

И.В. ПОПОВ

ЗАГАДКИ РЕЧНОГО РУСЛА

И.В. ПОПОВ

ЗАГАДКИ РЕЧНОГО РУСЛА

ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ
ЛЕНИНГРАД 1977

Попов И. В.

П 57 Загадки речного русла. Л., Гидрометеоиздат, 1977 г.
168 с. с илл.

Книга посвящена жизни речного русла и разработке методики борьбы с его деформациями. Автор ее — крупнейший специалист в области изучения морфологии речных русел и разработки методов их рационального использования, один из создателей гидроморфологической теории. В книге широко использована научная литература и практика современного гидротехнического строительства. Размышления и суждения автор подкрепляет многочисленными примерами из своей практики, призывает бережно относиться к нашему главному достоянию — окружающей нас природе.

Рассчитана на специалистов, научная и практическая деятельность которых связана с жизнью рек, а также на широкий круг читателей.

20806-176 **556. 5**
П——————75-77
069(02)-77

С О Д Е Р Ж А Н И Е

ВВЕДЕНИЕ 21 Необходимость знания закономерностей переформирования речных русел

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

МАЛЕНЬКИЕ РАССКАЗЫ О РЕЧНОМ РУСЛЕ

25 Немного истории

33 Смещение речного русла в плане

37 Песчаные гряды

41 Русловой процесс и конструкции сооружений на реках

45 Речная пойма. Источники поступления наносов в реку

48 Случаи разрушения речной поймы

52 Обвалование поймы и деформации речного русла

55 Прогноз хода деформаций речного русла и поймы

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ЧТО ТАКОЕ ГИДРОМОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

62 Сколько лет нашим рекам

70 Необратимые и обратимые деформации речного русла

73 Сток наносов

85 Различные законы движения взвешенных и донных наносов

92 Малые, средние и крупные формы речных русел

98 Типы руслового процесса

99 Ленточные гряды и побочни

103 Вековые изменения излучин речного русла

115	Скорости деформации речного русла
117	Деформации русла, ограниченные в плане
119	Русло реки с неограничеиными плановыми деформациями
122	Незавершенное меандрирование
126	Образование многорукавного русла при наличии поймы
129	Многорукавность, образующаяся в русле реки
133	О смешанных типах руслового процесса
137	Что делать дальше?
138	Вихри в потоке
146	О возможности количественной характеристики типов руслового процесса

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

156	Каждый может внести свой вклад в исследование деформаций речных русел и пойм
162	Практическое значение разработок по морфологии речных русел и пойм

ВВЕДЕНИЕ

Реки! Кажется, нет более привычного понятия. Ведь только на территории Советского Союза насчитывается около 3 миллионов рек, общая длина которых превышает 10 миллионов километров.

Человечество с незапамятных времен стремилось к рекам, селилось на их берегах, используя реки в самых разных целях.

Недаром междуречье Тигра и Евфрата считают «колыбелью человечества». Именно с этими реками связана культура вавилонян и ассирийцев. Египет — это Нил, говорят египтяне. Ганг — священная река Индии. Хуанхэ из-за катастрофических наводнений и огромной изменчивости ее русла называют «горем Китая». История Рима тесно связана с Тибром. Волга олицетворяет Россию.

Что же влекло человека к рекам? Прежде всего сама вода, необходимая для питья, хозяйственных нужд, для водопоя домашних животных и орошения посевов. Река — это и удобные пути сообщения, и возможность кормиться рыбой и использовать энергию текущих вод. К рекам человека привлекали и речные долины с их ровными террасами и поймами, столь удобными для хозяйственного использования, для размещения поселений, пастбищ и посевов.

Однако освоение рек требовало их знания, поскольку и речные долины, и поймы, и речные русла весьма изменчивы. Весьма изменчив и сам речной поток, то бурно несущий воды в период половодий и паводков, то обсыхающий до такой степени, что и лодке по нему не пройти. По мере того как человек переходил от использования тех благ, которые давала ему природа, к попыткам заставить работать реку в нужном для него направлении, возрастала и необходимость изучать реки и происходящие на них явления.

За всю свою историю человек накопил множество сведений о поведении рек и причинах, его обусловливающих, приобрел богатый опыт строительства на реках самых различных сооружений.

До сих пор вызывает удивление тонкое и совершенное знание реки Нила древними египтянами, жившими за 6 тысяч лет до наших дней. Осваивая эту реку, египтяне достигли высокого строительного искусства, создали целый ряд вспомогательных наук, обогативших математику, геометрию, геодезию, астрономию. Египтяне стремились объяснить причины нильских наводнений. Именно в Древнем Египте была впервые создана сеть устройств для наблюдений за высокими уровнями Нила — знаменитые ниломеры, по принципу действия не отличающиеся от современных реечных водомерных постов, распространенных по всему миру. Ряды наблюдений по этим ниломерам, охватывающие период продолжительностью около 1400 лет, не имеют себе равных. Египтяне сумели построить сложнейшую сеть оросительных каналов и обеспечить их нормальную работу. Строительство первых защитных сооружений от наводнений — дамб — на Ниле приписывается легендарному царю Менесу (IV тысячелетие до н. э.). Фараон Аменемхет III, живший в период Среднего царства (XXI—XVIII вв. до н. э.), прославился как инициатор ирригационного строительства.

На базе развитого орошения, использующего речные воды, процветали целые древние государства, например Древний Хорезм в Средней Азии.

В книге Р. Фюрона «Проблема воды на земном шаре» (в 1966 г. в Гидрометеоиздате вышел перевод этой книги на русский язык) целый раздел посвящен описанию «долин изобилия» — речных участков, на которых с древнейших времен воды реки использовались для орошения.

Человек всегда осваивал реку в борьбе с теми явлениями, которые мешали его хозяйственной деятельности. В течение тысячелетий китайцы вели непрерывную борьбу с рекой Хуанхэ. Еще за две тысячи лет до нашей эры проводились работы по укреплению берегов этой реки, а легендарный строитель Юй был даже провозглашен императором.

Позже защитные сооружения на Хуанхэ неоднократно разрушались, и тогда затапливались огромные площади, гибли миллионы людей, заносились песком плодородные поля, причем слой песка, отложенного рекой во время наводнений, достигал крыш домов. Люди вновь возводили защитные сооружения и стремились обуздать реку. Три самые крупные катастрофы на Хуанхэ были вызваны войнами. Во время войны с японцами в 1936 г., когда китайцы в целях обороны разрушили защитные дамбы, река, хлынув на прилегающую равнину, затопила ее и унесла несколько миллионов человеческих жизней. При этом река переместилась к югу примерно на 500 км, вернувшись в одно из своих старых русел. Когда же человеку удавалось обуздать реку, справившись с неблагоприятными явлениями, это давало большой эффект в хозяйстве и экономике страны.

С XIII столетия существуют в Швеции каналы и канализованные реки, позволяющие даже крупным морским судам заходить далеко в глубь страны. Благодаря огромным работам, проведен-

ным еще столетия назад, многие реки Европы оказались смиренными. Еще в начале прошлого века были построены берегоукрепительные сооружения на Висле, на многих участках Одера, Эльбы, Рейна, Сены, Гаронны, По и многих других рек.

У нас известны судоходные системы Петровской эпохи — Мариинская, соединившая Волгу с Балтийским морем, Тихвинская и др. При Петре проектировалось — и уже даже начали вестись работы — соединить Волгу с Доном. Однако построен был Волго-Донской канал только в наши дни.

Деятельно осваивались и естественные реки, на которых развивалось судоходство и велся лесосплав. В XI в. возникают поселения с пристанями на северных реках России, развивается судоходство на Северной Двине, Сухоне, Свири, Шексне и др. В XVII в. Волга становится рекой с самым интенсивным судоходством в мире. Осваиваются великие сибирские реки.

XVIII в., особенно же XIX и начало XX в. проходят под знаком интенсивного развития судоходства на реках России. Однако только после установления Советской власти возникает идея создать единый судоходный путь — соединить реки самых различных областей нашей родины. Ныне эта идея оказывается в значительной мере воплощенной в жизнь.

И все же, несмотря на столь длительное знакомство с реками, человек еще не располагает достаточными знаниями о них, которые позволили бы создать общепризнанные теоретические концепции, методы инженерных расчетов и прогнозов многих гидрологических явлений. Об этом свидетельствует наличие в гидрологии — науке о природных водах — многочисленных школ и направлений. Это же подтверждает и практика: неполадки в работе сооружений на реках, неожиданные эффекты, которые вызывают водохозяйственные мероприятия, растущие объемы землечерпательных работ на судоходных участках рек и многие другие факты.

К наименее изученным областям гидрологии относится так называемый русловой процесс. Что это такое?

Русловой процесс — это происходящие постоянно под действием текущей воды деформации речного русла и поймы. Часто они принимают такие размеры, что даже определяют судьбу многих сооружений в речном русле и на пойме. Именно русловому процессу и посвящена эта книга.

О правомерности ее появления свидетельствуют многочисленные факты, убедительно показывающие, сколь отрицательно сказывается на хозяйственной деятельности человека недостаточное знание руслового процесса. Такие факты приводятся и в публицистической, и в художественной литературе, не говоря уже о литературе специальной. С ними сталкиваются проектировщики и строители гидротехнических сооружений на реках.

В первой части книги обобщен личный опыт автора. Здесь автор рассказывает о том, с чем пришлось столкнуться гидрологам при обеспечении проектирования сооружений на реках примерно в два последних десятилетия. Во второй части книги излагается теория

руслового процесса. Во введении же имеет смысл показать лишь общую картину проблем руслового процесса.

Недавно мне пришлось прочитать статью Н. В. Гоголя «Мысли о географии». Меня поразило то, что многие мысли этой статьи остаются актуальными и в наши дни. Гоголь писал: «...перехода нет от природы к произведениям человека: они отрублены, как топором, от своего источника». Конечно, не о русловом процессе говорил Гоголь, а о природе вообще, но ведь река — это неотъемлемый элемент природы. Великий писатель, страстно влюбленный в природу, не мог оставаться равнодушным, видя, как человек теряет с ней связь, как непроизводительно растрачивает ее богатства.

Хищническое использование природных богатств — характерная черта того времени и того общественного строя, при котором жил Гоголь. С переходом к новому социальному строю, с установлением Советской власти, когда природные богатства стали принадлежать народу, ученые и государственные деятели не могли равнодушно пройти мимо проблемы взаимодействия человека и природы. В годы, когда началось осуществление крупнейших хозяйственных мероприятий, известный советский географ и геохимик академик А. Е. Ферсман особенно настойчиво ратовал за всесторонний учет того влияния, которое природные процессы оказывают или могут оказывать на хозяйственную деятельность нашего общества. Первый и необходимый шаг в познании окружающей нас среды, считал ученый,— это аэрофотосъемка, позволяющая с большой наглядностью и подробностью наблюдать окружающие нас природные комплексы.

«Ни один инженер, проектирующий крупные хозяйственные установки, ни один проектировщик хозяйственного освоения какой-либо территории не может считать свою задачу выполненной, если не проверит своих выводов путем визуальных наблюдений с самолета, если до начала своих работ даже не попытается общие черты намечаемого хозяйственного плана продумать сверху, на основе лежащей под его ногами грандиозной, но совершенно конкретной картины поверхности земли»,— писал А. Е. Ферсман в 1929 г.

И осваивая сегодня природные ресурсы, мы стремимся соблюдать эти заветы. В последнее время особенно много внимания уделяется экологическим проблемам — проблемам взаимовлияния человека и окружающей его природной среды. Человек понял, что произвольное нарушение природных связей, когда не учитываются закономерности взаимодействия различных природных процессов, неизбежно ведет к неожиданным и часто очень неблагоприятным последствиям.

Но если это действительно так, то читатель вправе упрекнуть автора в том, что слова Гоголя он считает актуальными и в наши дни. Однако приводя слова писателя сегодня, мы имели в виду прежде всего проблему деформаций речного русла, а по отношению к ней все сказанное остается справедливым.

И вот прямое подтверждение справедливости этих слов. В 1972 г. автору пришлось просмотреть около 40 нормативных документов по

проектированию сооружений на реках — и ведомственных, и общегосударственных. И ни в одном из них не содержалось конкретных рекомендаций по учету русловых и пойменных деформаций при проектировании. А результат? А результат мы можем проверить на работе уже построенных и действующих гидросооружений. Причиной многих неполадок и прямых аварий на таких сооружениях очень часто является как раз недооценка роли русловых и пойменных деформаций. По самым скромным подсчетам, только прямые убытки по этой причине составляют 10—15% от суммы капиталовложений в строительство на реках. Косвенные же убытки, связанные с нарушением ритмичности работы предприятий, нормальная деятельность которых обеспечивается этими гидросооружениями, значительно превышают приведенные цифры. Дорого приходится платить за явное пренебрежение законами руслообразования, за то, что вмешательство в жизнь реки нередко доверяется человеку, имеющему самое общее представление о ней и ее работе, о факторах, определяющих деформации речного русла и поймы, о русловом процессе — явлении очень сложном, чутко реагирующем на малейшее вмешательство, идущее вразрез с тенденциями его развития.

Спрямляются реки, разрабатываются или стесняются их русла, затопляются или иссушаются речные поймы, нарушается целостность их поверхности — и как часто при этом забывают, что река не терпит необдуманного вторжения в свою жизнь! Нарушишь одно звено в ее жизни — и выходят из повиновения другие, и чрезвычайно трудно справиться с начавшейся «цепной реакцией».

К счастью — или к несчастью? — не кричит река, когда вмешиваются в ее жизнь неумелые руки, иначе этот крик лишил бы спокойствия и сна тех, кто не желает считаться с законами ее жизни.

В докладе на VI Международном судоходном конгрессе в Гааге в 1904 г. видный русский инженер-путеец и ученый Н. С. Лелявский говорил: «Вследствие отвлеченности и неверности взгляда на движение воды, лица, занимавшиеся выправлением рек, не могли уяснить себе многих явлений, содержащихся в русле и имевших то или иное практическое влияние на выполнение работ. В одном доношении министерству по поводу неоднократных разрушений Черторойских сооружений (они обеспечивали движение судов на днепровских порогах.— *И. П.*) было наивно и чистосердечно между прочим сказано, что причина их, т. е. явлений, произведших разрушения, «сокрыта на глубине водной пучины».

Нет ничего удивительного, что слова, которые приводит Н. С. Лелявский в своей речи, говорились три четверти века тому назад. Удивительно то, что иногда примерно такие же слова приходится слышать и сегодня, когда даются объяснения причин неполадок и недоразумений на гидросооружениях.

Не лучше обстоит дело и за рубежом. И здесь в самых солидных и авторитетных книгах по гидрологии о деформации речных русел и пойм зачастую даже не упоминается.

В 1945 г. в Соединенных Штатах Америки появилась любопытная брошюра-памфлет «Гидрология и война», характеризующая состояние гидрологии в США и отношение к ней со стороны проектировщиков и строителей.

В этом памфлете рассказывалось о том, как одной фирме, называющейся «Строй — изучишь после», было поручено строительство поселка. Работы возглавил деятель по прозвищу «Высокое давление». Очень энергично и в короткий срок он израсходовал на строительство 5 млн. долларов, с величайшим трудом доставив строительный материал и рабочих к месту строительства. Неустанно работая днем и ночью, он построил замечательные сооружения, прочные, красивые, со всеми удобствами.

Однако в последний момент обнаружилось, что никто не подумал об источниках водоснабжения; воды в этом районе оказалось очень мало, да и та была соленой. Пришлось забросить поселок и начать новое строительство. Время было потеряно, деньги выброшены в трубу.

Картина эта, описанная известными американскими гидрологами Д. Стивеном и М. Бернардом, достаточно красноречива. И если к гидрологии как к науке в целом относятся точно так же, то, очевидно, и к частному ее разделу — учению о речном русле — относятся не лучше.

Прошло 20 лет. В 1965 г. уже в нашей стране издательством «Энергия» публикуется книга «Гидравлические и гидротехнические лаборатории США», написанная Е. П. Петровской, М. Ф. Складневым и П. В. Самостреловым по личным впечатлениям. Государственные ассигнования на эти лаборатории составляют около 10 млн. долларов в год, но на комплексное исследование руслового процесса тратятся в общем мизерные суммы. А ведь проблема деформаций речных русел и пойм в США, пожалуй, стоит еще острее, чем у нас, хотя бы потому, что реки Соединенных Штатов отличаются еще большей подвижностью русел, чем наши, а площади, занятые водосборами рек, подвержены эрозии, и, следовательно, с них выносится много наносов, которые поток вынужден транспортировать. Р. Фюрон в уже упоминавшейся книге пишет: «Само собой разумеется, все рекорды принадлежат Соединенным Штатам, в том числе и рекорды по эрозии... За 10 лет эрозия разрушает в США такое количество почвы, которое составляет площадь двух департаментов Франции». Одна только Миссисипи выносит в море около 211 млн. кубометров земли в год. Сенатор Д. Беннет, выступая в конгрессе, напоминает об уменьшении площади обрабатываемых земель в США: «Да, господа, со времени вчерашнего заседания мы потеряли 112 гектаров».

Несмотря на все это, даже Фюрон, рассматривающий в своей книге различные области гидрологии, о деформациях речных русел и пойм даже не упоминает.

Почему же так недооценивается русловой процесс?

По-видимому, прежде всего это объясняется тем, что он недостаточно изучен, а поэтому нет общепризнанной теории этого

процесса, которая легла бы в основу создания методов его расчета и прогнозирования. Если бы проектировщики сооружений на реках знали, каких размеров могут достигать деформации речных русел и пойм, как они происходят и от чего зависят, если бы они знали, как можно рассчитать эти деформации и предсказать их, то, наверное, никаких неполадок в работе сооружений давно бы уже не было.

Естественно, возникает вопрос, чем объяснить, что древние строители возводили сооружения на реках, которые стоят века и безотказно работают, а ныне, в наш атомный век, мы то и дело сталкиваемся со всякими неполадками? Может быть, можно строить и без знаний руслового процесса, или, может быть, древние знали о реках больше, чем мы?

Чтобы ответить на все эти вопросы, попытаемся прежде всего выяснить, какие задачи стояли перед древними строителями и какие возникают в наши дни.

Еще с древних времен и до сравнительно недавнего времени, всего несколько десятков лет тому назад, на реках возводились преимущественно одиночные сооружения, не влияющие на водный режим и сток наносов, а следовательно, и на ход деформаций речных русел и пойм. Небольшие плотины на маленьких реках могли вызывать переформирование речных русел и пойм только на коротких участках — на расстоянии не более 20—30 км. Строителей всех этих сооружений интересовали только те переформирования, которые происходили непосредственно на участке сооружения. Эти местные деформации нетрудно было пронаблюдать и учесть. Заранее ограждая себя от всех неблагоприятных последствий, строители прибегали к самому простому и надежному способу — они создавали сооружения с огромными запасами прочности, благо, в те времена это не составляло особой проблемы, поскольку использовался практически даровой труд рабов.

Кроме того, следует иметь в виду, что до наших дней сохранились, по-видимому, лишь отдельные, наиболее прочные сооружения, в то время как множество других наверняка были разрушены потоком. Таким образом, факт существования и в наши дни древних сооружений еще не говорит о том, что в древности гидротехники были более искусными и знающими строителями, чем в наши дни. Кстати, это можно доказать и документально. В I в. до н. э. жил крупнейший строитель своего времени Марк Витрувий Поллион. Он был военным инженером при Юлии Цезаре, а затем при императоре Августе. Витрувий написал трактат «Десять книг об архитектуре». В этих книгах обобщался опыт древних строителей Греции и Рима по возведению самых разнообразных сооружений, в том числе и на реках. Витрувий очень хорошо понимал, что при строительстве необходимо учитывать местные условия и даже климат. Однако он нигде не говорит о том, как размещать сооружения на берегах рек. Работы Витрувия усиленно анализировались специалистами вплоть до XIX в. На русский язык эта книга впервые была переведена в 1790—1797 гг.

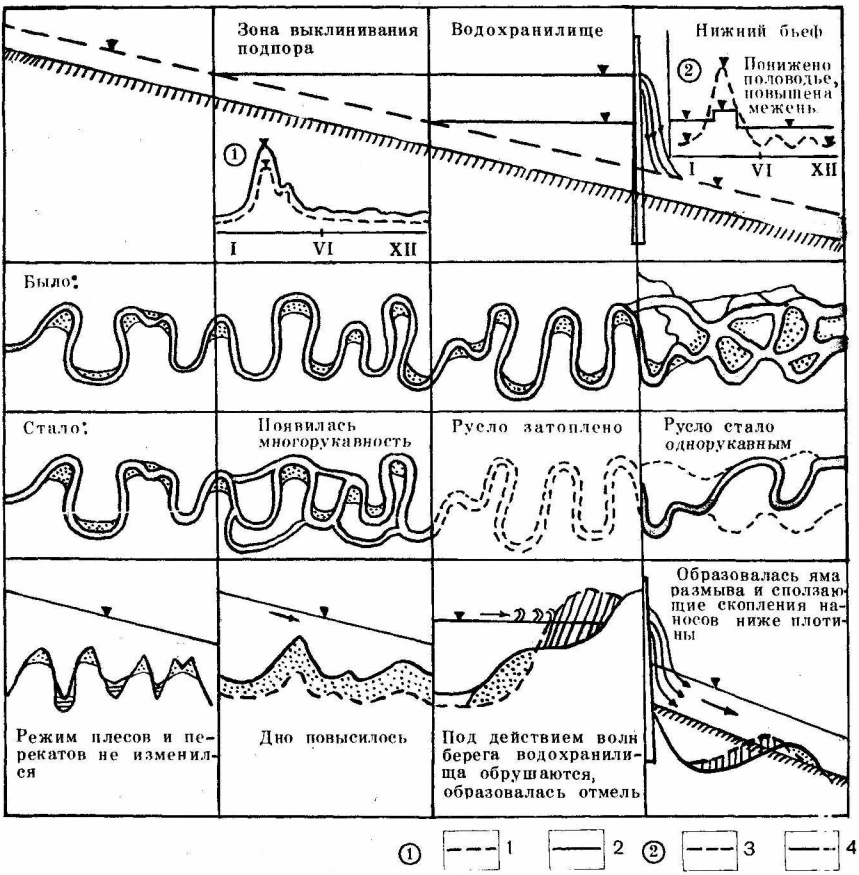
В наше время требования к оценке русловых деформаций неизмеримо усложнились. Строительство на реках приобрело массовый характер. Появилось множество — десятки и сотни тысяч — самых разнообразных сооружений. На участках длиной всего в несколько десятков километров можно встретить сотни сооружений, при строительстве которых надо оценивать русловой процесс с самых разных точек зрения и которые сами по-разному влияют на этот процесс. Появились целые каскады водохранилищ, «подобных морям». Плотины ГЭС, созданные на таких водохранилищах, пересекают все русло и пойму, позволяя регулировать сток воды. Это ведет к коренным изменениям в водном режиме, стоке наносов и, как следствие,— в ходе деформаций, которые идут иначе, чем в естественных условиях. Влияние водохранилищ распространяется на сотни километров выше и ниже плотин. Изменяются условия впадения притоков в главную реку, изменяется и ход деформаций на целой системе притоков. Таким образом, в результате создания водохранилища на крупной реке переформирования охватывают целые системы речной сети.

Проектировщик крупного сооружения, регулирующего водный режим и сток наносов, должен отдавать себе ясный отчет в том, как регулирование повлияет на множество сооружений, расположенных не только у воздвигаемой им плотины, но и на всех участках, где могут произойти изменения. Следовательно, необходимо иметь фоновый прогноз руслового процесса на больших участках главной реки и ее притоков, а не только предвидеть то, что может случиться непосредственно на участке проектируемого сооружения. Новые и ответственные задачи! И ведь речь идет не о том, чтобы составить прогноз на несколько лет вперед, а о том, чтобы предвидеть, что будет через 50, 100, а иногда и более лет — именно таков срок безаварийной работы гидросооружений, предусмотренный государственными стандартами. Необходимость прогнозирования на столь длительный срок заставляет считаться с деформациями, которыми раньше можно было пренебречь. Так, если сооружение должно проработать безаварийно 100 лет, то смещение берега реки всего на 1 м в год делается весьма ощутимым, так как в течение этого времени при однонаправленных деформациях река уйдет в сторону от своего первоначального положения на 100 м и может оказаться не перед водозабором, например, а позади него.

При проектировании часто используются карты 5—8-летней давности, в то время как, вообще-то говоря, надо ориентироваться на будущую карту участка сооружения. Вот ее-то и надо уметь составить.

Для того чтобы прогнозировать русловой процесс, надо прежде всего знать, как он развивается в природе. Затем эти знания нужно обобщить, переложить на язык цифр и уж тогда создавать методы инженерного расчета и прогноза.

Изучение руслового процесса представляет значительные трудности. Казалось бы, чего проще: раз русловой процесс — это постоянные, непрерывные видоизменения морфологического строения



Изменение гидрологических условий и типа русла в результате регулирования стока воды водохранилищем.

График первый — колебания уровня воды: *1* — уровень воды до регулирования, *2* — уровень воды после регулирования. График второй — колебания расходов воды: *3* — расход воды до регулирования стока, *4* — расход воды после регулирования стока.

речного русла, то и надо изучать это морфологическое строение и соответствующие ему свойства речного потока. Если бы деформации русла и поймы на участке данного сооружения определялись только свойствами потока на этом участке, то задача была бы сравнительно простой. Однако на деле все значительно сложнее, чем в приведенной выше исходной предпосылке.

Начнем с того, что река — самый изменчивый элемент ландшафта земли — это путь стока воды по земной поверхности. Раз так, то количество стекающей воды и режим этого стекания зависят от количества атмосферных осадков, выпадающих на водосборной площади реки. Именно поэтому основоположник нашей отечествен-

ной климатологии А. И. Воейков утверждает, что реки — продукт климата. Реки и ручьи текут по поверхности земли, разрушают слагающие ее породы, захватывают размытые частицы грунта и несут их в водоприемник — другую реку, озеро или море. Размывая поверхность земли, поток образует речную долину — этот важнейший элемент рельефа местности. Размываемость грунтов зависит от их вида, степени закрепления поверхности растительностью, промерзания и других факторов. Количество вынесенного рекой грунта определяется также уклонами местности, обусловливающими скорость течения воды и размывающую силу потока.

Если скорость течения, количество поступающего грунта и его крупность таковы, что поток может безостановочно нести наносы до своего водоприемника, т. е. проходить транзитом, деформации русла сведутся к повышениям и понижениям дна, вызванным сползанием по нему обычно существующих на дне рек песчаных гряд. Если же поток оказывается неспособным беспрепятственно выносить все поступающие в него наносы, он будет вынужден разгрузиться от них, отложив часть наносов, с тем чтобы затем размыть эти временные скопления и все-таки донести их до водоприемника. Таким образом, в этом случае наносы будут выноситься не транзитом, а путем последовательных переотложений.

Переотложения могут иметь самые различные формы. В одних случаях это будут большие прибрежные скопления наносов — побочни, которые поток переносит только в половодье. В других случаях, откладывая наносы, поток может начать меандрировать, т. е. развивать излучины. В ходе плановых изменений излучин начинает формироваться пойма реки — затопляемая в половодье часть дна речной долины. На пойме откладываются наносы, которые река несет в половодье, и высота ее постепенно нарастает. Поэтому, если произойдет даже сравнительно небольшое врезание русла в дно речной долины, пойма может перестать затопляться полыми водами и превратится в террасу речной долины. На наших русских реках на склонах долины часто можно проследить несколько таких разновысотных террас. Вместо старой поймы поток начнет формировать новую, более низкую.

Очевидно, что для того, чтобы понять и объяснить все эти тесно взаимосвязанные явления, надо знать и климат, и особенности строения рельефа водосбора изучаемой реки, знать условия формирования наносов и их свойства, знать, как они транспортируются потоком, и свойства этого потока. Таким образом, оказывается, что русловой процесс — явление сложное, и вопросы, связанные с его изучением, лежат на стыке нескольких смежных наук — прежде всего геоморфологии, гидрологии, гидравлики, механики грунтов и др. За исключением гидравлики, все эти науки относительно молодые, и в них еще много гипотетичных положений, не получивших общего признания и нуждающихся в более основательном подкреплении фактическим материалом. А уж если речь пойдет о деформациях, которые вызваны сооружениями, регулирующими сток воды и движение наносов, то материалы, позво-

ляющие судить о том, как изменился русловой процесс, весьма скудные, так как такие сооружения стали создаваться совсем недавно, а систематических длительных наблюдений за русловым процессом после окончания строительства обычно не ведется.

Изучение руслового процесса осложняется еще и тем обстоятельством, что природные условия на территории нашей страны крайне разнообразны, а следовательно, и развитие рек — способы транспортирования ими наносов и формы их перемещения — должно быть тоже весьма разнообразным. Поэтому рассчитывать на то, что, изучив детально речное русло и пойму какой-либо одной реки, тем самым получишь представление обо всех остальных реках,— нельзя. Только обобщив сведения о множестве рек в самых различных природных условиях, можно делать какие бы то ни было выводы. Задача очень непростая!

Но, вероятно, все трудности изучения руслового процесса были бы преодолены, если бы не было других осложняющих обстоятельств. Речь идет вот о чем.

Бурное развитие техники породило известное пренебрежение к природе и ее изучению. Можно быстро углубить судоходную прорезь, изъяв с переката несколько миллионов кубометров грунта; можно быстро проложить траншею по дну реки для укладки в ней труб или кабеля; можно быстро прорыть канал, спрямляющий длинную излучину, разрушить на реке старую плотину и возвести новую, намыть дамбу, перегораживающую пойму хоть на десятки километров, и т. д. и т. п. Все можно — техника в наш век могущественна. Но если она используется нерасчетливо, непродуманно, то все усилия человека могут быть ликвидированы рекой в течение нескольких месяцев, иногда недель, а иногда и часов. И тогда все надо начинать сначала. А ведь разумнее не бороться с рекой, а, детально изучив ее характер, использовать ее свойства в нужном нам направлении. Приведенные выше примеры грубого вмешательства в жизнь реки, по-видимому, и являются доказательством и иллюстрацией переоценки возможностей техники и недооценки природы.

Отрыв от природы, от изучения природных закономерностей руслового процесса связан не только с переоценкой возможностей техники. Большие успехи в области изучения гидравлики сооружений привели к убеждению, что теперь можно просто решить и задачи речной гидравлики, перенося на живую реку строгие — и в определенном смысле механистичные — законы гидравлики. Вместе с тем условия решения задачи в этих двух случаях совершенно разные. При гидравлическом расчете сооружений всегда имеются жесткие граничные условия, задаваемые габаритами и конструкцией сооружений, и задача решается сравнительно просто. А имея дело с размываемым руслом, которое непрерывно изменяется, и не зная законов этих изменений, задачу решить нельзя.

Ситуация еще более осложняется тем, что основные положения гидравлики сооружений основаны на представлениях о так называемом континиуме, т. е. на представлении о сплошности средь

Те же процессы, которые происходят в речном русле, дискретны: они осуществляются в виде перемещения определенных структурных образований в русле и на пойме реки, причем появляются и соответствующие им структурные образования в потоке — вихри разных размеров, различные вторичные течения, области с резко отличающимися свойствами потока. Развитие морфологических образований разных порядков осуществляется не только под влиянием различных факторов, но и по разным законам. Все это значительно осложняет русловой процесс и делает весьма трудными расчеты русловых переформирований. Попытка рассчитывать русловой процесс на чисто гидравлической основе привела к появлению грубых осреднений и множеству допущений и постулатов, при этом нередко выявляются только второстепенные детали процесса. Природа исчезла, а на первый план выступил сложный математический аппарат, очень схематично описывающий явление. Результаты расчета часто оказывались весьма далекими от того, что наблюдалось в натуре.

Невозможность построить теорию руслового процесса без знания того, как он развивается в природных условиях, отлично осознавалась теми русскими инженерами-путейцами, которые долгое время занимались выправлением рек с целью улучшения их судоходных условий и потому имели возможность непосредственно наблюдать развитие речного русла и поймы. Можно назвать немалю имен русских ученых и инженеров, разрабатывавших идеи построения и развития учения о речном русле. Но наиболее отчетливо такая идея была сформулирована известным русским инженером-путейцем В. М. Лохтиным еще в конце прошлого века.

Вот что писал Лохтин о том, как важно знать природные процессы: «Убогая деревня, населенная преимущественно волжскими лоцманами и матросами. Длинный зимний вечер. Просторная изба, наполненная разместившимися на лавках чинными бородатыми лоцманами, пришедшими на вечернюю беседу. Огонь потушен, чтобы в темноте яснее думать. Они приходят для повторения расположения фарватера своего плёса, подробно вспоминая, где и как лежит вода, как располагаются пески, осередки, косы и какие у лоцманов приметы. И если бы и наши инженеры послушали все эти разговоры, то нашли бы богатый материал для дополнения своих планов, богатых техническими данными, но крайне лаконичных и даже бедных в своем жизненном интересе.

Недаром так много плавал русский народ по рекам своим, недаром он воспевал их в своих песнях. Воспевал и любил, любил и сживался с ними, наблюдал их как что-то прекрасное, живое, осмысленное, вдумывался в сложность их явлений. И кому только привелось ознакомиться с этой обширной областью такой наблюдательности и ясного ума, тот смело скажет: «Нет такого народа в мире, у которого было бы подобное богатство в этом отношении».

В своей монографии «О механизме речного русла», изданной в наиболее полном виде в 1908 г., Лохтин писал, что объяснить, почему река создает русла разного типа, деформирующиеся по раз-

личным схемам, можно, только зная, как формируется сток наносов, ибо деформация русла — это форма транспорта этих наносов, способ их переноса к водоприемнику. Поэтому он считал, что для познания руслового процесса надо изучать его независимые факторы — сток воды и наносов, «скат местности», слагающие ее породы. Лохтина смело можно назвать основоположником науки о речном русле. К сожалению, в дальнейшем исследователи использовали только предложенное им аналитическое выражение, характеризующее устойчивость русла,— так называемый «коэффициент устойчивости Лохтина», а общие его концепции были забыты.

Бурное развитие техники, городов приводит к тому, что человек постепенно теряет свои связи с природой. Сейчас на берегах рек не так-то просто найти старожила: народ кочует с одной новостройки на другую, многие селения превращаются в города. Разве что рыбаки подолгу бывают на реке, да бакенщики знают каждый водоворот, каждую подводную гряду. Но надо ли так знать реку, как знали ее лохтинские лоцманы? Ведь ныне на реках судовой ход — фарватер — строго обозначен и путь судам указывают огоньки бакенов, а необходимую глубину на перекатах обеспечивают землечерпатели. И все-таки реку знать надо, и надо знать всем. Косы и пески как двигались, так и движутся по своим законам, и знание этих законов может существенно уменьшить объемы землечерпания и обеспечить нормальную работу множества сооружений на берегах и в руслах рек, сооружений, которым «несть числа». Могут возразить: «Позвольте, ведь строительная площадка всегда выбирается целой группой специалистов, всегда предлагаются конкурирующие варианты и из них осуществляется лучший, всегда используются все ранее накопленные материалы». Да, это так, но при выборе строительной площадки вопрос об устойчивости русла реки ставится в последнюю очередь, а иногда и вовсе не ставится.

Могут сказать также: «Есть же специалисты, прямой обязанностью которых является изучение рек». Да, реки изучаются гидрологами всесторонне и уже достаточно давно. Но в области исследования деформаций речных русел обобщающие работы начали появляться лишь в последние десятилетия, и их еще очень мало. Даже студенты специальных гидрологических высших учебных заведений не проходят курсов по русловому процессу, не имеют практики наблюдений за деформациями русла. В системе Главного управления Гидрометслужбы СССР до недавнего времени не велись постоянные наблюдения за изменением речных русел и пойм, а без длительных наблюдений во многих точках очень трудно судить о том, что происходит с реками в природе, насколько существенны их переформирования, каков их режим.

Итак, для того чтобы обеспечить запросы современного проектирования и строительства сооружений на реках, очень важно подойти к этой проблеме комплексно, всесторонне, учитывая природные факторы, определяющие русловой процесс.

Попытки создания обобщающей теории руслового процесса предпринимаются уже два или три десятилетия. К настоящему времени

основы такой теории обрисовались уже достаточно отчетливо в ряде работ специалистов Гидропроекта И. А. Кузьмина и К. И. Россинского. Но в наиболее конкретном виде они сформулированы в работах Государственного гидрологического института в Ленинграде.

Этот институт — почти ровесник Советской власти: он был создан в 1919 г. Институт является всесоюзным центром изучения вод суши — рек, озер, водохранилищ и болот. Поэтому вполне закономерно, что именно в его стенах, в Отделе русловых процессов, начала разрабатываться новая теория руслового процесса, получившая название гидроморфологической. Следуя заветам В. М. Лохтина, ее создатели стремились наиболее широко и всесторонне охватить русловой процесс, рассматривая его с позиций и геоморфологии, и гидравлики, и гидрологии.

Отдел русловых процессов был создан в 1954 г. взамен гидравлико-математического отдела, существовавшего с момента основания института. Тому, кто внимательно читал все, что уже здесь было сказано, понятно, что такая реорганизация была отнюдь не случайна. Возглавил новый отдел Н. Е. Кондратьев, считавший, что решение проблемы руслового процесса лежит на стыке геоморфологии и гидрологии. Гидротехник и гидравлик по специальности, он отличается философским складом ума, широтой подхода к проблемам.

Пригласили работать в Отдел и автора этих строк как специалиста, знакомого с геоморфологией, географией и гидрологией суши и уже кое-что сделавшего в области применения аэрометодов в гидрологических исследованиях.

Каковы же итоги многолетней и сложной работы Отдела русловых процессов, насчитывающего в настоящее время около ста специалистов?

О главном уже было сказано: удалось создать основы новой, гидроморфологической теории руслового процесса.

В книге будут подробно рассмотрены содержание и особенности нашей теории. Отметим лишь, что основой основ этой теории является знание того, как развиваются речные русла и поймы, систематизация и типизация видов деформаций речных русел и пойм, разработка методов количественной их оценки. Создан и целый ряд способов изучения карт, аэрофотоснимков и других материалов о реках. Поэтому нет никакого фокуса в том, что человек, знающий все это, придя на реку, а иногда только глядя на ее аэрофотоснимок или даже на обычную карту, сразу может оценить тип деформаций и предсказать их дальнейший ход. Дело в том, что мы вооружены знанием природных закономерностей переформирования речных русел и стараемся передать свои знания и другим.

За истекшие двадцать с лишним лет специалистам нашего Отдела множество раз приходилось применять гидроморфологическую теорию к решению практических задач. Об этом и хочется рассказать широкому кругу читателей.

Так как книга научно-популярная, автор не ставил перед собой задачу систематического изложения теории руслового процесса и способов ее применения в виде сухого перечня положений, фактов и рекомендаций. Для этого существуют учебники и учебные пособия, специальные монографии и статьи. Задача популярной книги, как нам кажется, должна заключаться в том, чтобы привлечь внимание к рассматриваемой в ней проблеме, показать ее значение, обрисовать круг входящих в нее вопросов, дать общее научное обоснование этой проблемы в ее современном виде, не забывая и истории науки, которая бывает очень поучительна.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

МАЛЕНЬКИЕ РАССКАЗЫ О РЕЧНОМ РУСЛЕ

Пусть не смущает читателя то обстоятельство, что в ряде эпизодов, о которых пойдет речь в этой книге, все выглядит очень просто: приехали, посмотрели, решили — и все в порядке. Если известны законы руслообразования, типы деформаций речного русла, если уметь увидеть их в природе, то все действительно оказывается достаточно просто.

При чтении наших рассказов читатель не всегда узнает, было ли осуществлено строительство сооружений, для которых оценивался русловой процесс. Задача гидролога-русловика — дать исходные данные для проектирования. Осуществление же самого строительства — дело проектировщиков и строителей, а гидролог за это ответственным быть не может. Он отвечает только за качество даваемых им прогнозов русловых переформирований.

Эти прогнозы составляются на нормативный срок безаварийной работы сооружений. Так, например, по государственным стандартам, опоры линий высоковольтных передач на переходах через реки, переходы через них трубопроводов, водозаборы должны работать безаварийно от 30 до 50 лет. И можно подумать, что для того чтобы проверить, оправдывается ли наш прогноз, надо ждать 30—50 лет. Однако дело обстоит значительно проще: чтобы судить о том, происходят ли деформации речного русла и поймы и в каком именно направлении, нужен значительно меньший срок — 5—10 лет. За этот срок уже достаточно уверенно обнаруживаются тенденции в ходе деформаций русла и поймы реки. Изменения в их развитии в том случае, если основные факторы руслообразования (водный режим, сток наносов и особенности геологического строения дна речной долины) не меняются, маловероятны. Дело в том, что определенным типам комбинаций этих факторов всегда присущи и определенные схемы деформаций речного русла и поймы, т. е. определенный тип руслового процесса. Типы же эти сейчас хорошо известны. Они выделены на основе натур-

ных материалов по рекам, общая длина которых составляет несколько сот тысяч километров, причем выделены для самых различных природных условий и многократно проверены. Поэтому нет особых оснований сомневаться в том, что если правильно определены тип руслового процесса и скорости деформаций, то изменений их в ближайшее время ждать не приходится. Изменения могут иметь место только в результате вмешательства человека, а уж их-то достаточно просто предвидеть, особенно в условиях нашего планового хозяйства.

Необходимость знания закономерностей переформирования речных русел

Случай, о котором я хочу сейчас рассказать, особенно памятен. С него началось широкое изучение деформаций речных русел, поскольку он убедительно показал пробелы в наших знаниях. Первые же результаты исследований дали возможность сделать обнадеживающие выводы и показали, что задачи, ранее казавшиеся неразрешимыми, решаются, и притом относительно простыми средствами и способами.

Перед нами письмо из Азгипроводхоза, город Баку, датированное 23 февраля 1954 г.; адресат — директор Государственного гидрологического института в Ленинграде.

«В связи с постройкой Мингечаурского водохранилища на р. Куре и изменением ее водного режима требуется оценить, как будут развиваться деформации русла реки на всем ее протяжении от створа плотины до устья, т. е. на участке длиной 560 км. Такая оценка необходима для выяснения условий работы многочисленных водозаборов и насосных станций, имеющих целью орошение земель Куро-Араксинской низменности, а также для размещения вновь проектируемых водозаборов, улучшения местного судоходства и рыбоводства, имеющего экспортное значение (осетровые рыбы)».

Ответить на поставленные вопросы поручили Отделу русловых процессов института.

Задача оказалась непростой. Ведь на деформации русла реки Куры влияет не только регулирование ее стока водохранилищем Мингечаурской ГЭС, но также и систематическое снижение уровня воды в Каспийском море.

На первых порах мы пытались решить задачу традиционным путем — с помощью гидравлических расчетов. Расчеты показали, что продольный профиль Куры на всем ее протяжении от Мингечаура до устья будет постепенно снижаться, то есть русло реки станет врезаться со скоростью 3 см в столетие. Во всех расчетах учитывалось и систематическое снижение уровня Каспийского моря. Оценив скорости течения, которые установятся в реке при регулировании ее стока, и определив, будут ли при этом размываться грунты, из которых сложено русло Куры, уже можно было составить уравнение баланса наносов по длине реки. Судя по всему,

на участке, лежащем выше устья главного притока Куры — Аракса, должны появиться участки размыва и отложения наносов длиной 30—40 км. А ниже устья Аракса водный режим реки должен восстановиться благодаря притоку воды из Аракса и стать примерно таким же, как в естественных условиях.

К таким же выводам — и с помощью подобных же расчетов — пришли и в другом учреждении, ведущем проектирование крупных гидроузлов на реках с целью регулирования стока воды.

К удивлению наших гидрологов, Азгипроводхоз, ознакомившись с их выводами и поблагодарив за выполненную работу, сообщил, что ему требуются совсем другие данные. Для проектирования сооружений на берегах Куры и выяснения судьбы уже имеющихся полутора сотен водозаборов строители прежде всего хотят знать, в какой именно форме будет проходить размыв или намыв русла, усилится или ослабеет свойственное Куре в ее естественном состоянии меандрирование, т. е. образование излучин, постепенно приобретающих форму петли. Не произойдет ли в результате регулирования стока воды выравнивание дна Куры — уменьшение разницы в глубинах на плёсах и перекатах или, может быть, эта разница будет увеличиваться по сравнению с наблюдавшейся в естественных условиях.

Но для ответа на эти вопросы надо прежде всего знать, как деформируются речные русла на естественных, а не лабораторных и схематизированных реках, каким закономерностям подчиняется процесс деформаций, какими факторами он определяется.

Итак, мы могли в полной мере использовать достижения гидравлики и гидродинамики, лишь «наложив» их на действительно происходящие на реке переформирования. А для этого в первую очередь надо было приступить к изучению рек в натуре. Пришлось начать с изучения картографических и аэрофотосъемочных материалов разных лет. Предстояло выяснить, какие же формы русел существуют в природе, насколько они разнообразны, сколь существенны размывы и намывы берегов и дна русла, с чем именно они связаны. Естественно, что изучение началось с самой Куры, с ее лоцманских карт, имевшихся с начала нашего века. Карт было мало, и все же по ним удалось выявить и проследить с достаточной надежностью основные особенности переформирований русла Куры.

Что же обнаружилось при анализе карт?

Прежде всего обращали на себя внимание четкие линии дамб, насыпанных вдоль реки, чтобы предотвратить затопление низменных участков, тянущихся вдоль Куры. Точно совмещая очертания этих дамб на картах разных лет, наши гидрологи получили возможность с уверенностью оценить виды переформирований и скорости деформаций.

Нельзя было не заметить и того, что все пространство между дамбами занято речными излучинами различных очертаний, преимущественно хорошо развитыми. Большинство вершин этих излучин упирается непосредственно в подножие дамб.

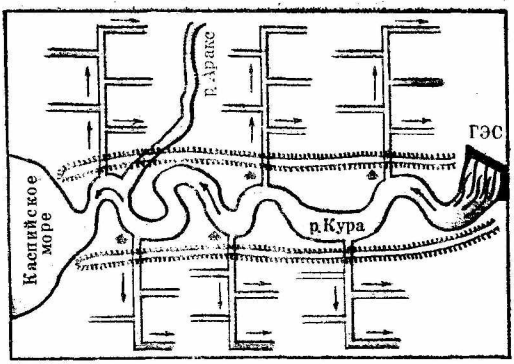


Схема р. Куры в ее равнинной части.
1 — валы, насыпанные вдоль реки для защиты от разливов, *2* — оросительные системы, *3* — насосные станции.

Устойчивы эти излучины в плане или способны изменять свои очертания?

Сличение карт разных лет показало, что с годами кривизна излучин увеличивается. При этом участки русла у вершин излучин изменяются в плане очень сильно, а участки русла между смежными излучинами очень устойчивы. Оказалось, что скорость смещения бровок берегов в плане огромна — до 100 м за одно половодье. Развитие излучин заканчивается прорывом перешейка между смежными излучинами. Река, таким образом, спрямляется. В результате увеличивается скорость подмыва ее берегов, поскольку увеличиваются уклоны потока и скорости его течения. А это в свою очередь приводит к формированию новой излучины. При смещении вогнутого берега выпуклый берег русла, наращивающийся за счет осаждения наносов, следует за перемещением вогнутого. Поэтому ширина реки в общем меняется мало.

А что происходит с глубинами русла? Вот тут обнаружились любопытные факты. То, что в вершинах излучин находятся глубокие участки — плёсы, а на перегибах русла от одной излучины к другой располагаются мелководные участки — перекаты,— факт общеизвестный. Не менее известно также и то, что плёсы в половодье углубляются, а перекаты намываются, что в межень идет обратный процесс — перекаты размываются, а размытый на них песок сносится в плёсы и они мелеют. Но неожиданными оказались размеры намывов и размывов дна: они достигали 7 м, т. е. высоты двухэтажного дома. Кроме того, выяснилось, что для продольного профиля дна Куры характерно чередование выпуклых и вогнутых участков длиной 30—40 км и что участки эти постепенно сползают вниз по течению реки. Плёсы и перекаты отдельных излучин оказываются как бы нанизанными на эти длинные выпуклые и вогнутые участки дна Куры. Вот такая сложная схема деформаций русла обнаружилась на Куре.

Как же предусмотреть, что будет дальше, когда под влиянием водохранилища изменится водный режим Куры и половодье будет задерживаться в водохранилище, а межень, благодаря попускам воды из него, будет повышенной?

Попробуем подойти к решению этого вопроса с морфологических позиций, рассуждая следующим образом. Если на реке построено водохранилище, то оно неизбежно будет задерживать и накапливать наносы, из которых поток строит свое русло. Следовательно, ниже плотины участок реки будет испытывать недостаток наносов, которые ранее поступали по реке, а теперь задержаны в водохранилище. Однако на этом же участке по-прежнему будут наблюдаться поступление воды и размыв русла. До сооружения плотин размыв русла компенсировался поступлением наносов с вышележащих участков реки, теперь же размыв, превратившись в некомпенсированный, начинает преобладать на всем протяжении реки до участка, на котором восстановится прежний объем переносимых рекой наносов.

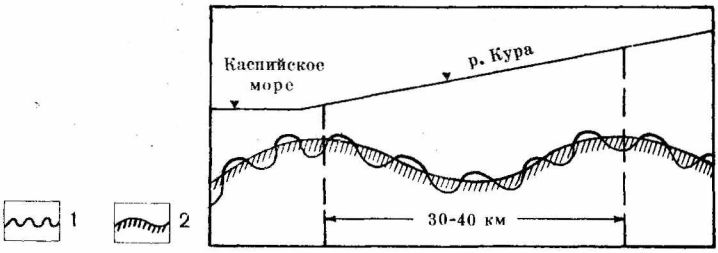
Восстановление объема переносимых потоком наносов может произойти под влиянием их выноса из притоков, который в общем должен увеличиться, так как ниже плотины уровни воды будут понижены вследствие задержки половодья водохранилищем.

Итак, не подлежит сомнению, что ниже плотины должен иметь место размыв, не компенсированный поступлением наносов по реке. Однако чрезвычайно важно выяснить, в какой форме будет проходить этот размыв — начнется ли врезание реки или она будет расширять свое русло? Вот тут-то особенно нужно знать, как деформировалось русло реки до постройки плотины.

Рассуждая примерно таким образом, можно было дать значительно более обоснованный прогноз того, что может быть с руслом Куры после создания Мингечаурского водохранилища, чем это получилось в первом, чисто расчетном варианте решения.

Да, действительно, как ожидалось в первом варианте, на протяжении всего участка Куры от Мингечаура до впадения Аракса преобладающей тенденцией останется тенденция к размыву русла, поскольку Аракс — первый приток, который может восполнить дефицит наносов, задержанных водохранилищем. Размыв будет выражаться во врезании русла, потому что Кура течет по мощной толще достаточно легко размываемых речных отложений. Так как русло реки было извилистым, то врезание потока будет сопровождаться повышением берегов, в том числе и подмываемых. Поэтому, кроме врезания, будет наблюдаться усиление смещения реки в плане — развитие излучин. Этого в первом, гидродинамическом варианте не предусмотрели.

Далее возникает вопрос о том, будут ли сглаживаться отметки дна глубоководных участков и мелководных перекатов. Здесь дело должно обстоять так. Из-за дефицита наносов перекаты будут намываться на меньшую величину, чем в естественных условиях, их размыв из-за снижения уровня воды при регулировании стока соответственно ослабеет, но зато размыв будет поддерживаться при повышенной межени. Таким образом, в плёсы, по-видимому, будет сноситься прежнее количество наносов, и существенного изменения отметок их дна не произойдет. И этого явления при первом, гидродинамическом варианте не предусматривалось.



При перемещении наносов р. Курой образуются чередующиеся по длине реки участки преобладающего размыва и намыва русла, что создает впечатление гигантских, длиной 30—40 км, плёсов и перекатов, на фоне которых существуют обычные плёсы и перекаты.

1 — плёсы и перекаты, образованные на излучинах русла, и средняя линия дна по съемке 1914 г., 2 — средняя линия дна по съемке 1939 г.

Вот так многоступенчато, пройдя весь этот сложный путь, удалось ответить на все вопросы проектировщиков.

С той поры прошло двадцать лет. И насколько известно, ничего не предвиденного на реке не произошло.

Немного истории

После случая с Курой были развернуты широкие исследования деформаций русел рек. Когда перед исследователем возникают новые вопросы, прежде всего необходимо ознакомиться с тем, что в этой области сделано предшественниками.

Работа началась с изучения материалов о формах речных русел и их изменениях. Мы просмотрели сотни библиографических карточек, статей и монографий, опубликованных в нашей и зарубежной литературе по гидрологии, геоморфологии, гидротехнике и гидравлике. Здесь затрагивались многие вопросы, связанные с деформациями речных русел, выяснились отдельные свойства потока на повороте русла, строение берегов и т. п., но о величинах деформаций, особенно о размерах подмыва берегов, данных практически не было. Среди множества формул для расчета отдельных характеристик потока — причем потока, который, как правило, течет в лабораторном лотке,— не было ни одной, которая позволяла бы оценить возможные смещения речного русла в плане, т. е. оценить скорость подмыва его берегов. И уж совершенно отсутствовали во всей этой литературе общие представления о причинах образования речных излучин, о том, какие именно факторы определяют деформацию речного русла. Достаточно сказать, что о причинах меандрирования рек существовало более тридцати различных гипотез, не только мало согласующихся между собой, но иногда и прямо противоположных. Почти не было фактических

данных о том, как ведут себя речные русла и поймы на зарегулированных участках рек. Оказалось, что наиболее полные представления о речных излучинах, и в наиболее конкретной форме, содержатся в работах французского инженера-гидротехника Л. Ж. Фарга, исследовавшего реку Гаронну. В 80-х годах прошлого века он сформулировал ряд положений о том, как распределяются по длине излучин глубокие — плёсовые и мелководные — перекатные участки, и установил их связь с кривизной излучин.

И с тех пор столь же широких обобщений относительно развития излучин не появлялось. Правда, многие русские ученые подчеркивали, что упомянутые «законы Фарга», выявляющие закономерности строения речных излучин, подтверждаются далеко не всегда. И из «законов» они превратились в «правила Фарга».

А как обстоит дело с нашими знаниями движущей силы руслового процесса — водного потока? Ведь очевидно, что знания тех форм, в которых проявляется русловой процесс,— сколь бы ни были эти формы изучены,— еще недостаточно для полного представления о самом водном потоке и о тех движущих силах, которые заставляют русло принять ту или иную форму. Вода и сегодня представляется веществом, во многих отношениях загадочным, обладающим рядом аномалий по сравнению с другими жидкостями. Она еще недостаточно изучена и в спокойном состоянии, и в движении. В текущем потоке возникают сложные кинематические структуры — турбулентные возмущения, иногда обладающие колоссальной энергией и вызывающие катастрофические последствия. Поэтому к осреднениям свойств потока надо подходить очень осторожно. Вдобавок ко всему, нередко вода содержит огромное количество твердого вещества. Так, в единице объема воды может содержаться 50 и более процентов твердых частиц разной крупности, состава, формы и подвижности. А ведь это материал, из которого поток строит свои берега и русло!

Изучением движущегося потока занимается гидравлика. Как наука речная гидравлика существует около пяти веков; основная задача этой прикладной науки — обеспечение строительства сооружений на реках, прокладки каналов, труб и т. п. И в этой области были достигнуты значительные успехи, найдено много приемов решения задач, позволяющих надежно обеспечить прокладку каналов и труб. Удачно рассчитываются и конструкции сооружений на реках, пока речь идет об их габаритах и воздействии на русло. Однако, когда пытаются перенести эти решения на расчет деформаций самого русла, все разработанные приемы и решения оказываются несостоятельными.

Пусть читатель не подумает, что, разрабатывая теорию руслового процесса, мы ничего не можем взять из современной речной гидравлики. Взять можно все, что помогает выяснить способность потока к размыву или отложению наносов.

В пределах настоящей книги мы не имеем возможности рассмотреть все разработки в области гидродинамики и гидравлики, которые могут найти применение в создании теории руслового процес-

са. Это обусловлено не только огромным числом различных разработок, но и сложной историей развития этих наук.

Вероятно, читатель знает, что в тех случаях, когда исходный фактический материал получить трудно, исследователям приходится иногда очень грубо схематизировать явления. А потому неудивительно, что воззрения, существовавшие десятки, а иногда и сотни лет и считавшиеся бесспорными, в дальнейшем, когда наука делала решительный шаг вперед, оказывались несостоятельными.

Так, например, во времена Э. Торричелли (1608—1647) считалось, что наибольшие скорости потока в реке должны располагаться не у поверхности воды, а у дна. Это объяснялось влиянием давления жидкости, благодаря которому придонные слои в потоке как бы выпираются вниз по течению и потому должны обладать большими скоростями. Подобные взгляды господствовали до 30-х годов XVIII в., когда А. Пито (1695—1771) изобрел свою знаменитую трубку — прибор, позволяющий измерять распределение скоростей течения в сечении потока. Измерения скоростей течения показали, что решающее влияние на их распределение в сечении потока оказывает сопротивление движению, вызываемое шероховатостью дна русла. Выяснилось, что наибольшую скорость течение имеет не у дна, а у поверхности воды, в точке, расположенной примерно на 0,2 глубины потока.

Однако есть и такие взгляды, которые, сформировавшись очень давно, бытуют и до сегодняшнего дня.

Теоретические основы современной механики жидкости были заложены в XVIII в., главным образом трудами Даниила Бернулли, Леонарда Эйлера и Жана Д'Аламбера.

Швейцарский ученый Даниил Бернулли (1700—1782) опубликовал первый капитальный труд по гидродинамике. Его работа так и называется «Гидродинамика» (1738). Он составил уравнение установившегося (не меняющегося во времени) движения идеальной жидкости при постоянном расходе ее.

Другой ученый, труды которого во многом не устарели и теперь,— Леонард Эйлер (1707—1783). Блестящий математик, Эйлер предложил известные дифференциальные уравнения движения жидкости, позже названные его именем. Жан Лерон Д'Аламбер (1717—1783), французский ученый, написал трактат «Опыт новой теории о сопротивлении жидкости» (1752).

Широко используются в наши дни работы французского математика и механика Жозефа Луи Лагранжа (1736—1813). Он предложил свой аналитический метод исследования движения жидкости, непохожий на метод Эйлера,— так называемый метод Лагранжа. Он впервые рассмотрел закономерности перемещения волн малой высоты. Лагранж был учеником Эйлера.

Редкий гидрологический расчет обходится без применения так называемой формулы Шези, по которой рассчитывается средняя скорость течения. Антуан Шези (1718—1798) был французским инженером. Не лишне заметить, что его формула долгое время оставалась неизвестной ученым.

К числу самых фундаментальных формул, постоянно использующихся и сегодня, относится уравнение Навье — Стокса, позволяющее рассчитывать движение жидкости. Анри Луи Мари Навье (1785—1836) был профессором механики в Политехнической школе и Школе дорог и мостов в Париже. Он ввел в уравнение жидкости Эйлера дополнительный член, учитывающий силы взаимодействия молекул жидкости при ее движении (силы сопротивления).

Английский физик и математик Джордж Габриель Стокс (1819—1913) усовершенствовал уравнение Навье, введя в него коэффициент вязкости жидкости. Как это часто бывает при математическом описании мало исследованного в натуре явления или процесса, в уравнениях появляются коэффициенты, физический смысл которых не всегда ясен. Так случилось и с этим уравнением. Навье ввел в свое уравнение этот коэффициент, но объяснить его физический смысл не смог и считал не слишком существенным. Стокс вскрыл физическую сущность этого коэффициента и показал, как важно его учитывать.

Необходимо также упомянуть работы, вскрывшие физическую сущность так называемого скоростного коэффициента в формуле Шези. Это прежде всего исследования ирландского инженера Роберта Маннинга (1816—1897) и швейцарских инженеров Эмиля Оскара Гангилье (1818—1894) и Вильгельма Рудольфа Куттера (1818—1888).

Важнейшее значение в гидродинамике имеют работы Оскара Рейнольдса (1842—1912) — английского физика и инженера. О. Рейнольдс выяснил критические условия перехода турбулентного (вихревого) потока в ламинарный с послойным движением жидкости.

До сих пор исследуются и совершенствуются уравнения французского ученого Жана-Клода Барре де Сен-Венана (1797—1886). Эти уравнения, составленные в общей дифференциальной форме, позволяют рассчитать движения неустановившегося потока — прохождение волн паводков и попусков по реке.

В гидравлических лабораторных исследованиях часто упоминается «число Фруда». Уильям Фруд (1810—1879), английский инженер, разрабатывал законы подобия лабораторных потоков натурным. Он предложил упомянутое число — критерий, показывающий степень турбулентности потоков.

К слову сказать, в истории гидрологии встречается немало любопытных парадоксов. Оказывается, первооткрывателем законов подобия и «числа Фруда» является вовсе не сам Фруд, как это принято считать, а французский ученый Фридерик Риич (1805—1880). Главная же работа Фруда — исследование так называемого пограничного слоя (слоя жидкости у стенок и дна, в котором зарождаются вихри в потоке) — предана забвению.

До сих пор не потеряли своей актуальности исследования немецкого ученого Людвига Прандтля (1875—1953). Параллельно с Дж. И. Тейлором и Т. Карманом он разработал полуэмпирическую теорию турбулентности. Особенно известны работы Л. Прандтля в области пограничного слоя.

Некоторые из перечисленных ученых — Л. Эйлер, И. Бернулли (отец Д. Бернулли) и др.— длительное время работали в России. И во второй половине XIX в. в нашей стране возникает своя школа выдающихся гидравликов и гидродинамиков, школа, и поныне занимающая ведущее место в мире. Для исследований руслового процесса особое значение имеют работы Н. Е. Жуковского (1847—1921), выдвинувшего гипотезу о существовании в потоке катящихся вихрей эллиптической формы, Н. С. Лелявского, выделившего в конце прошлого века различные виды течений в речном потоке, работы А. И. Лосиевского (30-е годы нашего века) по воспроизведению циркуляционных течений в лотках. Новым шагом явились исследования М. А. Великанова (1879—1964), выделившего в потоках явления макротурбулентности, исследования К. В. Гришанина, установившего связь между шагом песчаных гряд на дне потока и шагом турбулентных вихрей.

Можно назвать десятки работ других отечественных и зарубежных ученых, без которых не могла бы развиваться теория руслового процесса.

Первостепенное значение имеют и исследования в области движения наносов. Среди них особенно важен так называемый закон Эри, устанавливающий зависимость между весом перемещаемых частиц наносов и скоростью течения потока. В 1834 г. Эри обнаружил, что если скорость течения потока увеличить в два раза, то поток сможет перемещать наносы в 64 раза более тяжелые, чем до увеличения его скорости. Этот закон формулируется так: вес влекомых по дну русла частиц наносов пропорционален шестой степени скорости потока. Интересны разработки К. И. Россинского по расчетам движения донных наносов, выполненные уже в наши дни — в 70-х годах. Заслуживают внимания диффузионная теория движения взвешенных наносов, развитая В. М. Маккавеевым и его учеником А. В. Караушевым, гидравлические исследования И. В. Егиазарова, Г. В. Железнякова и многих других.

Однако еще раз повторим: ни одна из перечисленных работ не дает возможности судить о структурных образованиях в руслах и на поймах рек. Все формулы и расчеты хороши только для условий, в которых транспорт наносов идет без образования четко выраженных структур.

Как перейти к структурным представлениям, должны сказать гидродинамики, при этом они обязательно должны исходить из представлений о дискретности руслового процесса и о том, что он всегда протекает в структурных формах.

Известный советский гидравлик Р. Р. Чугаев в своей работе «Развитие и формирование технической механики жидкости (гидравлики)», изданной отдельной брошюрой Ленинградским политехническим институтом (1975), говорит о том, что, «казалось бы, элементарные представления механики жидкости осваивались человечеством... в течение весьма продолжительного времени». На усвоение идеи неразрывности движения жидкости, приводит пример Чугаев, потребовалось 1500 лет. В основе этих представлений ле-

жит допущение о возможности замены свойств среды, состоящей из более или менее однородных элементов, свойствами сплошной среды. Подобная замена очень удобна, потому что дает возможность вместо множества характеристик пользоваться одной.

Уравнение неразрывности используется и при исследованиях руслового процесса; но применение его значительно ограничивается, поскольку в потоке обнаруживаются уж слишком разнородные элементы, например, вихри разных размеров, форм и свойств, которые играют в движении наносов и подвижных их скоплений на дне русла различные роли.

Пожалуй, основной причиной того, что никак не удавалось перенести законы гидравлики на открытые русловые потоки, было то обстоятельство, что решение уравнений гидродинамики требует жестких граничных условий. Когда речь идет о гидравлическом расчете сооружений, эти условия налицо — сооружение жесткое. Но как только вопрос касается речного русла, положение осложняется тем, что русло реки непрерывно меняется. Выход может быть только один: решение задачи на основе знания закономерностей, определяющих изменения морфологического строения речных пойм и русел.

Невозможность решения задачи руслового процесса на основе одной только гидравлики становится все более очевидной. Чтобы не быть голословным, приведу высказывания некоторых крупнейших зарубежных гидравликов на конгрессе международной ассоциации гидравликов (МАГИ), проходившем в Париже в сентябре 1971 г. В выступлениях таких крупных американских ученых, как Г. Эйнштейн (он еще в 1937 г. предложил формулу для расчета движения донных наносов в речных потоках) и Д. Кеннеди (специалист по грядовому движению наносов), сквозила одна и та же мысль: слишком часто расчетные данные не совпадают с натурой; причина этого — весьма упрощенные представления об изучаемых явлениях и процессах, происходящих в реках, а следовательно, их грубая схематизация.

Удивительная ситуация! Гидравликой занимаются вот уже примерно пять столетий, а лишь во второй половине нашего века выяснилось, что без знания морфологии речного русла рассчитать деформации нельзя, и значит, надо пересматривать многие установившиеся за эти пять веков представления и заново приспосабливать к этой задаче уже имеющиеся решения.

Что значит установить связь между формами русла и движением вод потока? Это в первую очередь означает необходимость изучения динамических структур, имеющихся в потоке, и установления их связей со структурами русловых образований. Кажется, все очень просто: надо объединить наши знания о строении речного русла и поймы со знаниями структур потока — и тогда все станет на свои места. Но беда заключается в том, что уровни наших сведений о морфологической структуре русла и поймы и гидравлических структурах потока слишком различны. И пытаться объединить их — это все равно что пытаться совместить шестеренки с различ-

ным шагом зубцов. Положение осложняется еще и тем, что исследователь, изучающий поток, скован многолетней традицией, привычкой подходить к явлению с позиций континиума — сплошности среды, в то время как она дискретна.

К слову сказать, о том, сколь опасно при гидравлических исследованиях увлекаться умозрительными схемами, отходя от изучения тех явлений, которые происходят в реальных потоках, говорил еще Леонардо да Винчи. Как известно, он был не только великим художником, но и мыслителем, ученым, изобретателем и инженером, построившим ряд крупных сооружений в Италии. К сожалению, его работы, мысли, высказывания, связанные с гидравликой, стали известны только спустя четыреста лет после его смерти — уже в XX в.

Великий ученый считал, что теория — это полководец, а практика — солдат. Но говоря о потоках, он предупреждал: если хочешь изучать движение жидкости, то сначала наблюдай, а потом уже применяй рассуждение. Следуя сам этим правилам, Леонардо да Винчи разобрался в сущности многих явлений, происходящих в реках, и пришел к таким выводам, к которым инженеры и ученые придут лишь 300—400 лет спустя. Недаром другой великий ученый, Галилей, говорил, что изучение движения небесных тел представляет меньшие трудности, чем изучение протекающих перед нашими глазами струй реки.

К вопросам изучения гидродинамических структур в естественных потоках мы еще только подходим, да и то в основном с позиций статистики, а не с позиций создания хотя бы грубых, но надежных графических схем этих структур.

Исследование и фиксация гидродинамических структур в потоке представляют значительные трудности. К сожалению, в гидрологии лишь в последние годы начали внедряться новые, совершенные методы измерений; в области же измерений характеристик турбулентности, данные которых удовлетворяли бы требованиям структурных представлений о потоке, работа еще только начинается. Говорят, нет необходимости изобретать ложку — она нас вполне устраивает. А вот рейка, которой пользовались еще египетские жрецы, проводившие наблюдения на Ниле 2—3 тысячи лет тому назад, и которой пользуются гидрометристы и в наши дни, уже давно нас не устраивает, но все еще незаменима.

Что уж говорить об измерениях скоростного поля потока, если до сих пор нет надежного прибора даже для измерения направления течений и приходится измерять эти направления весьма приближенно?

И зачастую исследователи в своих выводах либо основываются на умозрительных схемах, грубо осредняющих те явления, которые в действительности происходят на реках, приспосабливая природу к возможностям существующего математического и гидравлического аппарата, либо пользуются данными, полученными для рек, созданных в лабораторных условиях и потому далеко не идентичных естественным рекам.

Особенно наглядно это проявляется в работах по изучению поведения потока на повороте русла, т. е. в излучине. Наиболее распространенное представление сводится к тому, что здесь, на излучине, речной поток образует циркуляционный винт. Согласно установившимся воззрениям, дело происходит так. Поток, набежав на участок вогнутого берега русла, начинает испытывать подпор. Вследствие этого уровень воды у вогнутого берега оказывается повышенным, и струи воды, начав опускаться вниз, ко дну, выходят затем к выпуклому берегу. Размытые на откосе вогнутого берега наносы переносятся циркуляционным течением и откладываются на выпуклом берегу, образуя пляж. Как будто бы рассуждение совершенно логичное и вполне соответствует действительности. Тем более, что перекос водной поверхности с наклоном от вогнутого берега к выпуклому подтверждается натурными измерениями. Ученые, занимавшиеся этим явлением, выполнили целый ряд лабораторных исследований по воспроизведению поперечной циркуляции. Такие опыты выполнил еще А. Я. Милович в 1912 г.; на его работы ссылаются до сего дня. Казалось бы, все ясно.

Но вот в 30-х годах А. И. Лосиевский, работая на лабораторных лотках, получает циркуляционные винты на совершенно прямолинейных руслах (впервые это явление обнаружил немецкий ученый Мюллер).

При этом выясняется, что в таких условиях образуется несколько параллельных циркуляционных винтов, и тем в большем количестве, чем шире лоток. В лотке треугольного сечения был получен только один винт.

В природе, на настоящих реках, структура потока изучалась чрезвычайно редко. Одни исследователи продолжали говорить о наличии циркуляции, другие же в естественных реках ее не обнаруживали. Характерно, что при исследованиях течений на повороте русла почему-то избегали применять термин «излучина». Говорили о повороте, изгибе и т. п. Может быть, это одно из свидетельств того, что при постановке экспериментов больше думали о каналах и лотках, чем о настоящих речных излучинах. Между тем, если бы исследователи больше помнили о настоящей речной излучине, часто имеющей сложные очертания в плане, и о том, каково соотношение глубины и ширины русла, они осторожнее предлагали бы свои схемы строения потока на излучине и осторожнее переносили бы данные лабораторного эксперимента на естественную реку.

Дело в том, что в лабораториях, изучая гидравлику потока, исследователь вынужден резко искажать соотношения масштабов глубины и ширины русла, так что ширина и глубина лабораторной реки разнятся несущественно. (Чтобы увидеть, каково распределение скоростей в потоке по его глубине, надо, чтобы глубина потока позволяла установить внутри него достаточно большой измерительный прибор.) В действительности же, в настоящей реке, глубина русла составляет ничтожную долю его ширины. Достаточно часто оказывается, что при ширине реки в 1 км ее глубина составляет всего 10—15 м, т. е. глубина в 75—100 раз (!) меньше ширины.

(Если вычертить поперечное сечение реки таким образом, чтобы масштаб ширины и глубины русла был одинаков, то на чертеже получилась бы узенькая, но очень длинная полоска.) Не надо доказывать, что при столь вытянутых формах поперечного сечения реки предполагать наличие общего циркуляционного винта нет никаких оснований. Речь может идти только о существовании в реках нескольких циркуляционных винтов.

Таким образом, скудость представлений о том, как происходят переформирования речного русла на настоящих реках, ограниченные возможности использования для суждений о русловом процессе наших знаний по гидравлике, накопленных к настоящему времени, приводили к неизбежному выводу: необходимо заново пересмотреть существующие взгляды на методы изучения этого сложного природного процесса.

Смещение речного русла в плане

Было это в 1959 г. В Отдел русловых процессов пришел за советом главный специалист-гидролог института «Теплоэлектропроект» В. И. Иванов. Тогда этот институт занимался проектированием тепловых электростанций и строительством линий высоковольтных передач.

В. И. Иванов рассказал, что наибольшие трудности в проектировании линий высоковольтных передач возникают в тех случаях, когда линии должны пересекать реки. Длина пролета между опорами определяет высоту мачт, на которых подвешиваются провода. Высокие мачты — сооружения дорогостоящие, и проектировщики, стремясь не допускать на переходах слишком длинных пролетов, располагают опоры возможно ближе к берегу русла. Вот тут-то и возникают осложнения. Опоры, поставленные близко от бровки русла, уже через несколько лет оказываются подмытыми рекой, тогда как по нормам они должны стоять не менее пятидесяти лет. Бывают случаи, когда падение подмытой переходной опоры приводит к падению целой серии смежных опор. Случается, что подмывает опоры, расположенные и на пойме реки. Во время разлива могут появиться и новые протоки, и большие ямы, и навалы льда, фундамент опоры начинает разрушаться ветровой волной. В. И Иванов просил нас прежде всего разработать правила размещения опор, гарантирующие их безаварийную работу хотя бы в течение нескольких десятков лет.

Так началось многолетнее сотрудничество нашего института с «Теплоэлектропроектом», а затем с институтом «Энергосетьпроект», которому в дальнейшем было передано проектирование всех линий высоковольтных передач.

За это время нам пришлось давать заключения по множеству переходов высоковольтных линий через реки, выезжать на места, выступать в качестве арбитра между проектировщиками и строителями. Первые стремятся возможно точнее выполнить проектные раз-

работки в натуре, вторые — сделать работу попроще и побыстрее. Во всяком случае, так бывает довольно часто.

Мне особенно запомнился случай на реке Тисе.

К тому времени, когда нам пришлось выехать на эту реку, у нас уже установились очень тесные контакты с гидрологами «Теплоэлектропроекта». В конце мая 1963 г. в Государственный гидрологический институт приехал новый главный гидролог «Теплоэлектропроекта» П. А. Оболенский и гидролог П. С. Гончаров, занимавшийся там же проектированием переходов. Они были встревожены тем, что наше заключение о значительной неустойчивости русла этой реки на том участке, где проектировался переход линии высоковольтной передачи, опротестовывается строителями. Строители утверждали, что русло Тисы в этом месте устойчивое и потому нет необходимости ни увеличивать ширину пролета перехода (чтобы выйти из опасной зоны плановых деформаций русла), ни тем более ставить опору на переходе на мостовом фундаменте, на чем настаивали, основываясь на нашем заключении, гидрологи «Теплоэлектропроекта».

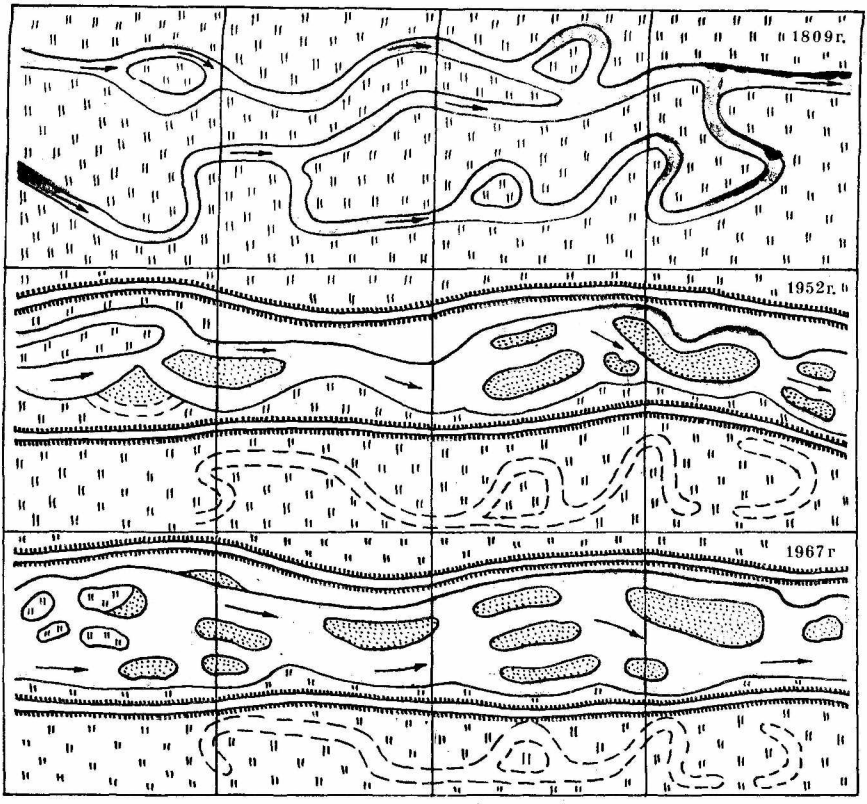
«Мы-то убеждены в неустойчивости русла Тисы на переходе, но помогите нам убедить в этом строителей, которые, очевидно, имеют слабое представление о русловом процессе вообще, а о Тисе особенно,— просили наши гости.— Строители — народ сугубо практический, никакими общими и теоретическими рассуждениями их не убедишь. Здесь нужны очевидные факты».

В начале июня я выехал во Львов. Представители строительной организации мне очень понравились: чувствовался большой опыт, реальный подход к решению задач, трезвая оценка обстановки.

Однако между нами сразу же разгорелся спор о взаимодействии теории с практикой. Само возникновение спора показало, что и в дальнейшем договориться нам будет нелегко. Но тем больше возрастала моя ответственность как представителя всесоюзного гидрологического центра.

Разговор начался с того, что, мол, наука — хорошая вещь, но часто занимается вопросами, от практики далекими, а поэтому бесполезными. Порой трудно бывает предсказать, какой практический выход найдут те или иные научные исследования, возражал я. Когда Наполеону Бонапарту продемонстрировали явления, доказывающие существование электричества, он сказал, что они забавны, но никогда не найдут практического применения. Допустим, Наполеон был далек от науки, но ведь подобные промахи случаются и с великими учеными. Так, Гальвани не оценил своих же опытов по воздействию электрического тока на мускулы лягушки. А Эйнштейн не признавал квантовой теории Нильса Бора. Бор же не понимал, каким образом такой умный человек, как Эйнштейн, может заниматься теорией относительности.

Чтобы окончательно решить наш спор, выехали прямо на Тису. Тиса оказалась обвалованной — валы сокращают ширину разлива и предохраняют от затопления угодья на ее пойме. Однако в пространстве между валами река имеет возможность образовывать излучины,



Изменения русла р. Тиса. В 1809 г. река текла двумя рукавами, широко разливаясь по пойме. Потом были построены дамбы, отгородившие правый проток, который пересох и заилился. В 1952 г. в пространстве между дамбами двигались крупные скопления наносов. В 1967 г. русло стало еще более подвижным, в нем перемещаются сильно раздробленные скопления наносов.

спрямлять их, вновь развивать и прорывать перемычки. Дно Тисы каменистое, и трудно ожидать, что она станет размывать его в глубину. И все же фундаменты опор моста ниже перехода, построенные в прошлом веке, заглублены под дно реки на 16—20 м. Они никогда не подмывались рекой. Что же касается деформаций русла в плане, то они по всем признакам значительны: во многих местах берега капитально укреплены — и все же повсюду видны подмывы. А за ограждающими валами виноградники, сады, плантации овощей — их надо оберегать от буйных вод половодья и от переувлажнения. На дорогах вдоль поймы непрерывные аллеи черешни.

Нашли в деревне деда-старожила. Он рассказал, как из-за подмыва берегов русла Тисы переносились кладбище, жилые дома,

дворы. В верхних слоях грунта на пойме — глина, и местные жители, добавляя в нее солому, делают кирпичи. Из этих кирпичей сооружают и хозяйственные постройки, и красивые коттеджи с огромными венецианскими окнами. Строят везде и даже на пойме, надеясь на защитные валы. Однако бывали случаи, когда река прорывала эти валы в половодье; вода устремлялась в прорвы, все разрушая на своем пути.

Всех этих причин более чем достаточно, чтобы местные землеустроители работали на пойме очень тщательно: они систематически следят за состоянием реки, поймы и ограждающих валов и практически ежегодно производят топографическую съемку. Зная это, я решил, что лучше всего убедят моих оппонентов-строителей съемки реки Тисы разных лет, сличение последней съемки с натурой.

Отправились в райцентр — небольшой городок Виноградов разыскивать землеустроителей. Землеустроители располагались в большом красивом белом доме — бывшей помещичьей усадьбе. Зашли в один из кабинетов. Навстречу нам поднялся красивый, какой-то особенно элегантный, несмотря на свои более чем семьдесят лет, человек. Узнав, что мы ищем для сравнения старые карты хотя бы десятилетней давности, он улыбнулся: «Я могу показать Вам съемки реки Тисы с 1809 года». Перед нами легла кипа идеально вычерченных планов реки. Даже беглый просмотр карт показал, как сильно меняется русло Тисы от года к году. В качестве съемок не было ни малейших сомнений: местоположения дамб и других устойчивых местных ориентиров совпадали идеально. Нанеся на карту сегодняшнее положение бровок подмываемых берегов, я еще раз убедился, как значительны деформации берегов русла.

Полученные выводы были тем более убедительны, что наметившиеся тенденции в ходе деформаций русла в плане хорошо совпадали с теми деформациями, которые присущи типу руслового процесса, происходящему на исследованном участке — на излучинах длительное время наблюдался однонаправленный размыв вогнутого берега и намыв противоположного, выпуклого берега реки. Можно было проследить последовательное развитие спрямляющих эти излучины протоков, сползание на прямых участках крупных галечных гряд и побочней и т. п.

Строители были благодарны за то, что им наглядно и убедительно продемонстрировали, как важно правильно оценивать деформации — ведь только так и можно предотвратить ошибки при размещении опор и выборе их конструкций.

Тут же, на месте, мы выбрали точки расположения переходных опор и приняли решение не ставить переходную опору в русле реки, что позволяло отказаться от дорогостоящих кессонных работ.

Переход был построен в том же году.

Через несколько лет мне пришлось вновь побывать в этих местах и увидеть построенный переход. Русло реки сильно изменилось, но процесс его деформаций переходу не угрожал: ведь перед строительством деформации речного русла оценивались не только не-

посредственно в створе перехода, но и на значительном расстоянии от него, на смежных участках русла. Это дало возможность предвидеть взаимовлияние смежных излучин и протоков реки, а потому и получить особенно надежные выводы о деформациях русла в створе самого перехода.

Таков счастливый конец эпопеи на Тисе.

Песчаные гряды

В 1968 г. мы получили на отзыв технические рекомендации по проектированию переходов магистральных трубопроводов через реки. Надо сказать, что уже в самые ближайшие годы число переходов трубопроводов через реки достигнет нескольких тысяч, причем речь идет только о переходах через крупные и средние реки. Следовательно, проблема их проектирования и рационального размещения чрезвычайно важна.

Ознакомившись с рекомендациями, мы обнаружили, что их авторам все реки представляются одинаковыми и все — со слабодеформируемым руслом. Составители рекомендаций совершенно игнорировали тот бесспорный факт, что русло смещается в плане. Между тем в наших работах, опубликованных еще в 50-х годах, не раз подчеркивалось, что эти смещения могут достигать десятков, а иногда и сотен метров в год.

Вскоре наш институт получил задание разработать новые рекомендации по учету руслового процесса при проектировании переходов трубопроводов через реки. Из бесед с проектировщиками и из специальной литературы выяснилось много интересного. (Особенно содержательной показалась мне книга С. И. Левина «Предупреждение аварий и ремонт подводных трубопроводов», вышедшая в Госстройиздате в 1963 г.)

Оказалось, проблема строительства переходов трубопроводов через реки беспокоит проектировщиков и у нас, и за рубежом. Зачастую переходы трубопроводов выходят из строя уже через два-три года после сдачи в эксплуатацию, хотя нормативный срок их безаварийной работы — три десятилетия. Анализ показывает, что основная причина аварий — неблагоприятное воздействие деформаций речного русла на проложенные по его дну трубы. Вот что происходит.

Труба, заложенная в специально вырытую траншею, пересекающую русло реки, постепенно вымывается потоком, повисает местами над дном и под действием турбулентных возмущений в потоке начинает вибрировать. Металл при этом дает трещины, при образовании которых, возможно, возникает искра. Это приводит к взрыву газа, идущего под давлением в 50 атмосфер. Ремонт перехода трубопровода до недавнего времени обходился во столько же, во сколько обходится строительство нового перехода, особенно в том случае, если ремонт требовал водолазных работ. В последнее время способы строительства переходов трубопроводов через реки зна-

чительно усовершенствованы. Но выход трубопровода из строя по-прежнему приносит убытки, не только прямые, но и косвенные — притом значительные убытки: потребители, не получающие газа или нефти, должны приостанавливать свое производство.

Чаще всего размыв трубы происходит по той причине, что при ее прокладке не учитывается наличие в русле реки крупных сползающих гряд. Эти гряды могут достигать высоты более 10 м, а длина их составляет в среднем около 6—8 ширин русла. Например, при ширине реки 200 м длина сползающей песчаной гряды может достигать 1200—1600 м. А на крупной реке шириной около километра длина гряды может быть равна 6—8 км. Естественно, что проектировщик, не знающий законов развития русла и перемещения наносов, придя на участок такой реки и, скажем, увидев гребень гряды, никак не может предположить, что мелководье в этом створе в ближайшие несколько лет, а иногда и месяцев неизбежно сменится большими глубинами: гряда сползет вниз по течению и гребень ее, конечно, также сместится вниз по течению, а на его место надвинется подвалье вышерасположенной гряды (глубоководный участок русла, располагающийся ниже гребня гряды).

Левин в своей книге «Предупреждение аварий и ремонт подводных трубопроводов» как раз описывает такой случай, происшедший на Волге ниже Куйбышевского водохранилища. Переход трубопровода был построен здесь на относительно мелководном участке русла. Каково же было удивление строителей, когда буквально через несколько лет трубопровод, заложенный в дно реки, оказался висящим над этим дном на высоте нескольких метров. Что же произошло? Выяснилось, что, не слишком задумываясь о деформациях русла, строители проложили трубопровод непосредственно выше гребня гряды — побочня (прибереrового скопления наносов). Когда гряда сползла вниз по течению, на створ перехода трубопровода надвинулось подвалье расположенной выше гряды и трубопровод повис над дном реки.

Работу по исследованию переходов трубопроводов решили начать с изучения того, что происходит на уже построенных переходах. Выяснением состояния перехода трубопроводов и особенностей деформаций русла и поймы реки на прилегающих к переходу участках занялась специальная экспедиция. Как бы ни был хорошо известен процесс этих деформаций, природа создает такое множество разнообразных вариантов, что в каждом конкретном случае нужно заново изучать русловой процесс, знакомясь с его местными особенностями.

В распоряжение экспедиции выделили специально оборудованную автомашину с лодкой и понтоном — ведь нам предстояло измерять на реке глубину русла, составлять характеристики грунтов дна, скоростей течения, определять размеры и особенности деформаций различных образований в русле реки и на пойме. Мы должны были исследовать реки с различным типом русловых деформаций, обращая особенное внимание на сбор данных о грядах в русле реки.

Результаты этой экспедиции еще раз подтвердили, как велика роль грядового движения наносов, даже относительно небольших гряд, высотой около 1 м,— от этого движения во многом и зависит сохранность переходов трубопроводов.

По существовавшим тогда нормативам трубы на переходе через реку надо было углублять только на 1 м ниже поверхности дна русла. Считалось, что метровой глубины достаточно, чтобы предотвратить поломку труб якорями или случайно затонувшими тяжелыми предметами. При наличии же грядового движения наносов самое важное — определить отметку, от которой надо отсчитывать этот самый метр (а она не может быть выше, чем отметка подвалий сползающих по руслу реки гряд).

Обнаружение гряд на дне речного русла в настоящее время не представляет особых трудностей, если прибегнуть к помощи эхолота. Как известно, эхолот — это прибор, который посылает звуковой импульс сквозь толщу воды, а затем принимает его отражение от дна и записывает полученный сигнал на ленту самописца. Установив эхолот на лодке, мы получаем непрерывную запись глубин по ходу лодки. Особенно хорошо гряды обнаруживаются при продольном промере, когда лодка с эхолотом идет вдоль по реке. Обычно выполняют ряд параллельных маршрутов, что дает возможность получить объемное представление о грядах.

К сожалению, еще не все проектные учреждения располагают достаточным количеством эхолотов, а без них довольно трудно получить сведения о грядах.

Расскажу один довольно забавный случай, происшедший при обследовании русла реки Десны у города Брянска, где мы искали место для размещения водозабора.

Дело происходило в начале ноября. Было морозно, у берегов держались забереги. Мы шли вдоль берега, обследуя русло, и жалели, что у нас нет лодки и эхолота, чтобы хоть в общем выяснить, есть ли на реке гряды. Был с нами и представитель проектирующей организации—инженер лет шестидесяти с лишним. Наш спутник, услышав про гряды, вдруг остановился и заявил, что ради науки готов пострадать и хоть сейчас нырнет в ледяную воду. Мы посмеялись, но наш товарищ начал быстро раздеваться. Несмотря на наши протесты, он, махнув на прощание рукой, нырнул с довольно высокого берега. Через несколько секунд над поверхностью еще тонких заберегов показалась его голова, и мы услышали радостный голос: «Есть гряды высотой больше метра, быстро сползают». Нырнув еще несколько раз, он вышел на берег, ломая ледок грудью. Оказалось, что наш спутник уже много лет увлекается зимним плаванием и состоит в клубе ленинградских «моржей».

Вообще говоря, как бы ни были совершенны промеры дна русла, очень важно посмотреть на него собственными глазами, и надо было бы использовать акваланги при гидрологических изысканиях не от случая к случаю, а постоянно. Правильно поступил Ленинградский гидрометеорологический институт, организовав специальную секцию подводного плавания, в которой готовят аквалангис-

тов. К сожалению, они занимаются главным образом морскими исследованиями.

Работы по трубопроводам завершились созданием первого в нашей практике пособия по учету руслового процесса при проектировании переходов трубопроводов через равнинные реки.

Составление такого пособия, да еще в виде рекомендаций по проектированию,— дело очень ответственное. Превращать в норму можно только то, что не вызывает сомнения, в чем есть полная уверенность. А все ли так ясно в проблеме переформирований речных русел и пойм? Нет. Что же, значит, надо отказаться от норм? Опять-таки нет. Мы нашли выход, разделив нормы на обязательную и только рекомендуемую части. Первая часть обязывала проектировщиков неукоснительно учитывать русловой процесс при проектировании, вторая же, необязательная часть открывала большой простор для инженерной мысли — проверяй, предлагай новое.

Вот еще один интересный случай.

Есть на реке Медведице, притоке Дона, Себряковский цементный завод, считающийся одним из крупнейших в Европе. Он берет из реки очень мало воды — меньше кубометра в секунду. Но тем не менее, если воды нет, производство остановится. И вдруг выясняется, что водозабор этого завода занесло песком. Пришлось выехать на место для выяснения причин.

Выходим на берег реки. Здесь стоит небольшая насосная станция, а где-то в нескольких десятках метров от нее под водой находится водоприемное устройство. По проекту оно должно возвышаться над дном реки, чтобы исключить возможность занесения его песком. Искать водоприемник не пришлось: над ним со дна реки поднимались большие воздушные пузыри. Оказалось, что пузыри никакого отношения к водоприемнику не имеют: они поднимаются из шлемов водолазов, которые лопатами разгребают песок над водоприемным устройством, работа идет круглые сутки.

Стоило проехать вверх по реке на 2—3 км, промеряя глубину русла обычной наметкой, и причина занесения водозабора выяснилась. По руслу Медведицы даже в низкую воду сползали крупные песчаные гряды высотой около 2 и длиной около 200 м. Откуда взялись эти гряды, тоже было достаточно ясно: еще выше по реке на протяжении нескольких километров поток подмывал вогнутый песчаный берег. Большие массы песка, поступая в реку, и формировали эти самые гряды. Вполне понятно, что, когда вершина гряды, сползающей по руслу, достигала створа водозабора, он оказывался занесенным песком. Гряда сползала ниже по течению — и водозабор обнажался. За год через створ водозабора переползало несколько гряд, что и вызывало периодические колебания отметок дна реки.

Проектировщики не заметили движения этих гряд, потому что обследовали только очень небольшой участок реки непосредственно у сооружения. Строители тоже не видели этих гряд, поскольку сооружали водозабор в то время, когда в створе водозабора находилась наиболее пониженная часть гряды — ее глубоководное

подвалье. Что же можно предпринять в такой ситуации? Казалось, можно было бы повысить отметки заложения оголовка (водоприемного устройства водозабора)—тогда при проходе через створ наиболее повышенной части гряды, сползающей по руслу, водозаборные отверстия не заваливались бы песком. Однако в этом случае над оголовком были бы очень малые глубины, и зимой он мог бы вмерзать в ледяной покров. И выход здесь — в регулировании движения песчаных гряд.

Одним из возможных вариантов воздействия на гряды, сползающие по руслу, могло бы явиться устройство выше створа водозабора шпоры, благодаря которой гряды отклонялись бы к середине реки, минуя прибрежную часть русла. Местные условия — наличие хорошо развитых излучин — допускали и другой вариант: спрямлять излучины, чтобы уменьшить расход наносов в главном русле и направить часть наносов в обход створа водозабора. Но этот вариант требовал проверки в лабораторных условиях на модели, в то время как эффективность первого варианта сомнений не вызывала, тем более, что как раз в том месте, где предлагалось возвести шпору, были обнаружены остатки подобного сооружения из каменной наброски. По рассказам, оно прекрасно выполняло свое назначение, отклоняя поток от левого берега; глубина реки в это время в створе водозабора была значительной.

Как видите, найти выход было не так уж трудно, следовало только внимательно посмотреть на реку и осмыслить происходящие на ней переформирования русла и поймы.

Русловой процесс и конструкции сооружений на реках

В 1972 г. в Государственный гидрологический институт поступила просьба дать заключение о деформациях русла Волги у рассеивающего выпуска сточных вод Волжского автомобильного завода в городе Тольятти.

Рассеивающий выпуск представляет собой сооружение, которое должно обеспечивать хорошее перемешивание сточных вод, поступающих в реку. Сегодня, когда борьба с загрязнением природных вод все усиливается, такое сооружение имеет особенно большое значение. Конструктивно этот выпуск представляет собой трубу большого диаметра, порядка 1 м, с приваренными к ней выпускными патрубками. Выпуск укладывается на дно реки поперек течения. По патрубкам сточные воды поступают в реку сразу на большом фронте, что обеспечивает быстрое их перемешивание с водами реки.

Все кажется удачным в этой конструкции, но вот беда: забыли, что дно русла подвижно. Наползающие песчаные гряды засыпали трубу мощным слоем песка — толщиной до 4 м, а на некоторых участках, где на створ рассеивающего выпуска надвинулось подвалье крупной гряды, труба начала подмываться и повисла над дном. Водосброс пришел в аварийное состояние: размытая часть оказалась под угрозой разрушения, а на части, заваленной песком,

перестали действовать патрубки. Прекращение же сброса сточных вод может привести к закрытию предприятия, которое обеспечивает рассеивающий выпуск, а это влечет за собой огромные убытки.

Госсанинспекция забила тревогу. Волновалась и заводская администрация: ее беспокоила не только угроза остановки производства, но и возможная задержка введения в строй третьей очереди завода. Поэтому задача разработки рекомендаций по обеспечению нормальной работы рассеивающего выпуска сточных вод была особенно срочной и ответственной.

Самолет прилетел в Куйбышев ночью. Нас встречали представители завода. Ехали в темноте на микроавтобусе. Сколько мы ни вглядывались в мелькавшие перед нами силуэты, надеясь заметить хоть малейшие признаки Волги, ничего, кроме ровной степи и отдельных строений, увидеть не удавалось. Так и добрались до гостиницы автозавода.

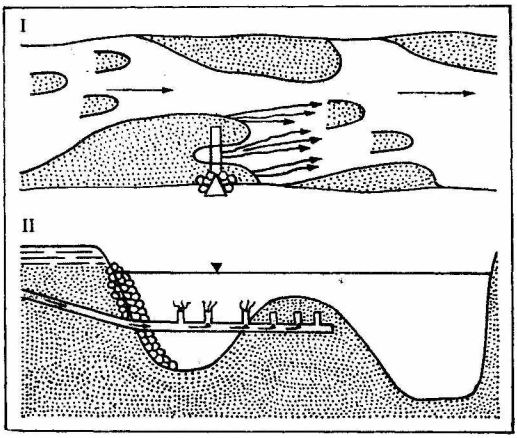
Устроили нас в уютном, весьма современном небольшом доме в дачном поселке. Электрическая плита, холодильник, но, к сожалению... не работает водопровод: воду привозят на машине, за 10 км от поселка. Объяснили — ремонт водопровода. Утром огляделись вокруг повнимательнее. Домики стоят в молодой рощице. Вокруг много старых пней, свидетельствующих, что когда-то здесь рос могучий лес. На противоположном правом берегу Волги — знаменитые Жигули. Высокие холмы, выступающие местами скалы — там заповедник. Но ощущение первозданности местности несколько нарушается отдельными буровыми вышками и небольшими бараками, просвечивающими среди зелени деревьев. Сентябрь, но лес еще имеет вполне летний вид. Да, Самарская лука, в пределах которой расположены Жигули, очень поэтична.

Однако дело не ждет. Надо ехать к рассеивающему выпуску. Наши товарищи, прибывшие на место работ несколькими днями раньше, ждали нас с уже готовыми эхограммами.

До темноты нужно успеть осмотреть участок реки у выпуска сточных вод, пока Куйбышевская ГЭС работает с полной нагрузкой и на всем участке реки ниже плотины ГЭС уровень воды повышен. Сам же рассеивающий выпуск и его работу лучше осматривать утром, когда будет низкий уровень воды.

Отправляемся осматривать участок реки на заводском катере. Одновременно проводим и эхолотирование. Очень важно не только оценить глубину русла на участке рассеивающего выпуска, но и выяснить, нет ли на дне реки сползающих песчаных гряд, их размеры и длину, скорость сползания. Эти гряды осложняют работу не только рассеивающего выпуска, но и многих других сооружений в русле реки: их сползание приводит то к занесению этих сооружений, то к их подмыву.

Нам надо несколько раз пересечь выпуск, двигаясь вдоль по реке. Капитан катера, крупный седой человек с трубкой в зубах, безропотно выполняет все наши просьбы, ведя катер в нужном нам направлении. Однако чувствуется, как осторожно и аккуратно ведет он наше суденышко над патрубками выпуска на тех участках,



Рассеивающий выпуск в плане (I) и профиле (II). Надвинувшийся побочень завалил концевую часть выпуска. Каменная отсыпка, которая должна была задержать побочень, привела к местному размыву и провисанию трубы выпуска.

где между днищем катера и трубой, по-видимому, всего десяток-другой сантиметров. Движения нашего капитана скупы, суденышко идет точно по заданному курсу, подчиняясь этому настоящему морскому волку.

Пока мы занимались эхолотированием, поднимались к плотине ГЭС, ходили по протокам, осматривая берега и песчаные скопления в русле реки, уровень воды поднялся больше чем на метр. Там, где еще недавно была видна длинная дамба, спокойно текла река.

Наш осмотр полностью подтвердил выводы, полученные при изучении карт этого участка и предварительных его исследованиях.

При исследовании деформаций речного русла прежде всего важно найти источник поступления наносов, и тогда многое становится ясным. Так и в нашем случае прежде всего надо выяснить, откуда берутся наносы, заносящие рассеивающий выпуск сточных вод,— и тогда можно было бы оценить, сколь длительным будет этот процесс, станет ли он усиливаться или ослабевать, и многие другие факторы, которые помогут решить, какой искать выход из создавшегося положения.

Ниже плотин водохранилищ, будь то на малой или на большой реке, сбрасывающаяся через водосбросы вода течет со скоростями, намного превышающими те, которые наблюдались до строительства плотины. Вследствие этого поток получает способность производить большую работу, и начинаются размывы его ложа; ниже плотины образуется так называемая яма размыва. Но даже и в том случае, когда существенного увеличения скоростей течения нет, размывы все равно возникают и быстро прогрессируют. Причина этого — нарушение естественного баланса наносов. Если до строительства плотины размывы, происходившие на данном участке реки, компенсировались поступлением наносов с вышележащего участка, то после возведения плотины наносы задерживаются и скапливаются в водохранилище и на участок ниже плотины больше не поступают или поступают в небольшом количестве. Таким образом, про-

исходящие здесь размывы не компенсируются поступлением наносов с верхнего участка, и, следовательно, начинает преобладать однонаправленный размыв.

Обычно когда говорят о размыве, то представляют себе процесс врезания русла в подстилающие его породы. Однако смысл термина «размыв» ограничивать этим нельзя. Под размывом следует понимать не только врезание русла, но и его расширение. Врезание происходит в том случае, если русло реки подстилается размывающимися породами. Если же под слоем легкоразмываемых речных отложений лежат трудноразмывающиеся породы, река не имеет возможности врезаться в них и, перемывая собственные отложения, начинает расширять свое русло.

Наносы, поступающие от размыва русла, перемещаются вниз по течению реки. Выйдя за пределы участка реки с повышенными скоростями, наносы начинают накапливаться в русле в результате замедления скорости сползания гряд, а также вследствие осаждения более мелких наносов. Поэтому ниже зоны размыва обычно формируется зона скопления наносов — так называемая аккумулятивная зона. Размыв, начавшийся непосредственно ниже плотины, постепенно распространяется все ниже по реке, естественно, в этом же направлении смещается и аккумулятивная зона. Лишь на участке, на котором восстановится прежний, существовавший до строительства плотины баланс наносов, сползание описываемых зон прекращается.

Как показали картографические материалы прежних лет, да и полевое обследование на интересующем нас участке, в первые же годы после строительства плотины Куйбышевской ГЭС ниже плотины сформировалась типичная яма размыва. Она постепенно сползает вниз по течению, а ниже ее имеется достаточно мощная, также сползающая аккумулятивная зона. Оказывается, что рассеивающий выпуск находится сейчас как раз в низовой части аккумулятивной зоны. Совершенно ясно, что патрубки будет заносить до тех пор, пока на место аккумулятивной зоны не надвинется яма размыва. Благодаря особенностям размещения сбросных отверстий в теле плотины основной поток в период половодья, когда происходят наибольшие сбросы воды через плотину, отклоняется к правому берегу, из-за чего здесь и держатся значительные глубины. Поэтому аккумулятивная зона сформировалась у левого берега в виде огромного прибережного песчаного скопления — побочня — длиной в несколько километров, а высотой в несколько метров. В ширину этот побочень занял значительную часть русла. Нарастая в высоту, он продолжает сползать вниз по течению и расширяется в сторону правого берега.

Строительство дамбы в прибереговой части рассеивающего выпуска, как уже говорилось, привело к размывам у ее оголовка. Но одновременно усилилось и отложение наносов выше дамбы — и скорость нарастания побочня в высоту увеличилась. Нетрудно представить себе, как накопившийся выше выпуска песок начнет поступать в проран у оголовка дамбы и завалит его.

Пока аккумулятивная зона, надвигающаяся на выпуск, минует *его и сменится зоной размыва, пройдет не один десяток лет. Но* мы не можем ждать, когда это произойдет, следовательно, надо предпринять какие-то меры по обеспечению нормальной работы рассеивающего выпуска. Зная, как развивается процесс, уже значительно проще предложить и меры по предотвращению его неблагоприятных последствий. В качестве, так сказать, пожарной меры можно закрепить с помощью бетонных свай высотное положение труб выпуска на размытом участке и перенести на этот участок патрубки, рассеивающие сточные воды. Тем самым на этом участке будет предотвращена угроза срыва труб — в том случае, если размыв у оголовка дамбы будет продолжаться, или в том случае, если на этот участок при сползании побочня навалятся пески.

Радикальное же решение вопроса заключается в следующем: трубу рассеивающего выпуска нужно продлить до глубоководной правобережной части русла, которая никогда не станет замываться. Здесь ее надо уложить не непосредственно по дну, а на известной высоте над дном, с тем чтобы сползающие по реке небольшие гряды не накапливались у трубы и не заваливали бы ее. Так как участок этот несудоходен (суда идут по специальному судоходному каналу), то особых возражений со стороны речников быть не должно.

Как видите, когда известен ход процесса, найти правильное решение не так уж трудно. Нужно только внимательно посмотреть, что же происходит на реке. Сделать же это может и обыкновенный проектировщик — стоит только по-настоящему этого захотеть.

Речная пойма. Источники поступления наносов в реку

Есть в Ленинградской области река Полометь, верховья которой расположены в районе Валдая. Речка эта небольшая, в межень ее ширина составляет всего 30—40 м, а то и меньше. Но в половодье ее пойма, достигающая в ширину 6 км, ежегодно затопляется. Пойма занята богатейшими покосами, которые служат десяткам колхозов. С некоторых пор на пойму стали выноситься пески, распространяющиеся по обе стороны от речного русла на сотни метров, а в глубине поймы, на ее поверхности, стал откладываться тончайший слой очень мелких глинистых наносов, попадающих туда в половодье. Оседая на траве, эти наносы настолько ухудшали качество сена, что скот отказывался его есть.

Местные колхозы встали перед дилеммой — либо искать новые сенокосы и пастбища — а найти их в хорошо обжитой местности не так-то легко,— либо принять необходимые меры против занесения и заиления поймы. Встал даже вопрос о возможном переселении колхозов.

В середине 50-х годов, всего через два-три года после сформирования Отдела русловых процессов Государственного гидрологического института, Ленинградскому институту по проектированию

водохозяйственного и мелиоративного строительства (Ленгипроводхозу) было поручено разработать проект мероприятий по улучшению полометских заливных лугов. Далее события развивались следующим образом.

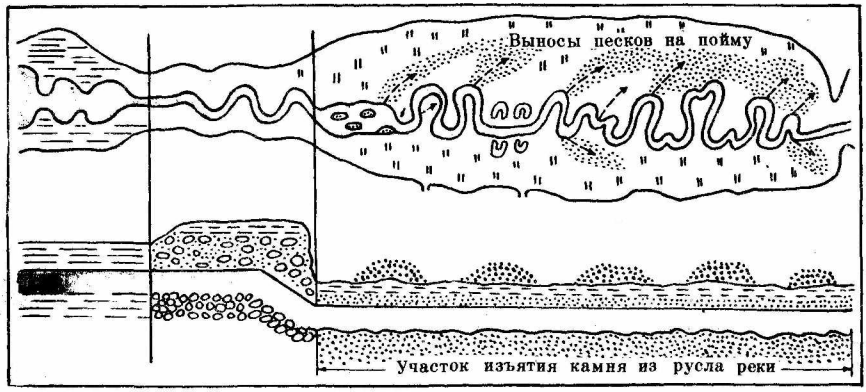
Ленгипроводхоз запросил в Государственном гидрологическом институте сведения о расходах взвешенных наносов, а также просил выяснить причины занесения полометской поймы.

Через несколько дней к нам приехала главный гидролог Ленгипроводхоза Л. М. Сидоркина. В то время мы уже обладали достаточно, как нам казалось, отчетливыми представлениями о том, что такое русловой процесс, и нам было очень интересно применить свои знания на практике. Решение сравнительно новой для нас задачи — с поймой мы еще не имели дел вплотную — давало нам возможность расширить свои представления о русловом процессе и получить новые данные для нашей науки. Кроме того, на Полометри была организована специальная русловая станция нашего института, где проводились наблюдения за деформациями русла этой реки и сопутствующими им гидрологическими явлениями. Так что мы с большой радостью взялись за это задание.

Прежде всего мы попытались выяснить намерения проектировщиков.

Ход их рассуждений был очень прост и, казалось бы, логичен. Раз река несет много наносов, значит, надо устроить в ее верховьях водохранилище, способное задерживать наносы, поступающие, как обычно, с водосбора в результате смыва почв и грунтов талыми и дождевыми водами. В водохранилище наносы будут осаждаться и отстаиваться, тогда ниже водохранилища река понесет чистую воду и вынос наносов на пойму прекратится.

Однако хорошо зная водосбор реки Полометри и деформации, которые происходят в ее русле, можно было легко понять, что задача эта так просто не решается. Убеждать наших заказчиков из Ленгипроводхоза в том, что получение данных только о взвешенных наносах задачи не решит, не пришлось. Мы предложили провести совместные полевые обследования Полометри на всем ее протяжении — от истока до конца пойменного участка с гибнущими сенокосами, чтобы выяснить, откуда берутся наносы и как они переносятся рекой. Берега Полометри покрыты травой и лесами и слабо распаханы, в верховьях реки уже есть естественные озера, и здесь наносы образовываться не могут. Значит, надо искать источники поступления наносов в другом месте, а потом уже думать, как с ними бороться. Решили сначала провести рекогносцировочное обследование реки, а затем начинать детальные исследования. На рекогносцировку поехали мы с Н. Е. Кондратьевым, а за более детальные исследования потом взялись старший инженер нашей Валдайской русловой станции В. А. Виноградов и представители Ленгипроводхоза. (Забегая вперед, следует сказать, что исследования эти оказались очень полезными, так как позволили отработать приемы полевых изысканий руслового процесса, которые получили в последующем название гидроморфологической съемки.)



Так выглядит р. Полометь в плане и в разрезе.

И вот мы на месте событий, там, где начинается река Полометь. Какая чистая вода в озере, из которого она берет начало! Да и в реке вода прозрачная, без всяких взвесей, каждый камень на дне виден. Ни песка, ни растительности в русле реки нет — одни крупные валуны.

Долина этой речки узкая и глубокая. На обнаженных склонах видны слои глинистых отложений с отдельными валунами. Вот эти-то валуны, падая в реку при подмыве ее берегов, и оказываются на дне русла, а вся мелочь мгновенно выносится потоком вниз по течению, поскольку уклоны реки большие. Ясно видны и признаки больших скоростей течения — стоячие волны. Кажется, будто световые зайчики ползут по дну реки — это солнечные лучи, преломляясь в струях течения, отражаются на дне русла.

Наконец, когда прошли не менее 15 км вниз по течению, в русле начали появляться сначала галька, потом песок. На откосах склонов долины валуны все еще видны, а в русле уже исчезли. Разыскали старожила:

— Слушай, дед! Река всегда была такой, как сейчас?

— Да нет, милые, раньше мы тут форель ловили. Заберешься на камень в реке — и уди себе хоть целый день.

— А куда же исчезли камни?

— Вывезли камни, вывезли все подчистую, когда начали мостить дорогу Москва — Петербург. Еще отец мой работал на вывозке камня. Вот и спуски, по которым съезжали к реке телеги, сохранились. Берега-то у нее крутые, высокие.

— Ну и что дальше случилось?

— А как вывезли камень, сняли со дна реки мостовую, так и начала вода мыть русло и выносить песок. Если пойдете вниз по реке, то увидите, сколько под мостом в деревне песку нанесло — метра на три дно в пролетах моста поднялось.

— Река ниже деревни в широкую низину выходит — у вас там теперь заливные луга, огороды в пойме. Как там раньше все было?

— А как вышла река на широкие заливные луга и потекла медленнее, стала она эти пески откладывать на дне русла. Оно повысилось, и пойма начала затапливаться глубже, чем раньше. Появились прорывы в береговых валах, и вместе с водой пошел на пойму и песок. Увидели наши мужики такое дело, расписали всю реку по дворам. Каждый хозяин заготавливал к весне мешки с песком, связки прутьев. Как начинала река где мыть берег, так сразу закладывали прорву, и песок на пойму не выносился. Луга у нас были замечательные! В войну бросили это дело — и стали гибнуть луга: много песка на пойму выносится в половодье. Как в пустыне стало. Да и размоин на пойме много появилось, огороды гибнут...

При полевом обследовании Поломети, выполненном совместно сотрудниками Ленгипроводхоза и Гидрологического института, первоначальные предположения о том, как формируются наносы на реке, как образуются прорывы береговых валов и выносится песок на пойму, полностью подтвердились. Подтвердилось и все то, что рассказывал наш старожил. Стало ясно и то, какие меры нужно принимать в первую очередь, чтобы не допустить порчу пойменных угодий на Поломети: надо следить за сохранностью береговых валов этой реки, провести обвалование русла для предотвращения выхода на пойму наносов из русла, перехватить сток притоков и, наконец, построить поперечную дамбу для предотвращения затопления поймы снизу. Создание же большого водохранилища в верховьях реки — как это проектировалось вначале — эффекта бы не дало.

Таким образом, наши исследования помогли выбрать рациональный проект нужных сооружений и избежать лишних затрат времени и средств. Надо сказать, что схема решения этой задачи была экспонирована на ВДНХ, в павильоне Гидрометслужбы, как пример того, насколько важно тщательно исследовать речное русло и пойму до того, как будет начато проектирование сооружений.

Случаи разрушения речной поймы

В Хакасской автономной области недалеко от Абакана существует Черногорский камвольно-суконный комбинат, один из крупнейших в Советском Союзе. Огромные стада хакасских овец дают ему высококачественную шерсть, а химические заводы — лавсан. Но чтобы комбинат бесперебойно работал, ему необходима вода. Водозабор комбината расположен на реке Абакан, километров на 25 выше его впадения в Енисей. На этом участке Абакан распадается на много рукавов, имеет сложную систему протоков, но основная масса вод этой реки проходит через два главных рукава — Старый и Новый Абакан. Сток воды по этим двум рукавам распределяется примерно поровну. Водозабор комбината был построен на Старом Абакане, недалеко от города Абакан. С комбинатом он соединялся 12-километровым водоводом, пересекавшим пойму. Во-

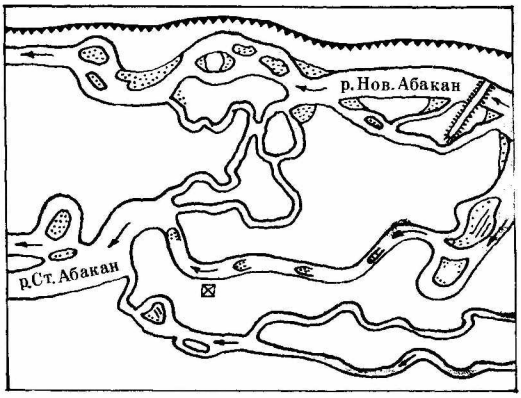


Схема протоков на р. Абакан и местоположение дамбы, перегородившей главный проток реки.
1 — бровка береговой долины, *2* — дамба, *3* — водозабор.

дозабор просуществовал несколько лет, а затем, после одного половодья, берег реки и пойма стали быстро разрушаться. Под угрозой разрушения оказался не только сам водозабор, но и насосная станция, подававшая воду на комбинат. Прекращение же подачи воды привело бы к остановке всего комбината.

И вот мы у протока Старый Абакан. Газик, доставивший нас из города к водозабору, остался на высоком берегу. Пешком пересекли пойму, идя вдоль линии водовода. Картина, открывшаяся взору, не радует: на пойме следы многочисленных промывов поверхности, новые протоки, снесенный водой мост, подмытые опоры линии высоковольтной передачи. На берегу Старого Абакана зрелище не менее удручающее. Трехэтажное здание насосной станции— его соорудили в пойме на искусственно намытом холме, чтобы избежать затопления в половодье — несколько накренилось к реке, но насосы работают. Ниже по реке очень отчетливо прослеживается цепочка бурунов на воде — там проходила бетонная ограждающая стенка, обрушившаяся в половодье. Линия же неукрепленного берега отстоит от полоски бурунов метров на 70 — это настолько смыло бе́рег за одно только половодье.

Поднимаемся на лодке вверх по реке. Открывается еще более интересное зрелище: вход во многие пойменные протоки почти полностью перекрывают огромные скопления наносов, будто здесь хорошо поработал гигантский экскаватор. Но нет, это работа потока: во время половодья он перемещал по реке большие песчаные гряды. При спаде уровня воды движение гряд приостановилось, и они застряли у берегов в виде огромных песчаных скоплений. Некоторые гряды закупорили входы в пойменные протоки. Это привело к сосредоточению потока в главном русле реки и, следовательно, способствовало усилению его размывов.

Но, наверное, все-таки это не главная причина усиления размывов русла Старого Абакана. Плывем еще выше по реке, к тому месту, где она разветвляется на два своих главных протока. Вот где, оказывается, «собака зарыта»! От правого, высокого — метров 15 — берега Нового Абакана отходит свеженасыпанная дамба, пере-

гораживающая русло и часть поймы; дамбу не должно заливать водой даже в самое высокое половодье. Длина этой насыпи — около 2,5 км, высота — 6—8 м (уровень воды в половодье поднимается не более чем на 5 м). Обнаруживаем и новый проток, идущий в обход дамбы, и поваленный течением лес вдоль нее. При высокой воде, когда на дамбу набегал поток, здесь образовывались мощные водовороты, на поверхности поймы остались вырытые ими большие воронки.

Когда же построена эта дамба? Оказывается, накануне того самого половодья, во время которого произошли большие переформирования русла Старого Абакана. Теперь все ясно. Сооружение дамбы привело к тому, что в половодье весь поток ринулся в русло Старого Абакана, расход воды в нем практически почти удвоился. Это и обусловило возникновение в русле Старого Абакана больших размывов, которые раньше не наблюдались. Для чего же была построена эта злосчастная дамба?

Дело в том, что правый берег Абакана сильно подмывался почти в каждое половодье. Подмыв его стал угрожать отдельным постройкам в селе Белый Яр, решили спасти эти домики. Но получилось, что, спасая их, поставили под угрозу другое сооружение, значительно более ценное и важное, как всегда и бывает, когда недооценивают мощь природных явлений или когда рассуждают по известной нам схеме: «Строй — изучишь после...»

Выяснилась еще одна интересная деталь. Поверхность поймы Абакана сложена мелким песком и супесями, а под ними залегают крупные галечники. Значит, поверхность поймы легко размывается, и поток может образовывать и быстро переформировывать протоки, причем возможности их углубления ограничены, поскольку в нижних слоях пойменных отложений лежит крупная галька. К тому же пойма Абакана затопляется на большую глубину, и на ней могут развиваться значительные скорости течения.

То же явление было замечено и на других реках: если пойма хорошо затопляется в половодье и если на поверхности она сложена мелкозернистым грунтом, а на глубине залегает значительно более крупный материал, то нередко на пойме возникает очень сложная система весьма неустойчивых протоков — они или быстро исчезают и возобновляются, или вообще возникают заново.

Но что же все-таки делать с водозабором Черногорского камвольного комбината? После осмотра интересующего нас участка реки ответить на этот вопрос не так уж сложно. Поскольку протоки на пойме неустойчивы, нетрудно будет повлиять на них, перераспределив сток реки таким образом, чтобы количество воды, проходящей через Старый Абакан, уменьшилось и тем самым уменьшились бы и деформации его русла. Мы отметили водные узлы, в которых можно перераспределить сток воды относительно простыми средствами, отметили и участки, на которых следовало укрепить берега. Конечно, для составления технического проекта намеченных мероприятий нужно будет провести дополнительные изыскания и выполнить работы по расчетам гидрологических характерис-

тик, но характер этих мероприятий, характер изысканий определился уже достаточно отчетливо после осмотра реки на месте.

Итак, стоит нарушить поверхность хорошо затопляемой поймы, как на ней начинают развиваться — без всякого преувеличения — грозные процессы. Вот с ними-то и пришлось столкнуться еще раз на переходе трубопровода через Днепр ниже Киева.

Строители прокладывали на пойме траншею для трубопровода. Прервали работу поздней осенью, подведя траншею к самому руслу реки. Конец траншеи прорезал береговой вал, и она могла свободно сообщаться с рекой.

Именно это обстоятельство и оказалось причиной происшедших в первое же весеннее половодье неприятностей, хотя половодье это было отнюдь не высоким.

Как только из-за таяния снегов уровень воды в реке поднялся, массы воды устремились в открытый канал траншеи с большой скоростью. Траншея начала быстро размываться, и к концу половодья на ее месте появился огромный проток, шириной около 400 и глубиной до 6 и более метров. Теперь, для того чтобы продолжить работы на переходе, необходимо было засыпать проток. Строительство трубопровода значительно удорожалось, но другого выхода не было. А корень зла все тот же — неумение учитывать деформации речного русла.

Примерно в это же время строился переход линии высоковольтной передачи через Обь в районе города Сургута. Здесь пришлось пересекать пойму реки шириной более 40 км. Мощные гусеничные тягачи, подтаскивавшие и фермы опор, и строительный материал для сооружения их фундаментов, образовали колеи на пойме, нарушив ее дерновый покров и верхние слои грунта.

Тут же неподалеку через пойму проложили дорогу, для которой соорудили насыпь и построили через проток Оби деревянный мост, очень небольшой, шириной всего в несколько десятков метров.

И вот в первое же половодье после окончания строительных работ на месте колеи образовался новый проток. Его ширина составила 600 м, а длина достигла более 6 км! Насыпь дороги перераспределила течения, возникающие на пойме при ее затоплении полыми водами. Выше моста образовался местный подпор воды, а ниже его стояли относительно низкие уровни. Таким образом, возник значительный перепад уровня воды, а следовательно, и большая скорость течения. Мост разрушился, не выдержав напора воды, и в короткий срок течение настолько разработало небольшой проток, через который был переброшен мост, что ширина его стала измеряться уже не десятками, а сотнями метров. При этом поток выносил огромное количество песка, откладывавшегося в 1,5—2 км ниже моста, где и образовался обширный конус выноса.

Во время последующих половодий возникавшие при затоплении поймы потоки были вынуждены обтекать конус выноса, что в свою очередь способствовало появлению новых протоков. Раз начавшиеся деформации поймы стали цепочкой развиваться вниз по течению реки. Такой, казалось бы, пустяк — разъездили небольшие колеи

на пойме и построили небольшой мост — неожиданно привел к серьезным осложнениям.

Подобные примеры убедительно показывают, что пойму обязательно нужно исследовать, как и русло реки, и что с ней надо обращаться не менее осторожно, чем с руслом.

Кроме того, отсюда следовал вывод: если пойма отличается неустойчивостью, которая проявляется при малейшем нарушении сложившихся веками условий развития потоков на ней, то есть все основания предположить, что, опираясь на знания закономерностей развития пойм, можно относительно просто изменять процессы, происходящие на пойме, в желаемом нам направлении.

Обвалование поймы и деформации речного русла

...Нам предстояло оценить, как будет вести себя русло реки, если ее пойму обваловать незатопляемыми дамбами. Для решения этой интересной задачи пришлось не только выполнить полевые работы, но и поставить лабораторный эксперимент.

Но вернемся к самому началу событий.

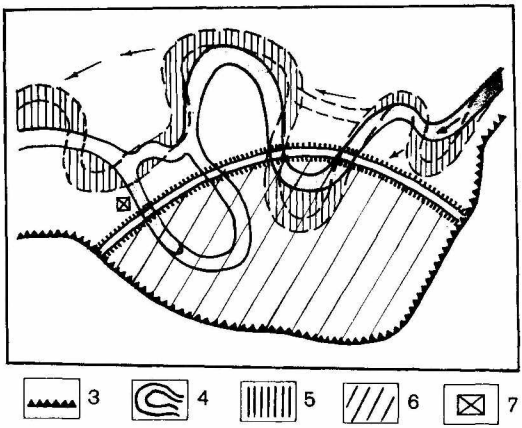
Московское отделение «Теплоэлектропроекта» работало над проектом пруда-охладителя в пойме реки Дона для электростанции. Пруд-охладитель позволил бы увеличить ее мощность. Наметили несколько вариантов размещения этого пруда. Но в любом случае следовало ожидать, что при обваловании того участка поймы, на котором разместится пруд-охладитель, по руслу реки будет сбрасываться много больше воды, чем в естественных условиях. Это могло вызвать подмыв как самих дамб, так и различных сооружений, уже существующих в русле реки.

Проектировщики обратились в Государственный гидрологический институт с просьбой оценить будущий русловой процесс, который возникнет в результате обвалования поймы.

Надо было выяснить, какие деформации возникнут в условиях обвалования при разных вариантах размещения пруда, какие участки дамб могут оказаться под угрозой размыва, какие русловыправительные работы потребуется проделать, чтобы создать наиболее благоприятные условия на стесненном участке и предотвратить разрушение дамб, и т. д.

Прежде всего предстояло обследовать реку на месте будущего пруда. На Дон одна за другой выехали несколько групп наших изыскателей. Первая группа выехала в период разлива реки. За короткий срок она получила важные данные об особенностях скоростного поля потока на затопленной пойме.

Вторая группа имела задание не только провести предварительное обследование реки для выяснения типа руслового процесса, развивающегося на ней, но и собрать на месте картографические материалы и получить данные, необходимые для строительства модели,— о порядке напластования грунтов в русле реки и на ее пойме, о скоростях течения и др. Третья группа специалистов долж-



Пруд-охладитель должен отрезать часть поймы и вершины излучин. Пунктиром показано будущее положение русла и предложенное спрямление излучин.

1 — направление движения воды на затопленной пойме, *2* — дамба пруда-охладителя, *3* — бровка склона долины, *4* — обсохшая петля русла, *5* — зона плановых деформаций русла, *6* — пруд-охладитель, *7* — водозабор.

на была завершить работу, составив предварительный прогноз переформирований русла Дона и оценив эффективность работ, намеченных для обеспечения наиболее беспрепятственного пропуска полых вод по руслу реки, стесненному дамбами пруда-охладителя.

На изучаемом участке Дон резко меняет свое направление, поворачивая почти под прямым углом. Вот в этом самом углу и должна находиться верхняя часть пруда-охладителя, и ограждающая его дамба пройдет очень близко от реки. В первую очередь следовало выяснить, как струи течения будут набегать на проектируемую ограждающую дамбу пруда при высокой воде.

Специалисты-гидрологи приступили к исследованиям.

Сам поворот Дона представляет собой достаточно хорошо выраженную излучину, вогнутый, подмываемый берег которой как раз обращен в сторону проектируемой дамбы. Подмываемый берег крутой, почти обрывистый, с многочисленными следами свежих подмывов. Однако наибольшие подмывы сосредоточиваются в низовой части излучины, что ведет не столько к ее перемещению в глубь поймы, сколько к сползанию вниз по течению. Факт этот показался благоприятным. Настораживало другое обстоятельство. На поверхности поймы, в верховой части излучины, были хорошо заметны достаточно мощные выносы песка. Они проникали в глубь поймы в виде отдельных языков, достигавших в длину 300 и более метров. Значит, именно эта часть берега встречала основное течение Дона до его поворота и, следовательно, основную массу несомых рекой наносов. При встрече с берегом в потоке, по-видимому, возникали восходящие токи, которые и выбрасывали наносы на поверхность поймы.

Н. Е. Кондратьев еще в самом начале работ высказал предположение, что когда берег будет поднят в результате строительства дамбы, то как раз на повороте реки должна возникнуть как бы буферная вихревая зона, которая будет способствовать отклонению основного течения вправо от вогнутого левого берега, поэтому опасаться больших размывов его не следует. Правда, оставалось не-

ясным, каковы будут вихри в этой буферной зоне и не станут ли они сами сильно размывать берег. Забегая вперед, скажем, что в лабораторных экспериментах, проводившихся на модели изучаемого участка реки, эти опасения не подтвердились.

Итак, на первый вопрос ответ получен: особых угроз на этом участке не возникнет, и крепить откосы дамбы можно обычными средствами.

Второй вопрос: что может произойти в самой середине исследуемого нами участка. Здесь река описывала крутую излучину, обращенную вершиной в сторону проектируемого пруда. Не окажется ли дамба под угрозой, если излучина начнет развиваться дальше и, значит, поток будет интенсивно подмывать левый берег в ее вершине.

Исследуя на катере этот участок Дона, мы очень хорошо видели, что на подходе к вершине излучины левый берег очень низкий, поверхность поймы ровная, со свежей растительностью. Ниже вершины излучины этот же левый берег значительно выше, откос его крутой и незадернованный — явное свидетельство того, что берег интенсивно подмывается. Судя по всем признакам, излучина сползает вниз по течению реки. И можно рассчитывать на то, что излучина и в дальнейшем будет сползать, т. е. смещаться вниз по течению параллельно самой себе, а следовательно, маловероятно, что русло реки станет отклоняться в сторону дамбы.

Но такое перемещение излучины представляет собой известную аномалию. Опыт показывал, что хорошо развитые излучины обычно либо принимают все более овальные очертания, либо все более вытягиваются в сторону от реки, принимая пальцеобразные очертания.

В чем же дело в нашем случае? Ответ на этот вопрос дало сопоставление карт разных лет.

Выяснилось, что раньше, года до 37-го, ниже по течению существовала излучина, подобная нашей. Затем произошло спрямление ее, и в образовавшийся спрямляющий проток устремилась основная часть вод реки. Сначала спрямление было довольно узким и имело две излучины. В настоящее же время спрямление сильно расширилось, при этом излучины его не успели развиться из-за большого количества воды, поступавшей в спрямление. От них остались только слабые следы — чуть изогнутое русло спрямляющего протока.

В результате спрямления русла Дона на всем лежащем выше нашей сползающей излучины участке произошло увеличение уклонов свободной водной поверхности, а следовательно,— и скоростей течения. В период затопления поймы ось потока оказывается спрямленной, вогнутый берег излучины, ранее плавно обтекавшийся рекой, начинает размываться, но только в низовой своей части, встречающей теперь течение. Вот поэтому-то излучина и стала сползать, вместо того чтобы разворачиваться или вытягиваться.

Проектировщики предусматривали спрямление этой излучины, чтобы обезопасить дамбу пруда от подмыва при развитии излучины.

Но после гидрологических исследований стало ясно, что в этом нет никакой необходимости.

Третий сложный вопрос — последствия спрямления русла Дона.

Благодаря тому, что вследствие спрямления длина реки резко сократилась, а следовательно, увеличились скорости течения, на участок, расположенный ниже спрямления, стало выноситься больше наносов, чем раньше. Увеличение количества выносимых наносов связано не только с разработкой русла спрямляющего протока, но и с ускорением перемещения наносов на всем участке выше этого спрямления и в самом спрямлении.

Увеличение поступления наносов на участок ниже спрямления может привести к тому, что поток на этом участке не справится с перемещением увеличившегося объема наносов и начнет их откладывать. Тогда начнет заносить водозаборные сооружения, последствия чего уже хорошо известны читателю. И если бы, не довольствуясь уже существующим естественным спрямлением, спрямили бы также, как предполагалось, лежащую выше излучину, прорыв канал, то заиление водозабора могло бы резко усилиться, поскольку еще больше увеличился бы вынос наносов.

А ведь вопрос о занесении водозабора первоначально даже и не ставился. Он возник только в ходе обследования участка Дона.

Дальнейшие исследования этого участка на модели, построенной в нашей русловой лаборатории, полностью подтвердили выводы предварительного морфологического анализа, выполненного на основе изучения карт разных лет и данных полевых работ. Кроме того, удалось получить необходимые для проектирования количественные гидравлические характеристики.

Прогноз хода деформаций речного русла и поймы

Нам предстояло обследовать так называемый Саралевский узел на Волге — дать прогноз деформаций ее русла, необходимый для разработки мероприятий по улучшению судоходных условий этого узла.

В Саратове нас ожидал специальный катер, но до Саратова надо было добираться своими средствами. Решили ехать пароходом, с тем чтобы «проникнуться духом» Волги, ощутить грандиозность образований в ее русле и на пойме — знаменитых волжских песков, очень подвижных, несмотря на свои гигантские размеры, и вызывающих большие осложнения и в судоходстве, и в строительстве сооружений на берегах реки.

На Саралевском узле никаких сооружений нет. Здесь проходит водный путь, по которому идут караваны самых различных судов и плотов. Узел этот лимитирует судоходство на всей Нижней Волге. И вот здесь-то переформирования русла реки привели к очень непростой ситуации — под угрозой оказалось беспрепятственное и безопасное движение всех судов, а следовательно, транспорт нефти, хлеба, овощей, рыбы и т. д.

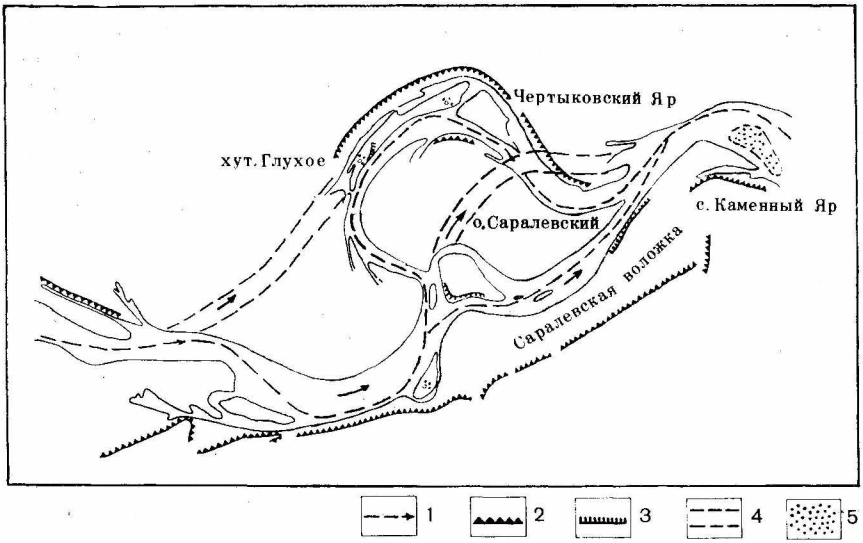
Суть дела в следующем.

Примерно на середине пути от Волгограда до Астрахани Волга описывает крутую излучину, имеющую в плане П-образное очертание. На лоцманской карте Волги, изданной в 1913 г., показан небольшой узкий проток, спрямляющий эту излучину. К 1940 г. этот проток значительно разработался и превратился в широкую извилистую реку. В отдельные годы ширина протока увеличивалась местами до 50 м за одно половодье. Через двадцать лет, т. е. к 1960 г., проток спрямился и шириной своей уже мог соперничать с Волгой. В результате большая часть волжской воды устремилась по разработанному протоку, а прежнее русло Волги, ее П-образная излучина, начало отмирать: здесь появились крупные скопления наносов и судовой ход стал чрезвычайно извилистым и неудобным, уменьшилась и его глубина. В общем, надо было либо закрывать движение судов по Волге — а это, конечно, невозможно,— либо изыскивать средства улучшения судового хода.

Самое простое и радикальное решение — перенесение судового хода в спрямляющий проток, формирование которого было только что описано. Однако здесь вступают в противоречие интересы речного транспорта и рыбного хозяйства: проток прочно оккупировали осетры, севрюги и белуги, устроив в этом месте нерестилища. Проток настолько им понравился, что здесь оказалась сосредоточенной большая часть всех нерестилищ Нижней Волги. Работники Рыбнадзора, ссылаясь на заключения своих научно-исследовательских институтов, утверждали, что даже сравнительно небольшие по объему работы по землечерпанию, выполненные на входе в этот спрямляющий проток, настолько неблагоприятно сказались на рыбных стадах, что рыбные промыслы потерпели убыток на миллионы рублей. Поэтому представители Рыбнадзора категорически протестовали против перенесения судового хода из старого русла в спрямляющий проток. Речники обратились за советом в Государственный гидрологический институт.

...Мы начали с осмотра спрямляющего протока, который все еще называется Саралевской воложкой, хотя на сегодняшний день это, несомненно, главное русло Волги, а никакая не воложка: ширина его много больше ширины старого главного русла. Осмотрев и главное русло, убедились в печальном состоянии судового хода — и это несмотря на большой объем ежегодных землечерпательных работ. Кстати сказать, по дороге встретили гигантский землесос: его производительность — 2,5 тысячи кубометров грунта в час. Грунт, поднятый со дна реки, по трубам подается к наиболее подходящим емкостям, где он и складируется. По идее, грунт изымается из реки навсегда. Правда, в действительности он зачастую все же достаточно быстро вновь оказывается в реке, так как выбрать место для отвала грунта не так-то просто.

Так что даже этот мощный землесос не может справиться с песком, приносимым и откладываемым рекой. 2 млн. кубометров грунта в год вычерпывается на судовом ходе Саралевской излучины, а нужного эффекта это не дает.



Саралевский водный узел и схемы спрямлений, рекомендованных для улучшения судоходства.
1 — судовой ход, *2* — склон береговой долины, *3* — участки подмываемого берега, *4* — проектируемое спрямление русла р. Волги, *5* — пески.

Осмотр излучины и спрямляющего протока выявил одну важную деталь. Оказалось, в нижнем конце излучины имеется каменистая гряда, которая пересекает русло Волги, проходит под поверхностью поймы и вновь обнажается в спрямлении, т. е. в Саралевской воложке. Теперь многое стало яснее и понятнее. Гряда способствует отложению наносов и образованию обширных песчаных скоплений в главном русле Волги, в результате чего русло реки не может развиваться в глубину. Эта же каменистая гряда препятствует развитию русла в глубину и в Саралевской излучине. Но так как объем воды, поступающий в воложку, непрерывно возрастает, то она интенсивно разрабатывается в ширину. Поэтому-то русло воложки оказалось много шире, чем старое русло Волги.

Мы обследовали не только русло Волги и Саралевской воложки, но и волжскую пойму: в период половодья, или, правильнее сказать, в период попусков воды через плотину Волгоградской ГЭС, на пойме возникают потоки, спрямляющие излучины. Иногда они вырабатывают себе широкие и глубокие русла. Сброс вод по спрямляющим протокам приводит к перераспределению расходов в рукавах, что имеет существенное значение для оценки работоспособности рукавов. Очень важно наметить возможные направления развития спрямляющих потоков на пойме, так как здесь могут появиться новые рукава. Таким образом, обследование поймы помогает выявить тенденции развития сложной системы волжских рукавов и главного русла.

Выше Саралевской излучины Волга тоже образует излучину, но относительно слабо развитую, имеющую треугольные очертания. По рассказам речников и старожилов, которые подтвердились при осмотре вершины Саралевской излучины, выяснилось, что при затоплении поймы возникают мощные течения, спрямляющие эту треугольную излучину. Однако, что происходит здесь в половодье, не знал никто. Говорили, что спрямляющие течения разработали большой проток, но где он начинался, как проходил, какие имел размеры, как в нем происходили деформации — опять-таки не знал никто. Ни на одной из имеющихся карт этот проток не был показан. Мы должны выяснить все это сами, обследовав 18-километровый участок реки. Осмотр решили начать с низовой части массива поймы, то есть с вершины Саралевской излучины. Именно здесь на лоцманских картах было отмечено устье какого-то широкого протока, неведомо куда идущего, так как в верховой части массива не было и намека на его начало.

Катер доставил нас на «исходные позиции».

Размеры искомого протока превзошли все ожидания. В устье это была настоящая мощная река шириной около 200 м — такова, например, Ока в своем среднем течении. Близ устья в протоке находился покрытый рослым лиственным лесом остров. Вверх по течению проток был почти прямой на протяжении нескольких километров. В его русле располагались в правильном шахматном порядке мощные побочни длиной в несколько сот метров и высотой в несколько метров. Низовые концы побочней образовывали затоны, отгороженные от реки длинными песчаными косами. Это свидетельствовало о том, что побочни достаточно интенсивно сползают вниз по течению, обеспечивая поступление большого количества песка в Саралевскую излучину.

Еще выше по течению русло расширялось примерно до 300 м, проток образовывал большую излучину, обращенную в сторону главного русла Волги, а затем тек параллельно ей, проходя местами всего в 250 м от главного русла. Узкий перешеек между Волгой и протоком расчленялся тремя небольшими протоками, по которым вода и попадала в него из Волги.

Берега протока возвышались над водой на 10—12 м. Сверху они были сложены суглинком, а ниже, по откосу, очень крутому и местами обрывистому,— мелкозернистыми песками. За бровкой берегов рос вековой лиственный лес — многоствольные ивы, вязы и мощные, в несколько обхватов, дубы. За бровкой берега мы обнаружили ряды береговых валов. Их большие размеры не оставляли сомнения в том, что валы образованы были отнюдь не нашим протоком, а самой Волгой. Да, но тогда получается, что наш проток вовсе не новое образование, сформированное пойменными течениями, а скорее всего остаток старого главного русла Волги. Именно отсюда, из этого положения, Волга, меандрируя, т. е. образуя деформирующиеся излучины, прошла весь путь до своего современного положения, образовав излучину треугольных очертаний.

Если наш проток — старое русло Волги, то, естественно, возникает вопрос: отмирает он или развивается? Наличие сползающих побочней как будто должно свидетельствовать о том, что по протоку идет интенсивное движение песков. О разработке протока свидетельствует и множество участков, на которых виден интенсивный подмыв берегов, эти участки хорошо заметны благодаря упавшим при подмыве деревьям.

Кстати сказать, существует мнение, что упавшие в реку деревья предохраняют берега от дальнейшего размыва. Случалось даже видеть — например, на реке Пометь — участки, на которых для ослабления размыва в реку специально сваливались с берегового откоса целые взрослые деревья с ветвями. Эффект такого «крепления», на первый взгляд, казался парадоксальным — размыв неожиданно увеличивался. Причиной же этого увеличения размыва оказались вихри, возникающие около упавших в реку стволов деревьев. Вихри эти бывают настолько интенсивными, что приводят к образованию в берегах полуцирков и местных ям на дне русла.

Как же могло получиться, что старое русло Волги вдруг вместо того, чтобы отмирать, стало возрождаться и размываться? Все объясняется довольно просто. Начав меандрировать, Волга удлинялась вследствие образования все более крутой излучины. Следовательно, уменьшались уклоны и скорости течения воды. Наконец удлинение достигло таких размеров, что весенний поток пошел по более короткому пути, т. е. по линии наибольших уклонов, как бы срезая излучину. В данном случае линия наибольших уклонов оказалась расположенной по оси старого русла Волги, и оно, естественно, стало разрабатываться.

Как ни ясна ситуация, но чем большим количеством фактов она подтверждается, тем становится убедительнее. В разговоре со старым волжским бакенщиком, теперь находящимся на пенсии, мы услышали подтверждение своим выводам: «Лет пятьдесят тому назад эта протока была главным руслом Волги. Мой отец был тоже бакенщиком, и вот там стоял его бакен — я хорошо помню, часто ездил с ним к бакену заправлять огонь на ночь».

Старик рассказал нам, что теперь в половодье через пойму и проток идет мощное течение с Волги — моется и берег Волги, и берег протока. По-видимому, скоро произойдет прорыв перешейка и Волга вернется в старое свое русло. Эти его слова точно совпадали с теми фактами, которыми располагали мы. На правобережье протока обнаружились обширные, длиной в несколько километров и шириной около километра, песчаные поля с множеством огромных ям, размытых водой, тянущихся цепочкой от Волги к протоку. Это явные следы активной работы воды на пойме в половодье. Четкие метки высоких вод в виде тонкого слоя глинистых осадков на нижней части стволов деревьев показывали, что глубина затопления поймы доходит здесь до 3—4 м. При такой большой глубине пойменных потоков совершенно правомерно ожидать и больших размывов поверхности поймы.

Итак, Саралевская излучина питается наносами не только из главного русла Волги, но и из исследованного нами протока. Поэтому неудивительно, что в ней существуют обширные скопления наносов и судовой ход из года в год ухудшается, тем более, что расход воды вследствие разработки спрямляющего протока — Саралевской воложки — в главном русле Волги все время уменьшается.

А что будет дальше? Ответить на этот вопрос не так просто. Может быть, с разработкой нового спрямления на вышележащей излучине и прибавлением воды в ней она промоется? Но ведь с водой придут и дополнительные объемы наносов, и, может быть, в этом случае заносимость русла увеличится? Тем более, что в нижней части излучины есть каменная гряда, препятствующая размыву русла. Значит, ее надо обязательно убрать.

А нельзя ли создать новый удобный водный путь, спрямив саму Саралевскую излучину левее Саралевской воложки, т. е. создав второе спрямление?

...Наши исследования продолжаются. Новый маршрут проходит уже по пойме Саралевской излучины.

Оказывается, и здесь течения на затопленной пойме производят большую работу и намечается второе естественное спрямление излучины. Заметны следы работы половодья — промывы в береговых валах, уже сформировавшиеся, правда, пока еще не очень широкие, протоки. Но... вся пойма поросла лесом, и проводить работы на ней будет непросто. По предварительным подсчетам, для прокладки нового судового хода потребуется вынуть около 2 млн. кубометров грунта. Это не так страшно, ведь объем ежегодных землечерпательных работ на судовом ходе Саралевской излучины примерно такой же. Но беда в том, что работа на пойме не может быть выполнена в короткие сроки, а ведь дело не терпит проволочек. Положение осложнялось тем, что надо будет убрать каменную гряду на выходе из излучины. А как это сделать, если взрывные работы на Волге запрещены в целях сохранения «великолепных осетров»?

В этом случае уже не русловой процесс, а экономика решает вопрос. Надо считать, надо думать, думать и взвешивать. Исчерпывается ли этими вариантами все, что можно тут сделать? И вот здесь возникает крамольная мысль: а нельзя ли все-таки перенести судовой ход в уже разработавшуюся Саралевскую протоку, оккупированную осетрами? Ведь на той же Волге есть нерестилища, по которым идет судовой ход, а осетры преспокойно продолжают себе размножаться. Кроме того, учитывают ли работники Рыбнадзора, возражающие против использования Саралевской излучины для судоходства на том основании, что прокладка судового хода вызовет значительные изменения в русловом и водном режиме, тот факт, что естественные переформирования, идущие в разрабатывающейся воложке, могут оказаться значительно более существенными, чем те, которые возникнут при расчистке отдельных перекатов на ее входе или выходе? Ведь сопоставления разновременных

съемок речного русла показывают, что процесс разработки волож-ки продолжается и за одно половодье берег может смещаться на 50 м.

Все время растет и количество воды, поступающей в воложку. Растут и объемы переносимых потоком наносов. Все это может привести к коренным изменениям в русле реки без всякого вме-шательства человека, когда намечающееся спрямление излучины, расположенной выше Саралевской, разработается настолько, что начнет принимать основную часть расхода воды. Тогда Саралевс-кая излучина восстановится в своей низовой части, а Саралевская воложка будет обречена на отмирание. Спрямление излучины выше Саралевской может произойти буквально в течение двух-трех лет, если река прорвет перешеек между спрямлением и главным руслом.

Не является ли запрет перенести судовой ход следствием не-знания хода деформаций Саралевского узла?

Итак, разобравшись в морфологии и гидрологических особен-ностях Саралевского водного узла, удалось составить схему его деформаций, наметив наиболее вероятные их тенденции. На основе этой схемы можно планировать инженерные мероприятия, улучшаю-щие судоходство на Саралевском водном узле и согласованные с ходом деформаций русла и поймы, а следовательно, наиболее надежные и эффективные.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ЧТО ТАКОЕ ГИДРОМОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

Если читатель заинтересовался тем, что происходит с речным руслом и поймой, и убедился в том, какое большое значение это имеет для проектирования и строительства сооружений на реках, то, наверное, он захочет узнать, каковы же законы переформирования речного русла.

Сколько лет нашим рекам

Сколько лет нашим современным рекам? Вопрос этот весьма важен.

Нередко, глядя с высокого берега на какую-нибудь небольшую реку, пытаешься понять, как маленькая речушка выработала себе такую огромную долину. Есть речные поймы, которые в 300 раз шире, чем русло реки, протекающей среди них. Высота склонов долины—например, грандиозных волжских яров — часто достигает 30—50 м над уровнем воды. Когда стоишь у подножия такого яра, то кажется, что ты не на равнине, а в горах, да и овраги, рассекающие эти яры, напоминают горные ущелья: слева и справа отвесные стены, нависшие кручи, впереди поворот, а что за ним — неизвестно.

Если все это создано за сотни тысяч, а может быть, и за миллионы лет, то, наверное, нет оснований ожидать больших изменений в ближайшем будущем. Но если все это произошло за относительно короткие сроки — скажем, за несколько десятилетий,— это совсем другое дело.

Возраст реки подскажет, насколько устойчивы ее берега, через какое примерно время они могут занять другое положение и «съесть» проектируемое или уже существующее сооружение. Так что возраст реки — вопрос актуальный, ведь чуть ли не каждый день в нашей стране вводятся в строй новые сооружения на реках. А сколько таких сооружений уже работает!

А раз так, то, очевидно, следует знать, как река развивалась и в результате каких процессов пришла к своему сегодняш-

нему состоянию. Ведь только зная прошлое реки, можно выявить тенденции ее развития, а значит, можно прогнозировать будущее. Это прописная истина, но о ней часто забывают. Нередко даже в капитальнейших монографиях нет ничего о прошлом реки, а следовательно, любые прогнозы на будущее не обоснованы.

Часто задают вопрос: кому нужна эта ваша история, ведь нельзя проверить не только то, что было тысячелетия назад, но даже и то, что было всего лишь сто лет тому назад.

В 1957 г. в «Записках Всесоюзного географического общества» было опубликовано исследование известного гидролога и географа Арсения Владимировича Шнитникова «Изменчивость общей увлажненности материков северного полушария». Он установил наличие циклов в ходе водоносности рек Евразии. По его данным, каждый такой цикл составляет около 1800 лет, в течение которых водоносность рек сначала увеличивается, а затем убывает. А. В. Шнитников рассмотрел четыре таких цикла, оценив ход водности примерно за 10 000 лет.

Скептики спрашивали: «Как проверить такие выводы? И в чем их практическое значение?»

Такая постановка вопроса отнюдь не свидетельствует об эрудиции их авторов. Критерий правильности любых выводов — практика. Практика — в философском толковании этого термина — это не только человеческая деятельность; практика — это и не зависящий от человека, неумолимый ход природных процессов. И если какое-то утверждение хорошо согласуется с логикой событий, то оно тоже является критерием истины.

Если полученные выводы согласуются с данными из самых различных областей знания, то какие могут быть сомнения в их правильности?

Устанавливая определенные циклы в водоносности материков, А. В. Шнитников привлекал данные из самых различных наук. Он использовал сведения о наступлении и отступлении моря (трансгрессии и регрессии); о высотах стояния уровня воды в море по четким отметкам его следов — по окаменелым останкам морских организмов и водорослей, встречающимся в горах, на побережьях морей, иногда на высоте, на сотни метров превышающей современный уровень моря. Изучал записи о границах снегов в горах, о перевалах на горных дорогах. Вчитывался в сообщения археологов о местах расположения стоянок доисторического человека в поймах рек. Привлекал данные о следах уровней воды в озерах, о толщине и особенностях строения торфяных толщ на болотах и т. д. И весь этот разнообразный материал подтверждал его выводы об изменениях водоносности рек Евразии. Можно ли после этого сомневаться в полученных выводах?

Но какое практическое значение имеют эти выводы для нас?

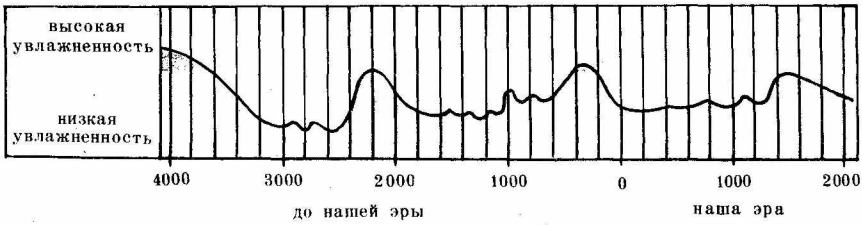
Наш век приходится на начало цикла убывающей водоносности рек. Следовательно, водоносность рек еще длительное время будет убывать. И если мы хотим, чтобы наши потомки не испытывали недостатка в воде, то надо уже сейчас принимать меры по обвод-

нению территорий, по переброске вод в засушливые районы. Не случайно уже сейчас осуществляется переброска вод из районов, богатых водой, в районы, в которых ощущается острая ее нехватка. Так, более чем 1000-километровый Каракумский канал перебрасывает воды полноводной Амударьи в пустыню, принося туда жизнь. Каналы же обеспечивают водой Донбасс, крымские степи, Караганду.

Русло каждой реки должно пропустить столько воды, сколько стекает с ее водосбора. Если из года в год в реку поступает примерно одно и то же количество воды, то русло ее существенно не меняется. Таким образом, между расходами воды в реке и размерами ее русла существует тесная зависимость. Отсюда следует, что те размеры русла, которые мы наблюдаем сегодня на наших реках, были созданы в условиях водоносности, близкой к современной. Значит, если мы хотим установить возраст современной реки, надо прежде всего выяснить, сколько времени существует климат, близкий к современному. Известно, например, что на территории, по крайней мере, Европейской части СССР был так называемый ледниковый период, когда наш материк был покрыт льдом, как Антарктида или Гренландия; местами толщина ледяной шапки достигала 4—5 км. Южная граница оледенения, спускаясь языком к югу, доходила примерно до широты Киева. Почему климат нашего материка изменился, точно неизвестно — на этот счет существует множество гипотез,— но ледяная шапка стала таять. Огромные массы воды потекли на юг или, следуя уклону поверхности, начали перемещаться вдоль края ледника. В этот период не было привычных нам половодий, вода поступала от таяния ледника равномерно, круглый год, поскольку колебания температуры воздуха в течение года были небольшими, как, например, в наше время в тропических странах.

Мощные потоки воды вырабатывали себе огромные русла. Накапливаясь в понижениях местности, талые воды образовывали большие озера. Когда эти озера переполнялись водой, между ними разрабатывались своего рода естественные сбросные каналы — также в виде огромных русел. По мере того как стаивали массы льда, край ледника отодвигался к северу, таяние замедлялось и количество воды, поступавшей в ледниковые реки, постепенно уменьшалось. По этой причине внутри старых огромных русел стали разрабатываться новые, меньших размеров, а старые большие русла превратились в речные долины. Немецкие геоморфологи назвали эти старые русла древними речными долинами. Такие долины обнаружены в Северной Германии, есть они и на нашей территории в районах Полесья и на северо-западе Европейской части СССР.

Когда льды стаяли, реки стали менее водоносными и уменьшились до размеров, близких к современным. Следовательно, наши реки в том виде, в котором они существуют сейчас, могли образоваться только после сброса талых ледниковых, или, как их называют, флювиогляциальных вод. Значит, для определения возраста современных рек надо знать, когда закончился сброс этих вод.



Изменение водоносности рек за 10 000 лет (по А. В. Шнитникову).

Возраст наших рек, протекающих севернее Ленинграда, составляет 5—6 тысяч лет, а возраст рек, расположенных в полосе между Москвой и Киевом,— 20—40 тысяч лет.

Если сравнить возраст современных рек с продолжительностью жизни одного человека, то приходится признать, что наши реки очень стары. Если же сравнить их возраст со временем существования всего человечества — по мнению разных ученых, человечество существует от 1 до 4 млн. лет,— то реки наши просто младенцы.

Говоря о молодости наших рек, мы не имеем в виду речную долину, ее террасы и пойму. Речь идет только о русле реки в его современном состоянии и той части поймы, которая создалась в ходе деформаций современного русла. Современное русло Волги молодое, но долина ее существует очень давно. По-видимому, она была разработана даже не во время четвертичного оледенения, а значительно раньше. Столь же древни долины Днепра и других наших крупных рек, особенно сибирских. Может быть, их долины образовались 60—70 млн. лет тому назад, а может быть, и еще раньше.

Иной скептик, прочтя эти строки, может задать вопрос: «А откуда все это известно? Не слишком ли смело рассуждает автор?» Да еще, пожалуй, припомнит одно очень ядовитое замечание Марка Твена, который в своей автобиографической книге «Жизнь на Миссисипи» писал следующее:

«Теперь, если бы я желал быть одним из тяжеловесных ученых людей и „начал доказывать", что случилось в отдаленном прошлом при помощи данных настоящего времени или недавнего прошлого или что случится в отдаленном будущем — для меня открылось бы широкое поле... Ледниковые периоды — великие вещи, но они так неопределенны, так неопределенны. А тут посмотрите что — в промежуток времени в сто семьдесят шесть лет нижняя Миссисипи укоротила себя на двести сорок две мили.

В среднем это составляет немного больше одной мили с третью в год. Поэтому всякий разумный человек, не слепой и не идиот, увидит, что в древний силлурийский период, со времени которого минет ровно миллион лет в следующем ноябре, нижняя Миссисипи имела в длину более миллиона трехсот тысяч миль и протягивалась через Мексиканский залив, как удочка. Основываясь на тех же

данных, всякий может понять, что через семьсот сорок два года нижняя Миссисипи будет длиной только в одну милю три четверти, а Каир и Новый Орлеан (города на Миссисипи.— *И. П.*) сольют воедино свои улицы, процветая под властью одного городского головы и общего совета альдерменов. В науке есть нечто чарующее! Получаем такой полный доход предположений с такого малого количества фактов».

Что греха таить, бывает порой, что наука, а вернее, отдельные ученые начинают оперировать фактами именно так, как это описывает Марк Твен. Но нас-то великий писатель-сатирик уже предупредил!

Какие же факты дают основанне утверждать, что нарисованная выше картина образования речных долин отражает действительность?

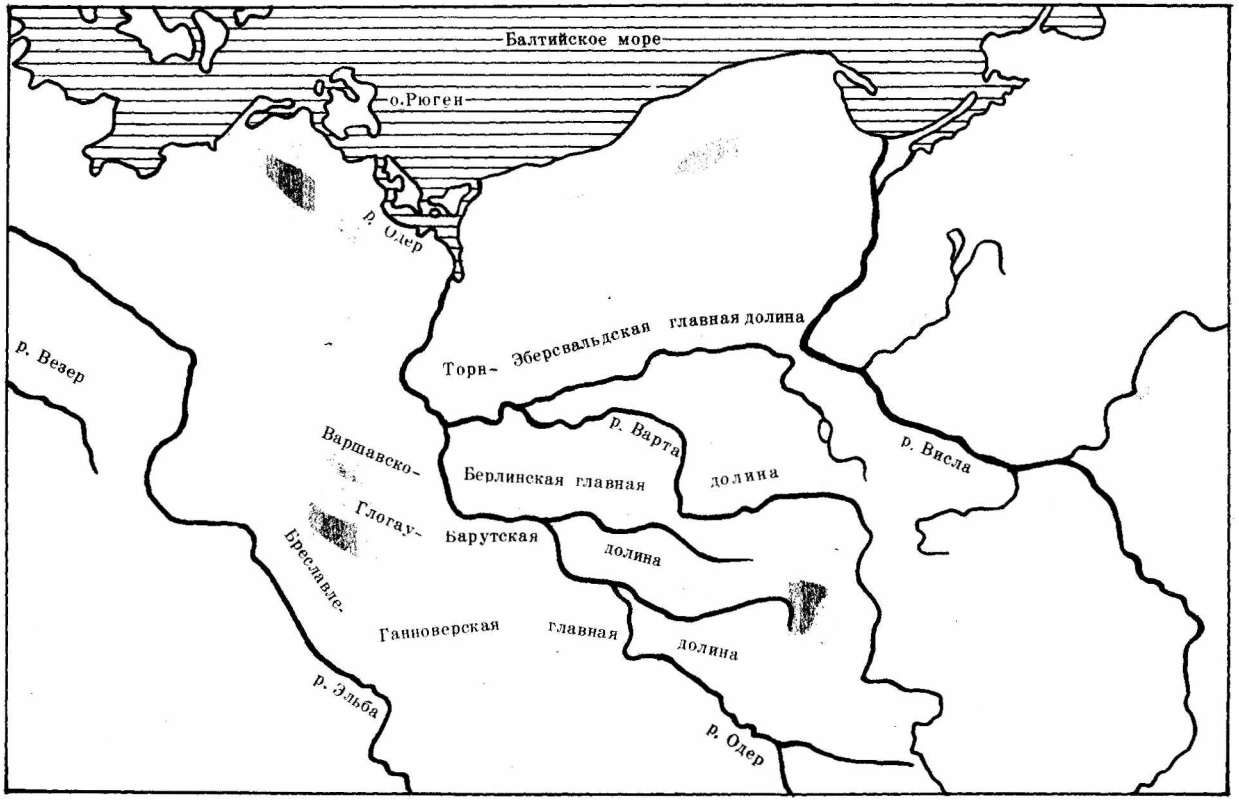
Откуда известно, что Земля переживала когда-то ледниковый период?

Еще в XVIII в. ученые обратили внимание на то, что на огромных площадях Европы и Северной Америки поверх коренных пород залегают породы, сложенные суглинками, гравием, глиной и песком с включением хорошо обкатанных камней-валунов. Не было никакого сомнения в том, что весь этот материал откуда-то принесен. Причем огромное количество этих отложений говорит о том, что их не могли принести те воды, которые протекают здесь в нашу эпоху.

Изучение работы современных ледников привело к мысли, что эти отложения должны быть принесены гигантским ледником, некогда покрывавшим поверхность материков. Действительно, мощность таких отложений, различная в разных регионах в зависимости от рельефа, в общем весьма значительна: она колеблется от нескольких десятков до нескольких сотен метров; размеры валунов также достигают нескольких метров в диаметре. В Европе материалы ледниковых отложений приносились в основном из Скандинавии и района Альп.

Если принять среднюю мощность отложений равной 80—100 м, то окажется, что только из Скандинавии на равнины Европы было принесено около 500—700 тысяч кубических километров переработанных льдом и водой горных пород. Это привело к снижению Скандинавских гор на 500—600 м. В районе Цюрихского озера снижение Альп — если провести аналогичный подсчет — должно было составить 550 м. В среднем на территории нынешней Швейцарии ледник снес слой пород толщиной 250 м, или объемом 3000 кубических километров. Называют и несколько другие цифры. По некоторым данным, в Баварии толща ледниковых отложений составляет в среднем около 100 м. Вместе с тем из района одного только Иннского ледника за последний этап великого оледенения было вынесено 500 кубических километров горных пород, а за весь период оледенения — около 3000 кубических километров. Приняв эту цифру за основу и произведя соответствующие расчеты, мы получим, что в результате столь большого сноса пород должны были

Долины древних первичных рек Северной Германии (древние ледниковые долины).



образоваться мощные отложения — толщиной около одного километра.

Однако толщина отложений, зафиксированная в этом районе, составляет всего 100 м. Тогда остается предположить, что примерно 9/10 этих отложений были впоследствии транспортированы протекающим здесь Дунаем в его низовья. Как видите, цифры огромные, но действительное количество материала, вынесенного ледником, должно быть намного больше приведенных цифр. (Строго говоря, непосредственно связывать высоту гор с объемом снесенного с них материала нельзя; по мере «разгрузки» горного массива он начинает постепенно подниматься. И, конечно же, все эти цифры весьма и весьма приближенные.)

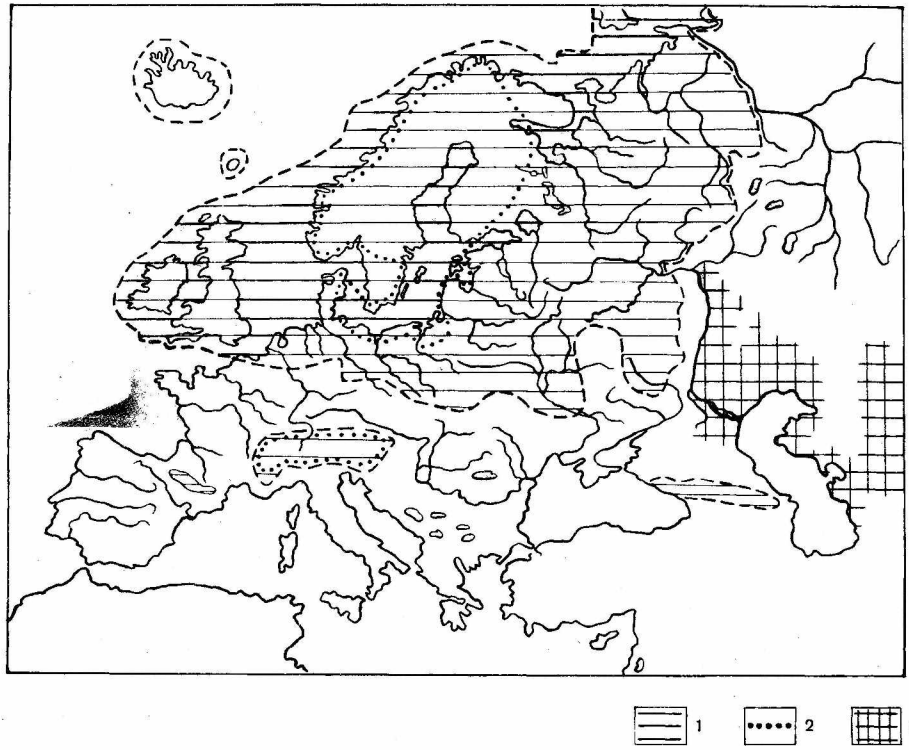
В зарубежной литературе отложенный ледником материал так и называется — ледниковые наносы, а в нашей, отечественной, он получил название покровной породы.

На карте показаны границы распространения льдов великого оледенения. На основании изучения ледниковых отложений ученые пришли к выводу, что всего было четыре ледниковых периода, временные промежутки между которыми составляли примерно 200 млн. лет. Каждый из этих периодов в свою очередь состоял из нескольких этапов. (Следует отметить, что и сейчас еще идут споры о том, сколько именно было оледенений и какой продолжительности, поэтому приведенные данные не следует считать абсолютно достоверными.) Наша карта показывает только этапы последнего, наибольшего оледенения. Следы прошлых оледенений обнаруживаются на еще больших территориях. Они встречаются — например, в виде ледниковых долин, в виде сглаженных движением льдов со скал так называемых бараньих лбов — в Северной Африке в пределах знойной песчаной пустыни Сахары, в Австралии в пустыне Виктория и в Южной Америке в пустыне Атакама. Обнаруженные здесь сухие долины неопровержимо свидетельствуют о том, что эти территории еще сравнительно недавно, в четвертичный период, были сильно обводнены.

В результате таяния огромных масс льда образовывались гигантские водоемы. Особенно много их возникло на востоке Европы, куда несли свои воды Дунай и его притоки, Днестр, Днепр, Дон, Волга.

Обилие вод, приносимых этими потоками, привело к значительному повышению уровня воды в Черном море, благодаря чему в четвертичный период оно сообщалось через Азовское море с Каспием. Каспийское море простиралось далеко к северу, достигая Казани, и через Устюрт соединялось с Аральским морем. Лишь после сброса талых ледниковых вод эти моря приняли современные очертания.

Надо заметить, что в прошлые межледниковые эпохи площади этих морей, так же как и Средиземного, бывали еще меньшими, чем сегодня. Так, например, Средиземное море когда-то состояло из двух обособленных водоемов, разделенных сушей в районе острова Сардиния. Особенно маленьким было Каспийское море.



Европа во время ледникового периода.
1 — границы максимального оледенения, *2* — границы льда во время последнего ледникового периода, *3* — районы Арало-Каспийского бассейна, которые были залиты водой.

О причинах периодичности оледенений споры идут и по сегодняшний день. Так, существует предположение, что ледниковый период совпадает с прохождением Землей так называемого холодного сектора Галактики, что бывает каждые 200 млн. лет. Есть попытки объяснить наступление ледниковых периодов изменениями положения оси Земли. Однако ось Земли сдвигается не так уж значительно, чтобы вызвать столь существенные изменения климата. Некоторые американские геоморфологи связывают оледенения с интенсивными горообразовательными процессами, в результате которых резко увеличивается высота местности. Это обстоятельство способствует накоплению снега и льда в горах, и ледники начинают спускаться на равнины.

Но какой же практический вывод из всех этих теоритических споров? Для нас ясно и чрезвычайно важно одно: мы находимся в начале межледникового периода, и надо опасаться не оледенения, а убывающей водоносности.

Необратимые и обратимые деформации речного русла

Как мы уже говорили, при движении ледников по поверхности суши происходит разрушение слагающих ее горных пород, и только за последнее оледенение высота Скандинавских гор и Альп понизилась вследствие этого процесса более чем на полкилометра.

Такие процессы, как смыв и вынос частиц пород, происходящие в течение целых геологических эпох и ведущие к общему снижению высоты местности, с полным правом могут быть названы необратимыми. Нетрудно понять, что это очень длительные процессы. В ходе необратимого процесса смыва и выноса пород водой происходит снижение продольного профиля реки, разработка склонов долины, превращение горных пород в речные отложения — речной аллювий. Сколько сломано копий в спорах о свойствах продольного профиля реки и путях его развития. Попробуем перечислить основные спорные вопросы.

Еще в конце прошлого века американский геоморфолог и геолог У. М. Дэвис выдвинул концепцию эволюционного развития рельефа, основываясь на разработанной схеме развития продольного профиля реки. Он утверждал, что всякий речной продольный профиль стремится к выравниванию и снижению своих отметок. С этим нельзя не согласиться. Далее Дэвис утверждал, что по характеру очертаний продольного профиля реки можно определить ее возраст. Так, при крутом и невыработанном продольном профиле реку следует считать «молодой», при более пологом и выровненном — «зрелой», а при очень пологом и сильно сглаженном — «старой». В принципе с этим можно было бы согласиться — если считать, что река появилась в тот момент, когда суша поднялась из моря и далее медленно и однонаправленно развивается с тех пор до наших дней. Но в действительности все обстоит значительно сложнее — достаточно вспомнить наши рассуждения о возрасте рек, великих оледенениях и геологических эпохах. Дэвис, пожалуй, допустил просчет из-за излишнего абстрагирования.

Кстати, ошибку Дэвиса заметил русский ученый-почвовед В. В. Докучаев. Он писал: «Далеко не все Слепороды, Супои, Оржицы, Золотоноши, Ирклеи, Голтвы и пр. могут действительно похвастать своим цветущим прошлым, силой, мощью и энергией своей молодости. У многих из них, наверное, никогда не было ничего подобного, не было ни детства, ни юности, ни возмужалости — они родились стариками, у них никогда не хватало сил прорыть для своего ложа даже лёсс (очень легко размываемые отложения.— *И. П.*), у них в сущности нет своего русла и определенных берегов, нет собственного дома, они воспользовались теми уже готовыми, блюдцами, ложбинками и западинами, которые остались после ледника, и только больше заболотили их».

Можно привести и другие примеры, из которых видно, что очень давно образовавшиеся реки, несмотря на свой почтенный возраст, часто имеют вид молодой реки с выпуклым продольным профилем. Таковы, например, реки Карелии. Они бурно несут свои воды, но

подстилающие породы разрушают очень мало, поскольку породы эти — граниты — не поддаются размыву, а хорошо размываемые грунты уже давно вынесены.

Есть и еще одно неоправдавшееся положение Дэвиса. Дэвис считал, что в процессе сработки продольного профиля рек, стекающих с гор в разные стороны, верховья одной реки в конце концов перехватывают верховья другой. И в результате одна река увлекает за собой другую, увеличивая при этом свою водоносность.

Приехав в Европу для геоморфологических наблюдений в Альпах, чтобы собрать факты, подтверждающие теорию перехватов, Дэвис быстро убедился, что его предположение отнюдь не бесспорно, и даже напротив — явление перехвата наблюдается очень редко. Тогда он начал искать расхождения своей теории с действительностью в особенностях местных условий — в движении земной коры, в убывающей водоносности рек и т. п. Дэвис так и не понял, что в верховьях рек площади их водосборов очень малы и потоки еще очень слабы и не способны размыть свои водоразделы. К тому же с приближением верховьев реки к водоразделу должно происходить еще большее уменьшение водосборной площади.

Наконец, Дэвис выдвинул еще одну концепцию. Он утверждал, что верховья реки всегда врезаются в подстилающие породы, в среднем же течении существует участок транзита наносов, а в нижнем — участок их аккумуляции. Однако и эта концепция не выдержала проверки фактами. В действительности врезание, транзит и аккумуляция наносов могут встречаться на любых участках реки, и зависят они в основном от местных особенностей транспорта наносов.

Конечно, без абстракции нельзя построить науки, но сама-то абстракция должна исходить из фактов, а их тогда у Дэвиса было мало.

Несмотря на свою бездоказательность, идеи Дэвиса господствовали в геоморфологии не один десяток лет.

Почему Докучаев смог так быстро выдвинуть возражения против положений Дэвиса?

В 1878 г. Докучаев защитил диссертацию на тему «Способы образования речных долин Европейской России», обследовав перед этим множество речных долин. Умея, как никто, видеть на местности и обобщать факты, он располагал огромным фактическим материалом и, естественно, сразу мог обнаружить несоответствие между абстрактными схемами и реальностью.

Кроме того, Докучаев, по-видимому, был знаком с идеей эволюционного развития рельефа, высказанной русским ученым И. Д. Черским за двенадцать лет до Дэвиса. Знал ли Дэвис об идеях Черского? Вряд ли. Скорее всего, как это часто бывает в науке, идея одновременно вызревала в умах разных ученых, подготавливаемая общим ходом развития науки и накопившимися фактами.

Необратимые, т. е. однонаправленные, деформации речного русла проявляются как некоторый итог более частных деформаций, ко-

торые мы назовем обратимыми. Обратимые деформации возникают в руслах рек в результате процесса переотложения наносов, переносящихся рекой.

Что такое переотложение наносов? Это прежде всего чередование на данном участке реки размывов и намывов ее русла. Формы этих размывов и намывов разнообразны, они зависят как от количества и состава наносов, так и от местных гидравлических условий в потоке. Вот примеры разных форм переотложения наносов.

По руслу движется песчаная гряда. Наблюдая за руслом в каком-нибудь одном створе, можно видеть, как сначала, когда надвигается гребень гряды, идет накопление наносов, а затем, когда гребень гряды минует данный створ и на его место надвинется подвалье лежащей выше по течению гряды, отметки дна понижаются.

Или возьмем речную излучину. Наблюдая за движением наносов в пределах излучины, легко увидеть, как часть их поступает в поток от размыва вогнутого берега, а другая часть откладывается на выпуклом берегу. Так происходит до тех пор, пока излучина не примет форму петли и не произойдет прорыв перешейка этой петли. Прорыв перешейка приводит к отчленению старого русла — в нем процессы размыва прекращаются, но они начинаются в новом русле, которое и повторяет весь цикл развития излучины. Вот поэтому-то и можно говорить об обратимости такого рода деформаций.

Итак, в руслах рек существуют два вида деформаций: необратимые — длительные, развивающиеся веками, и обратимые — быстро развивающиеся не только в течение одного года, но и ото дня ко дню, от часа к часу.

Почему важно различать эти два вида деформаций?

Прежде всего, такое деление заставляет признать необходимость изучения обоих видов деформаций. К сожалению, длительное время и в геоморфологии, и в геологии, и даже в гидрологии основное внимание обращалось на необратимые деформации В геоморфологии, где все подчинялось идее эволюции рельефа, это было естественно. Гидрологи же длительное время не имели собственных концепций и шли за геоморфологами.

Это не значит, конечно, что существование обратимых деформаций обнаружили только недавно. Нет, они известны давно. Ими занимались и инженеры-гидротехники, постоянно встречающиеся в своей практике с движением наносов, вызывающих обратимые деформации русла; и инженеры-путейцы, отвечающие за обеспечение судоходства. И все-таки должного внимания обратимым деформациям не уделялось.

Надо сказать, что наши инженеры и инженеры западные поразному подходили к проблемам, вставшим перед ними. В отличие от своих западноевропейских коллег, решавших задачи главным образом в направлении превращения рек в судоходные каналы с укрепленными берегами (что было возможно благодаря в общем-то малым размерам рек, с которыми они имели дело), наши инженеры-путейцы, имея дело с речными колоссами, вольно или неволь-

но вынуждены были считаться с их мощью и потому стремиться не столько насильственно обуздать реки, сколько заставить сам поток выправлять русло.

Поэтому и оказалось, что в Западной Европе вершиной изучения законов формирования русла были уже знакомые читателю правила Фарга — французского инженера, сформулировавшего положения о том, как развивается речная излучина и как в ней располагаются отдельные ее элементы (плёсы, перекаты), а русских инженеров-путейцев, кроме того, интересовало, какие именно силы управляют развитием русла.

Основоположником отечественного учения о речном русле должен быть признан русский инженер-путеец В. М. Лохтин.

Высоко ценя правила Фарга, Лохтин в то же время указывал на их ограниченность. Он считал русловой процесс явлением значительно более сложным и многофакторным, чем это казалось Фаргу, а характер деформаций русла и поймы реки ставил в зависимость от условий формирования стока наносов.

В. М. Лохтин писал: «Берега и ложе рек не могут и не могли быть источниками тех наносов, которые движутся вместе с водой... Наносы поступают в реку не вследствие размыва берегов... Они собираются вместе с водой, стекающей со всей площади водосбора, и большее или меньшее их количество есть неизбежный фактор, независимый от состояния собственного русла, как неизбежны и самые качества частиц этих наносов».

Геоморфологи значительно позже пришли к мысли о связи деформаций речного русла с движением наносов — уже в 20-х годах нашего столетия. Так, в работах австрийца Пенка и американца Г. Джильберта говорится, что в случае равенства объемов поступления и расходования наносов потоком продольный профиль реки приходит в состояние равновесия.

Итак, выделение двух видов деформаций — необратимых и обратимых — имеет первостепенное значение, позволяя точно наметить объект исследований, выяснить факторы, определяющие те или иные виды деформаций, четко разграничивать различные формы изменений речного русла и нацелить исследователя на важнейшие вопросы, имеющие наибольшее практическое значение. Поэтому деление деформаций на необратимые и обратимые является важным положением гидроморфологической теории руслового процесса.

Сток наносов

Если обратимые деформации речного русла происходят в результате перемещения наносов потоком, то, естественно, очень важно знать, как эти наносы попадают в реку.

Не будем углубляться в историю этого вопроса и, следуя принципам гидроморфологической теории, прежде всего попытаемся выяснить морфологическую сторону процесса формирования стока наносов.

В 1907 г. по инициативе видных русских ученых, изучавших образование почв, были начаты экспедиционные исследования, завершившиеся в 1911 г. созданием так называемых опытно-овражных станций. Перед этими станциями стояла задача выяснить, как происходит размыв почв на водосборах, куда уносятся размытые частицы и где они откладываются, поскольку смыв почв водой, так называемая эрозия их, ведет к уменьшению площадей пахотных земель и, следовательно, к снижению урожаев.

Наблюдения на опытно-овражных станциях велись по большой и сложной программе. Изучались эрозионные образования, скорость их деформаций, условия, в которых они происходят, движущие силы эрозии — текущие воды, их количество, особенности поступления с водосбора, скорость стекания в разные сезоны и многое другое. На одной из этих станций работал замечательный ученый А. С. Козменко, посвятивший изучению эрозии почв и борьбе с ней всю свою жизнь. Уже в очень преклонном возрасте Козменко написал книгу «Основы противоэрозионной мелиорации» (1955). Даже искушенный читатель не может не поражаться тем великолепным знанием фактического материала, которое проявляет автор этой книги, тем бесстрашием, с которым он идет непроторенными тропами и высказывает суждения, не всегда совпадающие с общепринятыми концепциями, а главное — глубиной и продуманностью его выводов. С первых же страниц становится ясно, что книга написана человеком, влюбленным с свое дело, но, несмотря на увлеченность, умеющим осторожно обращаться с фактами. Нет никаких оснований подозревать А. С. Козменко в стремлении к сенсации, но некоторые его выводы сами по себе сенсационны. Таково, например, положение о том, что современные эрозионные образования в наших условиях не могут принять формы, свойственные древним образованиям: современный овраг не может развиться в балку, а та — в речную долину.

Это положение сразу вызвало протесты: утверждение Козменко шло вразрез с устоявшимися воззрениями, согласно которым овраг с течением времени обязательно развивается в балку, а балка может превратиться в речную долину. Как видим, основным здесь считается фактор времени.

Подход А. С. Козменко совсем другой: прежде всего он оценивает основной фактор эрозии — сток воды. Если нет оснований предполагать, что сток воды существенно изменится, то, следовательно, нельзя и ожидать, что существенно изменятся выработанные им в течение длительного времени формы рельефа. Иными словами, для выработки определенной формы рельефа нужны определенный расход воды и определенный режим ее стекания, и, следовательно, на данном водосборе может выработаться только соответствующая его размерам эрозионная форма. Положение, на наш взгляд, бесспорное.

Чтобы разобраться в закономерностях образования определенных форм рельефа, очень важно выделить старые, унаследованные, и новые, современные, формы образований рельефа.

Точно так же не могли, например, разобраться в закономерностях накопления толщ речных отложений — речного аллювия, пока московский геолог Е. В. Шанцер не предложил разделять древний и современный аллювий.

Вот еще один пример. Когда автору этой книги пришлось заниматься типизацией речных пойм, то обнаружилось, что — вопреки распространенному мнению о том, что они являются результатом смещения русла в плане,— поймы встречаются на участках, на которых, по всем признакам, плановых деформаций не происходило. Но выяснить, понять это обстоятельство удалось лишь тогда, когда были выделены современные поймы, образованные работой современной реки, и унаследованные поймы, формировавшиеся в те времена, когда река имела другую водоносность. Так же удалось объяснить, почему ширина некоторых пойм намного превышает ту ширину, которая должна была бы выработаться при современной способности реки к смещениям в плане.

Умение отличить современные поймы от унаследованных помогает предвидеть дальнейший ход деформаций речных русел и пойм, а эта задача имеет первостепенное практическое значение.

...Так что же все-таки происходит при движении воды по склону местности? Если идти от границ водосбора какой-либо реки вниз по течению, то можно заметить, что одновременно с увеличением количества воды, поступающей с водосбора, меняются и размеры, и характер углублений земной поверхности, выработанных потоком.

А. С. Козменко, исследуя опытные водосборы на овражных станциях, не мог не заметить этой закономерности. На основе большого фактического материала он устанавливает, что меняются не только внешние формы эрозионных образований, но и характер напластования пород в каждом из них, характер стекания воды и перемещения наносов. Различия оказываются настолько существенными, что это дает возможность создать достаточно обоснованную типизацию этих форм. Для нас такая типизация очень важна тем, что позволяет проследить перемещение наносов текущими водами от водораздела до того места, где они попадают в реки.

Итак, если идти от водораздела в направлении стока воды, то первым эрозионным образованием, которое встречается на этом пути, будет так называемая ложбина стока.

Ложбина — это слабовыраженное, вытянутое и незамкнутое с низового конца углубление в земной поверхности. Пересекая ложбину, можно, даже не заметив этого, оказаться на ее дне: у нее пологие склоны и невыраженная бровка. Ни русел, ни даже мельчайших ручейков, ни рытвин, ни промоин на склонах и дне ложбин нет; по ним протекает немного воды. Почва сплошь задернована. Лишь в самом нижнем конце ложбины на ее дне можно заметить небольшие прямолинейные промоины — сухие руслица. Водосборные площади, с которых вода поступает в ложбины, очень малы — всего около 0,1, редко 0,5 квадратного километра. Вода стекает по ложбине тонким слоем, образуя густую сеть микроско-

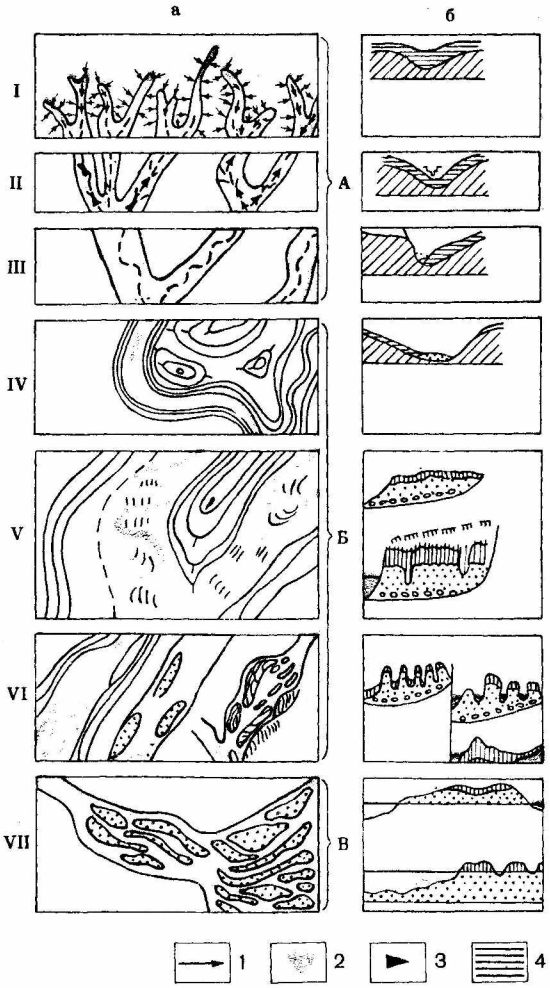


Схема формирования

а — схема формирования в плане, *б* — схема формирования в в различных звеньях сети, *д* — характер грядового

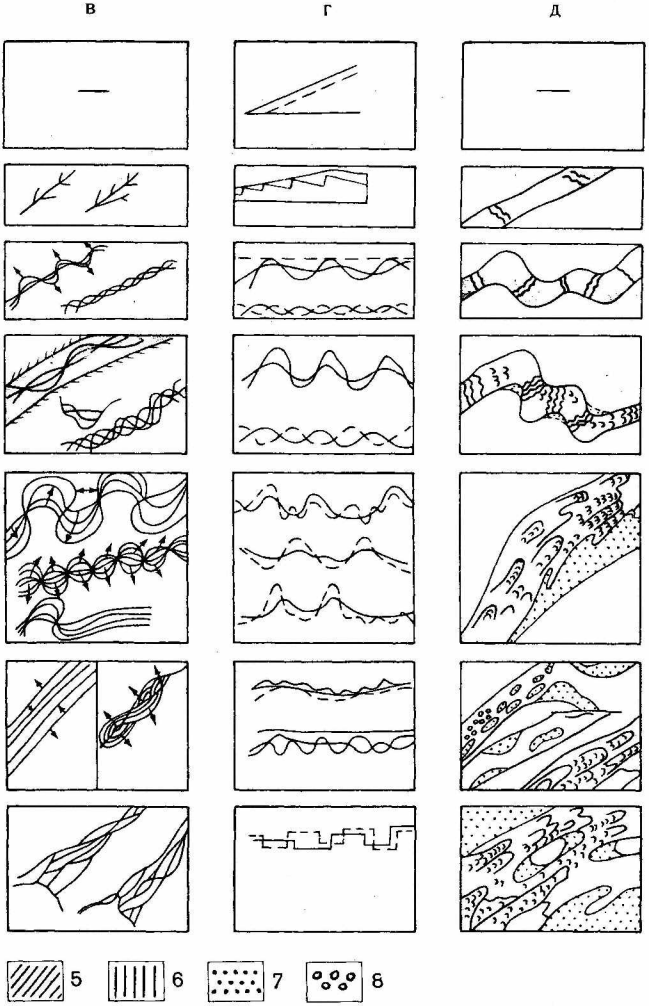
Основные

I — ложбины, II — лощины, III — суходолы, IV — беспойменные лом, VI — появление многорукавных

Основные зоны

А — зоны питания реки наносами, Б — зона

1 — плоскостной смыв, *2* — береговой размыв, *3* — донный разсоответственно пойменная и русловая



гидрографической сети.

разрезе, *в* — плановые деформации, *г* — высотные деформации
движения наносов в различных звеньях сети.
звенья сети.
речные долины, V — пойменные долины с меандрирующим рус-
русел, VII — устьевые участки рек.
транспорта наносов:
переотложения, В — зона аккумуляции.
мыв, *4* — покровная порода, *5* — коренные породы, *6* и *7* —
фации аллювия, базальный слой.

пических ручейков. Они настолько малы, что обтекают даже кустики травы. Поэтому и наносы перемещаются по склонам ложбины тонким слоем. Движущаяся по склону вода производит так называемый плоскостной смыв, или, как его еще называют, мелкоструйчатый размыв, который происходит почти равномерно и по дну, и по склонам ложбины. Если поперек ложбины пробурить скважины, это позволит обнаружить толщу покровной породы, образованной талыми ледниковыми водами, которая ныне и подвергается плоскостному смыву. Под дном ложбины покровная порода лежит более толстым слоем, чем под ее склонами. Нигде вы не встретите ни малейших признаков отложения современных наносов — продуктов размыва покровной породы. Снизу покровная порода граничит с коренными породами, слагающими основу данной местности. Эта граница повторяет очертания профиля ложбины. Таким образом, ложбина имеет как бы двойное дно: первое — современное, а второе — под толщей покровной породы. Это-то обстоятельство и позволило Козменко утверждать, что ложбина — древнее образование, размытое еще до ледникового периода.

Сливаясь между собой, ложбины способствуют увеличению сосредоточенного стока воды по склону водосбора. Это приводит к возникновению другого, также достаточно отчетливого морфологического образования на водосборе — лощины.

Лощина — это тоже удлиненная впадина в земной поверхности, но открытая и в верховой, и в низовой частях. Она резко отличается от ложбины. Прежде всего, она глубже врезана в поверхность местности, имеет более крутые склоны и более плоское дно. Благодаря большой крутизне склонов на них появляются как бы вторичные формы размыва — небольшие, рассекающие их овражки. По ним и осуществляется сосредоточенный сток воды. Поэтому количество воды, перемещающееся по лощине при снеготаянии и дождях, нарастает по ее длине скачкообразно, а в местах впадения ручейков из овражков, рассекающих склоны лощины, образуется местный размыв — маленький водопад. Это вторичная форма размыва. Козменко называет размывы склонов лощины береговой эрозией, а размывы дна лощины — донным размывом или донной эрозией. На участках между овражками, на склонах, встречается плоскостной смыв.

Таким образом, способ размыва здесь иной, чем в ложбине, и по-иному идет движение наносов.

Главное же отличие лощин от ложбин состоит в том, что в лощине впервые появляется руслице потока, проходящего по ее дну. Это руслице имеет прямолинейные очертания в плане, треугольное или трапецеидальное поперечное сечение. Руслица часто идут и из овражков, рассекающих склоны лощины. Поэтому сеть руслиц на дне лощины, имея ветвистый рисунок, в плане напоминает елочку с прямыми ветвями.

Буровые скважины, так же как и в ложбине, обнаружат сплошной слой покровной породы под лощиной; только обычно большая его толщина под дном, чем под склонами, выражена еще резче.

Ниже, повторяя очертания дна, проходит граница между покровными отложениями и коренными породами.

Слились две лощины, и произошло еще большее нарастание расхода воды. Изменилась ли эрозионная форма, по которой стекает вода?

Да, конечно. Появляется новое звено гидрографической сети, названное Козменко суходолом.

Суходол еще больше отличается от верхних звеньев гидрографической сети. Прежде всего бросается в глаза асимметрия склонов: один из них крутой, другой пологий. На склонах те же овражки, а вот водопадиков на дне суходола не видно. Руслице стало не ветвистым, а извилистым — совсем как маленькая речка, только вода в ней бывает лишь при снеготаянии или при сильных и продолжительных дождях. В руслицах имеется песок, образующий маленькие перекаты на перегибах. Можно также обнаружить небольшие песчаные гряды, сползавшие по руслицу, когда в нем текла вода. Они накапливались на перегибах русла, образуя эти маленькие перекаты, в то время как на поворотах русла развивались глубоководные участки — плёсы. Итак, в суходоле появляются первые признаки накопления аллювия.

Вот слили свои воды вместе два суходола. С увеличением расхода воды сразу меняется и характер русла водотока: как правило, появляется постоянный, т. е. осуществляющийся круглый год, без перерыва, сток воды, и мы уже имеем дело с настоящей рекой. Однако река эта еще не способна существенно разрабатывать долину, и поэтому течение ее подчинено изгибам долины, склоны которой ограничивают перемещения русла в плане — оно описывает только слабовыраженные излучины, вершины которых упираются непосредственно в эти склоны. Излучины огибают участки поймы, которая впервые появляется здесь: одна излучина — один пойменный массив.

Принимая притоки, река становится все более многоводной, и вслед за этим меняется характер ее долины и поймы. Долина реки расширяется настолько, что пойма, зачастую не занимая всего ее дна, граничит с надпойменными террасами. В свою очередь и пойма настолько расширяется, что русло реки, даже если оно очень извилисто и образует большие петли, также не занимает всей ее ширины.

С увеличением расходов воды в реке увеличивается и количество несомых ею наносов, но вместе с тем уменьшаются уклоны водной поверхности. Поэтому наносы начинают образовывать обширные скопления и русло становится многорукавным, а следовательно, и пойма представлена большими и малыми островами.

Наконец, мы попадаем в зону, где аккумуляция наносов оказывается явно преобладающим процессом,— в зону речной дельты.

Конечно, такая схема чередования основных звеньев гидрографической сети — идеальный случай. В действительности же намеченная схема может быть нарушена в зависимости от местных природных условий.

Например, после слияния суходолов может сразу встретиться широкая пойменная долина, которая затем, если реке приходится прорезать возвышенность или горные кряжи, сменится узкой, неразработанной.

Ну что же, говорят, нет правил без исключений, но ведь это не основание для отмены самих правил. Просто удивительно, что гидравлики и гидрологи так долго не уделяли внимания вопросам морфологии речных русел и пойм. И те, и другие упорно не хотели видеть, что изучаемые ими процессы дискретны, и продолжали находиться во власти представлений о непрерывности этих процессов. В учении о стоке воды структурные представления сводятся к выделению поверхностного и подземного стоков, склонового и руслового. Между тем из приведенного выше описания структуры гидрографической сети видно, что в разных ее звеньях должны существовать свои закономерности формирования стока, свои закономерности взаимосвязи поверхностных и подземных вод. Не удовлетворяет классификация звеньев по Козменко — давайте сделаем лучшую, но принцип, выдвинутый этим ученым, безусловно плодотворен!

Достаточно иметь под рукой только одну карту или аэрофотоснимки, как, зная закономерности строения гидрографической сети, сразу же можно выделить в пределах речных водосборов ту их часть, которая питает реку наносами, установить, на каких участках правомерно ожидать переотложения наносов. В пределах этих участков река, по сути дела, не получает и не расходует наносы в тех размерах, которые могли бы изменить средние многолетние значения их стока, т. е. то количество наносов, которое поступает из области их формирования (водосбора реки).

На первый взгляд, это парадоксальный вывод, из которого следует, что размывы берегов русла, сложенных речным аллювием, ровно ничего не добавляют к среднему многолетнему количеству наносов, которое поток получил со своего водосбора. Но если вдуматься в это явление как следует, становится понятным, что деформации русла, вовлекающие в русловой процесс старые отложения реки — речной аллювий, не меняют стока наносов: ведь это размываются ранее отложенные рекой наносы, поступившие из верхних звеньев гидрографической сети.

Иное дело, если поток подмывает склоны своей долины, сложенные коренными породами, а не современным аллювием, либо отложения, образованные древней рекой или озерного происхождения. В этом случае поток получает дополнительное количество наносов к тому, которое поступает из верхних звеньев гидрографической сети. При обратимых же деформациях, которые и выражают собственно русловой процесс, идет только переотложение наносов.

Еще раз оговоримся: так можно рассуждать только применительно к среднему многолетнему стоку. Если же речь идет о расходах наносов за короткий срок, то, конечно, местный размыв ведет к их увеличению, а намыв — к уменьшению; в том случае, если объемы размыва и намыва балансируются, то в конце такого участка сток наносов от этих переотложений не изменится.

Последнее обстоятельство как раз и доказывает, что сток наносов является независимым фактором руслового процесса, т. е. процесса переотложения наносов.

На III Всесоюзном гидрологическом съезде, проходившем в Ленинграде в 1957 г., на секции русловых процессов и гидродинамики обсуждался вопрос о том, как надо моделировать русловой процесс и вести его лабораторные исследования. Было бы очень заманчиво уметь воссоздавать русловой процесс на лабораторной модели.

На такой модели можно было бы с большой тщательностью и подробностью наблюдать и изменения морфологического строения русла, и пойму, и гидравлическую структуру потока, легко проникая внутрь его, что в натурных условиях не всегда возможно. Кроме того, на подобной модели за несколько часов можно воссоздать те явления, которые в природных условиях формируются на протяжении многих лет, а иногда даже тысячелетиями.

Нет нужды пояснять, какие это открывает возможности.

На съезде гидрологи вынуждены были признать, что ни у нас, ни за рубежом не удается воссоздать в лаборатории процесс развития речной излучины, каким бы длительным ни был эксперимент, иногда продолжающийся несколько сот часов.

Опыты по воссозданию излучин обычно проводились так.

На слегка наклонный лоток, длиной около 15 и шириной 2 м, укладывался ровным слоем песок. В середине лотка делалась так называемая пионерная прорезь — прямолинейная канавка, обычно треугольного сечения, идущая от верхнего конца лотка к нижнему. По этой канавке пускалась вода, двигавшаяся под уклон. Предполагалось, что вода начнет размывать русло так, что на нашей микрореке будут образовываться и развиваться излучины. Однако, вопреки ожиданиям, на первых этапах эксперимента вода размывала нижнюю часть пионерной прорези преимущественно в ширину.

Затем размыв постепенно поднимался вверх по течению и достигал верхнего края лотка, все время слабея. Таким образом, русло приобретало в плане треугольные очертания, с вершиной в начале микрореки.

Экспериментаторы считали, что микрорека будет насыщаться наносами в результате подмыва ее берегов и дна русла. Поэтому на лоток пускалась чистая вода.

Однако, как мы только что видели, в природе все обстоит иначе. Каждая река, уже от самых своих истоков, получает воду с наносами, поступающими в нее с ее водосбора в результате эрозии и разработки верхних, не имеющих постоянного стока звеньев гидрографической сети. Количество поступающих с водосбора наносов может быть очень велико: ведь эти звенья практически занимают всю площадь водосбора; и если из каждого звена выносится не так много частиц грунта, то в сумме все звенья дают огромное количество наносов — нередко оно выражается в миллионах тонн в год.

Если мы хотим воссоздать какой-либо процесс, то необходимо воссоздать и те условия, в которых он развивается. Вот об этом-то и забывали экспериментаторы, пытавшиеся изучать развитие излучин на основе очень приближенных умозрительных схем,— как оказалось, схем, совсем непохожих на то, что имеет место в действительности.

Когда же на лоток стали подавать не чистую воду, а смесь воды с определенным количеством наносов, тогда только стали получаться образования, похожие на речные излучины.

Некоторые исследователи пошли еще дальше: ими задавался определенный режим поступления воды на лоток, т. е. воссоздавался водный режим — половодье и межень. Стали воссоздавать и условия отложения наносов на пойме — засевали лоток травой. Эффект был разительный — начали образовываться излучины, по форме напоминающие настоящие, более крутые и иногда с выраженным перешейком, как настоящая петля русла...

Теперь остановимся на еще одном важном положении, вытекающем из признания двух обстоятельств: во-первых, того, что сток наносов есть независимый фактор руслового процесса, и, во-вторых, того, что процесс переотложения наносов не приводит к изменению их среднего многолетнего стока.

Если признать тот факт, что в современных условиях каждая река выносит (опять-таки за средний многолетний период) определенное количество наносов, которое не зависит от их переотложения при деформациях речного русла и поймы, то правомерно ожидать, что объемы размыва и намыва русла балансируются между собой, а следовательно, деформации речных русел находятся в состоянии динамического равновесия. Значит, средние размеры русел мало меняются в многолетнем разрезе.

Автору этой книги как-то пришлось сравнить продольные профили реки Оки, снятые в разные годы. Даже по внешнему виду профилей можно было утверждать, что очертания их за этот период изменились очень сильно. Однако, когда были вычислены средние глубины по фарватеру практически бесприточных участков, длина которых составляла иногда сотни километров, то обнаружилось, что в изучаемый период она изменилась мало и в среднем была практически постоянной.

Что же может привести к нарушению динамического равновесия? Ответ только один — изменения в факторах руслового процесса. Иными словами, нарушение динамического равновесия русловых деформаций может произойти в результате изменения стока воды, поступления наносов и условий их транспортирования потоком, т. е. в результате появления различных сооружений в русле или нарушения базисов эрозии в ходе естественного руслового процесса (промыв порогов потоком, сработка перекатов и т. п.).

Надо сказать, что изменения водного режима — явление распространенное. В основном оно вызывается широкими мероприятиями по регулированию речного стока в хозяйственных целях.

Поступление воды в реку, которая дотоле в нее не поступала, может начаться и под влиянием других хозяйственных мероприятий — вырубки лесов, распашки склонов и т. п.

Поступление наносов с водосбора также может измениться под влиянием хозяйственных мероприятий, которые нарушают состояние поверхности водосбора и условия просачивания воды, а следовательно, изменяют условия ее стекания по поверхности и неизбежно сопутствующего ему смыва почв — эрозию поверхности местности.

Как указывает А. С. Козменко, современные формы эрозии почв начали развиваться всего каких-нибудь 150—200 лет тому назад, с того времени, когда человек принялся особенно интенсивно разрабатывать и использовать земли для нужд сельского хозяйства. С увеличением поголовья скота стада стали вытаптывать огромные пространства лугов. Вспомните, как трудно ходить по выгонам из-за множества кочек, которые образовались при вытаптывании дерна скотом. Вспомните, как проложенные скотом тропы во время дождей и снеготаяния превращаются иногда в настоящие ручьи. А распашка, особенно если она выполнена не по агротехническим правилам и борозды идут не поперек, а вдоль склона? Ведь каждая такая борозда — это готовое русло ручья, а при больших уклонах стока — будущий овраг. Понесут они воду — и резко увеличится количество грунта, выносимого в реки. Рассчитано, что для смыва почвы толщиной 15 см на пашне требуется всего 15 лет, а на лугу — 3500 лет.

Нарушение равновесия в деформациях русла, как уже упоминалось, может произойти и в результате изменения условий транспортирования наносов потоком. Что же способно изменить эти условия?

Обвалование реки, например. Поток пойдет по реке более сосредоточенно, так как прекратится перелив его на пойму и растекание по ней. В этих условиях размывающая деятельность потока увеличится и наносы с такого участка будут выноситься в большем количестве, чем до обвалования. Уничтожение порогов, например. Взорвали пороги, вынули большое количество грунта со дна русла, разрушили плотины на реке. Все это, при прочих равных условиях, приведет к увеличению скоростей течения и к активизации потока — он станет выносить наносов больше, чем раньше.

Или напротив: уменьшились по какой-то причине уклоны водной поверхности, уменьшились скорости потока — уменьшился и вынос наносов.

«Уменьшилось», «увеличилось»... А что же фактически происходит с речным руслом?

Обычно рассуждают так. При данных скоростях течения поток может переносить только определенное количество наносов. Если скорости течения увеличились, поток оказывается способным перенести большее количество наносов и начнется размыв русла. Если же скорости течения уменьшатся, то поток начнет откладывать

наносы. Отложение наносов начнется и в том случае, когда в поток станет поступать наносов больше, чем он может нести. В том же случае, если количество наносов в потоке окажется меньшим, чем он способен перенести, поток будет насыщаться ими за счет размыва своего русла.

Считается, что при намыве дно русла повышается, при размыве река врезается. Однако наблюдения за поведением наших рек показывают, что в действительности дело обстоит куда сложнее. Намыв может выражаться не только в повышении отметок дна, а размыв — не только во врезании русла. Оказывается, что прежде всего меняются формы, размеры и скорости перемещения песчаных скоплений наносов по руслу. Иными словами, меняется форма транспорта наносов — и тем резче, чем резче изменяются условия этого транспорта (а это значит, что изменяются и формы речных русел, и характер их деформаций).

Когда рассуждают о намыве только как о процессе повышения отметок дна речного русла, а о размыве только как о врезании русла, обычно упускается вопрос о том, до каких же отметок дойдет изменение дна в том случае, если в поток будет поступать все большее или, наоборот, все меньшее количество наносов. Хотя совершенно очевидно, что еще никогда не было случая, чтобы река перестала течь и исчезла из-за того, например, что увеличилось поступление наносов в нее.

И еще одно упущение. Транспортирующую способность потока рассчитывают только для взвешенных наносов. А ведь бывает, что эта категория наносов вообще не принимает участия в формировании речного русла. Например, известны случаи, когда на участке реки, иногда весьма значительном участке — в несколько десятков или даже сотен километров, все деформации русла сводятся к сползанию по нему песчаных гряд, в то время как взвешенные мелкие частицы наносов проносятся, не задерживаясь в русле реки.

Это упущение нетрудно исправить, если исходить из представлений о делении наносов на донные и взвешенные и считать, что изменения в тех факторах, от которых зависит русловой процесс, вызывают и изменения морфологического строения русла, когда исчезают или видоизменяются одни формы и появляются другие, более приспособленные к новым условиям. В итоге следует признать, что реки могут сильно изменять транспортирующую способность, перестраивая свое русло применительно к новым условиям практически в неограниченных пределах. Ясно и другое: в первую очередь надо рассчитывать транспортирующую способность потока в отношении перемещения им донных наносов, образующих основные подвижные скопления в русле реки.

Вот таким образом и следует подходить к оценке того, что будет с руслом реки в том случае, если изменятся условия переотложения потоком наносов. С этих позиций первостепенное значение имеет и понимание того обстоятельства, как же происходит это переотложение, в каких формах поток переносит наносы в разных природных условиях.

Различные законы движения взвешенных и донных наносов

Частицы наносов обычно бывают различной крупности. Крупные частицы перекатываются по дну; если же в потоке существуют вихри, то частицы захватываются ими, поднимаются на некоторую высоту, а затем вновь выпадают на дно, продвигаясь при этом на относительно небольшие расстояния. Такой способ перемещения наносов называют сальтацией — прыжком.

По-иному ведут себя легкие частицы. Они перемещаются в толще потока во взвешенном состоянии на очень большие расстояния. Движение таких частиц напоминает полет птицы по сложной траектории.

Как видим, механизм перемещения различных наносов различен. Это приводит к тому, что наносы, перемещающиеся по дну русла, образуют одни формы скоплений, а взвешенные наносы — другие. Донные наносы формируют основные русловые образования и фундамент поймы, а взвешенные идут главным образом на построение верхних слоев поймы, так как могут проникать на отдаленные от русла ее участки. Таким образом, они способствуют нарастанию поймы в высоту, ежегодно откладываясь на ней во время затоплений, т. е. в половодья и паводки.

Несмотря на очевидность этих положений, необходимость деления наносов на донные и взвешенные длительное время отрицалась. По-видимому, это происходило по той причине, что батометры — приборы, измеряющие мутность потока и количество переносимых им наносов,— улавливали наносы обеих категорий одновременно, как единое целое. Батометр — это сосуд, который опускается в поток на разные глубины, выдерживается некоторое время на какой-то точке и затем вынимается из воды. За время, в течение которого батометр пребывает в потоке, в него, вместе с водой, попадают и частицы наносов. Из извлеченного на поверхность батометра проба сливается и фильтруется. Оставшиеся на фильтре наносы высушиваются, и по пробе уже сухих наносов определяется их вес и крупность. Суммируя все пробы, вычисляют содержание наносов в единице объема воды (мутность), а умножив мутность на расход воды, получают расход наносов, выражаемый в граммах или килограммах в секунду. Совершенно ясно, что при таком способе измерения в батометр попадают и взвешенные наносы, и частицы донных, поднятые вихрями. Но это еще не основание для того, чтобы не отличать взвешенные наносы от донных. Н. Е. Кондратьев, говоря о противниках разделения наносов на донные и взвешенные, как-то остроумно заметил, что и собака, прыгающая по земле, и летящая птица некоторое время находятся в воздухе, но ведь никому не приходит в голову утверждать, что способ их перемещения одинаков.

Гидроморфологическая теория не только предлагает разделять взвешенные и донные наносы в реках, но и указывает, как их можно разграничить по крупности. Ясно, что установить какое-то общее для всех рек значение крупности, разделяющее донные и

взвешенные наносы, нельзя, так как в потоке все время меняются скорости течения и структуры этих течений. А при таких изменениях возможен переход донных наносов во взвешенные и взвешенных в донные. Лишь располагая длительными рядами наблюдений, можно вычислить среднее многолетнее значение крупности, разделяющее взвешенные и донные наносы, для данного участка реки.

Однако длительных наблюдений за донными наносами нет, потому что до сих пор нет надежных методов их измерений. И лишь в последнее время появились приборы, позволяющие брать пробы этих отложений.

Как же измеряются расходы донных наносов?

Наиболее распространенный способ их измерения — улавливание перемещающихся по дну наносов в специальных лотках, опускаемых на дно реки. Однако ограниченные возможности такого способа измерения были очевидны уже давно.

В начале 50-х годов мне пришлось присутствовать на заседании Ученого совета Государственного гидрологического института. Один из основателей учения о речных наносах, ныне покойный Г. И. Шамов, выступал с докладом об измерениях донных наносов. Хотя сам он являлся автором одной из конструкций лотковых измерителей донных наносов, Г. И. Шамов не без горечи говорил, что надо перечеркнуть все работы по созданию лотковых измерителей и конструировать их по какому-то новому принципу.

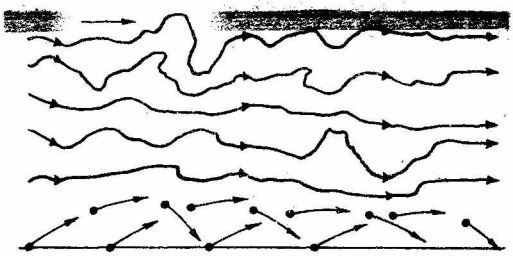
К слову сказать, в последние годы такой принципиально новый прибор действительно появился, но еще не получил большого распространения, поскольку еще далеко не ясно, насколько он надежен. Принцип действия этого прибора заключается в следующем: в поток опускается специальный датчик, который регистрирует число и силу ударов по нему несомых потоком частиц. По числу ударов можно судить о количестве частиц наносов, а по силе ударов — о крупности отдельных частиц.

В чем причина неточности измерений расходов донных наносов существующими ныне приборами и способами?

Дело, как нам кажется, в совершенно недостаточном учете форм перемещения донных наносов. Самая грубая схема этого перемещения выглядит так. Песчаное дно реки почти всегда покрыто движущимися грядами, сползающими вниз по течению. Поэтому в месте погружения донного батометра оказывается либо подвалье гряды, либо ее лобовой (обращенный против течения) пологий склон, либо крутой низовой склон. Наносы срываются течениями с лобового откоса гряды, движутся в направлении к ее гребню и наращивают низовой откос, как бы смещая его вниз по течению.

Вследствие такого движения наносов гряда постепенно сползает вниз по течению реки и вызывает стеснение потока по глубине. Поэтому скорости течения потока над грядой возрастают от подвалья к гребню. В этом же направлении возрастает и расход донных наносов, так как с увеличением скорости течения со склона срывается все больше частиц наносов.

Траектории частиц взвешенных и донных наносов.



Эта общая схема усложняется тем, что поток воды, переваливая через гребень гряды, образует вихрь с горизонтальной осью вращения и, следовательно, в придонном слое потока воды в подвалье гряды возникают обратные течения. Обратные течения охватывают примерно 1/3 лобового склона гряды, приводя к тому, что на этом участке склона возникает и обратное перемещение наносов в направлении низового склона гряды. Эти наносы способствуют наращиванию откоса вниз по течению. Значит, величина расхода наносов зависит от того, на какой участок гряды попал наш донный батометр. При большой глубине реки или мутной воде наблюдатель не видит этого места и, следовательно, не знает, что он измеряет: расход наносов в начале гряды, в ее середине, на гребне или в подвалье. Все эти расходы различны, в подвалье они могут быть даже отрицательными. Вот и идут споры о точности измерений расходов донных наносов батометрами, а между тем ошибки измерений этими приборами иногда составляют 1000%.

Интересный эксперимент проделали специалисты института «Гидропроект». Они попробовали устанавливать батометр для измерения донных наносов с помощью водолаза. Таким образом, экспериментаторы знали точно, на каком именно участке дна установлен прибор. Точность измерений сразу сильно возросла.

Делались также попытки измерять расходы наносов так называемым объемным способом, следя за накоплением наносов в емкостях с известными размерами. Но для подобного способа измерений необходимо либо специально строить такие емкости на реках, что обошлось бы чрезвычайно дорого, либо использовать емкости существующих гидротехнических сооружений. Кроме того, такой способ подходит для определения суммарного стока наносов, но не годится для оценки деформаций речных русел и пойм.

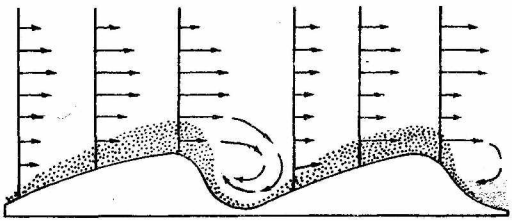


Схема течений над грядами.

Как видите, не только приборы, но и методика их применения не удовлетворяют исследователей руслового процесса.

К сожалению, еще достаточно часто цифре уделяют больше внимания, чем тому процессу, который она должна определять.

Вспоминается буквально анекдотический случай в одной полевой экспериментальной гидрологической лаборатории. На ее территории был установлен прибор, позволяющий очень точно измерять испарение с поверхности почвы. Гигантский почвенный монолит, весом 5 т, вырезанный с того же склона, на котором был размещен прибор, поместили в бак и установили на специальных весах, фиксирующих вес этого монолита с точностью до 50 г. Влага испарялась — вес монолита уменьшался, выпадали атмосферные осадки — вес его увеличивался. Изменения веса непрерывно фиксировались на ленте самописца. Поверхность взвешенного монолита находилась на одном уровне с поверхностью земли, чтобы можно было получать истинные величины испарения, без искажений.

Стали анализировать записи самописца. Что за диво?! В ранние утренние часы и перед вечерней зарей на ленте самописца отмечались резкие колебания испарения, хотя, судя по прежним наблюдениям на более простых и грубых приборах, да и по чисто теоретическим соображениям, этих колебаний не должно быть. Но изо дня в день запись показывала резкие колебания утром и вечером.

Что же выяснилось? Кто-то обратил внимание на то, что как раз ранним утром и ранним же вечером монолит усиленно посещают лягушки. Трудно понять, чем он им так понравился, но они бывали на нем систематически. А так как лягушки были крупные, весом более 50 г, бесстрастный автомат-самописец фиксировал их появление и исчезновение с высокой точностью.

Как же найти оптимальный способ автоматического замера донных наносов? Надо полагать, что наиболее перспективный способ — определять расход донных наносов при помощи измерения деформаций речного русла, в частности на основе измерения движения гряд эхолотированием.

Но не будем забегать вперед — этому вопросу посвящена отдельная глава.

Пусть читатель не подумает, что исследование взвешенных наносов — дело второстепенное; изучать их безусловно надо, но только в тесной взаимосвязи с донными наносами, с морфологией речного русла и поймы. Ведь со взвешенными наносами связано и качество воды, и заиление водохранилищ и других сооружений на реках, и т. д.

В результате изучения взвешенных наносов в настоящее время появился самостоятельный большой раздел гидрологии. Разрабатываются способы их измерения, обработки проб для определения крупности частиц наносов, организована целая сеть наблюдательных пунктов (на реках СССР их более 2000). Результаты измерений печатаются в Гидрологических ежегодниках, составляются карты распределения мутности вод в реках Советского Союза.

Однако подход к изучению взвешенных наносов страдает теми же недостатками, что и подход к учету стока воды. Исследователи интересуются главным образом общим количеством взвешенных наносов за многолетние периоды, в маловодные и многоводные годы, от года к году, в различные фазы водного режима — в половодье, в межень, по месяцам, декадам, дням и даже интересуются их распределением внутри суток. Все эти данные пытаются увязать с явлениями водной эрозии — смывом почв и грунтов с поверхности водосборов. Однако изучение связи стока наносов с морфологией речных русел и пойм, с деформациями, происходящими на них, с движением донных наносов находится в самой начальной стадии.

В первые же годы создания гидроморфологической теории Н. Е. Кондратьев достаточно убедительно показал, что изучение взвешенных наносов без одновременного исследования наносов донных приводит к грубому искажению действительного положения дел.

Без изучения взвешенных наносов нельзя получить и достоверных данных о деформациях речного русла. Нарастание пойм в высоту обусловлено главным образом отложениями на их поверхности именно взвешенных наносов. Оно приводит к тому, что поток течет в своем русле все более сосредоточенно, а следовательно, приобретает все большую активность. И, таким образом, с нарастанием поймы в высоту размыв берегов русла может постепенно усиливаться. А значит, для прогнозирования дальнейшего хода деформаций русла реки важно знать расход взвешенных и донных наносов, закономерности их отложения на пойме и взмыва с ее поверхности во время разливов.

С другой стороны, для того чтобы рассуждать о закономерностях распределения взвешенных наносов, очень важно знать особенности морфологического строения речной долины и поймы.

Несколько лет тому назад нам пришлось изучать распределение мутности по длине Оби, с тем чтобы оценить, на каком участке реки ниже Обской ГЭС, у Новосибирска, можно ожидать восстановления стока наносов после их задержки в водохранилище ГЭС. Выявилась довольно любопытная картина. Обычно мутность воды в реке увеличивается при высоких половодьях, когда с водосбора в реку стекает много воды и, естественно, река несет больше наносов. А на Оби были обнаружены участки, на которых мутность реки, как оказалось, имеет обратную связь с максимальными расходами воды: в наиболее высокие половодья мутность меньше, чем в низкие. Что это — случайность или закономерность? Причины этого явления выяснились, как только мы обратили внимание на морфологическое строение речной долины. Оказалось, что в высокие половодья пониженная мутность бывает на участках с низкой, хорошо затопляемой поймой. В этих условиях на пойму выносится много наносов, и в русле их количество уменьшается, поэтому-то и наблюдается пониженная мутность руслового потока.

В заключение приведем пример того, как взвешенные наносы могут влиять на работу сооружений.

В 1963 г. проектировщики и гидрологи «Теплоэлектропроекта» предложили нам выехать на Куру. Мы должны были дать рекомендации, что нужно сделать для обеспечения нормальной работы водозабора Али-Байрамлынской тепловой электростанции, часто выходящего из строя в результате заиления его взвешенными наносами.

...Голая степь, залитая палящими лучами солнца. Барачного типа домики. А где же здание самой ТЭЦ? Оно выглядело очень необычно: похоже, что многие агрегаты стоят под открытым небом. Действительно, так и есть. Оказывается, дождей здесь практически не бывает, а температуры воздуха устойчиво положительные.

Но к делу.

ТЭЦ берет в общем очень мало воды — всего несколько кубометров в секунду. А Кура несет в секунду сотни кубометров. Однако Кура, как и большинство рек, выходящих из гор на равнину, отличается исключительно мутной водой. Если в горах русло реки каменистое и со склонов долины и водосбора в нее поступает относительно мало наносов, то вода бывает прозрачной. По выходе реки на равнину резко уменьшаются скорости течения, и поэтому почти все наносы имеют возможность откладываться в русле. Так как этот процесс идет тысячелетиями, то наносов скапливается очень много, они образуют слои мощных отложений мелкозернистого или даже глинистого материала. Река легко его размывает и насыщается большим количеством мелких частиц. Кроме того, она принимает притоки, тоже текущие на равнине по мощным отложениям мелкозернистых частиц, и притоки эти также приносят в главную реку мутную воду. По цвету вода Куры напоминает кофе с молоком.

Водозабор, как бы мало он ни брал воды из реки, представляет собой угрозу для рыбы, которая в него засасывается и гибнет. Чтобы предотвратить эту беду, устанавливают специальные ограждающие решетки.

Итак, рыба спасена. А как обстоит дело с водоприемником? Оказалось, что на Куре ограждающие решетки очень быстро заносятся наносами и вода перестает поступать в водоприемник. На обследуемом водозаборе дело осложнялось еще и тем, что сам водозабор был расположен неудачно. Он помещался у вогнутого берега в самой вершине излучины. Струи потока отражались от берега несколько выше водозабора, и как раз там, где он находился, создавалась зона с очень малыми скоростями течения, что, безусловно, способствовало осаждению здесь большого количества наносов, забивающих водоприемник.

Что же делать? Конечно, самое радикальное решение вопроса водоснабжения ТЭЦ — устройство в пойме Куры пруда-охладителя. Для этого понадобилось бы обваловать часть поймы дамбами такой высоты, чтобы и в половодье они оказывались выше максимального уровня воды. Для наполнения пруда-охладителя и регулирования уровня воды в нем пришлось бы создать водоподводящий канал, водоприемные отверстия в теле дамбы, водозабор и сооружения

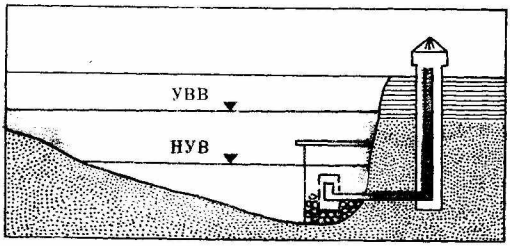


Схема водозабора на р. Куре.

УВВ — уровень высоких вод, НУВ — уровень низких вод.

для сброса теплой воды. Строительство такого пруда решило бы все проблемы: в водоприемник водозабора ТЭЦ поступала бы отстоявшаяся, чистая вода, а циркуляция ее в пруде обеспечивала бы охлаждение сброшенной сюда горячей воды.

Однако строительство такого пруда-охладителя представляет собой достаточно сложную задачу. Во-первых, это большое сооружение, требующее значительного объема строительных работ. Во-вторых, до сего времени многие процессы, происходящие в таком пруде с оборотом воды, еще слабо исследованы. И в-третьих, дамбы пруда, отгораживая большие участки поймы, стесняют пойменный поток и создают новые условия его протекания и в пойме, и в русле реки, а следовательно, возникает новый характер деформаций: очевидно, деформации должны усиливаться, по-видимому, должен измениться при этом и их тип. Не исключено, что видоизменения деформаций речного русла начнут неблагоприятным образом воздействовать на устойчивость дамб пруда.

Поэтому прежде чем приступить к проектированию пруда-охладителя, нужно собрать все необходимые данные. А для этого придется прибегнуть к лабораторному моделированию: построить модель пруда в определенном масштабе и исследовать на этой модели гидродинамические и тепловые процессы, которые могут возникнуть на проектируемом пруде-охладителе, конечно, не забывая при этом о самых общих закономерностях развития деформаций русла и поймы реки в природе.

Это идеальное решение проблемы. В реальной же жизни следует учитывать и вторую сторону вопроса. ТЭЦ уже работает, а пруд надо еще проектировать и строить, и займет это несколько лет. А что делать, пока он не построен?

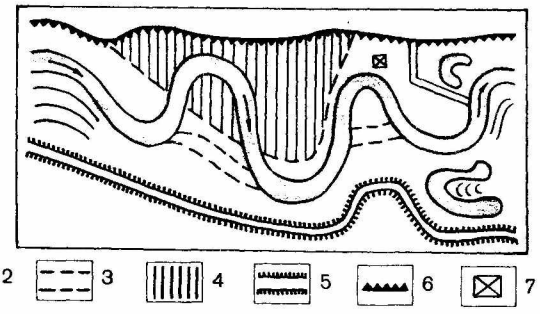


Схема участка реки у водозабора.

1 — сброс теплой воды, *2* — контур проектируемой дамбы прудаохладителя в пойме реки, *3* — проектируемые спрямления излучин, *4* — пруд-охладитель, *5* — дамба р. Куры, *6* — бровка береговой долины, *7* — водозабор.

Придется прибегнуть к каким-то временным мерам по водоснабжению. Но и для того чтобы наметить такие меры, опять-таки необходимо обратиться к описанным выше методам оценки руслового процесса — изучить морфологию русла и поймы, оценить скорости их деформаций на основе либо уже существующих материалов, либо обследований на месте.

Все это и было изложено в нашем заключении. В нем говорилось, что радикальным решением вопроса является строительство пруда-охладителя; рекомендовалось место его размещения в пойме Куры; указывался возможный характер деформаций на участке реки, стесненном дамбами. В качестве же временных мер по улучшению работы водозабора предлагалось устроить в русле реки шпоры, отклоняющие часть потока, наиболее насыщенную наносами, и направляющие ее мимо водоприемника ТЭЦ. Одновременно предлагалось и спрямление излучины, что должно было ослабить деформации ее в плане. Эта мера предотвратила бы возможный прорыв вышерасположенной излучины, который может привести к резкому усилению деформаций русла Куры на участке водозабора.

Все эти рекомендации, к сожалению, до сих пор не выполнены, и станция по-прежнему испытывает нужду в воде.

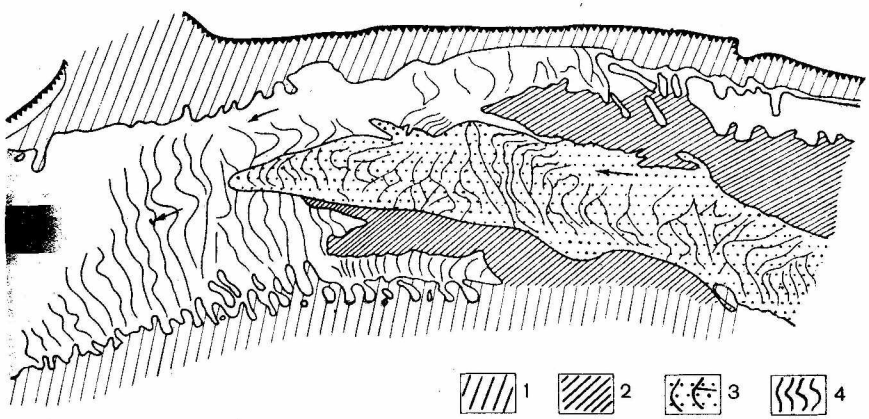
Малые, средние и крупные формы речных русел

Гидроморфологическая теория выделяет малые, средние и крупные формы образований в речных руслах. Такое деление не только помогает понять сущность руслового процесса и прогнозировать будущее русла, но и подсказывает методы их изучения.

Впервые рассматривая аэрофотоснимок речного русла, на котором благодаря хорошей прозрачности воды было видно дно, мы обнаружили на нем множество песчаных скоплений самых различных форм и размеров. Сильное впечатление произвело на нас и изучение первых эхограмм, полученных при эхолотировании речного русла. Запись хода глубин по длине русла выявляла крупные гряды, на поверхности которых были хорошо заметны гряды меньших порядков. Исследуя дно реки Даугавы, гидролог В. В. Ромашин обнаружил множество гряд разных размеров, причем гряды последующего порядка оказывались вдвое длиннее, чем гряды предыдущего порядка.

Двадцать лет тому назад эхолотирование было редкостью. Теперь же накоплен огромный материал о грядах на самых различных реках нашей страны.

Я отнюдь не хочу сказать, что это мы открыли существование гряд в русле реки. О грядах в русле было известно задолго до нас. Больше того, попытки создания теории гряд и методов их расчета делались неоднократно, в том числе и в самые последние годы. Так, К. В. Гришанин считает, что причиной образования гряд является наличие в потоке так называемой вихревой дорожки. По его мнению, шаг гряд (расстояние между гребнями смеж-



Песчаные гряды разной величины, обнаруженные по аэрофотоснимку.
1 — пляжи, *2* — обсохшие участки причленившихся к пляжам гряд, *3* — ленточная гряда, по которой движутся цепи небольших гряд, *4* — ряды небольших гряд.

ных гряд) соответствует расстоянию между вихрями. Рассчитав вихревую дорожку, можно одновременно оценить и шаг гряд. Подобные мысли примерно в то же время высказывались и Н. А. Михайловой, работающей в Московском государственном университете.

Но ни одна из теорий гряд не получила общего признания. И никогда прежде не говорилось о том, что бывают гряды разных порядков. Вот их-то нам и удалось увидеть на аэрофотоснимках.

Грядовое движение наносов имеет настолько отчетливые формы, что легко обнаруживается даже во время купания на реке. Стоишь себе спокойно в одном каком-то месте по грудь в воде, но только ступишь несколько шагов вверх или вниз по реке — и вдруг погружаешься с головой. Это значит, что первый раз ты попал на гребень гряды (наиболее высокую ее часть), а второй — в ее подвалье. Если стоять неподвижно на дне, то уже через короткое время начинаешь чувствовать, или как ступни ног заносит песком — это значит, наползает гряда, или как песок вымывает из-под ног — это значит, надвигается подвалье гряды, т. е. ее глубоководная часть.

Используя аэрофотоснимки, эхограммы, данные наземных полевых работ и лабораторных исследований, мы пришли к совершенно определенному выводу: все морфологические образования в руслах рек можно разделить на три основные категории.

К первой относятся гряды, повсеместно встречающиеся в русле рек; по своим размерам они несравненно меньше, чем его ширина и глубина. Их можно назвать микроформами речного русла, или малыми формами.

Попадаются в реках и очень крупные гряды. Одна такая гряда занимает всю ширину русла и тянется вдоль него на расстояние, в несколько раз превышающее ширину русла. Это уже значительно более мощное скопление наносов — мезоформа, или средняя форма.

Раз за разом тщательно рассматривая аэрофотоснимки русла или крупномасштабные карты, мы обратили внимание на закономерное повторение по длине реки определенных сочетаний морфологических элементов, представленных в том числе и средними формами. Эти комплексы морфологических образований оказались тоже достаточно разнообразными. Однако именно они определяли внешний вид русла на участке реки, тем более, что включали и морфологические элементы на поймах. Подобные сложные образования получили название макроформ речного русла, или крупных форм.

Не удивляйтесь тому, что столь важные и столь очевидные, казалось бы, вещи были открыты так недавно. В области морфологии рек мы знаем так мало, что всякая новая проработка открывает что-то новое, дотоле неизвестное. Впоследствии, когда была выработана система измерителей форм, с помощью которой стало удобно выяснять закономерности их строения и изменений, появились и трудоемкие расчеты, и применение методов вероятностной статистики, и построение сложных графических связей — короче говоря, морфология рек получила в свое распоряжение весь арсенал современных методов математического анализа. Наука о морфологии рек стала похожей на современную науку.

Но ведь в основе основ этой науки, в начале ее начал лежит простое наблюдение. Не будь этих множество раз повторенных наблюдений — не было бы и науки о морфологии рек. Недаром основоположник науки о русле В. М. Лохтин говорил: «Поменьше формул, побольше наблюдательности»,— тем самым подчеркивая, что описать уравнением можно все, но прежде всего надо знать, что описывать.

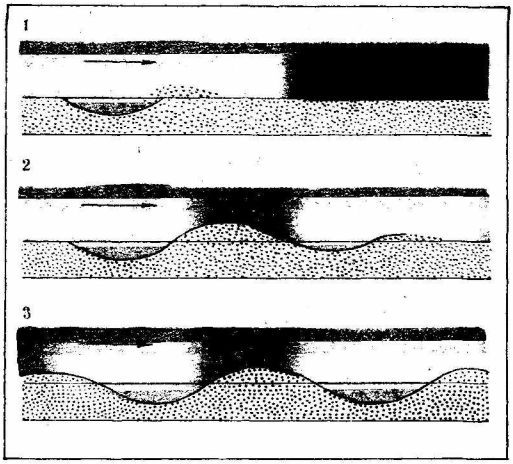
Деление русловых форм на разные категории дает возможность выявить причины образования каждой отдельной формы русла и установить, как, какими методами, средствами и силами надо вести исследования. Это серьезная предпосылка к успешному изучению процессов, происходящих на реках.

Почему одновременно в одном потоке существуют столь различные формы? Это может значить только одно: каждой категории русловых образований соответствуют какие-то свои определяющие факторы.

Как выявить эти факторы, как установить, какие именно из них вызывают формирование каждой из трех категорий?

Что касается микроформ, то здесь дело обстоит проще, чем с остальными двумя категориями, поскольку накоплен большой материал лабораторных исследований гряд — опыты по их воспроизведению в русловых лотках, очень тщательные измерения скоростей течений и крупности частиц грунта, из которых формируются гряды. Мы располагаем и наблюдениями за грядами микроформ, проведенными на настоящих реках.

В середине 50-х годов мне довелось присутствовать при одном очень интересном эксперименте, поставленном А. В. Караушевым в Государственном гидрологическом институте.



Примерная схема развития гряды при эксперименте в лотке.

В маленьком, длиной всего в несколько метров лотке с постоянным уклоном на дне выложили ровным слоем песок, затем пустили воду. Стеклянные стенки лотка позволяли следить за тем, как песок приходит в движение. На каком-то расстоянии от начала лотка по мере увеличения скорости течения песчинки вдруг приходили в особенно интенсивное движение и поднимались над дном. В этом месте на дне, в песке, образовывалась ямка. Одновременно с ней, ниже по течению, образовывалась вторая ямка, еще ниже по течению — третья, четвертая и т. д. Выносящиеся из ямки песчинки накапливались ниже — формировалась типичная песчаная гряда, которая начинала сползать, не меняя своих размеров и форм. При крупности песка 0,3 мм образование гряд начиналось тогда, когда скорость течения превышала 0,3 м в секунду. Подобный процесс происходил и при других экспериментах.

Этот опыт особенно запомнился, так как подтверждал наши предположения о том, что при данном гидравлическом режиме размеры сформировавшихся гряд должны быть примерно одинаковыми. А отсюда следовало, что по размерам гряд, видимым на аэрофотоснимках, можно судить о гидравлических условиях, в которых они сформировались.

Изучив данные по грядам, мы пришли к следующему заключению: главным фактором, обусловливающим их возникновение и существование, является турбулентность потока — наличие в нем вихревых возмущений. С изменением гидравлических характеристик потока микроформы быстро перестраиваются, меняя свои очертания и размеры, а значит, они обладают очень малой инерционностью.

Формы гряд зависят и от крупности слагающего их материала. Чем крупнее песок, тем более короткие и высокие гряды появляются в реке. Отсюда следует, что изучение микроформ — задача преимущественно гидравлическая, требующая знания мгновенного поля

скоростей потока во всей его толще и особенно в придонном слое. Размеры гряд-микроформ несоизмеримо малы по сравнению с размерами потока, его глубиной и шириной, вследствие чего эти гряды обычно оказывают малое влияние на структуру всей толщи потока. А потому микроформы могут существовать при самых различных гидравлических условиях.

Мезоформа — это гряда, которая одна занимает все русло реки в ширину, изменяя строение скоростного поля потока во всей его толще. Образование такой гряды требует иных гидравлических условий, чем образование микроформы. Достаточным условием образования средней формы является неравномерный режим потока, но при этом он может быть установившимся. (Напомним, что равномерный режим предполагает отсутствие изменения средних скоростей течения по длине потока, а неравномерный означает, что такие изменения есть. Установившийся режим — это такой режим, при котором нет изменений в расходах и уровнях воды, неустановившийся — такой, при котором подобные изменения есть.)

Общим между микро- и мезоформами является то обстоятельство, что определяющими факторами для них остаются гидравлические условия протекания потока.

Какие же факторы определяют существование макроформ речного русла? По сути дела, здесь требуется ответить на вопрос, почему в одном случае возникает один тип русловых деформаций, а в другом случае — другой. Как было сказано выше, макроформа — это сложный комплекс морфологических образований в речном русле, определяющих его внешний вид. В пределах макроформы находятся и микро-, и мезоформы. Однако оказывается, что объяснить существование макроформ исходя из одних гидравлических условий нельзя, так как в их образовании принимают участие отнюдь не одни только гидравлические факторы. Для того чтобы объяснить, почему в одних условиях возникают такие макроформы, а в других — иные, надо в первую очередь знать свойственный данному водосбору, питающему участок реки, на котором расположена изучаемая макроформа, водный режим и сток наносов (режим их поступления, градации крупности частиц, расходы их). Есть и еще один фактор, о котором следует сказать особо,— это так называемые ограничивающие условия.

Допустим, установлено, что при данной комбинации характеристик водного режима и стока наносов должны образовываться развитые излучины. Но карта показывает отсутствие излучин. На ней изображено прямое русло с большими песчаными скоплениями у берегов. В чем дело? Рассматриваем карту внимательнее и замечаем новые подробности: на этом участке склоны долины высокие, крутые, а сама долина такая узкая, что русло занимает почти все ее дно. Где уж тут образоваться излучине! Русло реки сжато склонами долины, переработать эти склоны потоку не под силу. Значит, трудноразмываемые склоны, стесняя плановые деформации русла, приводят к видоизменению их хода, обычно обусловленного особенностями стока воды и наносов. Это и есть ограни-

чивающий фактор руслового процесса, влияние которого может быть настолько значительным, что он изменит даже тип процесса.

Положение еще больше осложняется тем, что смежные формы русла — например, излучины — находятся в тесном взаимодействии, и, следовательно, гидравлические особенности потока в значительной мере определяются не только водным режимом, но и особенностями морфологического строения смежных макроформ речного русла, в данном случае — особенностями смежных излучин. И идти в этом вопросе чисто гидравлическим путем — это все равно что пытаться составить суждение о доме в целом на основании изучения структуры кирпичей, из которых он сложен. Это, конечно, не значит, что структуру и особенности «кирпичей» изучать не следует — это значит только то, что таким изучением задача не исчерпывается.

Какова же роль этих трех категорий образований в русловом процессе?

Небольшие песчаные гряды — повсеместно встречающаяся микроформа — определяют собой сопротивления движению потока. Кстати сказать, эта роль гряд на дне потока стала учитываться сравнительно недавно. А до этого при расчете сопротивления, которое русло оказывает потоку, учитывались и выступы зерен грунта, и влияние травяного покрова — все что угодно, кроме главного фактора — сопротивления гряд.

Но этим роль микроформ в русловом процессе не ограничивается. Их сползание по дну русла выражает расходы донных наносов, причем практически мгновенные, поскольку микроформы не обладают сколько-нибудь существенной инерционностью — они перестраиваются тотчас вслед за изменениями скоростного поля потока. В принципе, измеряя с заданной частотой с помощью эхолота скорости перемещения гряд одного и того же участка русла, можно достаточно надежно вычислить расход донных наносов.

А какова роль мезоформ речного русла? Как увидим дальше, средние формы могут придать определенные характерные черты речному руслу на участках значительной протяженности. Их изучение позволяет предсказать, как будет вести себя русло реки в целом. По изменению этих форм можно оценивать расходы донных наносов в среднем за период их смещения по руслу. Эти периоды могут измеряться неделями, месяцами, сезонами и даже годами. Продолжительность их зависит от скорости сползания мезоформ. Чем медленнее сползает такая форма по руслу, тем большее время требуется для точного определения расходов донных наносов.

Как уже говорилось, мезоформа, перемещаемая потоком, в свою очередь влияет на строение скоростного поля потока во всей его толще на том участке, на котором такая форма располагается (в отличие от микроформы, влияние которой сказывается преимущественно лишь на структуре придонного слоя). Следует также заметить, что при наличии хорошо выраженных гряд вихревой валец с горизонтальной осью, возникающий в подвалье такой гряды, иногда развивается настолько быстро, что это приводит к его

срыву. В момент срыва вальца (вихря) один конец его оси упирается в дно реки, а другой выходит к поверхности воды. Таким образом, ось вихря из горизонтальной превращается в наклонную, близкую к вертикальной. Такой вихрь быстро разрушается.

Срывы могут быть достаточно частыми, и поэтому правило, гласящее, что микроформа влияет только на придонный слой потока, часто нарушается.

Мезоформа оказывает на структуру потока более постоянное влияние, чем микроформа, и выражено оно более отчетливо. Вероятно, именно поэтому мы можем надеяться, что в первую очередь появится гидравлическая теория мезоформ. Появление такой теории значительно облегчило бы расчеты наиболее оптимальных режимов работы самых различных сооружений на реках и оценку эффективности защитных сооружений.

Так как макроформы определяют общий вид русла реки и потому представляют особый интерес для проектировщиков и строителей сооружений на реках, то о них уместно поговорить в специальной главе.

Типы руслового процесса

Как ни важно выделить микро-,мезо- и макроформы речных русел, выделения этого еще недостаточно для решения практических задач, так как внутри каждой категории существуют самые различные виды деформаций, обнаруживаются самые различные сочетания этих форм.

Изучение макроформ речного русла — задача первостепенная, поскольку именно макроформы определяют общий внешний вид речного русла и именно с ними в первую очередь приходится иметь дело проектировщикам сооружений на реках.

Изучение макроформ значительно упростилось бы, если бы удалось их типизировать. И вообще выделение типов руслового процесса избавило бы гидрологов от слишком осредненных представлений о русле, что всегда ведет к большому разрыву между тем, что бывает в действительности в природе, и тем, что считают ученые. Кроме того, типизация уже содержит в себе и определенный элемент прогноза. Действительно, зная типичную схему развития макроформы, например речной излучины, не составляет особого труда представить, во что со временем эта излучина должна превратиться.

Если известны скорости деформаций, то можно сказать и то, когда произойдет интересующее нас изменение.

Прежде чем появилась наша типизация макроформ русла — типичных схем его деформаций, пришлось переворошить груду картографических и разных других материалов. Достаточно сказать, что карта распределения типов руслового процесса на реках СССР, составленная нашим сотрудником С. И. Пиньковским, охватывает реки общей протяженностью свыше 700 000 км. В ходе ра-

бот приходилось выезжать на реки в самые разные районы нашей страны и проводить специальные полевые исследования.

Перед нами стояла задача, проанализировав очертания рек на крупномасштабных картах, отобрать наиболее типичные из них. При этом надо было охарактеризовать не какое-то определенное состояние русла, а составить типичную схему его деформаций на основании разновременных съемок одной и той же реки, чтобы иметь возможность судить о будущих изменениях положения ее русла. Только тогда можно было бы сказать, что представляет собой современное очертание русла реки — определенную ли стадию его развития, его ли устойчивое начальное или конечное положение. В качестве единицы типизации сочли удобным принять макроформу — определенный, тесно взаимосвязанный в своем развитии комплекс различных морфологических образований.

Первый же просмотр карт показал, сколь разнообразны макроформы речного русла, ни одна из них не повторяла в деталях другую.

Мы оказались примерно в таком же положении, в какое попали ученые, впервые всерьез занявшиеся дактилоскопией: они установили, что отпечатки пальцев человека никогда не повторяются и могут поэтому служить надежным способом опознания личности. Но людей великое множество, и найти нужный отпечаток в огромном массиве отпечатков, собранных в архиве, весьма непросто.

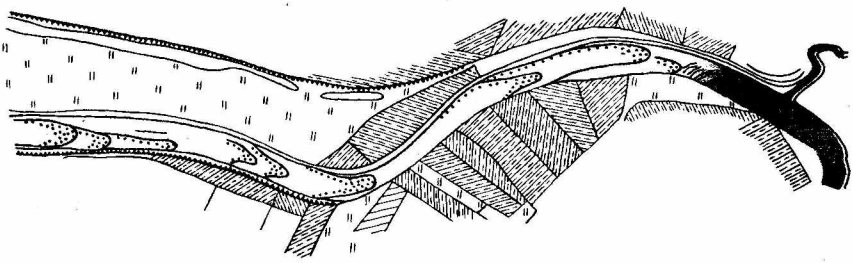
Вот и перед нами легло множество карт и аэрофотоснимков речных участков с неповторимыми рисунками макроформ речного русла.

Кроме общих очертаний русла в плане, на них хорошо видно множество деталей — элементов, составляющих макроформу. Прежде всего надо схематизировать рисунок речного русла. Выделить главное, типичное, отражающее суть натуры, не так просто, но вполне возможно. У Пикассо есть серия рисунков, показывающих, как художник приходит к обобщению виденного. На первом рисунке изображен бык, все детали рисунка выписаны весьма тщательно. На следующем рисунке — тот же бык, но убраны некоторые детали, которые показались художнику излишними. Далее следуют все более схематизированные изображения все того же животного, и, наконец, серия завершается рисунком, на котором бык изображен с помощью всего трех-четырех линий. И все же мы узнаем характерные черты этого животного!

Что же обнаружилось на наших рисунках речного русла?

Ленточные гряды и побочни

На многих аэрофотоснимках рек выделялись участки с относительно прямым руслом, обычно без поймы, с четко прослеживаемыми гребнями подводных гряд. Ни малейших следов подмыва берегов. Гребень гряды распюлагается почти перпендикулярно оси русла. Гряды размещаются по длине участка примерно на равных рас-



Ленточные гряды в русле.

стояниях друг от друга. Длина же самих участков с грядами составляет десятки километров.

При промерах оказалось, что, во-первых, гряды имеют высоту, равную приблизительно половине глубины реки, во-вторых, в межень они остаются затопленными, в-третьих, ползут они со скоростью 150—200 м в год. В половодье весь верховой склон гряды размывается и наносы откладываются на низовом склоне, что и приводит к сползанию гряды вниз по течению реки. В межень гряды продолжают двигаться, но уже по-другому: по верхнему склону гряды ползут гряды меньших размеров — микроформы. Достигнув гребня гряды, они сваливаются в подвалье, наращивая низовой склон. В первом случае мы имеем дело с прямым перемещением гряды, во втором — с косвенным.

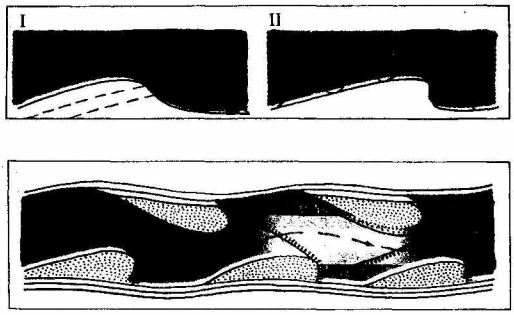
На аэрофотоснимках обнаружились и гряды, отличающиеся от описанных. Эта вторая разновидность гряд оказалась еще более распространенной: они встречаются на всей Волге, на Амуре, Висле, Даугаве, Оби, Северной Двине, Каме, Рейне и многих других реках.

Особенность этих гряд состоит в том, что их гребень перекошен в плане и что в межень прибрежные, возвышенные их части обсыхают и река становится извилистой, сама же гряда перестает сползать.

Когда по крупным грядам в руслах рек накопился достаточно большой материал, нам удалось выделить два типа деформаций русла. Первый тип — движение гряд с гребнем, перпендикулярным продольной оси русла,— был назван ленточногрядовым, а сами гряды — ленточными, так как в плане они напоминают волны, образуемые при размахивании обычной лентой. Второй тип — движение перекошенных в плане гряд, обсыхающих в межень в прибрежной части,— был назван побочневым, по названию прибрежных скоплений наносов — побочней.

Между этими двумя разными типами руслового процесса есть и нечто общее: все деформации русла сводятся только к сползанию гряд, а следовательно, к периодическим изменениям отметок дна; подойдет к створу сооружения гребень гряды — глубины у сооружения уменьшатся, подойдет подвалье — глубины увеличатся. Так как высота этих гряд доходит до 10 м, а скорость сползания

Прямое (I) и косвенное (II) перемещение гряд.



Побочневый тип руслового процесса.
1 — обсыхающие в межень части гряды, *2* — контур гребня гряды, *3* — средняя линия русла.

может превышать 1 км в год, то не считаться с их движением нельзя.

Разница же между двумя этими типами руслового процесса состоит в том, что во втором случае деформации происходят сложнее и надвижение побочня может привести к тому, что сооружение окажется вдали от реки.

Посмотрим на конкретном примере, как происходит движение побочня, и побываем на Оби у Барнаула. Проектировщики разместили крупный водозабор в плёсе ниже участка выпуклого берега, считая, что имеют дело с обычной излучиной. Однако прошло два или три года, и выпуклый берег наполз на створ сооружения, которое оказалось на сухом месте вдали от реки. Разгадать эту загадку удалось, восстановив прежние положения русла Оби по аэрофотоснимкам и осмотрев участки реки на месте.

Схемы деформаций русла Оби в плане показали, что река здесь развивает крупные излучины, которые потом зачастую спрямляются. По этим спрямлениям начинают двигаться крупные массы песка, располагаясь по длине реки в шахматном порядке и образуя побочни. Иногда они местами зарастают травой. Создается такое впечатление, будто русло состоит из отдельных излучин, хотя это совсем другие образования — ежегодно сползающие вниз по течению песчаные побочни. В свое время проектировщики не обследовали ряд смежных образований, приняв их за излучины. Стоило бы им проехать на катере 20—30 км выше водозабора, и все стало бы ясно. Но что говорить об этом теперь...

При сложившейся ситуации ничего другого не оставалось, как рекомендовать построить канал, спрямляющий побочень, и подвести воду к почти готовому водозабору. Канал построили, он сильно разработался в первое же половодье и теперь подает воду бесперебойно.

А вот как перемещался этот подвижный побочень. С марта 1958 г. по март 1959 г. левобережный побочень сполз вниз по реке на 530 м. В последующие два года были низкие половодья и по-

бочень переместился только на 200 м. В 1961 г. скорость сползания вновь увеличилась, достигнув 200 м, и к декабрю 1962 г. побочень сполз еще на 250 м. Всего за четыре года он спустился вниз по реке на 1,2 км. Между вытянутой низовой его оконечностью и левым берегом реки существовал затон. По мере сползания побочня перемещался вниз по течению и этот затон, причем глубина его уменьшилась с 18 до 3 м. Створ наибольших глубин в затоне сполз за четыре года на 500 м.

Правобережный побочень спускался вниз по реке с еще большей скоростью: за эти же четыре года он сместился на 1,5 км. Из-за этого левобережный побочень расширился почти вдвое. Таким образом, произошли сложные переформирования русла.

Ленточногрядовый и побочневый типы руслового процесса могут развиваться не только на реках, но и в каналах.

Очень любопытный случай произошел, например, на реке Висле. Здесь развивался побочневый тип руслового процесса. Из-за сползания побочней линия фарватера все время менялась, что осложняло судовождение. Тогда по обоим берегам реки построили струенаправляющие дамбы, что, по замыслу проектировщиков, должно было привести к сжатию потока и размыву средней части русла. Однако результат строительства оказался совершенно неожиданным: побочни не только не замедлили свое перемещение, но стали двигаться быстрее, чем раньше. Они оторвались от берегов и превратились в быстро сползающие островки полулунной формы, расположенные, так же как и старые побочни, в шахматном порядке.

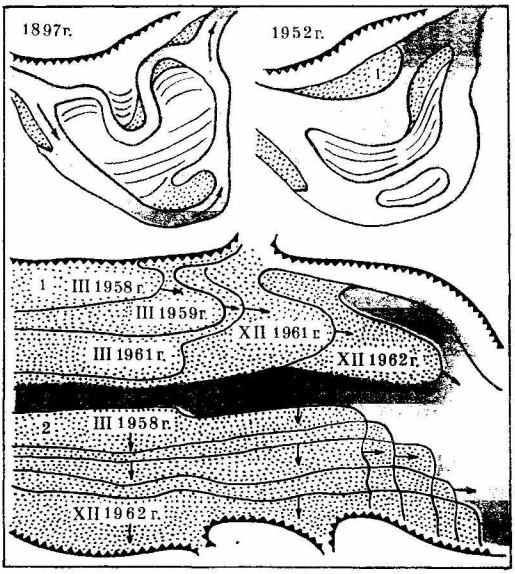
Приведенный пример — еще одно подтверждение того, что для изменения типа руслового процесса надо коренным образом менять определяющие его факторы, местные же меры в этом случае далеко не всегда дают желаемый эффект. Сток наносов и водный режим реки Вислы оказывали более сильное воздействие на деформации русла — транспорт наносов, чем искусственные сооружения.

Иногда данные о типе руслового процесса удается получить из совершенно неожиданных источников.

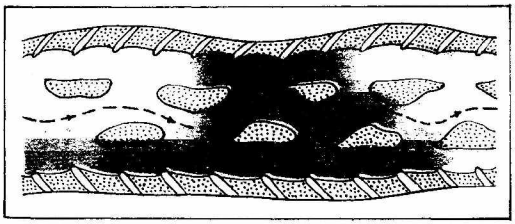
Американские археологи производили аэрофотосъемку реки Потомак, надеясь обнаружить на снимках стоянки древних индейских племен, а затем начать на них раскопки. Один из археологов, рассматривая снимки, обратил внимание на какие-то точки в русле реки, образующие в плане треугольники, обращенные вершинами вниз по течению.

Подъехали на лодках к этим странным фигурам и увидели под водой каменные столбы — остатки древних ловушек для рыб. На эти столбы натягивались сети. Такие ловушки всегда устанавливаются так, что стрежень потока делит угол в вершине треугольника, образованного натянутой на столбы сетью, пополам. Но почему же все ловушки, если сравнить их с современным положением стрежня потока, смотрят куда-то вбок? Можно ошибиться при сооружении одной ловушки, но вряд ли, конечно, рыбаки ошиблись в размещении своих сетей на значительном протяжении реки. Оставалось предположить, что положение стрежня потока в Пото-

Схема деформаций русла р. Оби. В 1897 г. излучина Оби начала спрямляться. К 1952 г. спрямление превратилось в широкий проток — главное русло, по которому начали двигаться побочни. Как именно они двигались, видно на нижнем рисунке.



Побочни на р. Висле после укрепления ее берегов отторглись от них и стали быстро двигаться в средней части русла.
1 — струенаправляющие дамбы, *2* — судовой ход.



1 2

маке изменилось вследствие смещения русловых образований. В таком случае по положению этих древних ловушек можно судить о старом положении стрежня, а он обычно совпадает с линией наибольших глубин в русле реки. Таким путем обнаружилось, что линия наибольших глубин сместилась от одного берега к другому, а следовательно, на место ранее существовавших побочней надвинулись промежутки между побочнями, т. е. произошло сползание побочней на всю их длину.

Вековые изменения излучин речного русла

Есть в Месопотамии река Меандр. Русло ее замечательно тем, что имеет удивительно правильные по своим очертаниям излучины, закономерно переходящие одна в другую на всем протяжении реки. С тех пор, как геоморфологи обратили внимание на эту реку, слово «меандр», прочно войдя в гидрологическую терминологию, стало обозначать излучину, а реки с извилистым руслом, с излучинами,

закономерно смещающимися в плане, стали называть меандрирующими реками.

Все ли излучины смещаются в плане одинаково, по одной схеме или развитие излучин происходит по-разному? Проще всего получить ответ на этот вопрос, сравнивая карты разных лет съемки и прослеживая на них положение отдельных излучин. Однако эта, на первый взгляд, простая задача оказывается не такой простой.

Прежде всего карты должны освещать достаточно долгий период, в течение которого излучины могли бы пройти полный цикл развития. Кроме того, перерывы между съемками должны быть возможно короче, чтобы проследить все промежуточные положения, которые проходила излучина при своих плановых деформациях.

К сожалению, рассчитывать получить систематические съемки речного русла, так чтобы они приходились на длительный период и охватывали большие участки, можно только по судоходным рекам, для которых составляются лоцманские карты.

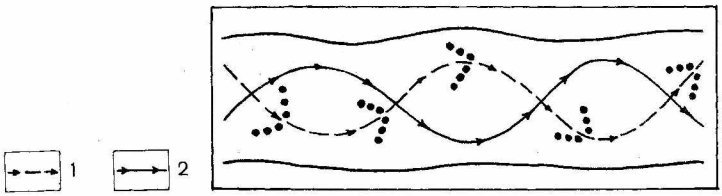
Однако и в этом случае возникают осложнения. Раньше карты снимались редко, и только за последнее десятилетие выпуск их участился. Старые карты и современные составлены с разной степенью подробности. Надо прямо сказать, что современные карты беднее старых. Дело в том, что лоцманские карты все более специализируются, а само судовождение совершенствуется благодаря появлению все более точных и надежных навигационных приборов; резко улучшилась и обстановка на реке — здесь появились путевые знаки, показывающие судам, куда и как надо держать курс. Поэтому составители карт весьма схематично изображают различные русловые образования и, как правило, не отмечают пойм. Кроме того, из-за совершенно, по-видимому, превратных представлений о скорости плановых деформаций русла составители считают возможным сохранять на новой карте очертание берегов, показанное на предыдущей карте, изменяя только «начинку» — изображение перекатов, побочней, осередков и других сильно меняющихся от года к году русловых образований.

Есть еще одна трудность. Составители лоцманских карт не учитывают, что их карты можно использовать не только для судовождения, но и в каких-то других хозяйственных и научных целях. Поэтому издание каждой новой карты они сопровождают категорическим требованием уничтожать старые карты.

Вот поэтому и пришлось искать новые надежные и объективные способы получения схем плановых деформаций речного русла за длительные периоды. Ведь, вероятно, можно восстановить прежние положения русла по морфологическим признакам. Надо только найти следы этих прежних положений.

Неоценимую услугу в таких поисках оказала аэрофотосъемка. Удалось разработать способ обнаружения прежних положений речного русла на аэрофотоснимках и на этой основе выяснить, как же происходит развитие речных излучин.

Аэрофотоснимок — это документально точное изображение местности. Он дает возможность не только обнаружить, но и измерить



Рыбные ловушки древних индейцев, обнаруженные на аэрофотоснимках р. Потомак, по которым восстановлена линия старого фарватера реки.
1 — старый фарватер, *2* — новый фарватер.

многие зафиксированные на нем предметы с не меньшей точностью, чем если бы это были наземные измерения; он гарантирует отличную обзорность изображения: по снимку сразу видно, что представляет собою местность на площади в несколько квадратных километров. Кроме того, аэрофотосъемка позволяет повторять исследования каждый раз, как только в этом возникает необходимость.

При первом же просмотре аэрофотоснимков обнаружился не очень понятный, на первый взгляд, рисунок поймы. Во всех случаях, когда русло реки было извилистым и можно было предполагать, что оно смещается в плане, т. е. меандрирует, на поверхности поймы — как вблизи русла, так и в отдалении от него — обнаруживались достаточно отчетливые серии дугообразных изогнутых полос. Светлые полосы чередовались с более темными. Поражала правильность очертаний полос, равномерность их чередования. На выпуклых участках берега эти полосы в общем отчетливо повторяли его очертания, а на остальных участках поймы они могли быть ориентированы по отношению к руслу самым различным образом. Иногда полосы обнаруживались и на надпойменной террасе, но в этом случае они оказывались более крупными, чем на пойме.

Самый простой способ выяснить, что представляют собой эти полосы,— это сличить аэрофотоснимок с местностью, т. е. провести так называемое полевое дешифрирование.

Решили поехать на реку Полометь. Эта река небольшая и потому удобна для проведения полевых работ. Кроме того, по ней есть много гидрологических, геологических и геоморфологических материалов, здесь ведутся специальные гидрологические наблюдения. Самое же главное — здесь развито свободное меандрирование и имеются четко выраженные пойменные массивы.

С высокого крутого склона речной долины пойма просматривалась отлично. Кустарника на ней почти не было. Дул свежий ветер, и по траве на пойме пробегали длинные ряды волн. Неужели они-то и образуют полосы на снимках? Но ведь ряды травяных волн прямые, а на снимках они дугообразно изогнуты, да к тому же образуют как бы системы различно ориентированных по отно-

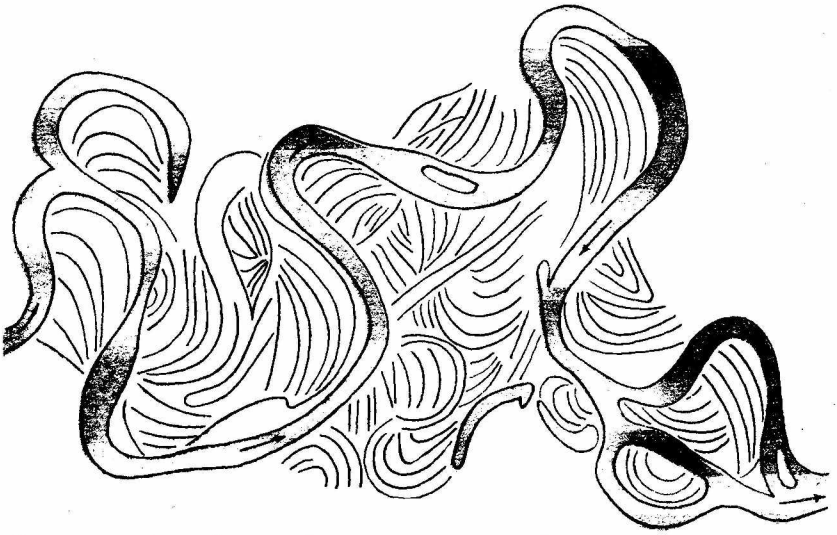
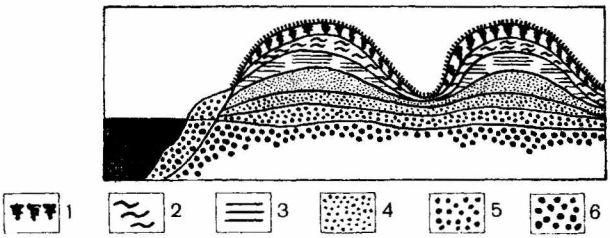


Схема рельефа поймы свободно меандрирующей реки, составленная по аэрофотоснимку.

шению друг к другу развернутых вееров. Значит, дело не в ветре и не в травяных волнах.

Спускаемся на пойму и направляемся к реке, наблюдая, как человек, идущий впереди в высокой траве, то скрывается в ней по пояс, то вновь виден во весь рост. Сомнений нет: мы пересекаем гряды и ложбины на поверхности поймы, тянущиеся параллельно берегу реки. Ориентируем аэрофотоснимок по множеству примет на местности — это и отдельно стоящие деревья, и сараи, и промоины, и тропки. Да, эти гряды и ложбины между ними точно соответствуют полоскам, видным на снимке. Почему же на аэрофотоснимке видны такие предметы и детали, которые не должны были бы получиться на снимке из-за своих малых размеров?

Различные поверхности имеют различную отражательную способность, которая оценивается так называемой спектральной характеристикой. Спектральная характеристика показывает, сколько процентов падающих на поверхность предмета световых лучей отражается ею. Светочувствительная же эмульсия на фотопленке фиксирует малейшие изменения этих характеристик. На анализируемом нами аэрофотоснимке гряды и ложбины между ними видны не вследствие разной освещенности поверхностей, а благодаря разной окраске и густоте травы, растущей на грядах и ложбинах, что обусловлено разными условиями увлажнения поверхности поймы. На сильно увлажненных участках поймы наилучшие условия произрастания растительности создаются на грядах, и трава на них оказывается более густой и сочно окрашенной. На относительно сухой пойме картина обратная — более сочной и густой бывает



Слоистость отложений в разрезе берегового вала. *1* — почва, *2* — ил, *3* — суглинок, *4* — мелкий песок, *5* — средний песок, *6* — крупный песок.

растительность в лучше увлажненных ложбинах. Таким образом, благодаря целому ряду связей между природными элементами, служащих коррелятивными признаками дешифрирования аэрофотоснимков (в нашем случае — благодаря зависимости густоты окраски растительности от увлажненности поверхности поймы, которая в свою очередь обусловлена высотой участка), на снимке удается обнаружить неровности поверхности, невидимые глазом при визуальном наблюдении поверхности поймы с возвышенного места.

Итак, пока ясно одно: полосы, видимые на аэрофотоснимке, действительно соответствуют положению грив и ложбин на пойме.

Но как образовались эти ложбины и гривы?

В гидрологической литературе есть упоминание о гривистом рельефе пойм меандрирующих рек, но взгляды на его происхождение весьма разноречивы.

Так, по В. Р. Вильямсу, известному советскому почвоведу, гривистый рельеф наиболее хорошо развит на поймах крупных рек. В руслах таких рек обширные пространства занимают прибрежные пески. Вильямс высказывает предположение, что резкая разница между условиями прогревания солнечными лучами поверхности воды и поверхности суши создает благоприятные условия для возникновения ветров типа бриза, имеющих переменные направления в течение суток. Песок, гонимый этими ветрами по поверхности поймы, скапливается в виде вытянутых гряд у различных местных препятствий: случайных неровностей поверхности, кустарников и т. д. — так постепенно складывается гривистый рельеф поймы. Но эти предположения не подтвердились другими исследователями.

Исследуя донскую пойму, академик Б. Б. Полынов сразу же обнаружил, что песчаные гряды по своему строению не имеют ничего общего с эоловыми скоплениями песков типа дюн или бархa-

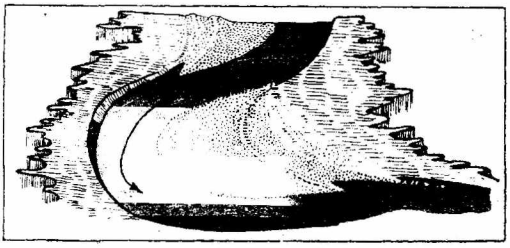


Схема формирования новых участков поймы по Е. В. Шанцеру.

нов. Он выдвинул свою гипотезу происхождения гривистого рельефа пойм. Основной причиной образования такого рельефа, считал Полынов, является эрозионная деятельность воды на поверхности поймы в период ее затопления высокими водами.

Академик Л. С. Берг, изучая пойму Иртыша, обращает внимание на большую роль в формировании рельефа поймы отложения на ней наносов, проникающих в глубь нее на большие расстояния. Эти отложения за одно половодье могут образовывать свежие слои толщиной до нескольких сантиметров вблизи от реки и до нескольких миллиметров — вдали от нее. Берг указывает, что отложению наносов способствует растительность, которая играет роль своего рода фильтра. Он считает, что гривистый рельеф на пойме имеет не только эрозионное происхождение, но обязан и процессам накопления аллювия.

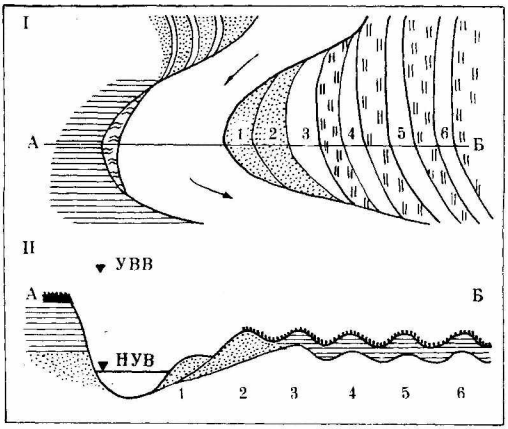
Другие исследователи, несмотря на какие-то отклонения в частностях, в общем придерживаются одной из этих трех точек зрения.

Однако, знакомясь с работами, посвященными этим вопросам, нельзя не обратить внимания на то, что большинство исследователей имели дело с небольшими участками пойм, обычно в пределах одной излучины. Поэтому вопрос о существовании на пойме различно ориентированных по отношению к руслу реки систем гряд и ложбин между ними практически не возникал.

Между тем вопрос этот очень важен. Действительно, если на пойме существуют различно ориентированные по отношению к руслу реки системы грив, то объяснить их происхождение действием обычно спрямленных в высокую воду течений на пойме довольно затруднительно — идет ли речь о размыве или намыве поверхности поймы. Тем меньше оснований имеет и предположение об эоловом происхождении этих грив. Хорошо заметная на аэрофотоснимках разновысотность различно ориентированных по отношению к руслу систем грив также не может быть объяснена с указанных выше позиций. Гипотезы пришли в противоречие с фактами.

Как же все-таки объяснить формирование грив на пойме? Не попытаться ли разрезать гривы и посмотреть, какова структура слагающих их слоев наносов?

Первый же разрез берегового вала на пойме Поломети вскрыл особенности его строения. Слои отложений в поперечном разрезе вала повторяли его выпуклые очертания — несомненно, это результат ежегодного отложения наносов, выносящихся водой на затопленную пойму. Слои были очень четкими. Их толщина колебалась от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Самые мощные слои залегали в основании берегового вала. К его же вершине толщина их в общем убывала, но не очень равномерно: некоторые слои оказывались толще, чем выше- и нижезалегающие. Иногда слои наносов прерывались так называемой погребенной дерниной — слоями, пронизанными корнями трав и остатками их стеблей. Даже на глаз было видно, что уменьшению толщины слоев от подножия берегового вала к его вершине сопутствует и уменьшение крупности частиц наносов, из которых эти слои состояли; причем



План излучины с системой старых береговых валов (I). Эти же валы в вертикальном разрезе (II).
УВВ — уровень высоких вод, НУВ — уровень низких вод.

уменьшение крупности частиц отложений было также неравномерным.

Всего было сделано около 90 разрезов береговых валов. Результаты этой работы полностью себя оправдали. Стало очевидным, что береговой вал не эоловое образование. Он не создан размывами поверхности поймы, не является он и эрозионно-аккумулятивным образованием. Береговой вал — это чисто аккумулятивное образование, результат отложения на поверхности речной излучины, причленившейся к выпуклому берегу, гряды наносов, несущихся потоком в период половодья. По мере роста вала в высоту на него

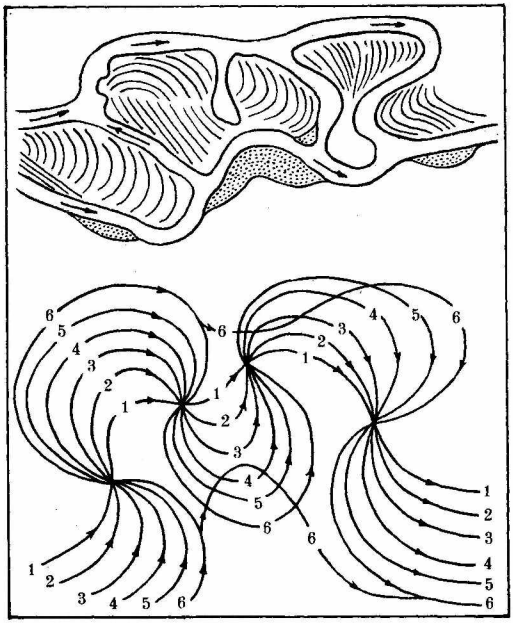


Схема деформаций русла (внизу), восстановленная по аэрофотоснимку (вверху).

выносится все меньшее количество наносов, причем наносы эти оказываются все меньшей крупности. Так как половодья бывают неодинаковой высоты, то, естественно, и слои отложений и их крупность оказываются неодинаковыми от года к году. В годы с высокими половодьями откладываются более мощные слои, содержащие и более крупные наносы.

Описанная выше схема формирования береговых валов нашла подтверждение в Трудах Почвенного института им. В. В. Докучаева, опубликованных еще в 1940 г. Сотрудницы этого института Е. А. Афанасьева и О. А. Грабовская, участвуя в экспедиции по изучению почв нижнего течения рек Шексны и Мологи и Молого-Шекснинской равнины, пришли к тем же выводам. Обнаруженные ими особенности строения речного аллювия в поймах названных рек показались им настолько убедительными, что на их основе Грабовская даже восстанавливает ход развития поймы Шексны.

Участница этой же экспедиции Е. А. Ансберг приводит в своей статье очень интересный поперечный разрез поймы реки Шексны у села Покровского. На схеме хорошо видна слоистость аллювия, его русловая и пойменная фации. Механический анализ этих слоев убедительно свидетельствует об уменьшении крупности слагающих их частиц по мере удаления от реки.

В 50-х годах в работах Е. В. Шанцера береговой вал рассматривается как аккумулятивное образование, возникающее на выпуклых берегах речных излучин.

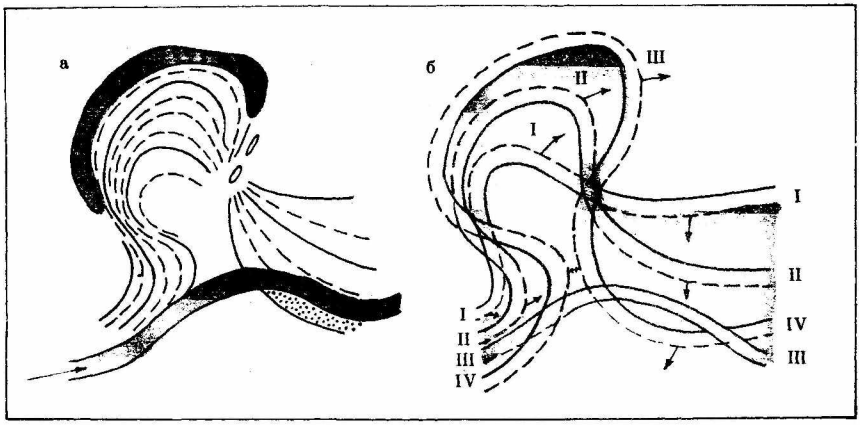
Знать, каково происхождение берегового вала, очень важно. Если береговой вал образуется вдоль кромки выпуклого берега реки вследствие причленения к нему сползающих по руслу реки гряд, то расположение этого вала повторяет прежнее положение берега русла.

Так как на аэрофотоснимках прослеживаются хорошо согласующиеся по своим очертаниям в плане системы этих валов, то по этой системе, по-видимому, можно восстановить прежние положения выпуклого берега русла, а по ним проследить весь ход деформаций излучины.

Такая схема деформаций излучины позволяет сразу увидеть, какие ее участки наиболее сильно смещаются, а какие остаются относительно устойчивыми, что имеет большое практическое значение.

Как же образуется система дугообразно изогнутых в плане валов? Почему не происходит плавного намыва выпуклого берега и валы разделяются между собой ложбинами? Почему на пойме встречаются различно ориентированные по отношению к руслу реки системы этих валов, получившие название «веер перемещения русла»?

Дело в том, что в то время как береговой вал на выпуклом берегу реки наращивается, противоположный вогнутый берег подмывается потоком и его бровка смещается в плане в сторону от реки. Вдоль выпуклого берега излучины, на котором расположен береговой вал, образуется зона пониженных скоростей течения,



Пример восстановления прежних положений речного русла по аэрофотоснимкам.
а — очертания прежних береговых валов, видных на аэрофотоснимках; *б* — четыре положения берегов русла (I—IV), установленные путем отложения от линии берегового вала ширины реки.

поскольку стрежень потока обычно прижат к размываемому вогнутому берегу и следует за ним. В этой зоне с пониженными скоростями создаются благоприятные для причленения гряд и отложения наносов условия и закладывается фундамент берегового вала.

Так как причленяющиеся гряды в поперечном сечении выпуклы, то между ранее причленившимися грядами и новыми образуется ложбина. Гребни гряд, вышедшие из-под воды, быстро покрываются растительностью, которая способствует усиленному осаждению наносов, и потому гребни растут в высоту скорее, чем дно ложбин.

При резких смещениях в плане противоположного выпуклого берега вдоль старого берегового вала создается более широкая, чем обычно, полоса потока с малыми скоростями и начинается причленение второго ряда гряд. Нарастая, они формируют новый береговой вал. Затем образуется третий, четвертый и т. д. валы, из которых складывается веер перемещения русла. Он формируется все время, пока растет излучина. А затем происходит прорыв ее перешейка, и вся система валов веера перемещения прекращает развиваться в ширину и может нарастать только в высоту. Так как при прорыве перешейка петля русла оказывается удаленной от реки, на поверхности такого веера перемещения русла наносы будут откладываться в меньшем количестве и образовывать все более тонкий слой отложений — наилка.

В результате прорывов перешейков петель русла вся пойма покрывается рядом отошедших от реки систем вееров перемещения. Новые веера имеют более низкие отметки поверхности, чем старые. В ходе смещений русла реки в плане часть старых вееров разру-

шается полностью или частично, и пойма испещряется системами самым различным образом ориентированных по отношению к руслу реки вееров перемещения.

Впервые высказал предположение, что веера перемещения русла можно использовать для восстановления его прежних положений, еще в 1937 г. геоморфолог В. К. Хлебников. При обследовании поймы реки Чулым Хлебников обратил внимание на то, что береговые валы этой реки формируются за один год и за этот же срок примерно на ширину новообразовавшегося вала смещается противоположный вогнутый берег.

Один из пионеров применения аэрофотосъемки в гидрологических исследованиях Д. И. Никифоров также обратил внимание на четкое изображение гривистого рельефа пойм на аэрофотоснимках. Но и Хлебников, и Никифоров дальше предположений не пошли.

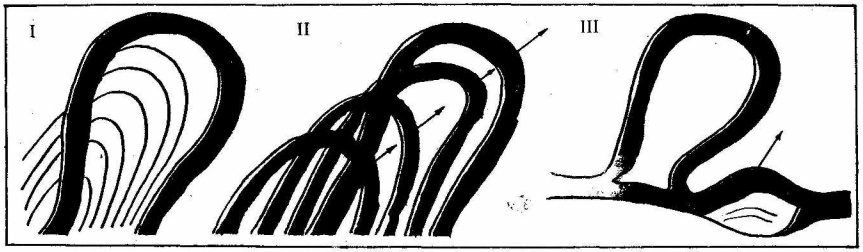
В 1946 г. А. В. Шнитников, между прочим, бывший летчик, также один из пионеров применения аэрофотосъемки в гидрологических исследованиях, сделал великолепные по качеству аэрофотоснимки русла и поймы реки Оки. Эти-то снимки мы и решили использовать для попыток восстановления по очертаниям грив на пойме прежних положений речного русла. Протяженность участка съемки составляла несколько сот километров.

При просмотре снимков мы обратили внимание на участок реки, на котором хорошо была видна огромная, отчленившаяся от главного русла старица — прежнее главное русло, имевшее петлеобразные очертания. Рядом с ней проходил спрямленный участок русла, уже начавший формироваться в новую излучину. К веерам перемещения, в общем повторяющим очертания русла, присоединялись системы вееров, по-разному ориентированные по отношению к современному руслу реки.

Если бы удалось восстановить ход деформаций русла реки на таком участке, то тогда впервые в истории гидрологии можно было бы наблюдать полный цикл развития речной излучины. Каким бы длинным ни был ряд наблюдений за этим процессом в натуре или по картам разных лет съемки, он все-таки, по-видимому, не дал бы возможности увидеть полный цикл развития излучины, так как даже самые достоверные и достаточно подробные наземные съемки вряд ли позволили бы проследить деформации более чем за сто лет. Сравнение имеющихся наземных съемок по намеченному участку показало, что смещение бровок берегов в плане не превышает 1—1,5 м в год, ширина каждого берегового вала равна примерно 12 м, а число валов в веерах перемещения русла составляет несколько десятков.

Очевидно, для восстановления хода плановых деформаций русла даже в пределах одного веера его перемещения потребовалось бы располагать съемками реки за несколько столетий.

Попробуем наметить положение русла, предшествующее современному, использовав для этого хотя бы три смежные излучины русла.



Характерные структуры рисунка рельефа пойм (I) и соответствующие им схемы деформаций русла в плане (II). Коса на участке ниже прорыва излучин (III).

Линию выпуклого берега русла нанести несложно — для этого надо воспользоваться очертаниями первых от реки береговых валов, отчетливо видных на аэрофотоснимках. Таким путем можно получить только положения выпуклого берега русла, но зато для каждой излучины. Назовем эти линии опорными, поскольку по ним несложно вычертить общий контур русла. Для этого достаточно нанести против каждого обрисовавшегося участка выпуклого берега предположительные очертания противоположного берега, считая, что линия вогнутого берега параллельна линии выпуклого и отстоит от него примерно на ширину русла между бровками меженных берегов русла.

Пока мы занимались не слишком хорошо развитыми излучинами, особых затруднений не было. Но как только дело дошло до петли русла, задача сразу осложнилась. На участках петель русла рисунок валов напоминал развернутый веер. Как же соединить очертания смежных излучин? Постепенно мы разобрались, что такой веер является результатом поворота петли, которая как бы разворачивалась вниз или вверх по течению реки. При этом валы, соответствующие низовой части петли в начальном ее положении, в конце концов оказывались в верхней части петли конечного положения, а новообразовавшиеся валы заняли низовую часть петли в конечном ее положении, зафиксированном на аэрофотоснимке,— так и получился рисунок, напоминающий развернутый веер.

На участках русла ниже прорыва петли у выпуклого берега почти всегда обнаруживалась короткая, но широкая коса, в плане похожая на запятую. Противоположный вогнутый участок берега ниже прорыва петли русла оказывался сильно врезанным в пойму, и следы ранее существовавших здесь береговых валов были как бы срезаны потоком. Это объясняется очень просто. После прорыва петли длина реки резко уменьшается. Вследствие этого значительно увеличиваются уклоны водной поверхности, соответственно возрастают и скорости течения потока и его размывающая способность. К тому же после прорыва поток подходит к берегу под

большим углом, как бы упираясь в него, и, естественно, плановые деформации русла резко увеличиваются. Бровка берега, в который упирается поток, быстро перемещается в сторону от реки. Поэтому у противоположного берега создается зона с малыми скоростями течения, и в ее пределах условия для отложения наносов очень благоприятны.

Обработка аэрофотоснимков самых различных рек с излучинами разной степени развитости каждый раз позволяла составить схему деформаций русла в плане. А это значило, что получен достаточно надежный метод восстановления прежних положений речного русла меандрирующих рек.

Трудно переоценить те возможности, которые открыл этот метод. Исследователь получает способ, позволяющий подробно восстаиавливать ход деформаций русла в плане за сотни лет, а главное, восстанавливать, точно соблюдая последовательность отдельных его положений. Никакие карты такой возможности не давали. Впервые воссоздается картина полных циклов развития речных излучин, причем схемы охватывают не только отдельные излучины, но и участки рек в сотни километров длиной. Это позволяет проследить характер взаимодействия смежных излучин — вопрос очень важный, так как особенности развития одной излучины накладывают отпечаток на развитие смежных с ней излучин, особенно в случаях прорыва перешейка, когда резко увеличиваются уклоны потока, а следовательно, и скорости течения, увеличиваются поступление наносов, угол подхода струй потока к берегу. Все это может либо усилить деформации смежных излучин, либо ослабить их, а иногда даже изменить направление деформаций.

Никакие карты не дают возможности так детально и так подробно восстановить ход деформаций русла в плане.

Как всегда, при создании нового метода встает вопрос о его точности. Конечно, нельзя утверждать, что каждое положение русла, восстановленное по аэрофотоснимкам, позволяет вычислять скорости деформаций в плане с той же точностью, с какой это можно сделать по крупномасштабным картам. Но то обстоятельство, что впервые удалось проследить последовательные положения русла, отлично согласующиеся между собой, дает уверенность в том, что мы получаем истинную картину деформаций, причем с такой полнотой, которая не обеспечивается никакими другими способами. Таким образом, если в отдельных деталях и могут быть неточности, то в целом ход деформаций русла в плане оценивается с большой надежностью. А это дает возможность обоснованно выбирать наиболее выгодные — с точки зрения условий развития русловых деформаций — места расположения сооружений на берегах рек, судить о том, какие процессы могут угрожать сооружению, что надо сделать, чтобы обеспечить его нормальную работу. Но возможности метода значительно шире.

Смотришь иной раз на сложнейшую схему плановых деформаций речного русла и отчетливо видишь, что одни участки деформировались слабо, а другие подвергались весьма значительным, иног-

да коренным преобразованиям. Но имеют ли все эти сложные деформации практическое значение? Ведь не исключено, что они проходили в течение таких больших промежутков времени, по сравнению с которыми срок работы самых долговременных сооружений покажется одним мгновением.

Итак, каковы скорости деформаций?

Скорости деформаций речного русла

Итак, каковы скорости деформаций речного русла?

Ответ на этот вопрос можно получить, сопоставляя карты разных лет съемки. О недостатках такого способа оценки деформаций русла реки уже говорилось. Однако, если есть уверенность, что в период между съемками смещения русла происходили однонаправленно, т. е. излучины последовательно развивались, сползая или увеличивая свою длину и кривизну,— а это легко установить по изображению тех же вееров перемещения русла на аэрофотоснимках,— надежность оценок повышается. Но тут же возникает другой вопрос. На какой срок можно распространять эти данные? Ведь не исключено, что скорости деформаций могли очень существенно меняться. Вопрос этот очень важен и для выяснения продолжительности полных циклов развития излучин, и для прогноза деформаций речного русла в плане. Обычно по крупным судоходным рекам карты имеются за семьдесят — восемьдесят лет; значит, именно за это время мы можем узнать средние скорости плановых деформаций русла. А какими эти скорости были сто, двести и более лет тому назад? Это не праздный вопрос, так как именно на эти сроки надо давать прогноз деформаций речного русла для обеспечения бесперебойной работы проектирующихся на реке сооружений.

На помощь опять приходит аэрофотоснимок. Оказалось, что число грив — старых береговых валов на пойме, приходящееся на единицу длины плана (например, на каждый его сантиметр), в разных частях поймы примерно одинаково. Значит, такие веера перемещения русла создавались в условиях примерно одинаковой водоносности реки. Это обстоятельство позволяет распространить данные о скоростях смещения русла в плане, полученные по современным картам, на участки поймы, в пределах которых частота старых береговых валов близка к современной.

Можно ли определить скорость плановых деформаций, если есть только одна карта? Да, можно, если эта карта старая, т. е. снималась лет десять — пятнадцать тому назад. Чтобы оценить скорость смещения берегов при таких условиях, необходимо нанести на эту карту современное положение русла.

Если же ни одной карты нет, скорости деформаций русла реки в плане можно определить косвенно. Например, по возрасту деревьев, растущих на современном береговом валу. Совершенно ясно, что такое дерево не может быть старше, чем береговой вал,

на котором оно растет. Спилив дерево и подсчитав число годичных колец на его срезе, можно приближенно считать, что столько же лет существует и береговой вал.

Скорость нарастания берегового вала можно определить и по-другому — измерив толщину годичного слоя отложения наносов на берегу реки, т. е. толщину так называемого наилка. Эти измерения надо делать сейчас же после освобождения поймы от воды, когда наилок хорошо заметен. Измерив одновременно высоту берегового вала над меженным уровнем воды в реке, можно подсчитать, сколько лет потребовалось для его образования.

Есть еще один, правда, очень приближенный, способ оценки возраста берегового вала. Он основан на следующих рассуждениях. Участки поймы, образовавшиеся в ходе меандрирования ныне существующего русла, могли сформироваться только в условиях современной водоносности реки. Современная же водоносность могла установиться только после окончания последнего оледенения. Значит, возраст поймы можно отсчитывать от времени окончания этого оледенения до настоящего времени. Продолжительность послеледникового периода была установлена с помощью метода так называемого пыльцевого анализа — определения относительного возраста пород по составу пыльцы растений, содержащейся в них, а также с помощью радиоуглеродного метода, который позволяет установить абсолютный возраст толщ отложений, образовавшихся после окончания оледенения.

Установлено, что со времени окончания оледенения на севере Европейской территории СССР прошло около 7000 лет, на широте Москвы — около 12 000—15 000 лет, а южнее — до 40 000 лет. Зная число валов на пойме, можно подсчитать время образования одного вала и возраст отдельных участков пойм. При подсчете числа валов следует учесть, что за время существования поймы река могла неоднократно переходить от одного склона долины к другому; следовательно, имеющиеся на снимке веера перемещения русла не характеризуют общего возможного числа валов на пойме, а отражают только какую-то часть общего периода существования поймы. Однако из этого положения можно найти выход.

В ходе плановых смещений речного русла образуется так называемый пояс меандрирования — полоса поймы, которая заключена между линиями, огибающими вершины современных излучин русла, т. е. это участки поймы, образовавшиеся в ходе меандрирования современных излучин русла. Так как эти излучины далеко не всегда занимают всю ширину поймы между склонами долины, то виден не только современный пояс меандрирования, но и следы прежних его положений, которые можно обнаружить и по рисунку вееров перемещения русла, т. е. по системам старых береговых валов, и по числу разновысотных площадок на пойме. Оказывается, что при смене положения пояса меандрирования обычно изменяется и высотное положение поверхности поймы. Таким образом, можно считать — конечно, весьма приближенно,— что число разновысотных плоскостей на пойме показывает число имевшихся на

ней поясов меандрирования. Если это так, то подсчитывать число валов можно только в границах современного пояса меандрирования. А чтобы подсчитать общее число валов в пределах поймы, надо количество обнаруженных в современном поясе меандрирования береговых валов умножить на число разновысотных ступеней на пойме, которые, как указывалось, характеризуют и число смен поясов меандрирования. Конечно, все эти цифры будут весьма приближенными, они позволяют оценить только порядок величин скоростей плановых деформаций русла.

Деформации русла, ограниченные в плане

Итак, материалы аэрофотосъемки в значительной мере помогают ответить на вопрос о том, как же развиваются речные русла. Аэрофотосъемка открывала перед нами многообещающую возможность получить массовый материал, установить, насколько разнообразны деформации речного русла, и попытаться выяснить, каким природным условиям соответствуют те или иные их виды.

Сравнение съемок разных лет и восстановление прежних положений русла по аэрофотоснимкам показало, что существуют излучины, которые действительно, как говорил Фарг, сползают вниз по течению. Но, оказывается, эти излучины сползают, не меняя своих размеров и форм на довольно большом расстоянии. Они не слишком развиты, и на них никогда не встречается даже слабых намеков на существование перешейка. Вершины их обычно упираются в склоны речной долины: с одной стороны пойма реки ограничена склонами долины, а с другой — руслом реки. Таким образом, пойма представлена обособленными друг от друга массивами, в плане имеющими полулунную форму. Подобный тип руслового процесса мы называем ограниченным меандрированием.

Как же при этом типе руслового процесса происходят смещения русла в плане? Участок поймы, огибаемый одной излучиной, по форме очень напоминает побочень, заросший травой, но переставший сползать и перемещающийся только вместе с излучиной. Можно предположить, что ограниченное меандрирование является модификацией побочневого типа руслового процесса, развивающегося в том случае, когда условия транспорта наносов оказываются менее благоприятными, чем при обычном побочневом типе. Деформации излучин происходят по той причине, что низовая часть вогнутого берега встречает течение и начинает размываться. Размытые потоком наносы откладываются на том же берегу, но ниже по течению. Место их отложения находится ниже вершины выпуклого берега. Вот почему здесь обнаруживаются песчаные скопления в виде пляжа, а вся излучина сползает вниз по течению. Наиболее интенсивный размыв вогнутого берега идет в половодье. Размытый материал сносится потоком из плёса на перекат, т. е. на мелководный участок, расположенный на выходе из излучины. Когда уровни воды спадут после прохождения гребня половодья, пере-

каты начинают размываться и из плёса на них поступает мало наносов. Размытые на перекате наносы откладываются в нижележащем плёсе. В очередное половодье плёс вновь начнет размываться, а перекат намываться. Ход отметок дна на перекате повторяет ход уровней воды, а ход отметок дна на плёсе представляет собой зеркальное отображение хода уровня воды в реке.

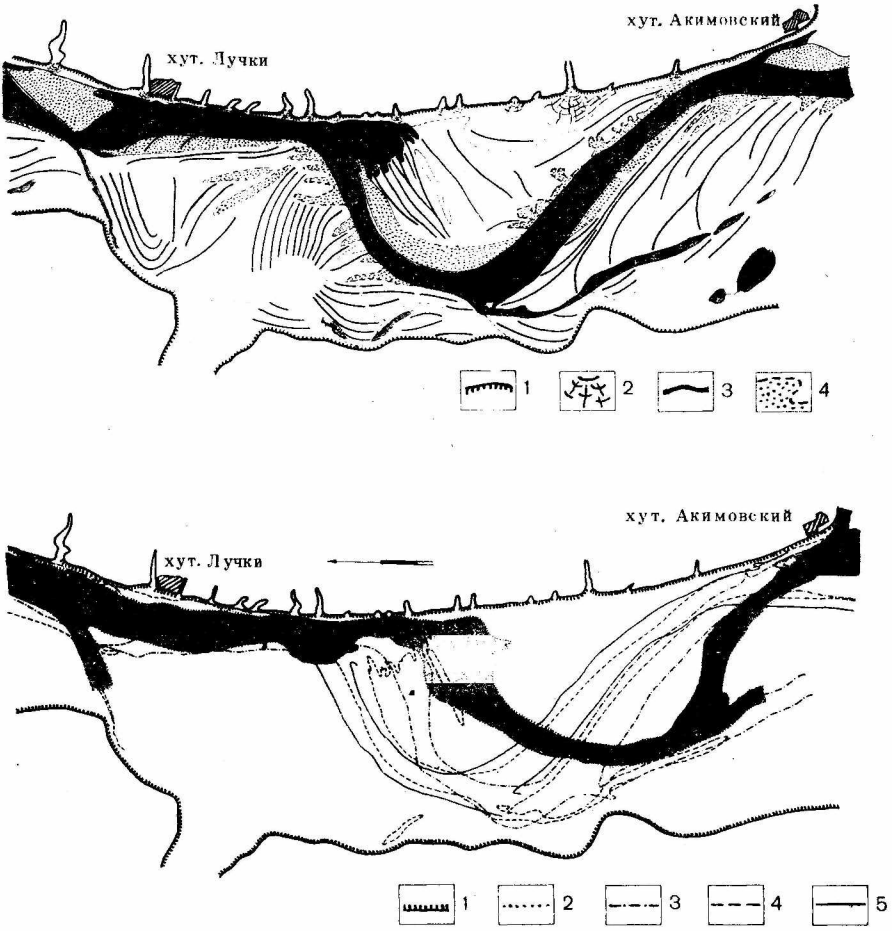


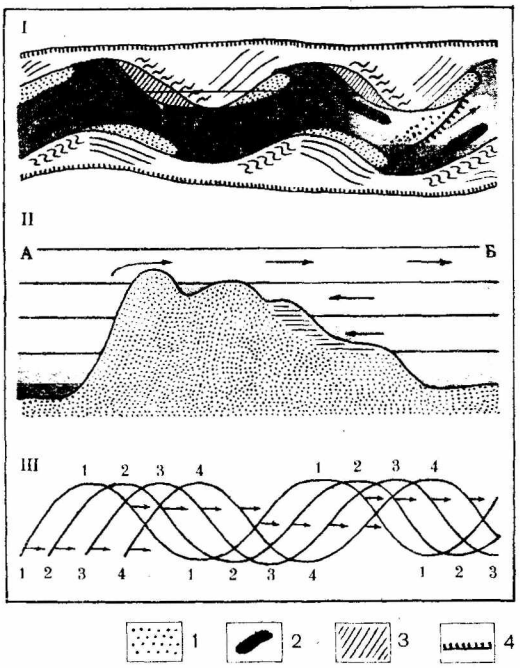
Схема рельефа поймы реки Дон (I). Совмещенные съемки русла позволили проследить, что оно закономерно сползает вниз по течению (II).

Схема I

1 — граница поймы, *2* — конусы выноса, *3* — валы, *4* — аккумулятивные формы.

Схема II

1 — граница поймы, *2* — русло 1891 г., *3* — русло 1930 г., *4* — русло 1948 г., *5* — русло 1961 г.



Ограниченное меандрирование.
I — план русла ограниченно меандрирующей реки; II — продольный профиль пойменного массива, образованного одной излучиной, и схема его затопления; III — схема сползания излучины. *1* — пески, *2* — плёсы, *3* — размывы, *4* — перекаты.

Русло реки с неограниченными плановыми деформациями

Если русло реки не ограничено в плановых деформациях, то смещение его в плане начинается с образования слабо выраженных излучин, сползающих так же, как при ограниченном меандрировании. Однако в ходе этого сползания излучины интенсивно развиваются и становятся все более асимметричными. Наконец излучина принимает форму петли, ее перешеек прорывается, она перестает развиваться и превращается в старицу.

В начальной стадии развития свободно меандрирующей излучины в ее пределах образуются один плёс и два переката, расположенные на входе и выходе из излучины. По мере увеличения асимметрии плановых очертаний возникают вначале два, затем три-четыре, а иногда и шесть — восемь фокусов размыва и соответствующих им плёсов. Между этими плёсами образуются так называемые перевалы — глубоководные перекаты. Мелководных же перекатов всегда бывает только два. Один, верхний, расположен на перегибе русла в начале излучины, а второй, нижний,— на низовом перегибе русла. Напомним, что перегиб русла — это участок, на котором происходит изменение знака деформаций, т. е. выше перегиба вогнутый берег русла обращен вправо, а ниже — влево. Вогнутый берег носит явные следы подмыва — он крутой, часто обрывистый, с обнаженным грунтом. Судя по аэрофотоснимкам, размыв на

разных реках происходит по-разному. Часто при размыве образуются полуцирки; один за другим они тянутся вдоль берега, разделенные мысами. Эти мысы нередко оказываются приуроченными к концам выходящих к реке старых береговых валов, а полуцирки приходятся на ложбины между этими валами.

Иногда размыв равномерно охватывает весь береговой склон и уходит под воду в расположенный у такого берега плёс. Иногда подмывается только верхняя часть берега, а в нижней образуются обвалы грунта, которые в дальнейшем смываются потоком. Встречаются случаи, когда основной подмыв сосредоточивается в подводной части откоса. Верхняя его часть некоторое время сохраняется, а затем внезапно обрушивается, причем это может произойти и в межень. Бывает и так, что размыв сосредоточивается в низовой части склона берега, в котором образуются ниши. Эти ниши, похожие на гроты, располагаются рядом, одна за другой. На Оке, примерно в 30 км выше Мурома, весь берег излучины у села Досчатое как бы изъеден небольшими оврагами, которые образуются при сливе воды с поймы в конце половодья. Главный подмыв берега в этом случае происходит при сливе воды с поймы, а не вследствие воздействия потока в русле. Существуют и сложные комбинации из названных форм размыва берегов.

Формы размыва исследованы еще очень слабо. Просто удивительно, как такой важный для оценки деформаций вопрос, без знания которого нельзя создать надежных методов их расчета, до сего времени оставался вне поля зрения исследователей. Знать формы переработки берегов — это уже значительный шаг в познании механизма их разрушения и основа для создания расчетных формул, позволяющих наиболее полно учитывать местные условия.

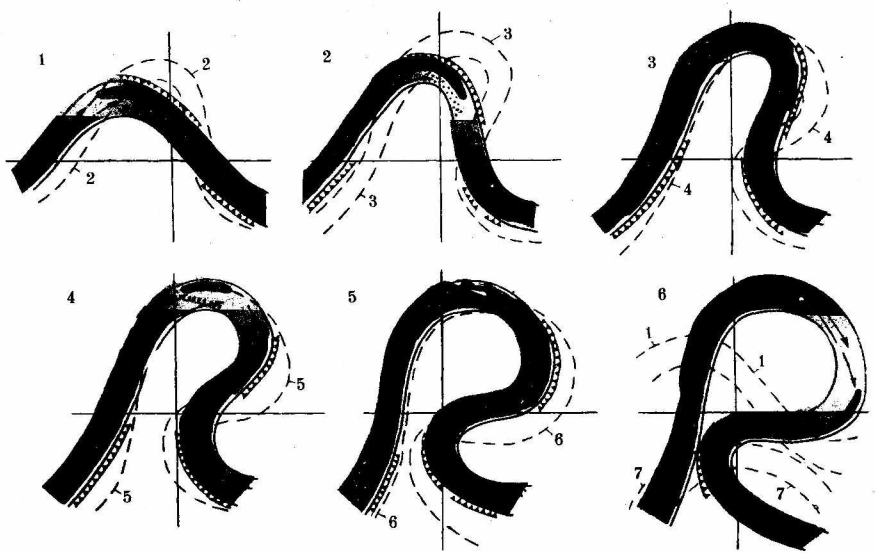
С какими скоростями идет размыв берегов русла при свободном меандрировании? Важнейшая характеристика русла и реки — а данные у нас крайне отрывочные и случайные. Их нужно собирать буквально по крупицам.

Б. К. Штегман, проводивший геоморфологические исследования в дельте реки Или, пишет, что эта река удивительно подвижна. Он сам наблюдал, как на протяжении всего четырех лет излучина Или успевала превратиться в петлю русла, прорваться и снова стать петлей.

Выполняя геоморфологические исследования на Северной Двине, Е. И. Сахаров обнаружил, что за одно половодье река может срезать участки поймы до 10—20 м шириной.

Крупнейший специалист по русловым процессам К. И. Россинский, наблюдая за переформированием русла на излучине Волги, установил, что только за пять месяцев, с 18 апреля по 24 сентября 1955 г., подмываемый берег этой излучины сместился на 18 м.

Натурные наблюдения на реке Куре ниже Мингечаурского водохранилища, выполнявшиеся по заданию Государственного гидрологического института Управлением гидрометслужбы Азербайджанской ССР, позволили обнаружить размыв вогнутого берега излучины, происходящий со скоростью 50—100 м за одно половодье.



Последовательные стадии развития свободно меандрирующей излучины. Пунктиром показаны последующие положения русла. Хорошо видно увеличение асимметрии плановых очертаний излучин и раздвоение плёсов.
1 — подмываемые участки берега, *2* — плёсы, *3* — перекаты.

Подробные данные о смещении русла в плане за счет размыва приводит Г. А. Трегубов, поставивший наблюдения на реках Амуре и Зее, на участках общей протяженностью 250 км.

Наибольшая скорость разрушения берега отмечается в период спада уровней воды половодья и при волнобое. В это время в воду попадает 19% обрушивающегося за все половодье материала. Когда берег полностью затоплен водой, объем обрушившегося материала составляет только 6,5%.

По мнению Трегубова, главным агентом размыва берега является волнение. Но, надо полагать, это далеко не всеобщий закон.

Интересны цифры, характеризующие смещение бровок берегов в плане в разных условиях. На реке Зее между селами Малой Сазанкой и Даниловкой отмечены случаи, когда за одни сутки обрушивалась береговая полоса шириной 10 м. Судя по высоте берега, 15—20 м, это размывалась не пойма, а склон долины. К сожалению, подробных данных о характере этого берега нет. Сопоставление съемок этого участка Зеи за 1910—1947 гг. показало, что ежегодный прирост длины размываемых участков составляет около 40 м. Смещение же бровок берегов в среднем составляет 3,5 м в год, а в зоне с обрывистыми берегами — 6—7 м в год. При подмыве берега в реку ежегодно поступает 60—80 тысяч кубометров песка с 1 погонного километра берега.

На экспериментальных площадках на Амуре у города Хабаровска средняя полоса смещения бровки берега, по Трегубову, составляла 7 м в год на участках с обнаженным берегом и 4 м в год на заросших берегах.

С. Т. Алтунин описывает случай, когда река Амударья у города Турткуль с 4 апреля по 23 сентября 1936 г. сместилась на 600 м.

В 1937—1938 гг. на этом же участке за 30—40 минут была смыта полоса шириной 15—20 м. Сопоставление съемок этого же участка показало, что за 60 лет берег реки длиной в 50 км сместился вправо на 6, а местами и на 30 км. Это значит, что он смещался со скоростью 100 м в год при высоте берега 6 м.

100 м в год — это не слишком большая величина. На реке Волге ниже Волгограда, на так называемом Поповицком перекате, берег реки в вершине излучины в течение 1954—1957 гг. смещался на 260 м в год.

На Оби у города Барнаула Э. А. Кондитеровой были обнаружены смещения бровки вогнутого берега излучины, превышающие 300 м в год.

Перечень данных скоростей смещения можно было бы продолжить. Однако и так ясно: если срок работы сооружения составляет 100 лет, то даже деформации берега, равные всего 1 м в год, имеют существенное значение.

Опыт показывает, что крепление берегов, как бы капитально оно ни проводилось, часто не дает устойчивого эффекта. Например, левый вогнутый берег Волги ниже Волгоградской ГЭС был укреплен бетонными плитами. После первых же попусков через плотину ГЭС дно русла углубилось на 14 м, и крепление обвалилось во многих местах на участке длиной 6 км.

Крепление же берегов с помощью так называемых шпор — полузапруд, сооружающихся под углом к руслу реки и способствующих отклонению течения от берега, не всегда можно осуществить из-за больших глубин, которые обычно отмечаются у вогнутого берега.

Хороший эффект должны дать мероприятия, способствующие уменьшению расхода воды на размываемом участке. Этого можно добиться с помощью спрямления излучины. Лучше всего делать регулируемое (частично укрепленное) спрямление — иначе вся вода может уйти в спрямление, и тогда старое русло обсохнет и выйдут из строя расположенные на нем сооружения.

Незавершенное меандрирование

Иногда на каком-либо участке реки излучины развиваются так, как при свободном меандрировании,— об этом уже шла речь,— а затем, не достигнув состояния петли, спрямляются из-за образования протока, пересекающего излучину. Это особый тип руслового процесса — незавершенное меандрирование.

Первые же попытки выяснить, в каких условиях развивается незавершенное меандрирование, показали, что основным фактором тут является хорошая затопляемость поймы.

Спрямляющие протоки далеко не сразу превращаются в главное русло, но тем не менее это процесс неизбежный, поскольку спрямление вызывает укорочение реки, а следовательно, увеличение уклонов потока и скоростей его течения. Происходит усиленный размыв русла, отвлекающий все большую часть расхода воды в это спрямление.

Идеальный тому пример — Саралевская излучина на Волге. На лоцманских картах 1913 г. виден узенький и извилистый проток, текущий по пойме, образованной при меандрировании Саралевской излучины. Этот проток начинается там, где Волга поворачивает влево, вступая в Саралевскую излучину, и впадает в главное русло в нижнем конце излучины. Он пересекает Саралевскую излучину вдоль правого склона долины. Ширина русла этого протока, названного Саралевской воложкой, была не больше 200—300 м; русло воложки имело три слаборазвитые излучины.

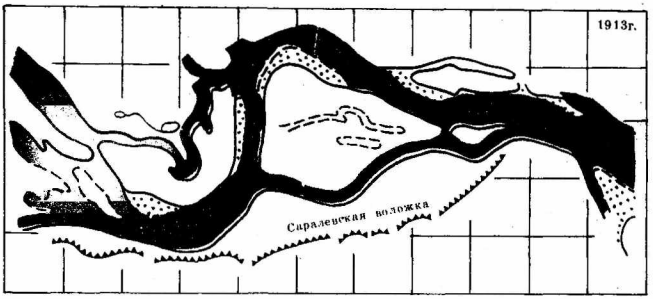
На следующей карте — карте 1940 г. — воложки не узнать. За прошедшие двадцать семь лет русло ее весьма расширилось: его ширина между бровками меженных берегов составляет уже не 200—300, а 1200—1300 м, т. е. она увеличилась на целый километр! Правда, большая часть русла заполнена движущимися песками, и в межень ширина потока от уреза до уреза воды еще не так велика — 200—300 м.

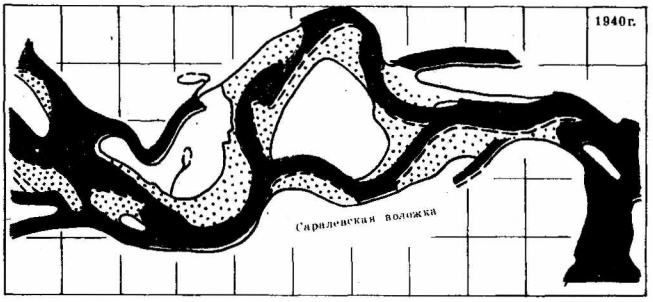
Карты следующих лет позволяют проследить, что случилось с Саралевской воложкой еще за двенадцать лет. Оказывается, вершина первой от ее входа излучины сместилась влево на целых 500 м, т. е. излучина эта сильно развилась. Нижние же излучины не претерпели существенных переформирований, все это время они оставались относительно стабильными.

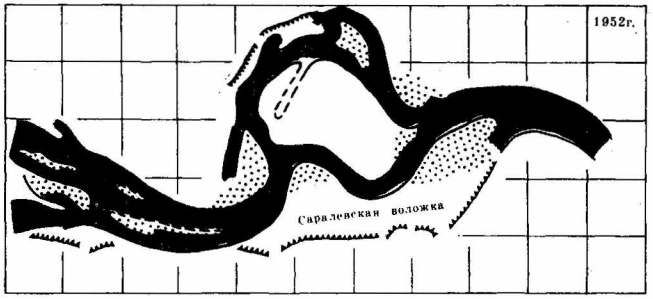
Пески из русла воложки постепенно выносились в Волгу, и ширина его по урезу воды увеличилась до 500 м. Если подсчитать, с какой скоростью смещался вогнутый берег верхней излучины на воложке, то получается довольно внушительная цифра: в среднем он размывался, т. е. уходил в глубь поймы, со скоростью 40 м в год.

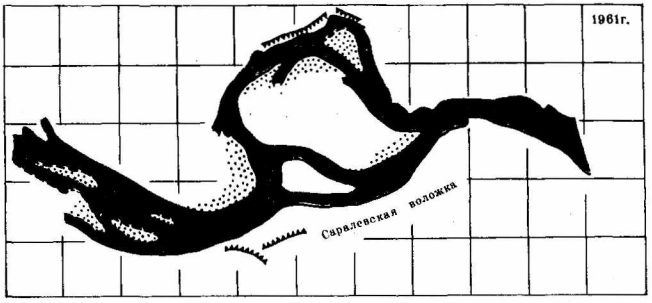
В течение следующих девяти лет, к 1961 г., скорость смещения вогнутого берега еще больше возросла. Излучина сместилась влево еще на 450 м, т. е. двигалась со скоростью примерно 50 м в год, а местами даже до 80 м в год. Излучина вытягивалась, и на ней появился уже заметный перешеек. Поток в половодье потек поперек излучины и размыл в ней новое спрямление. Спрямилась Саралевская излучина, и образовалась Саралевская воложка, а теперь спрямилась и излучина на Саралевской воложке.

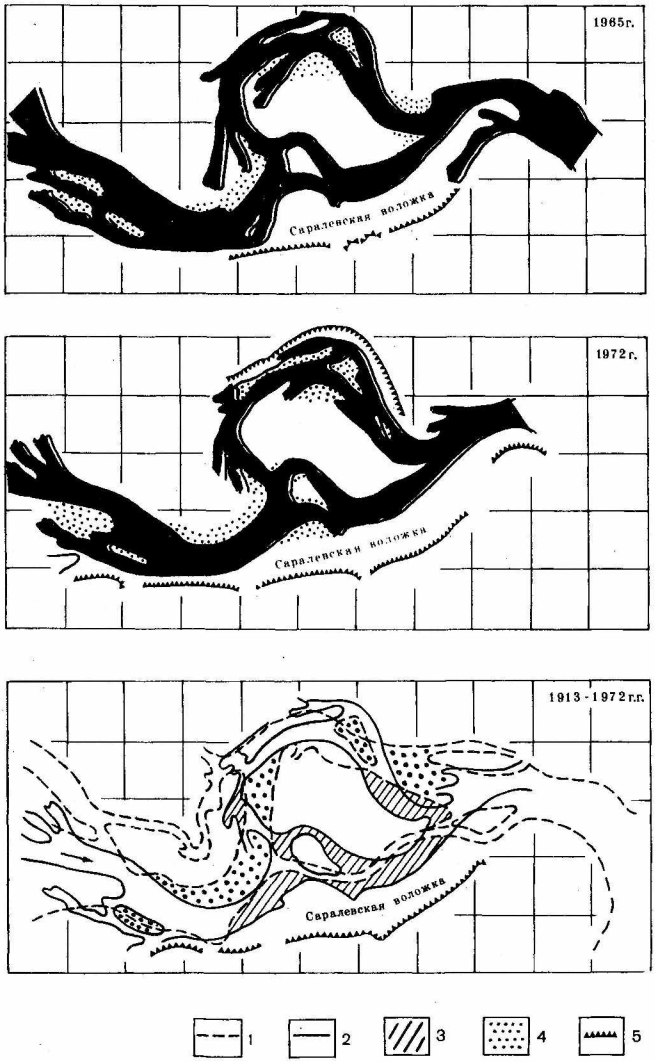
Даже маленький спрямляющий проток на верхней излучине стал быстро разрабатываться и к 1965 г. достиг ширины 600 м. В 1972 г. его ширина была уже больше километра. А спрямленная излучина после 1961 г. продолжала смещаться влево (на 700 м


1913г.
Саралевская воложка


1940г.
Саралевская воложка


1952г.
Саралевская воложка


1961г.
Саралевская воложка



Русло Волги на Саралевском водном узле в разные годы. На последней схеме четко прослеживается стремление потока уйти влево, что увеличивает возможность самоспрямлений Саралевской излучины.

1 — положение русла в 1913 г., *2* — положение русла в 1972 г., *3* — зоны размыва, *4* — зоны намыва, *5* — бровка береговой долины.

в общем за 1961—1965 гг., т. е. со скоростью 175 м в год). А в 1972 г. ее уже занесло песком в верховой части, и всякие деформации на ней прекратились.

На формирование нового спрямления, способного принять расход воды, который шел раньше по главному руслу реки, потребовалось шестьдесят лет. Это довольно длительный срок. Но известны случаи, когда спрямления происходили всего за два-три года, а иногда даже и за одно половодье, если оно оказывалось исключительно высоким.

Вершина же старой излучины Волги с 1913 по 1940 г. разворачивалась вниз по течению. Этот процесс шел настолько интенсивно, что даже начала размываться верховая часть выпуклого берега, а у противоположного вогнутого берега, где надлежит быть глубоководному плёсу, стали накапливаться наносы. Однако уже к 1952 г. разворот излучины прекратился. Вместо этого низовой, сильно вытянувшийся участок выпуклого берега отторгся от поймы, и в вершине излучины возникло еще одно спрямление. Во все последующие годы общих переформирований в излучине не происходило, но по ней двигались обширные скопления наносов, сильно затруднявшие судоходство. К 1972 г. в старое русло Волги шло только 19% расхода воды, а 81% проходил по спрямлению — Саралевской воложке.

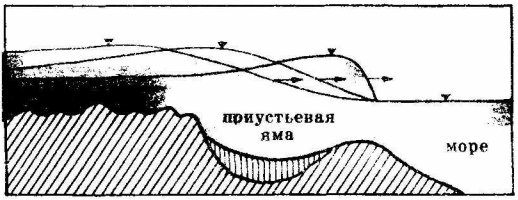
Вот тогда-то и возникли особенно большие затруднения с судоходством на Волге, о которых рассказывалось выше.

Образование многорукавного русла при наличии поймы

А теперь вернемся на уже знакомый нам по первой части книги Абакан, отличающийся обилием рукавов. Что привело к образованию столь большого количества рукавов и протоков? Уже говорилось, что в разрезе этой поймы четко разграничивается верхний слагающий ее мелкозернистый слой, или, как его называют, пойменная фация аллювия, и резко отличающийся от него слой крупнозернистых отложений, залегающих под ним,— русловая фация аллювия. Причем верхний слой — суглинки — составляли пылеватые частицы, нижний слой — галька диаметром в несколько сантиметров. Разница в крупности этих фаций чрезвычайно велика. При затоплении поймы верхний мелкозернистый слой отложений (это отложения взвешенных наносов) может легко размываться, и тогда на пойме будут образовываться протоки. Этот процесс пойдет тем интенсивнее, чем больше будет слой воды на затопленной пойме.

Именно так обстоит дело на Абакане. Утверждать на основании только одного примера, что большая разница в крупности пойменной и русловой фаций аллювия и значительная затапливаемость пойм — это и есть основные причины образования многорукавности, было бы неосторожно. Но подобная ситуация обнаруживается и на множестве участков других рек с многору-

Схема образования приустьевой ямы.



кавным руслом, например на нижней Волге, Оби, Иртыше, на многих реках по выходе их из гор.

Важно подчеркнуть разницу между незавершенным меандрированием, когда излучины спрямляются одним протоком, и многорукавной поймой. Часто пойменные протоки спрямляют не одну, а сразу несколько излучин. Иногда они текут как будто без всякой связи с очертаниями русла, пересекая пойму под различными углами. Сама сеть протоков оказывается более густой, чем при незавершенном меандрировании, причем русла протоков могут быть самой разной величины. Выделяются протоки с более крупными руслами и более мелкие, соединяющие смежные крупные протоки.

Иногда протоки на пойме, начинаясь вблизи от склонов долины, текут параллельно главному руслу и лишь потом впадают в него. Эти протоки обычно называют пойменными речками. Они образуются в результате сосредоточенного поступления воды со склонов долины на поверхность поймы по оврагам, балкам, маленьким речкам, выходящим на пойму, и т. д.

Бывает и так, что главное русло развивается по схеме незавершенного меандрирования, а на пойме одновременно существуют протоки разных порядков. Именно так, например, обстоит дело на нижней Волге, в пределах знаменитой своим плодородием Волго-Ахтубинской поймы, на нижней Оби и на многих других реках.

Протоки, образовавшиеся в различных условиях развития течений и переноса наносов на пойме, могут развиваться по-разному; но тем не менее обычно на них удается обнаружить знакомые типы руслового процесса. Так, некоторые протоки начинают меандрировать, на других развивается ленточногрядовый тип руслового процесса, на третьих — побочневый и т. д.

Мы имеем все основания рассматривать развитие протоков на пойме по указанным схемам как самостоятельный тип руслового процесса — пойменную многорукавность.

При пойменной многорукавности сеть протоков довольно часто претерпевает изменения. На Абакане крупные песчаные гряды, ползущие по главному руслу реки, время от времени перекрывали входы и выходы из протоков в это главное русло. То же самое явление может происходить и на более мелких протоках. Сползание гряд, открывая входы и выходы из протоков, неизбежно перераспределяет расходы воды и наносов, идущие по ним. В результате некоторые протоки начинают отмирать, другие возобновляются в прежних размерах. Таким образом, при пойменной многорукавности происходит постоянное перераспределение стока воды и на-

носов между главным руслом и протоками, а следовательно, идет и непрерывная перестройка их русел.

На приустьевых участках и на речных дельтах создаются особые условия для развития руслового процесса. Эти участки расположены близко к базису эрозии реки, т. е. к очень устойчивой в высотном отношении точке, в которой уклоны свободной водной поверхности практически приближаются к нулю. Скорости течения падают здесь тоже почти до нуля, и это ограничивает возможность врезания русла. Если река впадает в море, то высотное положение базиса эрозии определяется средним уровнем моря. Как известно, средний уровень моря — величина настолько устойчивая, что от нее исчисляются высотные отметки земной поверхности; эти отметки называются абсолютными.

На деле все оказывается не так просто. Несмотря на уменьшение уклонов к устью реки, а следовательно, казалось бы, и уменьшение скоростей течения, скорости эти — даже на участках, прилегающих к базису эрозии,— оказываются нередко больше, чем где-нибудь выше по реке. Дело в том, что если уровень моря устойчив, а по реке идет волна половодья, то в лобовой ее части создаются повышенные уклоны свободной водной поверхности. Это происходит по той причине, что вызвать подъем уровня воды в море такая речная волна не способна, и потому она распластывается. В то же время на самой реке вода, продолжая прибывать, вызывает подъем уровня, отчего и возникает большой уклон на участке между гребнем этой волны и неизменным уровнем моря. Вот здесь-то и возникают большие скорости. Воздействуя на русло реки, они приводят к образованию в нем как бы переуглубленных участков, дно которых лежит много глубже базиса эрозии. Это так называемые приустьевые ямы. На приустьевом участке Волги такая яма переуглублена по сравнению с отметками дна моря в устье реки на 36 м. Такие же приустьевые переуглубленные участки есть на многих реках Франции и на наших реках. Это довольно распространенное явление.

Понятно, что приустьевые ямы расположены выше верхней оконечности дельты. Сама дельта есть ярко выраженное аккумулятивное образование — это место отложения наносов, выносимых в море рекой.

В дельте поток должен нести большое количество донных наносов, поскольку частицы наносов, которые выше нее могли проходить во взвешенном состоянии, здесь начинают осаждаться и перемещаться только в виде их обширных скоплений. Следовательно, русла протоков должны изобиловать разнообразными крупными скоплениями донных наносов, сток воды и наносов благодаря этому должен часто перераспределяться между рукавами и протоками, и потому они становятся неустойчивыми.

Если река выносит в море большое количество наносов, то они могут образовать даже подводную дельту и подводное русло реки. Например, на Оби подводное русло прослеживается примерно до 200 км в глубь моря.

В результате накопления выносимых рекой наносов внешний край дельты может перемещаться, выдвигаясь в море, и образовывать обширный приустьевой морской бар — вал из отложенных наносов, перегораживающих вход в реку со стороны моря. Однако надо иметь в виду, что море тоже воздействует на дельту и приустьевой участок реки. Тут и действие волны, и сгоны и нагоны, вызываемые ветром, и так называемые обратные течения, распространяющиеся вверх по реке на десятки километров. Поэтому внешний край дельты может размываться, при обратных течениях транспорт наносов по протоке может замедляться или даже приостанавливаться, а из-за сгонных течений могут появляться участки с повышенными скоростями, на этих участках могут возникать размывы и т. п. Однако, несмотря на все это, на протоках речных дельт обычно обнаруживаются те же типы руслового процесса, что и при пойменной многорукавности. Одни протоки дельты явно меандрируют, на других идет перемещение наносов в виде побочней, ленточных гряд или осередков. Таким образом, формы русла сохраняются, меняется лишь режим их деформаций, а следовательно, описанная нами типизация русловых процессов распространяется и на предустьевые участки и дельтовые протоки.

Если внешний край дельты выдвигается в море, река постепенно удлиняется, а одновременно перемещаются и участки с разным типом руслового процесса и спускается вниз по реке верхняя граница приустьевого участка и самой дельты. Иногда бывает и так, что ниже старой дельты образуется новая, а старая оказывается как бы включенной в приустьевой участок реки. Например, на Дунае имеются отчетливые следы, по крайней мере, трех старых дельт, включенных ныне в приустьевой участок.

Вот некоторые данные о годовом приросте длины реки в результате выдвижения внешнего края дельты в море. Длина Куры ежегодно увеличивается на 20—30 м, Урала на 82, Сырдарьи на 97, Миссисипи на 80—350, Янцзы на 60—80 м.

Многорукавность, образующаяся в русле реки

Просматривая аэрофотоснимки участков рек на выходе из гор, где еще сохраняются относительно большие уклоны свободной водной поверхности, нельзя не обратить внимание на широкое, распластанное русло, изобилующее множеством подвижных скоплений наносов. На одних участках эти подвижные скопления наносов представлены множеством затопленных гряд, двигающихся по руслу реки. На других участках видны крупные осередки с незатопленной в межень, открытой песчаной поверхностью; иногда тут встречаются заросшие растительностью острова с мощными песчаными отложениями в верховых и низовых частях, а также вдоль периферии.

В последнем случае отложения по форме напоминают побочни, а иногда — пляжи меандрирующих излучин.

Подобные распластанные русла, изобилующие подвижными скоплениями наносов, принято называть русловой многорукавностью.

Формы скоплений наносов в русле при русловой многорукавности на различных участках представлены разными морфологическими образованиями, и потому выделяют несколько подтипов русловой многорукавности.

Первый подтип — русло блуждающего типа. Оно характерно тем, что по реке движется, довольно беспорядочно, множество гряд, обсыхающих разве только в очень низкую межень, когда и обнаруживается многорукавность русла. Однако гряды эти настолько велики, что оказывают определенные воздействия на течения в потоке. Их движение приводит к изменению положения струй в потоке, и струи все время блуждают по руслу. Иногда гряда прижимает течение или резко отклоняет его в сторону берега. В этом случае возникает быстрый подмыв берега, и он внезапно обрушивается, иногда на протяжении сразу нескольких сотен метров.

В условиях, когда гряды в русле могут обсыхать, в нем появляются осередки, сползающие вниз по течению и меняющие свое местоположение по ширине реки. Это осередковый подтип русловой многорукавности.

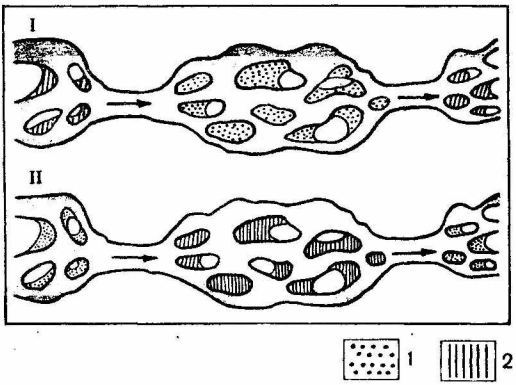
Если условия складываются так, что осередки имеют возможность зарастать травой и кустарником,— например, если проток, отделяющий их от берега, начинает меандрировать,— то они превращаются в острова. Острова также сползают вниз по течению и смещаются по ширине реки. Это островной подтип русловой многорукавности. На заросшей поверхности островов усиленно откладываются наносы, и это ведет к увеличению высоты острова. При большой амплитуде колебаний уровня воды высота острова может достигать десятков метров, как, например, на реке Тунгуске.

Как происходят переформирования речного русла в случае русловой многорукавности, можно судить по примеру Амударьи.

Для изучения русловых деформаций Амударьи решили, как обычно, сопоставить карты разных лет. Однако прежде всего надо было выяснить по тем же картам, были ли изменения в положении русла реки и отдельных русловых образований последовательны, т. е. не менялось ли направление деформаций в промежутках между съемками. Ведь могло случиться так, что в период между съемками русла какое-либо скопление наносов успело исчезнуть полностью, а на его месте появилось совсем другое образование, которое сопоставлять с прежним, естественно, нельзя.

С уверенностью проследить переформирование одних и тех же образований в русле реки можно только в том случае, если имеются съемки за каждый год. Если же между съемками прошло несколько лет, уже нет уверенности, что на первой и последующей съемках сравниваются одни и те же русловые образования.

Оказалось, что съемки интересующего нас участка за каждый год можно получить лишь для 1949, 1950 и 1951 гг.



Чередование зон размыва и намыва русла Амударьи в 1971 г. (I) и в 1973 г. (II).
1 — намыв русловых образований, *2* — размыв русловых образований

Вот как выглядели переформирования русла Амударьи за эти годы.

Для долины Амударьи на изучаемом участке характерно чередование коротких (длиной 1—2 км) суженных (шириной около 1—1,5 км) участков и длинных (длиной 10—12 км) расширенных (шириной 3,5—4 км) участков.

Исследовались четыре узких и пять широких участков. В русле реки располагаются обширные осередки, но местами обнаруживаются и участки островной поймы, поросшей травой. По-видимому, это успевшие закрепиться растительностью осередки. Все пойменные участки расположены за выступами склонов долины, у вогнутых берегов, т. е. в зоне относительно небольших скоростей течения,— это обстоятельство подтверждает возможность образования пойменных участков из остановившихся осередков или побочней, которые также имеются на изучаемом участке.

Сравнение карт привело к неожиданным результатам. Выяснилось, что деформации русловых образований в плане проходят отнюдь не хаотично, а подчиняются определенным закономерностям: те образования, которые в 1949 и 1950 гг. размывались, в последующие годы намывались, и наоборот — те образования, которые в предшествующие два года намывались, в последующие два года размывались. Таким образом, наносы перемещаются по реке как бы пульсируя и поступают на нижерасположенный участок порциями. Оказалось, что если в верховой части расширения долины Амударьи идет размыв, то в низовой части этого расширения наблюдается отложение наносов и рост площадей русловых образований. По мере того как накопившиеся в нижней части расширения долины скопления наносов начинают срабатываться и поступать в расположенное ниже сужение долины, в следующем за ним расширении размыв начинает сменяться намывом. Благодаря этому в нижнюю часть расширения начинает поступать меньше наносов, чем раньше, и здесь появляются размывы русловых образований. Так постепенно зоны размыва и намыва кочуют вниз по реке из одного расширения в другое, расположенное ниже.

Любопытны данные о скоростях деформаций русла и русловых образований. Сопоставление карт разных лет съемки изучаемого участка русла Амударьи позволяет установить их с достаточной надежностью. Скорость смещения бровок пойменных берегов составила в среднем за 1949—1951 гг. 530 м в год; намыв пойменных участков шел со скоростью 800 м в год; сползание крупных осередков достигало 1700 м в год; приверхи осередков и островов размывались со скоростью 1000 м в год, а их намыв в плане составил 700 м в год; размыв ухвостий осередков и островов шел со скоростью 600 м в год, а боковой размыв этих образований — со скоростью 380 м в год.

Приведенный пример отнюдь не говорит о том, что на всех реках с русловой многорукавностью переформирования русла и русловых скоплений наносов проходят точно по такой же схеме и с подобными скоростями. Но он показывает, насколько сложно развивается русловой процесс при русловой многорукавности и как с помощью простейших средств можно обнаружить совершенно новые и крайне важные для оценки его будущих тенденций закономерности. Например, осередки и острова могут перемещаться в самых разнообразных по отношению к руслу направлениях — сползать вниз, пятиться вверх по течению, перемещаться в поперечных к руслу направлениях.

Кстати сказать, поперечные перемещения островов отлично обнаруживаются по разовому аэрофотоснимку, на котором видна речная пойма. Множество перемещающихся подобным образом островов выявлено на верхней Оби (участок между местом слияния Бии и Катуни и городом Барнаулом). При первом же просмотре аэрофотоснимков бросался в глаза очень любопытный рисунок поверхности поймы: видны были четкие дугообразно изогнутые полоски, концами выходящие к реке, а выпуклой частью обращенные в сторону от нее.

Как объяснить появление этих дугообразно изогнутых полосок и их ориентировку по отношению к руслу реки? Удалось установить, что эти полоски представляют собой следы перемещения островов в поперечном реке направлении. Они формируются так. Допустим, на реке появился остров, образовавшийся благодаря закреплению поверхности осередка растительностью или по каким-либо другим причинам. Если один из протоков, обтекающих такой остров, начнет меандрировать, смещаясь в сторону поймы реки, то на выпуклом берегу острова начнет формироваться береговой вал, а перед ним пляж. По мере дальнейшего меандрирования протока образуется второй береговой вал, третий, четвертый и т. д. Проток в ходе меандрирования удлиняется и приобретает все большую кривизну, и, следовательно, уклоны водной поверхности в нем постепенно уменьшаются. В какой-то момент длина протока по сравнению с начальной увеличится настолько, что уклоны водной поверхности станут ничтожными, а значит, уменьшатся скорости течения, и проток, перестав меандрировать, начнет заноситься наносами, зарастать травой и в конце концов отомрет. Вот и оказывается, что

остров как бы въехал в пойму, да там и законсервировался, оставив по себе память лишь в виде дугообразно изогнутых старых береговых валов среди поймы, концами обращенных к реке — к концевым участкам некогда существовавшего протока.

О смешанных типах руслового процесса

Мы познакомились с типами речных русел и отображением в них характеров рек, или, проще говоря, с типизацией руслового процесса.

Насколько полно представляет наша «картинная галерея» то, что происходит на реках?

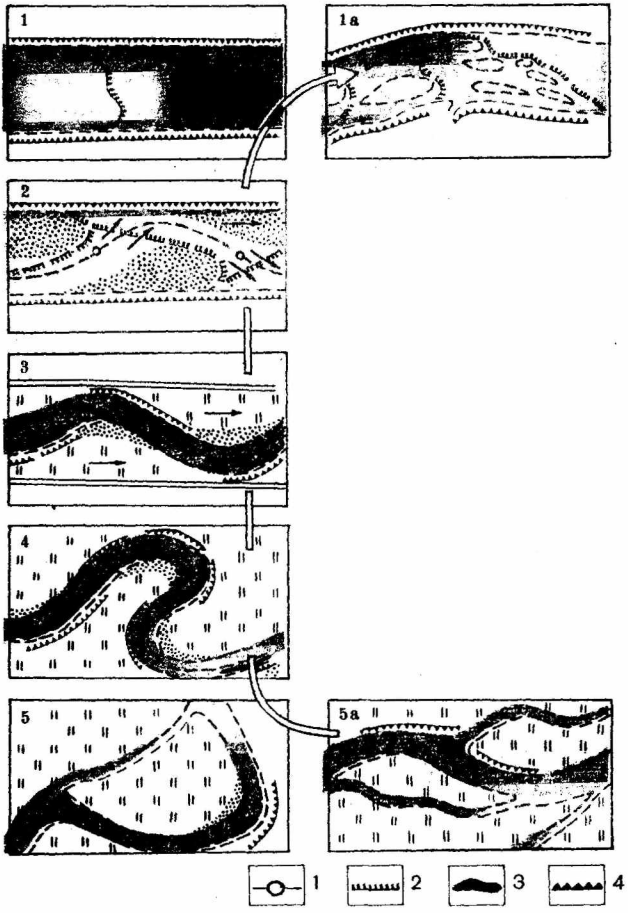
Безусловно, наша типизация столь же схематична, сколь схематично деление луча белого света на основные цвета спектра: ведь из этих семи основных цветов получают великое множество самых тонких и разнообразных оттенков, тонов, полутонов, световых контрастов и т. п.

Выделенные нами типы руслового процесса дают ключ к раскрытию основных особенностей деформаций речных русел и пойм. Природные условия чрезвычайно разнообразны. И потому столь же разнообразны существующие варианты в ходе развития русловых форм, в скоростях их деформаций и т. п. Но это уже будут лишь, условно говоря, оттенки. Нам приходилось иметь дело и с речными дельтами, и с реками, протекающими в условиях вечной мерзлоты и среди пустынь, и с участками рек, подвергшихся воздействию человека. Нам приходилось иметь дело и с равнинными реками, и с горными, русло которых сложено не песком, а галькой, и нередко очень крупной. Но всегда мы находили знакомые нам черты одного из типов руслового процесса. Следовательно, в нашей типизации руслового процесса заложены правильные основы.

Но и этого мало. Вот если бы мы обнаружили, что все выделенные типы связаны какой-то общей закономерностью, это говорило бы о надежности и «удачности» типизации.

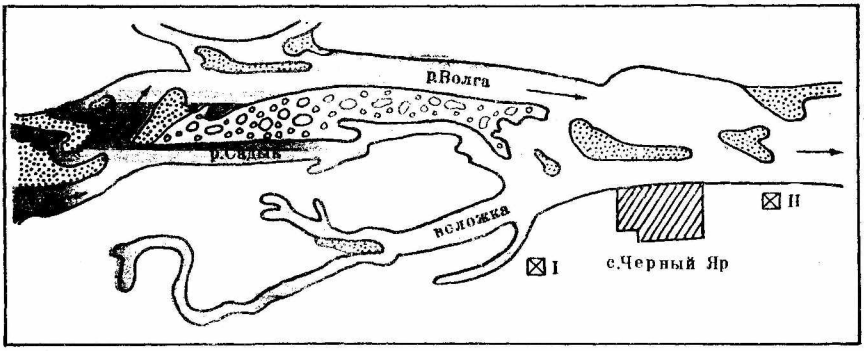
На существование такой закономерности указал Н. Е. Кондратьев. Он заметил, что если расположить выделенные нами типы руслового процесса в определенном порядке: ленточногрядовый, побочневый, ограниченное, свободное и незавершенное меандрирование, пойменная многорукавность,— то окажется, что транспортирующая способность потоков последовательно убывает.

Это объясняется тем, что в этой же последовательности все больше увеличивается разница между уклонами свободной водной поверхности и уклонами дна речных долин. При ленточногрядовом типе процесса эти уклоны примерно равны, при свободном меандрировании разница между уклонами уже больше и т. д. Наклон дна долины вниз по течению является как бы заданным современному потоку, в то время как уклон свободной водной поверхности создается самим потоком в результате отложения им наносов. Если поток способен проносить все наносы, которые в него поступают



Последовательность перехода одного типа руслового процесса в другой.
1 — ленточногрядовый тип, *1а* — русловая многорукавность; *2* — побочневый тип; *3* — ограниченное меандрирование; *4* — свободное меандрирование; *5* — незавершенное меандрирование, *5а* — пойменная многорукавность. Стрелкой показано убывание транспортирующей способности потока при переходе от одного типа руслового процесса к другому.
1 — точки перегиба русла; *2* — ленточные гряды, перекаты, осередки; *3* — плёсы; *4* — подмываемые участки берега.

с его водосбора, то отложений наносов в русле не будет. Если же поток не способен справиться с переносом наносов, то они будут откладываться по пути. Это приведет к тому, что река примет извилистые очертания, ее длина увеличится, а уклоны уменьшатся. Чем больше поток откладывает наносов, тем меньшие уклоны он имеет.



Где разместить водозабор — в воложке (I) или в главном русле реки (II)?

Чем меньше уклоны водной поверхности, тем меньше скорости течения и, следовательно, при прочих равных условиях, меньше транспортирующая способность потока.

Что касается русловой многорукавности, то есть основания предполагать, что этот тип руслового процесса обладает наивысшей транспортирующей способностью. Действительно, русловая многорукавность чаще всего встречается на участках реки, несущей очень большое количество наносов, обычно ниже выхода реки из гор и в приустьевой части.

По выходе реки из гор уклоны потока резко уменьшаются по сравнению с горным участком. По этой причине наносы, которые в горах проходили по руслу во взвешенном состоянии, по выходе на равнину, где их количество уменьшается, превращаются в наносы донные. Таким образом, объем перемещаемых наносов увеличивается.

На приустьевых участках тоже происходит уменьшение уклонов потока, выпадение взвешенных наносов, отчего объем донных наносов резко повышается по сравнению с участками среднего течения.

Почему же поток оказывается способным перемещать большое количество донных наносов, несмотря на то, что уклоны его уменьшились? Как выяснилось, в этом случае транспортирующая способность потока увеличивается за счет его распластывания, т. е. увеличения ширины русла. Благодаря этому увеличивается длина фронта перемещения донных наносов. Таким образом, увеличение транспортирующей способности потока при русловой многорукавности происходит совсем по другим причинам, чем при переходе от ленточногрядового или побочневого типов руслового процесса к разновидностям меандрирования.

В заключение можно сделать и «групповые снимки», а именно выделить участки с одинаковым типом руслового процесса, или, говоря иными словами, с одинаковыми макроформами речного

русла. Такие участки считаются морфологически однородными. Они формируются в тех случаях, когда по длине реки не происходит существенного изменения характеристик факторов руслообразования — водного режима, стока наносов и ограничивающих, препятствующих развитию деформаций условий. По длине такого участка формы транспорта наносов должны быть одинаковыми, т. е. на таком участке должны встречаться макроформы одного типа. Таким образом, морфологически однородный участок составлен как бы из отдельных звеньев макроформ.

Напомним, что в природе существует множество местных особенностей развития руслового процесса. Выделяя морфологически однородные участки, следует иметь в виду, что встречаются и смешанные типы руслового процесса, когда на фоне одного типа руслового процесса, имеющего четкие признаки, одновременно наблюдаются и признаки процесса другого типа. На фоне ограниченного меандрирования, например, иногда можно обнаружить признаки руслового процесса побочневого типа и т. п. Причина подобных явлений — изменения в факторах руслообразования. В таких случаях один из типов руслового процесса, по-видимому, является как бы законсервированным, неразвивающимся, а второй — действующим. Может быть и так, что, например, в маловодные годы развивается один тип руслового процесса, а в многоводные — другой.

Разобраться во всех возможных сочетаниях форм руслового процесса не такое уж сложное дело, особенно если пользоваться разработанной их типизацией, а в качестве исходного материала иметь аэрофотоснимки исследуемой реки. И конечно, очень важно проверить свои выводы в натуре, выехав на объект.

Если научиться выделять типы руслового процесса и не смотреть на реку только как на некое скопище формул, а видеть в ней живые, вечно изменяющиеся морфологические образования и структуры в потоке, то решение многих задач, связанных с оценкой руслового процесса, упрощается чрезвычайно.

Однажды нам с Н. Е. Кондратьевым пришлось выехать на нижнюю Волгу, чтобы осмотреть участок реки у селения Черный Яр, где собирались построить очень крупный водозабор. Водоприемные устройства намечалось разместить в затоне. У проектировщиков возник вопрос, не занесет ли этот затон песками, в большом количестве перемещающимися по главному руслу Волги, тем более, что мощные насосы водозабора должны были гнать воду вверх по затону, захватывая не одну только воду, но и содержащиеся в ней наносы.

...Поднимаемся на крутой, 30-метровый откос яра. Все как на ладони — и главное русло, и воложки, и затон. На открывшейся нам картине, как на карте, находим место нашего водозабора. Верхняя часть воложки, на которой проектируется разместить водозабор, перекрыта глухой земляной перемычкой, что и превратило воложку в затон. Уменьшение стока по воложке привело к появлению обширных скоплений наносов в ухвостье отделенного ею

острова. Конец песчаной косы грозит вот-вот закрыть воложку. Вывод напрашивается сам собой: надо либо разместить водозабор в главном русле, либо наладить свободный сток воды по воложке — *закрепить пески ухвостья острова и рассечь их подводящим каналом*, что обеспечит дополнительное поступление воды в воложку и ее промыв. Иными словами, надо вернуть воложку в ее естественное состояние, т. е. сделать ее такой, какой она была до перекрытия земляной перемычкой. (Кстати, на всем участке от Волгограда до Астрахани нам не удалось обнаружить ни одной воложки, занесенной песком,— все они остаются проточными очень длительное время, если человек не вмешивается необдуманно в естественный ход руслового процесса.)

Однако сооружать водозабор в главном русле нельзя: негде будет разместить строительную площадку, так как между обрывистым, с оползнями откосом яра и урезом воды в русле Волги остается лишь узкая полоска незатопленного берега, особенно в высокую воду. Значит, надо ориентироваться на воложку.

Проектировщики приняли наши рекомендации. Рекламаций на работу водозабора не поступало.

Что делать дальше?

Как бы много ни давало изучение морфологии речного русла и поймы, все же далеко не все задачи пока решены. Знание морфологических закономерностей руслового процесса позволяет понять то, к а к происходят деформации, но не то, п о ч е м у они происходят. Для того чтобы ответить на этот вопрос, нужно знать одновременно морфологию русла и движущие силы потока. Исследуя движущие силы потока в тесной связи с морфологией русла, можно было бы создать гидравлическую теорию русловых форм и уже на ее основе разработать детальные методы расчета и прогноза деформаций. Решение этой задачи исключительно важно уже по одному тому, что избавляет от необходимости вести длительные наблюдения, сокращает сроки полевых исследований, сроки проектирования сооружений, повышает прочность и надежность сооружений в эксплуатации.

Нельзя больше допускать, чтобы непрерывно меняющееся русло реки, с его сложным морфологическим строением и соответствующими различными гидродинамическими структурами, грубо уподоблялось каналу с неразмываемыми берегами и дном или жесткому сечению гидротехнических сооружений, как это еще достаточно часто делается и у нас, и за рубежом. Нельзя допускать, чтобы русло канала, проложенного в размываемых берегах, считалось устойчивым, даже если удается подобрать какое-то оптимальное его сечение. Практика убедительно показывает, что такие каналы со временем неизбежно начинают вести себя как реки. Возникающий в них транспорт наносов приводит к тому, что в русле канала появляются те же морфологические образования, которые

наблюдаются в реках, и в канале устанавливается определенный тип руслового процесса — побочневый, меандрирование и т. п.

Вихри в потоке

Интересные исследования образующихся в потоке структур — вихрей проводили сотрудники Русловой лаборатории Государственного гидрологического института под руководством старшего научного сотрудника А. Б. Клавена в конце 60-х годов.

Вначале рассматривался простейший случай: на первом этапе эксперимента изучались структуры, возникающие в потоках с равномерным установившимся движением при гладком и шероховатом дне. Чтобы вихри в потоке были видны глазом и их можно было бы зафиксировать, стенки лотка сделали стеклянными. В лоток вводились шарики из полистирола, удельный вес которых равен единице.

Такой шарик, погруженный на определенную глубину, не всплывает, если его не унесет вихревым течением. Подхватываемые струями течений, шарики следовали за ними, обрисовывая очертания вихрей.

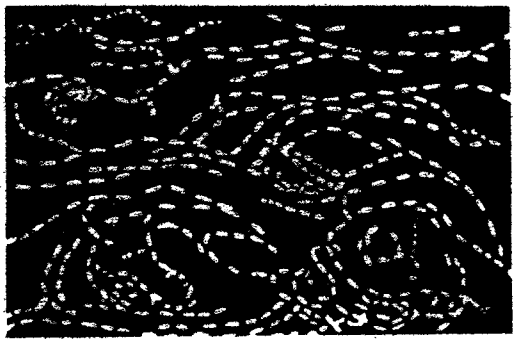
На следующем этапе эксперимента фиксировались очертания вихря и измерялись скорости возникающих при его образовании течений. Лучшим способом фиксации, по-видимому, является киносъемка, причем не с какой-то одной постоянной точки, а скользящая. При скользящей съемке киноаппарат движется со скоростью перемещения снимаемого объекта, что дает возможность проследить все изменения вихря по мере его смещения вниз по течению.

Надо сказать, что даже при таком совершенном способе фиксации, как скользящая киносъемка, не удается избежать некоторых условностей в изображении вихрей. Оказывается, что изображения получаются различными при разных скоростях движения киноаппарата. Так как скорости течения в верхних слоях потока больше, чем в нижних, то встает вопрос о том, с какой же скоростью надо перемещать аппарат. В основных экспериментах он двигался со средней скоростью течения.

С помощью киносъемки в потоке были обнаружены крупные вихри с горизонтальной осью вращения. По высоте эти вихри охватывали всю толщу потока, а их диаметры по длине потока при гладком дне равнялись примерно 7 глубинам. Таким образом, вихри имеют эллиптическую форму, что предполагал еще в 1919 г. Н. Е. Жуковский.

Соотношение скорости, с которой вихри смещаются вниз по течению (переносная скорость), и скорости, с которой частицы воды движутся по контуру вихря (орбитальная скорость), таково, что структурные элементы (вихри) как бы катятся по течению с некоторым скольжением относительно дна.

С увеличением шероховатости дна растут и предельные значения продольной и вертикальной составляющих скорости в пре-



Вихревые структуры в потоке, обнаруженные А. Б. Клавеном с помощью скользящей киносъемки.

делах крупномасштабных элементов и уменьшается их продольный размер.

Обнаруженные вихри обусловливают распределение по глубине потока предельных значений скорости течения. В пределах вихрей наблюдаются наибольшие отклонения компонент скорости от их средних значений.

То, что было обнаружено А. Б. Клавеном, далеко не полная картина вихревых образований в потоке. Согласно воззрениям академиков А. Н. Колмогорова и А. М. Обухова, в турбулентном потоке должны существовать вихри с широко меняющимися линейными размерами и периодами движения. Как пишет К. В. Гришанин, наиболее крупные вихри возникают вследствие неустойчивости основного движения потока и отбирают энергию от основного движения. Эти-то вихри и были обнаружены Клавеном. Неустойчивость крупномасштабных вихрей порождает вихри меньших размеров. Дробление вихрей продолжается до тех пор, пока не образуются столь мелкие структуры, что их энергия гасится силами молекулярной вязкости, т. е. переходит в тепло. Здесь можно выделить вихри средних масштабов и наиболее мелкие. Вихри средних масштабов осуществляют передачу турбулентной энергии от крупных к мелким структурам. В мелких вихрях механическая энергия пульсаций превращается в энергию уже молекулярного движения.

Н. Е. Кондратьев считает, что вихри малых масштабов в придонном слое играют роль своего рода колес, на которых катится основная часть потока, движущегося, таким образом, наподобие гусеничного трактора.

Установить, так это или не так,— очередная задача.

Пока же исследования структур в потоке не дают ответа даже на вопросы о том, что такое поток. Такой вопрос был поставлен более двадцати лет назад зарубежным ученым Х. Драйденом. Он пишет:

«Массы жидкости, имеющие значительную величину, движутся как более или менее связанные образования... Следует ли поток рассматривать как среднее течение, которое просто переносит и искривляет большие вихри?.. Или следует рассматривать поток

как среднее течение, на которое накладываются перемещающиеся волновые системы, причем каждая волна движется со скоростью, определяемой геометрией всего пограничного слоя, скоростью вне пограничного слоя и физическими свойствами жидкости?»

Важной задачей, которую решают в экспериментальной лаборатории, является изучение потока на повороте русла. Это тоже задача очень непростая, и, хотя она имеет длительную историю, предстоит еще многое сделать.

Обнаруженные закономерности развития излучин, а именно возникновение асимметрии их очертаний и появление в пределах одного поворота нескольких плёсов, разделенных мелководными перекатами, также очень трудно объяснить с позиций поперечной циркуляции. Вместе с тем эти явления хорошо объясняются без всякой поперечной циркуляции, исходя из схемы, в которой рассматривается отражение набегающих на берег струй течения. В 1956 г. такую схему предложил немецкий ученый Г. Гарбрехт.

По инициативе Н. Е. Кондратьева в лаборатории были поставлены специальные эксперименты по проверке этой схемы, в которых изучались гидравлика потока и движение наносов при трех стадиях развития излучин — в начальной стадии, когда излучина еще очень пологая, в промежуточной стадии и в той стадии, когда излучина приобрела петлеобразные очертания в плане. Контур излучины задавался жестким, а дно было песчаным. При пропуске воды по руслу поток сам формировал все русловые образования, свойственные меандрирующей излучине,— перекаты, плёсы, пляжи на выпуклом берегу, по дну русла начинали двигаться песчаные гряды. При разных степенях развитости излучин отмечались и разные пути движения наносов и своя специфика образования в русле основных элементов излучины. Эти опыты с большой тщательностью проводила З. М. Великанова.

Исследуя данные модели, ученые видели одну и ту же картину: плёсы неизменно формировались в местах отражения набегающих на вогнутый берег излучины струй потока,— схема Гарбрехта в общем оправдывала себя неплохо. Это подтверждалось и изучением карт речных излучин: плёсы оказывались там, где поток мог набегать на берег.

Н. Е. Кондратьев вместе с молодым своим сотрудником математиком Б. К. Трахтенбергом предпринял попытку теоретически рассмотреть явление отражения струй потока. Это был очень смелый шаг, ибо у наших гидравликов сложились столь устоявшиеся представления о циркуляции, что какие-то другие взгляды, идущие вразрез с их собственными, казались им абсурдом.

Отношение к новым взглядам, новым гипотезам, новым теориям в науке неизменно проходит три этапа. Вначале говорят: «Этого не может быть!» Дальше, по мере того как теория продолжает жить и развиваться, скептики начинают колебаться: «Да, пожалуй, в этом что-то есть!» Когда же теория получает самые неопровержимые доказательства, критики скептически улыбаются: «Да это же давно всем известно!»

Проблема отражения струй потока от препятствий находится сейчас, пожалуй, еще на первом этапе.

Особый интерес представляет гидравлика речных пойм: поймы все шире и шире используются в хозяйственной деятельности человека.

Исследования начались с натурного изучения затопленных пойм. Наиболее удобный способ их изучения — аэрогидрометрическая съемка скоростного поля потока на затопленной пойме, когда с самолета сбрасываются поплавки, положение которых фиксируется на фотопленке. Таким способом прослеживается весь путь движения поплавка, а следовательно, и выявляются пойменные течения.

Даже при ширине поймы в несколько десятков километров на съемку систем течений на затопленной пойме уходит только несколько часов. Повторяя съемку в разные фазы половодья, можно выяснить режим этих течений.

Подобные работы, произведенные на ряде затопленных пойм разных типов, дали неожиданный результат. Оказалось, прежние представления о том, что во время половодья на пойме образуется медленное течение, параллельное русловому, не соответствуют действительности.

Аэрогидрометрические наблюдения показали, что гидравлические явления на пойме отличаются большой пестротой и фрагментарностью. Выяснилась большая роль прорв, через которые происходит заполнение поймы водой и слив этой воды. (Прорва — это промытый водой участок берегового вала.) В них могут возникать скорости течения, намного превышающие те, которые наблюдаются в русле реки. Однако эти течения быстро гасятся ниже прорвы. Поэтому сквозные течения на пойме возникают только при очень редких высоких половодьях. В обычных же условиях на пойме образуются так называемые застойные аккумулирующие емкости. Из-за неравномерного их наполнения и разных высот стояния уровня воды начинается перелив ее из одной емкости в другую. На границах емкостей также могут возникнуть участки с очень большими скоростями течения (внутренние прорвы).

Чтобы создать методы расчета затопления и опорожнения пойм, а также развития пойменных течений, пришлось выполнить специальные лабораторные исследования закономерностей растекания воды по пойме при выходе из прорвы в береговом валу и переливов воды непосредственно через гребни береговых валов, а также выяснить условия выноса наносов на поверхность поймы и т. п. Все эти явления исследовались на моделях фрагментов пойм разных типов Русловой лабораторией Государственного гидрологического института примерно в течение трех лет. В результате были созданы новые методы расчета затопления и опорожнения пойменного массива и развития пойменных течений.

Здесь были приведены только отдельные вопросы, по которым удалось найти новые решения. Очевидно, существует множество таких вопросов, и они еще ждут своих исследователей.

Р. Р. Чугаев пишет в уже упоминавшейся брошюре «Развитие и формирование технической механики жидкости (гидравлики)»: «Для того чтобы окончательно решить вопрос о вакууме, впервые затронутый (и неправильно освещенный) Аристотелем, человечеству потребовалось около 2000 лет; для окончательного выяснения вопроса об уравнении неразрывности жидкости — 1500 лет».

Как уже говорилось, история гидравлики знает случаи, когда длительное время считались несомненными положения, которые ныне признаны абсурдными. Поэтому надо осторожнее относиться к тому, что кажется непривычным или не слишком согласующимся с устоявшимися воззрениями, как, например, в вопросе о поведении потока на повороте русла или в вопросе о гидравлике пойм.

Много неясного остается и в вопросах морфологии речного русла и поймы, исследования их должны вестись более интенсивно. Нужно уточнить виды морфологических образований в русле реки и условия их образования, уточнить связь этих образований с водным режимом и стоком наносов; кроме того, очень важно уметь выражать эти связи количественно, что имеет большое практическое значение. Нужно научиться оценивать и вероятностные характеристики полученных размеров форм русла и их деформаций. Ко всем этим вопросам мы только начинаем подходить.

А теперь допустим, что и гидравлические структуры в потоке, и морфология речного русла, и пойма уже очень хорошо изучены. Но ведь еще остается проблема — соединить морфологию с гидравликой, а это уже самостоятельная сложная задача.

Чтобы показать, насколько не просто объяснить природные явления только с гидравлических позиций, расскажем историю закона Бэра — Бабине.

Закон Бэра — Бабине гласит, что в северном полушарии подмываются преимущественно правые берега рек и русло рек оказывается прижатым к правому склону речной долины. Впервые это обстоятельство было отмечено исследователем сибирских рек П. А. Словцовым в 1827 г. Он обратил внимание, что крупные сибирские реки, такие, как Обь, Енисей, Лена, текут, прижимаясь к правым, трудноразмываемым склонам своих долин. Однако в то время наблюдение Словцова никого не заинтересовало. Позже, в 1856 г., русский географ К. М. Бэр отметил подобное явление на реках Европейской территории России. Его работы получили большую известность. Оба ученых, и Словцов, и Бэр, причину асимметричного расположения русла в речной долине связывали с влиянием Кориолисова ускорения, но считали, что это правило, или закон, распространяется на реки, текущие лишь в меридиональном направлении. Спустя три года после Бэра Бабине дает более обобщенное толкование закона, указав, что ему подчиняются все реки северного полушария, в каком бы направлении они ни текли.

И. А. Федосеев, занимавшийся историей гидрологии, приводит, кстати сказать, любопытные сведения: в трудах Вольного экономического общества России еще в 1793 г. появилась статья пастора

Алопеуса «Описание вод Карелий», в которой автор указывает, что западные и северные берега озер в этом районе скалистые и возвышенные, связывая это обстоятельство с суточным вращением Земли. По мнению пастора Алопеуса, здесь проявляется мудрость божья: бог укрепил берега, «дабы вода при скором обращении земного шара границы свои не преступала и не могла произвести наводнений».

Итак, Словцов в 1827 г., Бэр в 1856 и Бабине в 1859 г. высказались достаточно определенно о причинах асимметрии речных долин.

Однако русловой процесс — настолько сложное и многофакторное явление, что выявлять связи морфологических образований с движущимся потоком нужно весьма осмотрительно, обязательно учитывая возможность влияния других факторов на образование тех или иных форм русловых и пойменных образований.

Вскоре после того как появился закон Бэра — Бабине, выяснилось, что асимметрию речных долин можно объяснить совсем с других позиций, связывая ее не только с Кориолисовым ускорением.

В частности, зарубежные ученые Стефанович и Клинге выступили с отрицанием влияния вращения Земли на берега рек; факт размыва правых берегов они относили за счет разрушительной деятельности волнения, вызываемого устойчивыми направлениями ветров. Клинге, например, утверждал, что сибирские реки, текущие с юга на север, подмывают свои правые берега по той причине, что в период, когда на них нет льда, господствуют западные ветры, а на реке Волге, текущей с севера на юг, правый берег подмывается по той причине, что летом здесь господствуют восточные ветра.

Русский ученый М. П. Рудский писал по этому поводу: «Ветры, предполагаемые г. Клинге, почему-то дуют в ту сторону, в которую действует вращение Земли, а истинные ветры дуют, пожалуй, не совсем так. Насчет распределения ветров в Сибири у меня нет достаточных данных, но и г. Клинге их тоже не имел... Что касается Поволжья, то данные есть, но они не говорят в пользу мнения г. Клинге». Рудский ссылается при этом на данные А. И. Воейкова, полностью подтвердившиеся в наши дни — по материалам уже длительно действующих многочисленных метеорологических станций. Кроме того, Рудский указывает, что воздействие ветра на берега широкой и узкой рек не может быть одинаковым, а между тем правые крутые берега наблюдаются и на малых реках, и на больших.

Например, такие берега обнаружил В. В. Докучаев на малых реках Нижегородской губернии.

Нельзя отрицать, что волнение, вызываемое ветрами устойчивых направлений и особенно штормами, может произвести значительные разрушения берегов на широких озерах, водохранилищах и реках, но распространять это положение в качестве единственной причины на все случаи жизни было бы, конечно, неправильно.

Ряд исследователей, изучая строение речных долин и положение в них речного русла, приходит к выводу, что далеко не всегда подмываются именно правые берега рек. В качестве примера приводятся склоны долины верхней Волги (от истока до впадения реки Оки у города Горького). Здесь участки с высоким подмываемым правым берегом чередуются с участками, на которых подмываемым и более крутым и высоким оказывается левый берег.

Обязательным условием того, чтобы русло оказалось у правого склона долины, является возможность перемещения русла по ее дну, т. е. возможность плановых деформаций. Однако в ряде случаев реки текут по унаследованным ими долинам, располагаясь у их склонов не в результате плановых деформаций и путешествия по дну долины, а, так сказать, изначально. Это может быть обусловлено и движениями земной коры. Как утверждал В. В. Докучаев — это и сейчас еще спорный вопрос,— многие речные долины выпаханы ледником и представляют собой цепочки озеровидных расширений, соединившихся при сбросе талых вод. Таковы, например, долины Волги, Оки, Камы, Днепра, Припяти и других рек.

Русло этих рек может свободно перемещаться и менять всю полосу меандрирования в результате прорыва отдельных излучин, и тогда поток оказывается совсем не у правого берега, а у левого или в средней части такого озеровидного расширения, нарушая закон Бэра — Бабине.

Попытки отрицать универсальность закона Бэра — Бабине делались и в самое последнее время. Так, в 1971 г. в четвертом номере сборника «Вопросы физической географии», издаваемого Саратовским университетом, опубликована статья Г. И. Леонтьева «Об асимметрии речных долин и законе Бэра».

«Что является движущей силой, обусловливающей асимметрию речных долин?» — спрашивает Леонтьев. Он считает, что движущими силами являются две группы факторов: одни действуют на поток, другие непосредственно на склоны долин. К первым относятся центростремительные ускорения, возникающие на поворотах русла, Кориолисово ускорение, движение наносов. Ко вторым — процессы выветривания, размыв склонов талыми и дождевыми водами, воздействие ветра на породы и т. п.

Условия, способствующие, ослабляющие или прекращающие воздействие всех перечисленных факторов, автор подразделяет на климатические (температурный и ветровой режим и пр.), структурно-тектонические (наклон слоев пород и т. п.), литологические, гидрологические и т. п.

В таком делении особенной четкости нет, но с общим выводом, состоящим в том, что асимметрию речных долин нельзя объяснять только законом Бэра — Бабине, можно согласиться.

Г. И. Леонтьев считает, что высокий и крутой склон долины может возникнуть в результате тектонических движений, а река у его подножия может протекать только по той единственной при-

чине, что здесь происходит разгрузка подземных вод, вытекающих из-под склона и обеспечивающих устойчивый сток реки. Высокий склон долины может быть образован и при отступании моря.

Леонтьев пишет, что если бы не был уже известен закон Бэра — Бабине, то асимметрию долин можно было бы связать с зональностью природных условий. Долины с крутыми правыми склонами преобладают в степях и лесостепях и отчасти в смешанных лесах. Их меньше в хвойных лесах, а в полупустыне они и вовсе отсутствуют.

Крутые и высокие подмываемые склоны долины часто встречаются на участках, в пределах которых к бровке долины прилегают небольшие водосборные площади и, следовательно, по поверхности склонов стекает мало воды и они слабо разрушаются. Так, на реке Волге водосборная площадь правого возвышенного и крутого склона очень мала и к тому же дренируется текущими параллельно главной реке притоками — Свиягой, Терешкой, Иловлей, перехватывающими сток воды и не допускающими поэтому ее стекания по склонам волжской долины.

Енисей, по данным В. А. Варсонофьевой, сдвигается не вправо, а влево, в сторону берега с небольшой водосборной площадью, причем этот берег пологий.

Н. И. Маккавеевым и его сотрудниками было установлено, что на верхней Оби наблюдаются систематическая убыль материала с левобережья и его накопление на правобережье под действием ветров. Поэтому русло реки смещается в сторону, противоположную направлению ветров, а не в сторону господствующих ветров, как считал Клинге.

Западная циркуляция ветров, господствующая над Европейской территорией нашей страны, способствует усиленному переносу песка с правого берега на левый. Поэтому правый берег подмывается легче, чем левый.

Поток держится у крутого берега потому, что с него поступает мало наносов.

Западная циркуляция ветров, конечно, связана с Кориолисовым ускорением, но это совсем иная связь, чем та, которую предполагает закон Бэра — Бабине.

В пустынях эоловые переносы песка значительнее, чем в лесах. В лиственном лесу они больше, чем в хвойном, который сильнее гасит ветер; кроме того, в хвойном лесу нет открытых грунтов.

Рассуждения о законе Бэра — Бабине отвлекли нас от структуры потока.

Однако эти рассуждения не были лишними. Они показывают, что, какими бы совершенными и строгими ни были теоретические законы механики и гидродинамики, как только встает задача их применения на практике, например в приложении их к естественным, так сказать, «природным» рекам, возникает множество осложнений. И делать какие бы то ни было выводы можно только тогда, когда рассматриваемое явление всесторонне изучено во всех его проявлениях в природных условиях.

О возможности количественной характеристики типов руслового процесса

Морфологические исследования могут давать совершенно конкретные практические результаты. И уже по одной этой причине надо всемерно развивать это направление русловых исследований.

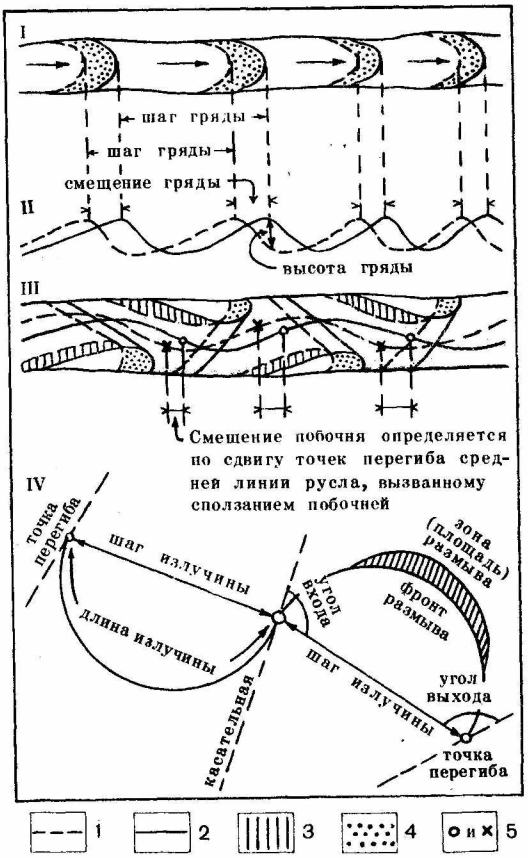
Количественное описание явления всегда открывает новые возможности его анализа — выяснения новых, ранее неизвестных закономерностей процесса и подтверждения и уточнения уже известных, так как появляется возможность применить к полученным рядам цифр законы математики.

Нередко значение цифр переоценивается, особенно когда ими характеризуется явление, недостаточно изученное. В таких случаях всегда есть опасность, что цифрой будет описана не самая характерная сторона явления или что явление окажется слишком грубо осредненным и при столкновении с действительностью расчет не оправдается.

Подобные случаи очень хорошо описаны в романе Жюля Верна «Необыкновенные приключения экспедиции Барсака». Один из участников этой экспедиции, статистик г-н Понсен, стремится все увиденное превратить в цифры и непрерывно тренирует свои математические способности. Все заинтригованы колонками цифр, которые непрерывно пишет г-н Понсен. Наконец другой участник экспедиции, вездесущий корреспондент одной парижской газеты Амедей Флоранс, решает спросить Понсена, что значат ряды цифр в его записной книжке.

— Я статистик,— ответил Понсен.— Эти заметки содержат неистощимые копи сведений! Я открыл поразительные вещи, сударь!

— Вот посмотрите на это, сударь,— вскричал он, показывая запись, датированную 16 февраля.— За 62 дня мы видели 9 стад антилоп, содержащих 3907 голов, сосчитанных мною, что в среднем дает на одно стадо 434 и одиннадцать сотых антилопы. В один год — это математика! — мы встретили бы 46 и девяносто три сотых стада, то есть 20 372 и семьдесят две сотых антилопы. Отсюда вытекает — ма-те-ма-ти-чески, что 54 600 квадратных километров, которыми исчисляется площадь петли Нигера, содержат 555 166 и восемьсот девяносто четыре тысячных антилопы. Это, я полагаю, ценный результат с зоологической точки зрения. Я знаю, например, что в петле Нигера содержится в среднем девять тысячных крокодила и двадцать семь тысячных гиппопотама на метр течения реки! Что здесь в этом году будет произведено 682 квадрильона 321 триллион 233 миллиарда 107 миллионов 485 тысяч и одно зерно проса! Что здесь ежедневно рождается в среднем двадцать восемь тысячных ребенка на каждую деревню и что эти двадцать восемь тысячных содержат двести шестьдесят семнадцатитысячных девочки и сто девяносто девять семнадцатитысячных мальчика! Что рисунки, вытатуированные на коже негров этой области, будучи приложенными друг к другу, накроют сто



Измерители макроформ разного типа и способы их определения.

I — план реки с ленточногрядовым типом руслового процесса, II — продольный профиль этого же участка, III — совмещенные планы реки с побочневым типом руслового процесса, IV — план смежных излучин по средней линии русла.

1 — первоначальное положение средней линии русла, *2* — последующее положение средней линии русла, *3* — размытые части побочней, *4* — намытые части побочней, *5* — точки перегиба русла.

три тысячи пятьсот двадцать восьмых окружности земного шара! Что...

— Довольно, довольно, господин Понсен! — перебил Флоранс, затыкая уши.— Это восхитительно в самом деле, но чересчур сильно для меня, признаюсь!

Хочу заверить читателя, что в способах количественной оценки тех явлений, которые происходят с речным руслом при разных типах руслового процесса, нет ничего похожего на рассуждения г-на Понсена, но... в тех случаях, когда при этом не учитывается морфология русла, одна только количественная оценка, безусловно, чем-то начинает напоминать рассуждения Понсена.

Деформации речных русел и пойм происходят обычно в виде смещения целостных морфологических образований — сползает гряда, смещается остров или осередок, развиваются или сползают излучины русла. Значит, в первую очередь надо иметь такие количественные показатели, которые позволили бы охарактеризовать форму и размеры излучин или других макроформ и их деформаций;

обычных характеристик русла, таких, как длина реки, ширина, глубина, высота берегов, для наших целей недостаточно.

Чтобы охарактеризовать, например, ленточную гряду, надо прежде всего оценить ее длину и высоту и скорость сползания. Если эти характеристики известны, то можно сказать, насколько понизится или повысится дно русла при сползании по нему гряды и когда примерно это произойдет. Пожалуй, больше ничего при ленточногрядовом типе руслового процесса и не требуется знать, так как все деформации русла сводятся к перемещению вдоль по нему песчаных гряд.

Если имеется продольный профиль реки, эти гряды можно измерить. Для определения скорости сползания гряд надо иметь съемки реки за два срока, и тогда по смещению гребней гряд легко найти и скорость сползания.

При разновидностях меандрирования важно принять что-то за единицу измерения, т. е. иметь измерители, характеризующие размеры и форму излучин и их изменения. Как определить форму и размеры излучин, показано на схеме. А относительно скорости деформаций излучин стоит поговорить подробнее.

Скорость развития излучин можно найти с помощью угловых или линейных показателей. Угловая скорость плановых деформаций излучины — это изменение угла разворота излучины во времени. Чтобы измерить это изменение, надо иметь две съемки одного и того же участка реки. Вычислив разность в углах разворота (между значениями при первой и второй съемках) и разделив ее на число лет, прошедших между съемками, получаем угловую скорость деформаций, обычно измеряемую в минутах в год. Это очень удобная характеристика для исследования закономерностей развития излучин. Для практических же целей удобнее пользоваться линейными измерителями скорости деформаций.

Чтобы определить скорости смещения бровок берегов русла в результате их размыва или намыва, тоже надо иметь две разновременные съемки речного русла с разрывом в 10—15 лет. Если снимки наложить один на другой (или, как говорят, совместить их) так, чтобы контуры бровок берегов русла возможно точнее совпадали, то сразу обрисуются зоны размыва и намыва. Измерив размытые или намытые площади и разделив их на длину участка размыва или намыва, получим в результате среднее смещение бровки берега, а разделив этот результат на число лет, прошедших между съемками, определим и среднюю скорость смещения бровки берега, а следовательно, и изучаемой излучины.

Приведенная выше система морфометрических измерителей замечательна прежде всего тем, что искомые данные могут быть получены на основе обычных карт или аэрофотоснимков. Если мы хотим получить много количественных показателей руслового процесса, причем показателей разного типа, надо только проявить трудолюбие и терпение, обработав побольше съемок рек, уже кем-то выполненных. Обработка эта элементарно проста. И если работа будет выполнена тщательно, то сколько бы раз вы ни повторяли

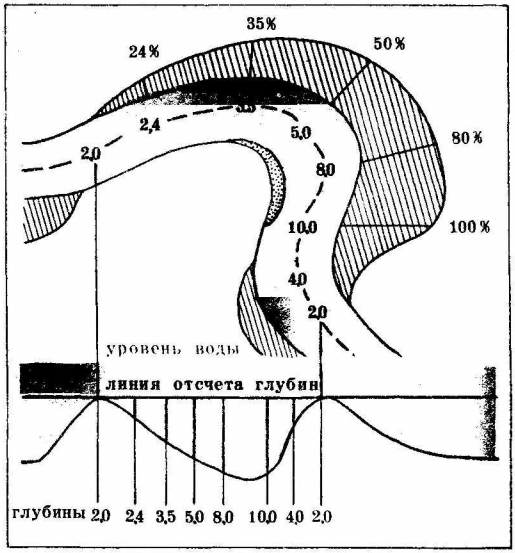


Схема расчета смещения вогнутого берега излучины при меандрировании (в процентах дано отношение данной глубины к наибольшей и отношение скорости размыва к наибольшей скорости на участке реки).
1 — размытые участки берега, *2* — песок.

эту обработку, для одного и того же участка вы получите очень близкие значения измеряемых характеристик.

А вот что дает анализ цифр. Напомним, данных собрано такое множество, что выводы, сделанные из них, приобретают силу морфологических законов.

— Ленточные гряды и побочни чередуются по длине реки примерно через равные расстояния. Эти расстояния составляют 6—8 ширин русла.

— Шаги гряд, побочней и излучин разнятся между собой несущественно, что свидетельствует об общности происхождения этих образований.

— Размеры макроформ меняются меньше, чем величины речного стока.

— Чем больше расход воды в реке, площадь ее водосбора или ее ширина, тем больше размер гряд, побочней и излучин.

— Излучины при свободном меандрировании могут приобретать овальные формы, и число плёсов на них растет с ростом излучины. В других случаях излучины могут сильно вытягиваться и постоянно сохранять только один плёс. Начать же вытягиваться излучины могут в том случае, когда угол разворота достигнет 180°.

— Скорость смещения русла в плане на ранних стадиях развития излучин увеличивается, а затем убывает.

— Если излучина вытягивается, сохраняя один плёс, то глубина его все время увеличивается. Если число плёсов увеличивается, то их глубина меняется мало.

— Увеличение длин одних излучин обычно сопровождается уменьшением длин других излучин, поэтому участки рек с большим числом излучин сохраняют свою длину практически неизменной.

— Чем глубже затопляется пойма в половодье, тем на более ранних стадиях развития излучин происходит их спрямление, тем скорее отторгаются от берегов побочни.

— Спрямления излучин после своего появления меандрируют, затем расширяются, теряют извилистость и по ним начинают двигаться побочни и осередки, а уж после этого спрямление начинает превращаться в большую излучину.

Вот десять заповедей (и это еще далеко не все), которые удалось выяснить, изучая наши измерители.

Знание закономерностей деформаций русла позволило создать формулу для расчета будущих положений речной излучины. Эту формулу вывели с помощью чисто логических рассуждений. Но, будучи опробованной на многих объектах, она завоевала доверие.

Ход рассуждений таков. На каком участке вогнутого берега излучины можно ожидать наибольшего подмыва? Очевидно, там, где берег будет встречать течение под наибольшим углом. И если здесь работа потока окажется наиболее активной, то здесь же появится и наиболее глубокий участок. Следовательно, плановые деформации русла можно поставить в зависимость от глубины русла, которую всегда легко измерить: там, где будет наибольшая глубина русла, можно ожидать и наибольшего смещения вогнутого берега.

Значит, чтобы рассчитать будущее положение излучины, надо знать наибольшую скорость смещения берегов на участке русла (а для этого сравнить карты разных лет). Она будет находиться в створе с наибольшей глубиной. Для остальных участков значение этой скорости распределяется пропорционально распределению вдоль излучины глубин русла. Например, если глубина в данном створе уменьшилась по сравнению с наибольшей на 10%, то и скорость в этом створе уменьшилась на те же 10%. Так можно рассчитать новое положение русла на любой заданный срок — на пять, десять, двадцать лет и т. д.

Все, казалось бы, хорошо, но, к сожалению, здесь есть осложняющие обстоятельства.

Во-первых, с развитием излучины скорость ее деформации в плане не остается постоянной. Однако, как она изменяется с развитием излучин, известно, и это изменение можно учесть, введя в формулу соответствующий поправочный коэффициент.

Во-вторых, с развитием излучины изменяются глубины. Но как меняется глубина, тоже известно, и это обстоятельство тоже может быть учтено.

И, наконец, в-третьих, расчет делается, исходя из предположения, что излучина, развиваясь, остается неподвижной в точках перегибов русла, хотя в этих точках не нулевая глубина, а следовательно, и не нулевая скорость смещения берегов в плане. Это просто учесть при расчете: для того чтобы принять скорость на перегибах за нулевую, надо расчет глубин вести не от уровня воды в реке, а от средней отметки дна на перекатах, т. е. на перегибах русла.

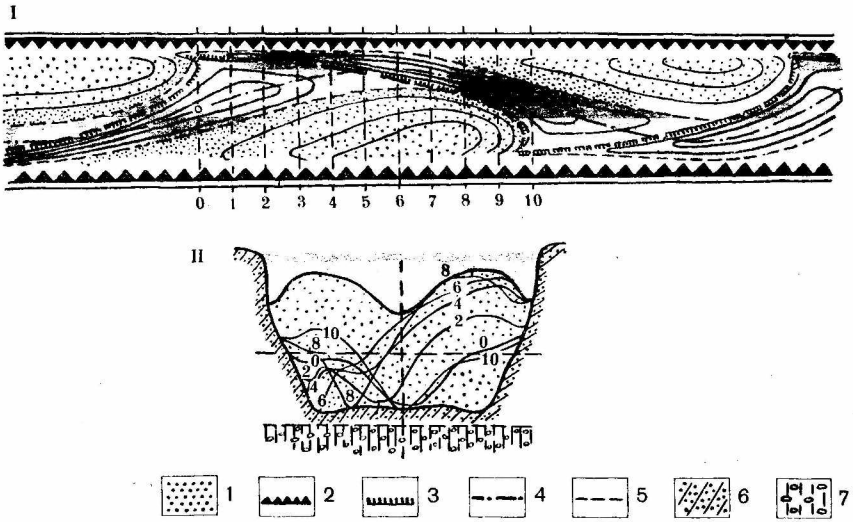


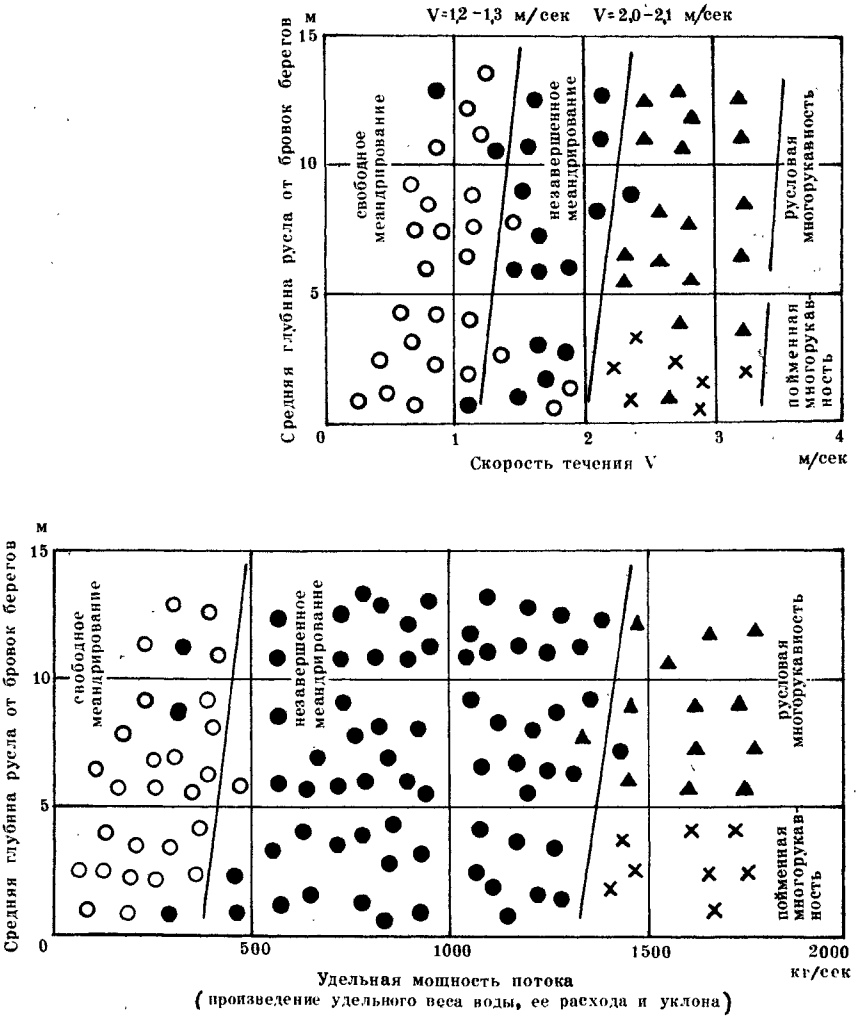
Схема графического определения отметок наибольшего размыва и намыва русла при ленточногрядовом и побочневом типах руслового процесса и при ограниченном меандрировании. План участка (I), совмещенные поперечные профили русла (II).

1 — пески, *2* — бровка меженного берега, *3* — гребни перекатов, *4* — средняя линия русла; *5* — положение промерных поперечников, *6* — неаллювиальные породы, *7* — базальный горизонт.

Конечно, даже со всеми этими поправками формула не делается идеальной: она не дает возможности рассчитывать режим деформаций русла в плане, не учитывает того факта, что один год бывает многоводным, а другой — маловодным. Значит, и скорость деформаций может от года к году меняться. Формула же рассчитана на среднюю многолетнюю скорость смещения берега. Учет режима — это пока дело будущего.

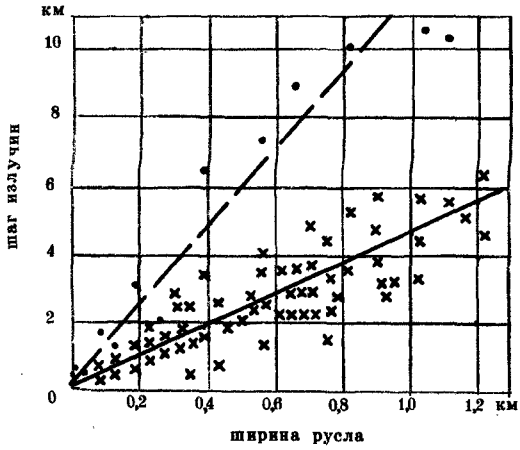
Вот другой пример расчета на чисто морфологической основе. При ленточногрядовом и побочневом типах руслового процесса наблюдается систематическое сползание гряд, а при ограниченном меандрировании — сползание излучин, причем гряды и излучины не изменяют своих размеров и форм. Значит, через любой заданный на реке створ должна пройти либо гряда (при ленточногрядовом или побочневом типах процесса), либо излучина со своими двумя перекатами и плёсом между ними.

Изменения (повышение или понижение) отметок дна русла будут определяться высотой гряд или разницей в отметках дна плёсов и перекатов излучин. Если знать эти размеры и скорость сползания гряд или излучин, то можно сказать, насколько повысится или понизится дно русла в любом заданном створе и когда это произойдет. Практически задача решается с помощью простого



Критериальные зависимости, характеризующие условия перехода из одного типа руслового процесса в другой (по В. И. Антроповскому). Переходам из одного типа руслового процесса в другой соответствуют определенные значения средних скоростей течения и удельной мощности потока.

графического построения. По данным промеров глубин на определенном участке русла строится серия его поперечных профилей. Затем они накладываются один на другой, совмещаясь по средней линии русла. Нижняя огибающая совмещенных профилей покажет предельную глубину размыва русла (отметку снижения его дна), верхняя огибающая дает положение отметок дна при наибольшем



Зависимость шагов излучин от ширины реки. Пунктиром показана кривая американских ученых Леопольда и Вольмана, сплошной линией — наших ученых.

его повышении. Прослеживая последовательные отметки дна всех промежуточных профилей и зная скорость сползания гряд или излучин, можно рассчитать, когда любой заданный поперечный профиль русла из числа расположенных выше расчетного створа достигает его.

Это очень важная характеристика деформаций русла реки — она нужна для определения глубины заложения водоприемных устройств водозаборов, фундаментов различных сооружений на берегах рек, мостовых опор и т. п.

При ограниченном меандрировании порядок построения поперечных профилей русла тот же, что и при ленточногрядовом или побочневом типах процесса. Отличие состоит только в том, что поперечные профили русла при ограниченном меандрировании совмещаются не по средней линии русла, а по средней линии между огибающими, проведенными через вершины излучин.

Количественным прогнозом деформаций речного русла при изменениях в факторах руслообразования и прежде всего в стоке воды и наносах занимался сотрудник Государственного гидрологического института В. И. Антроповский. Он попытался установить, в каких условиях возникает тот или иной тип руслового процесса. Для этого была построена система графиков, связывающих различные характеристики условий протекания воды и перемещения наносов. Нанесенные на график точки образовали целые поля, и, казалось бы, провести по ним какие-либо линии связи было невозможно. Однако стоило соотнести каждую точку на графике с типом руслового процесса на участке реки, для которого определялись эти характеристики, как сразу же оказалось возможным соединить отдельные точки, свойственные данному типу руслового процесса, четкими линиями. Таким образом, поле точек на графиках разделилось на отчетливые полосы, в пределах которых находились характеристики только данного типа руслового процесса.

Так было установлено, что данному типу руслового процесса свойственны совершенно определенные значения уклонов дна долины, средних скоростей течения, ширины и глубины русла, средних максимальных расходов воды, при которых происходят основные переформирования русла и поймы реки, уклонов водной поверхности, касательных напряжений у дна и так называемых скоростных коэффициентов в известной формуле французского инженера Шези, связывающей среднюю скорость течения с глубиной русла и уклоном водной поверхности.

Оказалось, что на этом же поле точек можно не только выделить полосы, но и провести граничные линии между этими полосами и линии, соответствующие средним значениям характеристик при данном типе руслового процесса. А тем самым открывалась возможность выяснить критические значения факторов руслового процесса, при которых один его тип переходит в другой, а также средние характеристики условий, при которых существует данный тип руслового процесса.

Трудно переоценить значение установления подобных связей для прогнозов руслового процесса. Зная, как изменятся факторы руслообразования, можно сказать, каков будет тип руслового процесса; а зная тип руслового процесса, можно сказать, какие условия надо создать, чтобы сформировался желательный тип руслового процесса.

Именно таким путем были даны прогнозы деформаций русла на участке нижнего бьефа Волгоградской ГЭС на Волге, в нижнем бьефе Вилюйской ГЭС на Вилюе, притоке Лены, и т. д.

Конечно, проблема не может считаться полностью решенной, но основные узлы ее успешно развязываются. Описанный способ, естественно, не единственный. Он не исключает и других возможностей решения проблемы. А главное — на его основе можно решать задачи любыми другими способами.

Насколько важно учитывать тип руслового процесса при построении связей, подобных описанным выше, свидетельствует следующий случай.

Два американских ученых — Л. Леопольд и М. Вольман, пользуясь теми же измерителями, что и мы, построили связь между шагом излучины и шириной русла реки. Сопоставив нашу связь с полученной Леопольдом и Вольманом, мы обнаружили, что они сходятся только при небольших значениях шагов, а дальше резко расходятся. Оказалось, что если наши связи строились со строгим отбором действительно свободно меандрирующих излучин, то в американские графики попали точки, относящиеся к извилинам русла, которые повторяли меандры долины, поэтому-то американцы и получили явно завышенные значения шагов. Это и привело к тому, что их кривая связи отклонилась влево от нашей, более строгой кривой.

Размеры речного русла зависят не только от расходов воды и ширины русла, но и от площадей водосбора, которые вычисляются проще, чем расходы воды,— путем простого измерения их по карте.

Английский ученый Г. Дьюри построил такую зависимость, в которой величина шага излучин связывалась с размером площади водосбора. Связь получилась тесной и надежной. В этом нет ничего удивительного: площадь водосбора определяет и соответствующий ей расход воды, а значит, и размеры русла реки, питаемой этим водосбором.

Выведенную зависимость Дьюри использовал для того, чтобы определить величины расходов воды, при которых образовались речные долины рек Англии. Выяснив эти величины, можно было попытаться оценить количество атмосферных осадков и величину испарения в этот период. Таким образом, Дьюри решал как бы обратную задачу: по морфометрическим данным речной долины определял значения формирующих ее факторов. Но предварительно надо было убедиться в том, что условия руслообразования в те далекие времена были такими же, как и современные. Для этого Дьюри сравнивал плановые очертания речных долин и современных русел и их поперечные сечения. Ученому удалось установить их подобие. Это дало возможность предположить, что изучаемые речные долины — это бывшие русла некогда больших рек. Полученные Дьюри величины прежних расходов воды, атмосферных осадков и потерь стока оказались вполне реальными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Каждый может внести свой вклад в исследование деформаций речных русел и пойм

Как бы ни были успешны морфологические и гидравлические исследования руслового процесса, для его познания всегда будут требоваться все новые и новые факты, которые надо будет подтверждать на массовом материале. Да и те выводы, которые уже сделаны, только выиграют от того, что им будут находить все новые и новые подтверждения. Природа бесконечно разнообразна, и трудно предугадать, какие сюрпризы и загадки она еще преподнесет нам.

Накапливая необходимый материал, мы организовали массовые наблюдения за деформациями речных русел и пойм на реках с разными типами руслового процесса. Главная задача таких наблюдений — получение данных об этих деформациях изо дня в день, от месяца к месяцу, от года к году, в периоды с повышенной водностью и пониженного стока воды, при ледоставе и ледоходе и т. п.

Наблюдения подобного рода получили название сетевых русловых наблюдений. Они организованы на базе станций Главного управления Гидрометслужбы СССР.

В отличие от всех других видов наблюдений, обычно проводящихся в отдельных, отдаленных друг от друга створах или пунктах, русловые наблюдения производятся на целых речных участках. Ведь деформации, как читатель мог убедиться, происходят в виде смещения целостных и весьма отличных друг от друга морфологических образований — сползают гряды разных размеров и форм, развиваются излучины, тесно взаимодействующие друг с другом, образуются многорукавные русла и т. д.

Одна из первоочередных задач — накопление материала по множеству подобных образований. Поэтому участки наблюдений обычно охватывают 10—15 смежных морфологических образований — ленточных гряд, побочней, излучин, осе-

редков, разветвлений русла и т. п. Занимаясь такими большими участками, главное — изучать смещения русла реки в плане в различные по водности годы. К тому же плановые смещения русла проще всего наблюдать с помощью систематических съемок и аэрофотосъемок.

Но этого, конечно, мало: мы должны знать не только следствие, но и его причины. Поэтому нужно вести детальные исследования тех процессов, которые происходят на наиболее характерных морфологических образованиях. В этих целях на отдельных грядах, побочнях и излучинах, а также на разветвлениях русла, кроме чисто морфологических наблюдений, ведутся исследования гидравлики потока. Изучаются структура скоростного поля потока, течения на пойме, состав и количество донных и взвешенных наносов, причем особое внимание обращается на изучение деталей этих явлений, выявление особенностей строения потока. Сетевые русловые наблюдения ведутся всего каких-нибудь три-четыре года, но уже дают новый материал, новые факты, обогащая наши представления об особенностях руслового процесса.

Это только самое начало работы. К тому же таких участков, на которых ведутся сетевые русловые наблюдения, еще очень мало — всего около пятнадцати на весь Советский Союз с его тремя миллионами рек.

В этом отношении мы оказываемся примерно в таком же положении, в котором находилась гидрологическая сеть наблюдательных пунктов в 20-е годы нашего столетия. И вот тогда, для того чтобы пополнить наши знания о реках, основатель советской гидрологии и Государственного гидрологического института Виктор Григорьевич Глушков предложил применить так называемый анкетный метод накопления данных о водном режиме наших рек и озер.

В истории исследований природных ресурсов нашей страны этот метод применялся уже не первый раз. Пожалуй, наиболее широко этот метод использовал еще М. В. Ломоносов. Его анкеты охватывали огромный круг вопросов, касавшихся природы различных районов, включая животный мир, человека и его деятельность. Анкеты принесли немало интересного материала. Этот метод сыграл положительную роль и на заре развития гидрологии.

Надо сказать, что на анкеты В. Г. Глушкова откликнулись буквально десятки тысяч добровольных корреспондентов. Были получены очень интересные сведения о тех явлениях, которые происходят на реках в самых разных уголках нашей страны.

Состав добровольных корреспондентов был весьма своеобразным. Среди них оказались школьники и учителя, краеведы и охотники, сплавщики и речники. Это были люди, влюбленные в природу своего края, люди исключительно наблюдательные, умеющие сопоставлять факты, самостоятельно постигать сложные явления на реках, на которых многие из них провели всю свою жизнь.

Невольно напрашивается простая мысль: как важны при нашем относительно скудном знании деталей русловых переформирований сообщения обо всех обычных и необычных явлениях, происходя-

щих на реках и в их поймах, какую могли бы они сыграть роль в развитии теории руслового процесса, в создании новых методов его расчета и прогноза, в хозяйственном освоении рек!

Года два тому назад в Гидрологический институт приехала группа школьников из разных городов Ленинградской области, и мне пришлось проводить специальное заседание, на котором заслушивались доклады ребят об исследованиях рек и озер, выполненных ими в краеведческих кружках. Честно говоря, я не рассчитывал, что ребята из шестых и седьмых классов средней школы смогут так много сделать и так интересно рассказать о сделанном.

Сообщения, с которыми выступали школьники, не были выписками из разных книг. В них говорилось преимущественно о результатах тех работ, которые ребята проводили в дни школьных каникул на речках и озерах Ленинградской области.

Одна группа школьников исследовала зоны загрязнения сточными водами речного участка, причем обнаружила, что даже спустя пятнадцать лет после прекращения сброса сточных вод в реке сохранились следы вредных веществ, сброшенных в нее. Другая группа школьников следила за тем, как далеко из Финского залива проникает в реку рыба, идущая на нерест. Третья группа выясняла условия обитания разных видов рыб в довольно большом озере и установила, что улов данной породы рыб можно прогнозировать. Еще одна группа следила за деформациями берега на излучине реки и т. д.

Когда мне пришлось обобщать прослушанные сообщения и делать замечания по выполненным школьниками работам, я с чистой совестью мог сказать не только о научном, но и о практическом значении этих работ, которые в полной мере можно было назвать исследованиями, а также мог констатировать, что в методику этих исследований было внесено много свежего и оригинального.

И если даже наблюдения школьников оказались столь интересными, а материалов о деформациях речных русел недостаточно, то почему бы не попытаться получить необходимые данные, обратившись за помощью к добровольным исследователям?

Мне кажется, что материал, изложенный в этой книге, предоставляет широкое поле деятельности и школьникам, и студентам техникумов и высших учебных заведений.

Посмотрим, что же практически можно поручить школьникам и студентам.

Как уже говорилось, у нас очень мало сведений о подмыве берегов потоком. Ребята могли бы собирать данные о формах подмыва. Можно даже организовать специальную школьную «экспедицию» для сбора таких сведений. Экспедиция подобного рода могла бы дать ценнейший материал.

Конечно, проще всего вести работу на небольшой реке, шириной от 20—40 до 200—300 м. Здесь можно встретить разные формы переработки берега потоком даже на сравнительно небольших участках — длиной 15—20 км. Хорошо, если на реке существуют

излучины с разной степенью развитости. Это может быть река как с естественным водным режимом, так и с зарегулированным режимом (с плотинами). Важно только учитывать это обстоятельство и иметь типичный график колебаний уровня воды в исследуемой реке. Данные можно получить в местных учреждениях Гидрометслужбы СССР — в Управлении, Обсерватории, Гидрометбюро, на гидрометрических станциях. Кстати, в этих учреждениях всегда помогут и с выбором реки, и с получением уже имеющихся данных о ней.

Желательно, чтобы подмывался пойменный берег реки, а не малоподвижный склон речной долины, подходящий к реке.

Очень хорошо, если на исследуемой реке проводятся какие-либо хозяйственные мероприятия, для строительства или проектирования которых нужны сведения о деформациях русла. Это обстоятельство тоже можно выяснить в учреждениях Гидрометслужбы. Тогда работы, выполняемые школьниками, могут найти практическое применение.

В 1973 г. вышли специальные методические рекомендации по проведению русловых наблюдений, вполне пригодные для школ и техникумов. С ними тоже можно познакомиться в учреждениях Гидрометслужбы.

Сами наблюдения значительно упрощаются при наличии хотя бы грубой схемы изучаемой речки. Это может быть выкопировка из судоходной карты, схема землепользования и т. п. Если такой схемы составить нельзя, то можно ограничиться глазомерной съемкой.

Теперь поговорим о главной задаче — описание подмываемого берега. Чтобы описать такой берег, надо ответить на следующие вопросы.

1. На каком расстоянии от поворота русла находится размываемый участок берега? Какова его длина?

2. Какова высота подмываемого берега над урезом воды при низкой воде (в межень)? Если берег имеет разную высоту по длине размываемого участка, на схеме надо показать границы участков с разными высотами, проставив их значение.

3. Каков поперечный профиль берега в надводной и подводной его части? Если профили на размываемом участке берега разные, нужно дать наиболее характерные из них и указать, где именно берег имеет тот или иной поперечный профиль. Подводный участок поперечного профиля берега надо довести до наиболее глубокого места в поперечном сечении русла реки.

4. Из чего сложен берег? Нанесите на поперечные профили берега границы между различными грунтами, начиная от бровки берега до уреза воды и далее на подводной части берегового откоса. У линий, обозначающих границы различных грунтов, проставьте расстояния по вертикали от поверхности берега. Следует указать нижнюю границу дернины, почвы, супесей, суглинков, глин, илов, песков разной крупности и других грунтов. Дернина может оказаться не только у поверхности берега, но и в его толще, это так называемая погребенная дернина. Ее наличие свидетельствует

о том, что раньше берег был ниже, а потом его завалило песками или мелкими наносами, что могло произойти только при высоком половодье. Погребенную дернину не надо путать с так называемыми осовами, т. е. сползанием берега, когда глыба земли, покрытая дерном, сползает вниз по береговому откосу. В этом случае дерн оказывается расположенным ниже бровки берега.

Отличить погребенную дернину от сползающей очень просто. Погребенная дернина продолжается далеко в сторону от реки, а сползшая занимает узкую полоску, ее внешняя от реки граница упирается в грунт откоса.

Обязательно надо описать строение отложений в разрезе берега. Даже однородные отложения (супеси, суглинки, пески и т. п.) могут иметь слоистое строение. Толщина слоев может колебаться от миллиметров до сантиметров. Ее надо измерить, подсчитать число слоев, наметить границы слоев с различной толщиной. На поперечном профиле берега следует показать только границы толщ с различным числом слоев, так как из-за малой толщины этих слоев их невозможно показать в масштабе.

В описываемой толще следует отмечать наличие отложений растительных остатков и других инородных включений.

5. Каковы формы подмыва берега? Поток почти всегда оставляет следы своей работы. По ним можно судить о формах подмыва берегов. Ровный ли береговой откос по всей длине подмываемого участка и по высоте берега? Имеются ли бухточки и разделяющие их мысы по длине размываемого участка? Какова длина участков между мысами, каково расстояние между наиболее удаленной от реки точкой бухты и оконечностью мыса? Есть ли на участке овражки, прорезающие бровку берегов; каковы их размеры (длина овражка, его ширина, глубина у устья)? Нет ли трещин, параллельных берегу; какова их длина, ширина, глубина? Имеются ли террасы на береговом откосе; каковы их размеры, особенности размещения по высоте откоса и длине подмываемого участка? Нет ли ниш в откосе; где они находятся; каковы их размеры? Нет ли выходов грунтовых вод на береговом откосе, на какой высоте от уровня низкой воды или от бровки берега они находятся? Нет ли оползней на откосе; где они находятся; каковы их размеры? Нет ли осовов (сползания участков откоса с сохранением дерна); сколько их; какова их длина, ширина, высота?

Нет ли каких-либо других, кроме перечисленных, особенностей в формах берегового откоса? Опишите их и дайте представление о размерах.

6. Какова скорость течения в реке у подмываемого берега? Отвечая на этот вопрос, можно ограничиться измерением поверхностных скоростей течений поплавками. Измеряя скорость течения, важно отметить не только путь движения поплавка и скорость его перемещения, но и состояние поверхности воды, по которому можно судить о вихрях в потоке.

Что же можно увидеть на поверхности воды при отсутствии волнения?

— Гладкая поверхность. Свидетельствует о плавном обтекании потоком берега и отсутствии значительных вихрей.

— Вспучивание отдельных, округлых в плане участков водной поверхности. Это признак восходящих вихрей. Такие участки могут образовывать дорожку вихрей вдоль потока.

— Воронки на поверхности воды. Это признак нисходящих вихрей. Они тоже могут образовывать дорожки вдоль реки.

— Узкие полоски со стоячими волнами. Это признак больших скоростей течения и бурного состояния потока.

— Обратные течения. Обычно бывают за выступом берега.

— Резкие перепады поверхности воды и скоростей течения могут свидетельствовать об обтекании потоком крупных препятствий в русле

— Струи потока, расходящиеся вниз по реке, тоже свидетельствуют об обтекании потоком крупных препятствий.

Если внимательно посмотреть на поверхность воды, можно обнаружить и другие особенности состояния водной поверхности. Надо попытаться сфотографировать все перечисленные образования в потоке, определить их положение относительно берега, оценить размеры в плане. Таким образом можно получить ценные сведения об особенностях тех движущих сил, которые приводят к размыву берегов.

Как видите, все это не очень сложно. Все измерения производятся простейшими способами и фиксируются тоже достаточно просто — лучше всего с помощью фотографирования.

Если на переднем и заднем плане фотоснимка будут зафиксированы какие-то предметы (например, вешки, расстояние между которыми вам известно), такой снимок можно развернуть в план.

Удобнее всего развернуть (превратить в план) перспективный снимок, на котором засняты две вехи на переднем и две вехи на заднем плане, причем расстояние между вешками одинаково. Соединив вешки на снимке прямыми линиями, получим трапецию. Поделив каждую ее сторону на равное число отрезков, получим сетку из маленьких трапеций. Затем построим на бумаге в любом заданном масштабе сетку квадратов, число которых должно быть равным числу маленьких трапеций на снимке. Перенеся с фотографии линии контуров, заключенных в каждой трапеции, на соответствующие им квадраты, получим план местности.

Вообще на снимке всегда надо иметь изображение предметов с известными размерами, и тогда по фотографии можно получить размеры зафиксированных на ней изображений — например высоту берегов, размеры вихрей в потоке, крупность наносов и др.

Если наблюдения за деформациями берега проводятся в течение ряда лет, то можно получить очень ценные данные не только о формах размыва, но и о его размерах, и выяснить связи между водностью года и размером деформаций. При этом важно выполнять исследования на одном и том же участке, обеспечивая надежную привязку получаемых количественных характеристик к одним и тем же точкам на местности. Для этого надо проложить вдоль

берега реки магистраль, обозначив ее прочными кольями, которые могли бы сохраниться до следующего года. Все измерения в данном году и в последующие годы проводятся от этой магистральной линии: от нее замеряются расстояния до бровки подмываемого берега, к ней привязывается местоположение различных образований в русле реки, в потоке и на пойме.

Здесь приведен только один пример тех исследований, которые мог бы выполнить любой грамотный человек. Но список их можно значительно расширить. Если вас заинтересуют подобные работы, обратитесь за помощью в Отдел русловых процессов Государственного гидрологического института.

Практическое значение разработок по морфологии речных русел и пойм

Искушенный читатель несомненно обратит внимание на то, что в этой книге освещены не все проблемы, связанные с русловым процессом, а также на то, что поставленные задачи нередко сформулированы недостаточно полно, а предлагаемые решения не всегда носят завершенный характер. Однако автор хочет все же подчеркнуть, что и то, что сделано на сегодня, уже имеет практический выход.

При проектировании сооружения на реке прежде всего встает вопрос, где его разместить. В числе многих других обстоятельств надо, конечно, учитывать и то, что сооружение должно как можно меньше страдать от неблагоприятных воздействий в результате деформации русла и поймы реки. Удачный выбор места для строительства сооружения способствует его безаварийной работе в течение многих лет, помогает наметить наиболее подходящую для данных условий конструкцию проектируемого сооружения и в случае необходимости наметить такие защитные мероприятия, которые дали бы наибольший эффект при минимальных затратах.

Когда строятся так называемые массовые сооружения, например водозаборы, переходы трубопроводов, высоковольтных линий электропередачи, кабельных линий связи и т. п., то решение этой задачи — выбор места — осложняется ограниченными сроками полевых изысканий и других исследований. Это вызвано тем, что изучение местности и проектирование подобных сооружений идет практически одновременно.

Такая задача может решаться с достаточной надежностью на основе гидроморфологического анализа уже существующих материалов, а если таких материалов нет, то на основе кратковременного полевого обследования. Как неоднократно подчеркивалось, большое значение здесь имеет типизация руслового процесса, т. е. знание схем развития русла, поймы и отдельных морфологических образований в них. Изучив эти схемы и внешние признаки типов руслового процесса, не так уж сложно дать его прогноз. Конечно, при этом надо учитывать особенности конструкций и режим рабо-

ты сооружения, которое предполагается разместить на данном участке реки.

Итак, первая задача — вопрос о выборе места строительства — может быть решена уже сегодня. Решалась ли она до появления гидроморфологической теории руслового процесса? Как я уже говорил, нам пришлось просмотреть более трех десятков нормативных документов по проектированию сооружений на реках, и прямых указаний на принципы выбора места строительства мы в них не нашли.

Следующая задача — выбрать конструкцию сооружения, обеспечивающую его бесперебойную работу.

Существует много конструкций водозаборов, выпусков сточных вод, переходов трубопроводов, опор линий высоковольтных передач, которые устанавливаются на переходах через реки. Многие конструкции решены весьма остроумно, с учетом особенностей речного потока, но... к сожалению, почти нет конструкций, которые учитывали бы особенности развития руслового процесса, его типы и местные отличия.

Пришла пора подумать о том, чтобы любое возводимое на реке сооружение наиболее соответствовало бы тому типу руслового процесса, который развивается на данном участке. Тогда можно будет избежать или, по крайней мере, уменьшить число неполадок в работе сооружений на реках и в их поймах.

Чем можно помочь в разработке таких конструкций?

Наши знания о том, как развиваются деформации речных русел и пойм, могут пригодиться при составлении технических условий или, проще говоря, при формулировании требований к конструкциям любых сооружений в зависимости от типов руслового процесса.

Допустим, по каким-то причинам для сооружения не удается выбрать благоприятного места, трудно подобрать и конструкцию, которая бы надежно работала в данных условиях. Что же, значит, надо вообще отказаться от оценки руслового процесса? Вовсе нет. Как раз именно в этом случае особенно важно его учитывать, чтобы знать, что может угрожать сооружению и какие меры помогут защитить его от деформаций речного русла и поймы.

Иногда это могут быть местные мероприятия, ограничивающиеся непосредственно участком сооружения. Но очень часто такие меры оказываются малоэффективными, и тогда возникает задача стабилизации русла и поймы реки. Вопрос о стабилизации русла может встать и тогда, если на каком-либо участке реки существует несколько сооружений.

В этом случае эффективнее, надежнее и выгоднее не проводить местных защитных мероприятий у каждого сооружения в отдельности, а стабилизировать сразу весь участок реки, на котором находятся эти сооружения.

Мы столкнулись с целым рядом таких случаев. Это и участок Оки в районе Дзержинска с рядом промышленных водозаборов, и участок Оби у Барнаула, и участок Томи в районе Томска. С каждого из этих участков к нам обращались различные учреж-

дения и требовали рекомендаций по своим объектам отдельно, хотя эти объекты располагались практически рядом.

Что можно сделать в этом отношении сегодня? Используя выводы гидроморфологической теории, мы можем предсказать, какие именно мероприятия при данном типе руслового процесса дадут наибольший эффект.

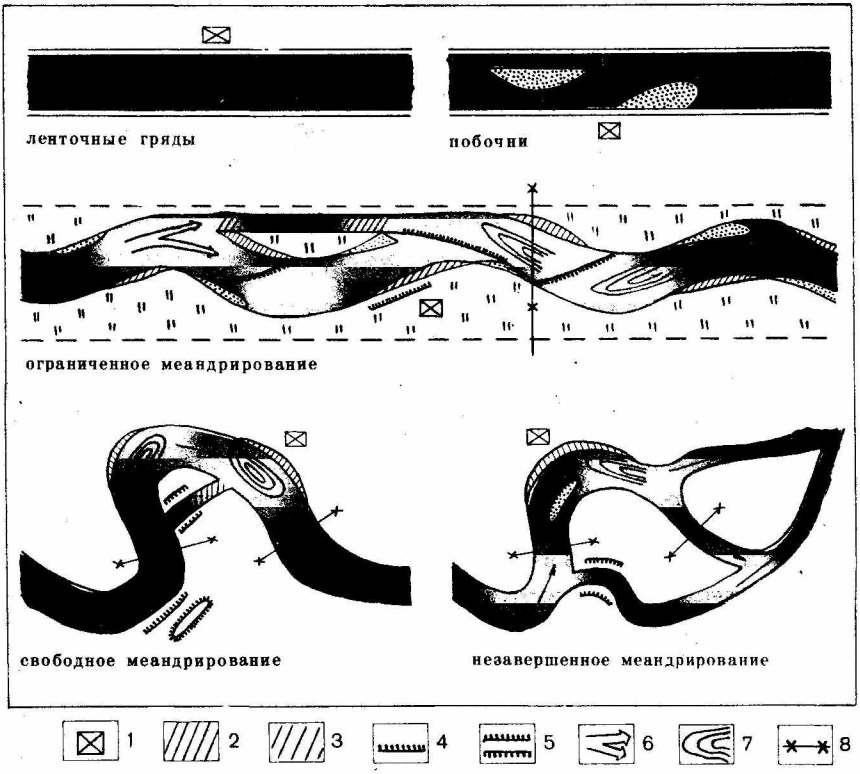
Конечно, слово «сегодня» не надо понимать буквально. Оно лишь означает, что, решая эти вопросы, мы находимся на верном пути и нужное решение будет найдено.

Какие же мероприятия по защите сооружений можно считать наиболее эффективными? Очевидно, те, действие которых в наибольшей степени согласуется с тенденциями руслового процесса, развивающегося на участке размещения того или иного сооружения, подлежащего защите.

Допустим, на интересующем нас участке реки имеется ленточногрядовый тип руслового процесса, при котором, как уже известно, основную угрозу сооружениям представляют сползающие по реке гряды. На средних и больших реках приходится считаться и с самой ленточной грядой, и с грядами-микроформами, которые могут двигаться по ее поверхности. Оба вида этих гряд будут вызывать периодические колебания отметок дна на участке сооружения, первые — большие, но более редкие, а вторые — меньшие по размерам, но более частые. Как же добиться прекращения колебания отметок дна? Если нельзя приспособить к ним конструкцию проектируемого сооружения, то, естественно, надо прибегнуть к защитным мерам с помощью специальных сооружений. Как мы знаем, тип руслового процесса можно изменить, только изменив факторы руслообразования, т. е. зарегулировав сток воды и наносов. Но подобные мероприятия могут не оправдать себя экономически. Из местных же мероприятий в таких условиях наиболее реально наметить систематические расчистки дна или строительство каких-либо руслорегулирующих сооружений, отводящих поток наносов в сторону от нашего сооружения и способствующих регулируемому размыву (намыву) дна русла около него. Это могут быть струенаправляющие дамбы, искусственные пороги и т. п.

Чтобы выбрать систему защитных мероприятий, достаточно знать длину и высоту гряд на участке и скорость их перемещения. Как получить эти данные, мы уже знаем. Однако, для того чтобы разместить защитные сооружения в русле реки и рассчитать их габариты, одних морфологических данных недостаточно. Надо знать гидравлику потока, конечно, лучше и надежнее всего — в структурных представлениях, и тогда можно будет выбрать наиболее правильное решение.

Если на участке развит побочневый тип руслового процесса, то эффект его воздействия на сооружения примерно такой же, как воздействие ленточногрядового типа. Не следует только совершать распространенную ошибку и принимать обсохший в межень побочень за устойчивый в плане выпуклый берег излучины русла. Не надо забывать, что в очередное половодье этот побочень обязатель-



Рекомендации по размещению сооружений и уменьшению скорости деформаций при разных типах руслового процесса.
1 — водозабор, *2* — места расчисток русла или спрямления, *3* — размываемые участки берега, *4* — перекаты, *5* — дамбы и участки крепления берегов, *6* — распределение расходов воды в русле, *7* — плёсы, *8* — переходы коммуникаций.

но сползет вниз по течению. При наличии побочней на реке русло ее можно стабилизировать, во всяком случае сильно замедлить движение побочней. Это задача несложная: вдоль берегового края побочня надо сделать прорезь. Тогда поток воды, омывающий побочень, раздвоится, и проходящая по прорези часть потока не будет оказывать воздействия на нижерасположенный побочень, в результате чего он замедлит свое движение. Почему об этом можно говорить с уверенностью? Да потому, что отторжение побочней часто происходит и на естественной реке, и скорость их сползания в этом случае обычно резко уменьшается.

Не раз предпринимались попытки замедлить движение побочней при помощи строительства на них поперечных запруд. Однако зачастую уже через два-три года выяснялось, что побочень еще быстрее, чем раньше, сползал вниз по течению, а запруды оставались там, где их построили, т. е. оказывались не на побочнях, а между

ними. Дело в том, что если полузапруда построена без учета движения песков в половодье, то при высокой воде ее затапливает водосливом. Вода сливается с нее с большими скоростями, и ниже запруды происходит усиленный размыв песков. Таким образом, эти сооружения не только не замедляли сползание побочня, но способствовали более интенсивному его перемещению вниз по течению.

В том же случае, если запруды размещались очень часто, побочни начинали образовываться ближе к середине русла, вдоль концов полузапруд, как это случилось на реке Висле.

При ограниченном меандрировании, кроме изменения отметок дна, особенно важно учитывать плановые деформации русла вследствие перемещения по руслу вторичных гряд и сползания самих излучин с такими их неотъемлемыми элементами, как плёсы и перекаты. Так как при этом типе руслового процесса излучины неуклонно сползают вниз по течению, то любое сооружение, размещенное на берегу или в пойме реки, рано или поздно подвергнется размыву. Об этом нужно помнить. Конечно, необходимо учитывать и скорости сползания излучин, так как может случиться, что скорости эти настолько невелики, что сооружение простоит положенный ему срок, и русло реки за это время не успеет на него надвинуться. В общем же случае сооружение следует строить в нижней части пойменного массива.

Если говорить о местных мероприятиях, то для стабилизации участка реки с ограниченным меандрированием должно быть достаточно спрямления излучины, расположенной выше той, на которой предполагается строить сооружение. Тогда, как и в случае с побочнями, будет ослаблено действие потока на встречающий его берег излучины.

Часто применяют крепление откоса берега. Но для того чтобы крепление было надежным, его следует делать капитальным, а это весьма дорогостоящее дело. Легкие же крепления легко и разрушаются. Крепление с помощью полузапруд не всегда удобно. В этом случае у оголовков запруд возникают глубокие ямы размыва, требующие очень глубокого заложения фундаментов запруд. Акватория между запрудами нередко заносится и мелеет, что для многих сооружений (водозаборы, головы отводящих или сбросных каналов и т. п.) может быть невыгодным.

В случае свободного меандрирования общая схема рассуждений, приведенная для ограниченного меандрирования, в общем остается такой же.

Однако и здесь имеется своя специфика. Для предотвращения прорывов петель русла необходимо уделить особое внимание пойме — закрытию прорв в береговых валах, креплению берегов перешейка, петель русла, устройству регулируемого спрямления.

Выбирая способ стабилизации русла при незавершенном меандрировании, также нужно исходить из особенностей руслового процесса. При незавершенном меандрировании наиболее эффективными мероприятиями будут: крепление входов и выходов протока, спрямляющего излучину,— для сохранения участков старого русла; про-

ведение местных мероприятий по ослаблению действия пойменных течений и т. д.

При многорукавных руслах (русловая и пойменная многорукавность) особое значение приобретают фрагментирование потока и русла реки, выявление тенденций развития отдельных протоков и водных узлов (узлов слияния и раздвоения и т. п.).

Как видим, знание морфологии позволяет наметить общие схемы мероприятий и оценить заранее их эффективность, а это очень важно.

И последнее, о чем хотелось бы сказать.

Автор надеется, что читатель этой книги проникнется мыслью о невозможности дальнейших исследований руслового процесса в любом направлении, в любом аспекте без знания морфологических закономерностей развития речных русел и пойм, иными словами, без учета того, что происходит на наших реках в действительности. Именно в развитии и накоплении этих знаний автор видит залог того, что методы расчета и прогноза переформирований речных русел и пойм будут давать близкие к реальным результаты, а следовательно, реки станут служить людям даже в самых неблагоприятных условиях.

Игорь Владимирович Попов

ЗАГАДКИ РЕЧНОГО РУСЛА

ИБ 544

Редактор А. А. Лущик. Художник Т. А. Баканова. Технический редактор В. И. Семенова. Корректор Л. И. Хромова.
Сдано в набор 24/XI 1976 г. Подписано к печати 8/VIII 1977 г. М-25193. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага тип. № 2. Печ. л. 10,5. Уч.-изд. л. 11,66. Тираж 50 000 экз. Индекс ПЛ-14. Заказ 7. Цена 40 коп. Гидрометеоиздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, 23. Полиграфкомбинат им. Я. Коласа. г. Минск, Красная, 23.

40 коп.



Попов Игорь Владимирович — доктор географических наук, один из ведущих специалистов Государственного гидрологического института и создателей гидроморфологической теории руслового процесса, разрабатываемой в этом институте. За свою почти сорокалетнюю научную деятельность ему довелось исследовать множество рек и заниматься самыми разными хозяйственными проблемами, возникающими при освоении рек. Работы И. В. Попова широко известны у нас в стране и за рубежом. Им подготовлено много квалифицированных специалистов в области руслового процесса.

В книге «Загадки речного русла» отражен и личный опыт автора, и опыт ряда отечественных и зарубежных ученых.

ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1977

ЗАГАДКИ РЕЧНОГО РУСЛА

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ
МАЛЕНЬКИЕ РАССКАЗЫ О РЕЧНОМ РУСЛЕ

ЧАСТЬ ВТОРАЯ
ЧТО ТАКОЕ ГИДРОМОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

Не зная законов переформирования речных русел и пойм, нельзя правильно выбрать место расположения сооружений на реках, нельзя найти их оптимальную конструкцию и надежные средства защиты, нельзя прогнозировать поведение реки даже на ближайшие несколько лет.

Автор знакомит читателя с этими законами, рассказывает о том, с какими непредвиденными осложнениями приходится сталкиваться человеку при освоении рек.