющую динамическую ось потока от вогнутого берега к средней части русла. Это вынуждает по-новому рассматривать и механизм размыва вогнутого берега. Материалы наблюдений русловой станции ВНИГЛ неоднократно использовались при разработке проектов мелиорации поймы р. Поломети. Часть этих работ экспонируется на выставке достижений народного хозяйства в павильоне «Гидрометслужба».

В настоящее время русловая станция ВНИГЛ реорганизуется в методический центр по производству сетевых русловых наблюдений. Более подробные сведения о работах русловой станции содержатся в статье В. А. Виноградова.

2. Северное УГМС. Производятся наблюдения за деформациями русловых образований на р. Пинеге в условиях побочного типа руслового процесса, развивающегося на фоне ограниченного меандрирования, за транспортом донных наносов и сопутствующими гидрологическими и гидравлическими факторами. Длина участка 30 км. Наблюдения начаты в 1971 г. Выполнялись в составе гидрографической партии. Получены характеристики указанных выше процессов применительно к маловодным и средним по водности годам. Задачей является их изучение в многоводные годы. В статье (исполнителем этих работ является И. М. Жила) выясняются специфические особенности переформирования побочных скоплений наносов в этих условиях, их тесная связь с движением микроформ.

3. Верхне-Волжское УГМС. Наблюдения за деформациями основных морфологических образований в русле р. Волги па участке зоны влияния суточного регулирования Горьковской ГЭС. Его длина около 50 км. Наблюдения проводятся с 1971 г. Горьковской ГМО (Городец). Получены характеристики деформаций основных морфологических образований на разном удалении от створа ГЭС. Проводятся детальные наблюдения на приплотинном участке. Продолжение наблюдений диктуется необходимостью получения режима деформаций при разных характеристиках гидравлических условий.

В статье Н. А. Ярославцева и Т. И. Краснощековой анализируется ход деформаций в нижнем бьефе Горьковской ГЭС. Даны количественные оценки плановых смещений русла, прослежено сползание зоны приплотинного размыва, рассмотрена гидрологическая обстановка развития руслового процесса, влияние землечерпания на ход деформаций.

4. Северо-Кавказское УГМС. Исследование плановых и высотных деформаций русла р. Кубани в нижнем бьефе Краснодарского водохранилища, знание которых необходимо для разработки проекта мероприятий по обеспечению устойчивости плотины водохранилища и нормальной работы сооружений в нижнем бьефе. Наблюдения начаты с 1972 г. Получены первые данные о деформациях и сопутствующих им гидрологических и гидравлических условиях. Наблюдения требуется продолжать для получения режимных характеристик деформаций и в связи с продолжающейся разработкой русла реки в нижнем бьефе. Работы выполнялись Краснодарской ГМО. К сожалению, исполнители работ, представив полноценный, хорошо оформленный отчет, не дали статьи для настоящего сборника,

5. Северо-Кавказское УГМС. Исследования деформаций русла р. Волги и протоков Волго-Ахтубинской поймы в условиях резкого уменьшения ее затопляемости в связи с регулированием стока водохранилищем Волгоградской ГЭС им. XXII съезда КПСС. Кроме накопления режимных характеристик деформаций, необходимых для проектирования сооружений на участке р. Волги в нижнем бьефе ГЭС, наблюдения ведутся с целью проверки фонового прогноза перестроенной русла Волги и ее протоков, выпущенного ГГИ в 1963 г. Наблюдения ведутся с 1954 г. Волжской ГМО и были начаты по инициативе управления строительства ГЭС. Получены материалы, широко используемые при проектировании различных сооружений на участке длиной около 500 км ниже створа ГЭС. В 1974-1975 гг. полевые работы не производились в связи с необходимостью обобщения ранее выполненных исследований. Необходимо производство очередной морфологической съемки участка Волги длиной около 400 км и на протоках Волго-Ахтубинской поймы для продолжения режимного ряда и оценки фонового прогноза. В 1975 г. продолжались работы по обобщению этого материала, который может служить основой для издания монографии о русловом процессе Нижней Волги.

6. УГМС Украинской ССР. Наблюдения за деформациями русла р. Случь у г. Сарны с целью изучения влияния на них мостовых переходов. Наблюдения начаты с 1971 г. Проводятся ГМБ Житомир под руководством и при участии Киевской ГМО. Получены первые результаты о влиянии мостового перехода на развитие свободно меандрирующих излучин. Необходимо продолжение наблюдений для получения режимных характеристик деформаций (в разные по водности годы) и их детализация за счет усиления гидрометрических работ по изучению скоростного поля потока на излучинах. Предва-

рительные итоги изложены в статье Т. В. Самченко и С. Л. Жеребицкой. Авторам удалось выяснить основные тенденции развития излучин и их различия на участках выше и ниже мостового перехода. Для количественных обобщений ряд наблюдений еще очень мал.

7. Западно-Сибирский РНИГМИ. Исследования руслового процесса р. Оби в зоне выклинивания Новосибирского водохранилища ведутся лабораторией русловых процессов РНИГМИ с 1971 г. Получены ценные сведения о деформациях русла р. Оби и ее протоков, используемые проектными организациями и при разработке методов расчетов и прогнозов руслового процесса. Часть работ выполняется на договорных началах с Ленгипроводхозом. Наблюдения следует продолжать для получения режимных характеристик деформаций.

8. Западно-Сибирский РНИГМИ. Исследования деформаций в нижнем бьефе Новосибирского водохранилища на р. Оби ведутся с 1974 г. для обеспечения местных проектных организаций данными о деформациях русла, необходимыми при решении вопроса о размещении сооружений на берегах Оби, о защитных мероприятиях и о режиме эксплуатации сооружений. Проводятся лабораторией прикладной гидрологии РНИГМИ. Их следует продолжать.

9. Западно-Сибирский РНИГМИ. Исследования деформаций русла и поймы р. Кеть у села Максимкин Яр проводились гидрографической партией по требованию нефтедобывающих организаций. С 1975 г. наблюдения продолжают лабораторией русловых процессов РНИГМИ. Получены важные в практическом отношении и для развития теории руслового процесса данные о закономерностях развития свободно меандрирующих излучин и о формировании речной поймы в этих условиях. Наблюдения требуют продолжения для получения режимных характеристик.

10. Западно-Сибирский РНИГМИ. Планируется участие лаборатории русловых процессов в работах по исследованию руслового процесса на р. Оби для гидрологического обоснования генеральной схемы развития г. Барнаула. Подробнее о некоторых итогах работ РНИГМИ по русловым наблюдениям изложено в статьях В. С. Лесневского и В. В. Лысенко.

Лесневский проводил наблюдения за деформациями излучин р. Кеть и поверхности поймы этой реки в разные фазы водного режима. Им получены новые представления о формах размыва вогнутого берега излучины, определена их связь с характером пойменных отложений, выявляется режим затопления и опорожнения поймы и развития на ней течений и связанных с этим деформаций поверхности. Столь подробные характеристики указанных явлений имелись лишь в экспериментальных исследованиях ГГИ.

Лысенко посвящает свою статью итогам наблюдений за деформациями русла р. Оби в зонах выклинивания подпора Новосибирского водохранилища и в его нижнем бьефе. Их задачей являлось выяснение отличий в развитии морфологических и гидравлических явлений в условиях естественного и регулируемого водного режима. Прослеживая развитие отдельных морфологических образований, автор констатирует появление новых тенденций деформаций, возникших после начала регулирования стока, пытается выяснить особенности баланса наносов и новых гидравлических условий р. Оби. Намечаются вопросы будущих исследований.

11. Омское УГМС. Исследование руслового процесса на р. Иртыше в районе г. Омска. Наблюдения начаты в 1973 г. Получены данные о дефор-

мациях р. Иртыша, используемые при прокладке и эксплуатации переходов трубопроводов и проектировании рассеивающих выпусков сточных вод г. Омска. Необходимо расширение наблюдений и их продолжение на основе большой детализации.

12. УГМС Узбекской ССР. Изучение руслового процесса р. Сырдарья у пос. Чильмахрам. Начато в 1972 г. по местной инициативе. Проводится Гидрографической партией Кайраккумской ГМО. Требуется продолжать наблюдения.

13. УГМС Грузинской ССР. Исследования русловых деформаций русловых образований на горных реках. Исследования ведутся на р. Риони и некоторых ее притоках. Изучается движение галечных гряд в русле рек, развитие излучин. Проводятся исследования гидравлики потока на участках различных морфологических образований. Наблюдения начаты с 1971 г. В УГМС действует сектор русловых сетевых исследований. Непосредственные наблюдения выполняются Кутаисской ГМС первого разряда, которая была специализирована в этих целях. Требуется продолжение наблюдений для накопления режимных характеристик деформации.

14. УГМС Грузинской ССР. Исследования руслового процесса р. Риони на приустьевом участке у г. Поти. Начаты в 1975 г. по инициативе УГМС, проводятся Кутаисской ГМО. Материалы в ГГИ еще не поступили, но программа наблюдений может быть одобрена. Наблюдения следует продолжать. Работы по горным рекам обобщены в статье О. Д. Шаутидзе (УГМС Грузинской ССР), которая посвящена русловому процессу р. Риони. В статье Шаутидзе русловой процесс горной реки рассматривается с широких позиций, в ней содержатся морфологические и гидравлические обобщения.

15. Красноярское УГМС. Исследования влияния зоны выклинивания подпора Красноярской ГЭС на русловой процесс р. Енисей у устья притока р. Абакан. Наблюдения начаты в 1972 г. Проводятся Дивногорской ГМО, требуется их продолжение для освещения руслового процесса в разные по водности годы. Их первые результаты публикуются в настоящем сборнике в статье В. А. Крицкого и В. И. Литвинского.

Учитывая большое разнообразие типов деформаций речных русел и пойм в различных природных условиях, все растущие требования со стороны народнохозяйственных организаций по оценке руслового процесса при проектировании практически всех сооружений на реках, для разработки оптимальных конструкций сооружений, мероприятий по обеспечению бесперебойной их эксплуатации и для совершенствования методов расчетов и прогнозов русловых переформирований, целесообразно организовать сетевые русловые наблюдения во всех УГМС, доведя число участков наблюдений до 60-70.

Основной трудностью в организации сетевых русловых наблюдений является то обстоятельство, что до настоящего времени вопрос об их организационных формах, штатах, средствах оборудования и других видах материального обеспечения остается открытым. Достаточно указать, что в положении о

Гидрометслужбе отсутствует указание о возложении на нее обязанности изучения руслового процесса, хотя русловой процесс является неизбежным следствием стока воды и наносов, а его недостаточный учет приводит к значительному ущербу для народного хозяйства. Это следует из подготовленного ГГИ и переданного в ГКНТ доклада, обобщающего сведения, полученные более чем от 40 министерств и ведомств.

Отсутствие четких организационных форм сетевых русловых наблюдений приводит к тому, что их организация зависит от личных взглядов руководителей УГМС и НИУ или случайного наличия соответствующе подготовленных специалистов. Часто они рассматриваются как дополнительная внеплановая работа, к тому же не обеспеченная штатом и средствами, тем более что сетевые русловые наблюдения должны по преимуществу выполняться экспедиционным путем. Так, общие наблюдения требуют выезда в поле 2-3 раза в год на 3-5 недель, а детальные требуют проведения 5-6 серий в год продолжительностью 2-3 недели каждая.

Наиболее ответственно к организации русловых исследований отнеслось руководство Западно-Сибирского РНИГМИ, которое нашло возможным создать специальное подразделение – лабораторию прикладной гидрологии. В УГМС Грузинской ССР создан специальный сектор русловых и селевых исследований, а гидрометстанция Кутаиси превращена в специализированную по русловым исследованиям. Северо-Кавказское, Верхне-Волжское и Красноярское УГМС создали группы русловых исследований при ГМО. Северное УГМС использует в этих целях гидрографическую партию в порядке выполнения отдельных заданий. УГМС УССР ведет работы на ГМС Житомир.

Недостаточное развитие русловых исследований и наблюдений в некоторых УГМС и использование имеющихся возможностей отнюдь не объясняется отсутствием подходящих объектов и требований со стороны народнохозяйственных организаций. И в УССР, и в Среднеазиатских и Сибирских УГМС имеется множество объектов для русловых наблюдений.

Для дальнейшего развития сетевых русловых наблюдений в системе ГУГМС необходимы следующие первоочередные мероприятия.

- а. Следует продолжать наблюдения во всех УГМС, в которых они были организованы, проводя их по действующим в настоящее время программам. Эти програм-

## О СООТНОШЕНИЯХ ШИРИНЫ И ГЛУБИНЫ РЕЧНОГО РУСЛА ПРИ РАЗНЫХ ТИПАХ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

Соотношения ширины  $B$  и глубины  $H$  русла рек уже многие десятилетия используются при гидравлических расчетах, включая оценку устойчивости речного русла, расходов наносов, расчетов масштабов моделей при лабораторных исследованиях и др. Они неизменно учитываются при выявлении связей морфометрических характеристик русла с определяющими факторами. Особенно повысился интерес к соотношениям  $B/H$  в связи с проектированием каналов для переброски стока, размеры которых сопоставимы с размерами рек.

На естественных реках соотношения  $B/H$  устанавливаются в результате длительно развивающегося процесса переотложения наносов потоком (руслового процесса) и, следовательно, носят устойчивый в многолетнем разрезе характер и могут быть использованы как аналоги для суждения о том, какие размеры и формы может принять канал, проложенный в размываемых грунтах в результате его длительной эксплуатации.

Несмотря на важность знания  $B/H$ , со времен разработки В. Г. Глушковым так называемого закона 1924 г.  $B/H = k$ , специальных исследований и схематизации данных о показателях формы русла, т. е. величинах  $B/H$ , тем более при разных типах руслового процесса практически не производилось. Учитывая все эти обстоятельства, автором были предприняты попытки исследовать соотношения  $B/H$  на естественных реках на массовом фактическом материале. В качестве исходных материалов были использованы лоцманские карты, топографические съемки речных участков, а также графики распределения морфометрических характеристик русла, имеющиеся в «Ресурсах поверхностных вод районов освоения целинных и залежных земель».

Условимся о том, что надо принимать за ширину и глубину русла. Для обеспечения сравнимости данных по разным рекам и съемкам различных дат целесообразно эти характеристики принимать такими, чтобы они отражали результаты длительно развивающегося руслового процесса и не зависели бы от высоты стояния уровня.

Исходя из принятого в гидроморфологической теории определения русла как части дна долины, в пределах которой перемещается основная часть донных наносов, за границы русла следует принимать выработанные потоком бровки меженных



берегов. Тогда ширина русла  $B$  должна определяться как расстояние между бровками его противоположных берегов и включать всю полосу перемещающихся рекой скоплений наносов.

Глубина русла  $H$  при этих условиях должна определяться как расстояние по вертикали между точками дна русла и отметками бровок меженных берегов, определяемыми в створе измерений  $B$ . Исходные материалы в большинстве случаев позволили надежно оценивать только наибольшие глубины в поперечном сечении русла. Таким образом, принятое в работе значение  $H$  соответствует наибольшей в створе глубине русла, считая от отметок бровок берегов. Измерения производились с расчетом освещения всех плёсов и перекатов по морфологически однородным (с одинаковым типом деформаций, т. е. русловым процессом) участкам.

Попытки выделить значения  $B/H$  отдельно для плёсов и перекатов не увенчались успехом и кривые обеспеченности их значений практически совпали.

Результаты определения величин  $B/H$  обобщались по данному участку реки с помощью кривых обеспеченности.

Значения  $B$  и  $H$  были измерены на 35 участках рек с различным типом руслового процесса по классификации ГГИ. Их длина составляла от 20-30 км до сотен километров (на крупных реках). Число створов определения  $B/H$  на участке колебалось от 15 до нескольких сотен значений.

Типизация ГГИ выделяет семь основных типов руслового процесса, каждый из которых характеризует определенную форму транспорта наносов и соответствует определенной транспортирующей способности потока. При каждой форме транспорта наносов возникают свои специфические русловые образования, что позволяет легко обнаруживать различные типы транспорта наносов. Так, русловая многорукавность, ленточногрядовый и побочный типы руслового процесса характеризуются сползаем по руслу так называемых средних форм – мезоформ, крупных грядообразных скоплений наносов, соизмеримых с размерами русла. Это разновидности ленточных гряд (собственно ленточные гряды, побочни, осередки). При разновидностях меандрирования (ограниченное, свободное и незавершенное) возникают более сложные образования – макроформы, представляющие собой комплексы морфологических образований, тесно взаимосвязанные в своем развитии. Макро-

формы представлены излучинами, развивающимися при каждом типе меандрирования по-разному. При ограниченном меандрировании они сползают, не меняя своих форм и размеров, при свободном меандрировании – проходят сложные повторяющиеся циклы развития, при незавершенном меандрировании эти циклы развития прерываются в результате образования спрямляющих излучины протоков.

Пойменная многорукавность – это многорукавные русла с пойменными островами, с постоянным перераспределением расхода воды и наносов и, как следствие, – с разными типами процесса (из числа перечисленных выше) в рукавах.

Отличительным свойством макроформ является интенсивный обмен наносами между руслом и формируемой в процессе их деформаций в плане поймой.

Для каждого участка измерений были построены кривые обеспеченности величин  $B/H$ . При их совмещении обнаружилось закономерное уменьшение величин  $B/H$  при переходе от русловой многорукавности к побочному типу руслового процесса, далее к незавершенному, свободному и ограниченному меандрированию (рис. 1, табл. 1).

Таблица 1. Значения  $B/H$  (50 %-ной обеспеченности) при разных типах руслового процесса

Тип руслового процесса	Число участков	Средняя ширина русла на участках, м		$B/H$	
		наименьшая	наибольшая	наименьшая	наибольшая
Русловая многорукавность	7	65	2110	30	350
Побочный тип	5	460	1730	50	140
Незавершенное меандрирование	3	4,7	874	2	160
Свободное меандрирование	13	4,7	820	2	85
Ограниченное меандрирование	7	9	1073	6	85

Предельные значения  $B/H$  составили 2 и 675.

В пределах каждого типа руслового процесса, как видно из данных табл. 1 и рис. 1, имеет место значительный диапазон значений  $B/H$ . Однако и при таких условиях наблюдаются су-

существенные различия этих значений и для малых, и для больших рек. Так, если при разновидностях меандрирования на малых реках  $V/H$  составляют 2-6, то при побочном типе и русловой многорукавности они равны 30-50, т. е. в 5-20 раз больше. На крупных реках эти различия также существенны и колеблются от 85 при свободном и ограниченном меандрировании до 160 при незавершенном и от 140 при побочном типе процесса до 350 при русловой многорукавности.

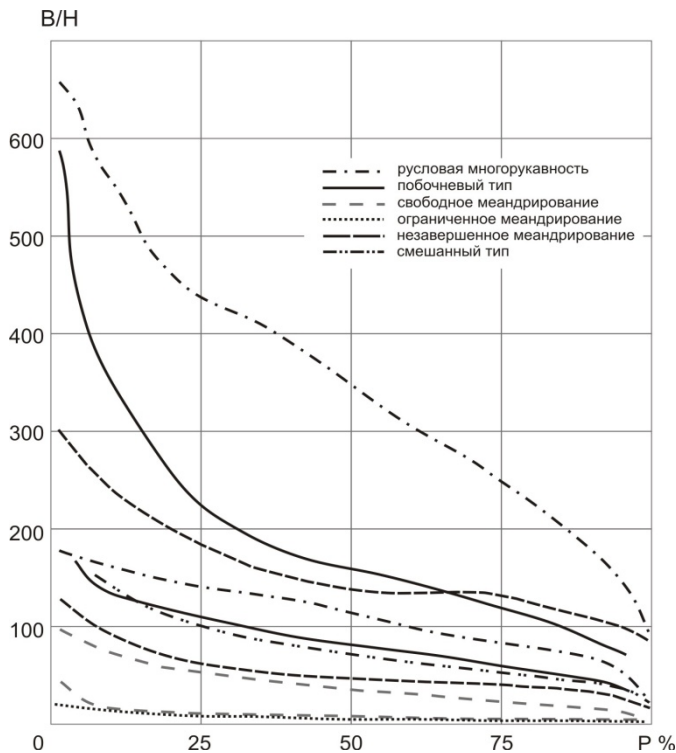
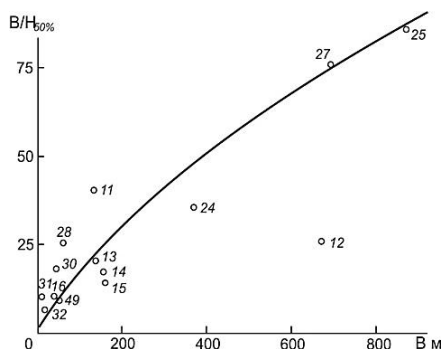


Рис. 1. Кривые обеспеченности  $V/H$ , разграничивающие разные типы руслового процесса

Возвратимся к значениям  $V/H$  в пределах одного типа процесса. Как указывалось, наблюдается большая их разница и можно утверждать, что на величины  $V/H$  оказывают влияние не только типы руслового процесса, но и масштабный эффект (размеры реки).

Ограниченность исходного материала позволила приближенно оценить влияние размеров реки на величины  $B/H$  только при свободном меандрировании (рис. 2). На этой связи одна точка, соответствующая участку р. Иртыша между 212 и 152-м км от устья, дает резко уменьшенные значения  $B/H$ . Здесь при ширине реки в среднем около 670 м глубины на плёсах составляют 25-20 м, что и дает в среднем  $B/H = 25$ . Этот участок р. Иртыша характерен повышенной поймой с затоплением ее 1 раз в 4 года, что свидетельствует о сосредоточенном в русле пропуске половодий. В годы несоответствия в прохождении половодий на реках Иртыше и Оби, кроме того, имеют место повышенные уклоны свободной водной поверхности в р. Ир-



тыше. Может также иметь значение то обстоятельство, что участок находится в зоне прогиба, а выше расположенный — в зоне поднятия, что может способствовать местному увеличению уклонов и врезанию русла.

Рис. 2. Связь  $B/H$  с размерами реки в условиях свободного и ограниченного меандрирования

Несмотря на приближенность этой связи, которая подлежит уточнению по мере накопления материалов, все же можно судить о том, что в диапазоне ширины русла между бровками меженных берегов от 20 до 850 м  $B/H$  увеличились от 5 до 85. Ориентируясь на эту кривую, можно установить следующие приближенные соотношения  $B/H$  и средней ширины реки:

$B$	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
$B/H$	5	17	24	40	50	60	67	72	82	90

Еще раз напомним, что все численные значения  $B/H$  следует рассматривать как приближенные и подлежащие уточнению за счет использования большего фактического материала, учета уклонов потоков и расхода донных наносов. Однако можно предполагать, что порядок цифр здесь оценен достаточно надежно.

Касаясь причин увеличения  $V/H$  с переходом от разнообразнейших меандрирования к побочному типу руслового процесса и к русловой многорукавности, уместно напомнить высказывание Н. Е. Кондратьева о том, что изменение формы русла представляет собой один из способов регулирования его транспортирующей способности [Кондратьев, 1968]. Если поток вынужден транспортировать большее, чем раньше, количество наносов, то для обеспечения этого транспорта он расплывает свое русло, т. е. меняет форму поперечного сечения. И лишь при коренных изменениях объемов наносов, поступающих в русло реки, изменение транспортирующей способности потока достигается сменой типа руслового процесса.

Этот вывод сделан Кондратьевым на основе анализа формул для расчета расходов донных наносов. Он показывает, что только формула Г. В. Лопатина отражает саморегулирование расхода донных наносов, т. е. имеет экстремум, в то время как все остальные приходят к выводу, что начавшееся увеличение стока наносов идет бесконечно. Это саморегулирование Кондратьев связывает с изменением формы поперечного сечения русла.

### **Выводы**

1. Выявлены большие различия в значениях  $V/H$  для равнинных рек. Они колеблются от 2 до 675.

2. Обнаруживается связь значений  $V/H$  с типами руслового процесса по классификации ГГИ, а поскольку каждому типу процесса свойственна своя транспортирующая способность, то можно утверждать, что значения  $V/H$  увеличиваются с ее увеличением. Верхними пределами  $V/H$  50 %-ной обеспеченности (для рек шириной более 500 м) для ограниченного и свободного меандрирования можно принять  $V/H$  равным 85, для побочного типа – 140, для незавершенного меандрирования – 160, для русловой многорукавности – около 350.

3. Обнаруживается влияние на величину  $V/H$  масштабного эффекта: с увеличением размеров реки значение  $V/H$  возрастает. При свободном меандрировании (около половины всех равнинных рек СССР) на малых реках шириной до 20 м  $V/H \approx 2$ , на реках шириной русла до 200 м  $V/H \leq 24$ , на реках шириной русла до 400 м  $V/H = 50$  и свыше 500 м  $V/H$  изменяется до 85-90.

4. Для принятия величин  $V/H$ , свойственных естественным рекам, в качестве аналогов для каналов переброски стока

требуются специальные исследования и выявление влияния уклонов, сопротивлений в руслах, расходов донных наносов и других факторов на основе привлечения обширного натурального материала. Проведенная работа по определению значений  $B/H$  равнинных рек показывает на целесообразность и перспективность подобных исследований. Они нуждаются в продолжении и более тщательном установлении связей формы русел с определяющими их факторами, в первую очередь со стоком наносов и гидравликой потоков, на более обширном фактическом материале.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Кондратьев Н. Е. Гидроморфологические процессы и методы их изучения. Автореф. дисс. на соискание ученой степени доктора технических наук. – Ленинград, 1968.–32 с.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ В ТРУДАХ ГГИ

1. Попов И.В. *Анализ продольного профиля рек для целей крупномасштабного картирования речной сети.* – Труды ГГИ, вып.4, 1949.
2. Попов И.В. *Изменение морфологических характеристик во времени как показатель направленности русловых процессов на меандрирующих реках.* – Труды ГГИ, вып.44/98/, 1954.
3. Попов И.В. *Процесс меандрирования речных излучин и его изучение при помощи аэрофотосъемки.* – Труды ГГИ, вып.49/103/, 1955.
4. Попов И.В. *О формах перемещения речных излучин.* – Труды ГГИ, вып.56/110/, 1956.
5. Пиньковский С.И., Попов И.В. *К вопросу о морфологических особенностях равнинных рек.* – Труды ГГИ, вып.56/110/, 1956.
6. Попов И.В. *Исследование морфологии рек при решении задач хозяйственного освоения пойм.* – Труды ГГИ, вып.74, 1960.
7. Попов И.В. *Баланс наносов речных участков и его использование для характеристики руслового процесса.* – Труды ГГИ, вып.94, 1962.
8. Попов И.В. *Применение морфологического анализа к оценке общих русловых деформаций р. Оби.* – Труды ГГИ, вып.94, 1962.
9. Попов И.В. *Русловые переформирования р. Волги на участке Волгоград-Астрахань.* – Труды ГГИ, вып.108, 1963.
10. Попов И.В. *Количественные показатели руслового процесса различного типа.* – Труды ГГИ, вып.116, 1964.
11. Попов И.В. *Применение гидролого-морфологического анализа при проектировании водозаборов.* – Труды ГГИ, вып. 120, 1965.
12. Попов И.В. *К вопросу о влиянии тектонических движений на типы руслового процесса.* – Труды ГГИ, вып. 136, 1966.
13. Кондитерова Э.А., Попов И.В. *О связи изменений плановых и высотных характеристик речных русел.* – Труды ГГИ, вып. 136, 1966.

14. Кондратьев Н.Е., Попов И.В. *Методические предпосылки к постановке сетевых наблюдений за русловым процессом.* – Труды ГГИ, вып. 144, 1967.

15. Попов И.В. *Типы речных пойм и их связи с типами руслового процесса.* – Труды ГГИ, вып. 155, 1968.

16. Кондитерова Э.А., Попов И.В. *О закономерностях изменения длин свободно меандрирующих рек.* – Труды ГГИ, вып. 169, 1969.

17. Попов И.В., Гаврин Ю.С. *Применение аэрофотосъемки к оценке процессов затопления и опорожнения речных пойм и развития пойменных течений.* – Труды ГГИ, вып. 183, 1970.

18. Кондитерова Э.А., Попов И.В. *К вопросу о связи скорости плановых деформаций речного русла с водностью реки и циклами морфологических переформирований.* – Труды ГГИ, вып. 183, 1970.

19. Кондратьев Н.Е., Попов И.В. *Исследования ГГИ в теории руслового процесса.* Докл. на юбилейной сессии Гидрологического института, окт. 1969 г. – Труды ГГИ, вып.171, 1971.

20. Попов И.В., Кочаненкова Н.П. *О морфологических особенностях речных пойм.* – Труды ГГИ, вып. 190, 1972.

21. Попов И.В., Кондитерова Э.А. *Прогноз русловых деформаций Волги на участке Саралевского водного узла в связи с проектированием улучшения его судоходных условий.* – Труды ГГИ, вып. 216, 1974.

22. Попов И.В. *О соотношениях ширины и глубины речного русла при разных типах руслового процесса.* – Труды ГГИ, 288, 1983.

23. Гендельман М.М., Попов И.В. *О развитии спрямлений речных русел.* – Труды ГГИ, вып. 307, 1987.

### **Статьи в других изданиях**

1. Попов И. В. *Русловой процесс как внешнее проявление твердого стока.* – Труды III гидролог. съезда, том V, Л., 1960.

2. Попов И. В. *Принципы выбора мест водозабора и трасс перехода ЛЭП через реки.* Доклады на науч.-техн. совещании по гидрометеорологическому обслуживанию тепловых электростанций и линий электропередач. – Изд. НТО энергетической промышленности, Львовское областное правление, Львов 1962.



3. Попов И.В. *Гидролого-морфологические основы теории руслового процесса и их использование при гидротехническом проектировании*. – "Метеорология и гидрология", №4, 1964.
4. Znamenskaya N.S., Kondratiev N.E., Popov I.V. *Hydro-morphological basis for studying river-bed deformations at unsteady flow*. – Proc. XI Congress IAHR, Leningrad, 1965.
5. Знаменская Н.С., Ляпин А.Н., Попов И.В. *Транспорт донных наносов*. Сб. докладов XIX Генеральной Ассамблеи геофизики и геологии в Женеве, 1967.
6. Попов И.В. В материалах к Всесоюзному совещанию по вопросам динамики и термики рек в связи с использованием водных ресурсов. (22-25 июня 1971 г.), М., 1971.
7. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Снисченко Б.Ф. *Теоретические основы прогнозов деформаций речного русла*. Докл. на VI Конференции Придунайских стран по гидрологическим прогнозам (14-19.06.1971). – Киев, 1972.
8. Попов И.В. *Методы оценки руслового процесса при строительном проектировании*. В кн. Влияние водохранилищ на поверхностный и подземный сток (Международн. Высшие гидрол. курсы ЮНЕСКО при МГУ, 4-сессия). – М., 1972
9. Попов И.В. *Основные итоги работ по исследованию свободного меандрирования*. – Сб. «Морфология речных русел и их моделирование» Бакинского филиала ВНИИ «ВОДГЕО», 1972.
10. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Снисченко Б.Ф. *Пути развития гидроморфологической теории руслового процесса в связи с проблемой комплексного использования водных ресурсов*. В сб. Динамика и термика рек. – М.: Стройиздат, 1973.
11. Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Снисченко Б. Ф. *Теория и методы расчета русловых процессов*. – Труды IV гидролог. съезда, том 1, Л., 1975.
12. Попов И.В. *Гидролого-морфологический анализ русловых процессов и его практическое применение*. В сб. Речная гидравлика и русловые процессы, ч. 2. – М.: МГУ, 1976.
13. Попов И.В. *Организация и первые итоги сетевых русловых наблюдений на сети гидрометслужбы*. – Труды IV гидролог. съезда, том 10, Л., 1976.
14. Попов И.В. *Типизация речных пойм и ее практическое применение*. – Труды IV гидролог. съезда, том 10, Л., 1976.

15. Попов И.В., Власов А.Т., Копалиани З.Д., Пиньковский С.И. *Русловой процесс*. В сб. «Водные ресурсы рек зоны БАМа» – Л., Гидрометеиздат, 1977.

16. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Снисченко Б.Ф., Клавен А.Б. *Некоторые результаты развития геоморфологической теории руслового процесса*. В сб. «Динамика и термика рек и водохранилищ». – М.: Наука, 1984.

17. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Снисченко Б.Ф. *Гидроморфологическая теория руслового процесса и перспективы ее развития*. В сб. «Общие вопросы теории руслового процесса»/Докл. секции русловых процессов ГКНТ, вып.1. – Л.: Гидрометеиздат, 1986.

18. Клавен А.Б., Копалиани З.Д., Попов И.В., Снисченко Б.Ф. *Состояние и перспективы развития геоморфологической теории руслового процесса*. – Труды V гидролог. съезда, том 10, книга 1, Л.: Гидрометеиздат, 1988.

19. Попов И.В. *Теоретические основы нормативных пособий по оценке руслового процесса*. – Труды V гидролог. съезда, том 10, книга 1, Л.: Гидрометеиздат, 1988.

### **Нормативные документы**

1. Методические указания УГМС, вып. 71/ГГИ. (Применение материалов аэрофотосъемки для изучения русловых процессов и деформаций берегов водохранилищ). – Л.: Гидрометеиздат, 1966.

2. Рекомендации по учету русловых деформаций при проектировании переходов магистральных трубопроводов через равнинные реки с естественным режимом. – М.: Изд. ОНТИ ВНИИСТ, 1967.

3. Рекомендации по учету естественных циклических деформаций русел равнинных рек при строительном проектировании. – Л.: Гидрометеиздат, 1969.

4. Рекомендации по учету русловых, пойменных и береговых деформаций, волновых и ледовых воздействий при проектировании фундаментов опор ЛЭП на переходах через реки и водохранилища. – Л.: Гидрометеиздат, 1973.

5. Методические указания УГКС по сетевым русловым наблюдениям. – Л.: Гидрометеиздат, 1981.

6. Рекомендации по размещению и проектированию рассеивающих выпусков сточных вод. – М.: Стойиздат, 1981.

7. Рекомендации по учету деформаций речных русел при проектировании инженерных сооружений на реках зоны Байкало-Амурской железнодорожной магистрали. – Л.: Гидрометеоздат, 1983.

8. Учет деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов (нефтегазопроводов). ВСН 163-83. – Л.: Гидрометеоздат, 1985.

### Монографии

1. Гаврилов А.М., Попов И.В. *Днепр идет в степь*. – Л.: Гидрометеоздат, 1951.

2. Гаврилов А.М., Попов И.В. *Вопросы гидрологии и народное хозяйство*. – Л.: Гидрометеоздат, 1955.

3. Попов И.В. *Жизнь речного русла*. – Л.: Гидрометеоздат, 1955.

4. Кудрицкий Д.М., Попов И.В., Романова Е.А. *Основы гидрографического дешифрирования аэроснимков* / под ред. А.П. Доманицкого. – Л.: Гидрометеоздат, 1956.

5. Попов И.В. *Река Нил*. – Л.: Гидрометеоздат, 1958.

6. Кондратьев Н.Е., Ляпин А.Н., Попов И.В., Пиньковский С.И., Федоров Н.Н., Якунин И.И. *Русловой процесс*. – Л.: Гидрометеоздат, 1959.

7. Попов И.В. *Аэрофотосъемка и изучение вод суши*. – Л.: Гидрометеоздат, 1960.

8. Гаврилов А.М., Попов И.В. *Гидрология и народное хозяйство*. – Л.: Гидрометеоздат, 1960.

9. Попов И.В. *Методические основы исследований руслового процесса*. – Л.: Гидрометеоздат, 1961.

10. Попов И.В. *Деформации речных русел и гидротехническое строительство*. – Л.: Гидрометеоздат, 1965.

11. Попов И.В. *Деформации речных русел и гидротехническое строительство*. – Л.: Гидрометеоздат, 2-е изд., перераб. и доп., – Л.: Гидрометеоздат, 1969.

12. Попов И.В. *Загадки речного русла*. – Л.: Гидрометеоздат, 1977.

13. Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Снисченко Б. Ф. *Основы гидроморфологической теории руслового процесса*. – Л.: Гидрометеоздат, 1982.

14. Барышников Н.Б., Попов И.В. *Динамика русловых потоков и русловые процессы: Учебное пособие для вузов*. – Л.: Гидрометеоздат, 1988.

**Игорь Владимирович Попов**

Методологические основы  
гидроморфологической теории руслового процесса

Избранные труды

Технический редактор *Н.И. Католикова*  
Оригинал-макет *Н.И. Католикова, З.Н. Ильина, Е.С. Шварева*

Подписано в печать 29.03.2012. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Бумага офсетная. Печать офсетная  
Усл.-печ. л. 38. Заказ № 2628  
Тираж 500 экз.

Государственный гидрологический институт  
199053 Санкт-Петербург, 2-я линия В. О., д. 23

Издательство «Нестор-История»  
197110 СПб., Петрозаводская ул., д. 7  
Тел. (812)235-15-86  
e-mail: nestor\_historia@list.ru; www.rossica.su

Отпечатано с готового оригинал-макет  
в типографии «Нестор-История»  
198095 СПб., ул. Розенштейна, д. 21  
Тел. (812)622-01-23