

Summary

Investigations of the ancient and recent continental slope of the Black Sea basin revealed sedimentary layers to be truncated in some sections. The thickness of the layers removed reaches a few kilometers within the Gudauty region. The authors believe the truncation results from erosive action of slumping sediments. The theory of continental slope erosion by moving sediments is developed as a modification of the general theory of erosional processes. The slumping sediment about 13 cm thick is shown to erode the slope if the latter is composed of clay. An equation is obtained which defines the process of continental slope erosion by sediments.

УДК 551.432.11

В. В. ИВАНОВ, Р. С. ЧАЛОВ

ПРЯМОЛИНЕЙНЫЕ НЕРАЗВЕТВЛЕННЫЕ РУСЛА КАК МОРФОДИНАМИЧЕСКИЙ ТИП

В большинстве классификаций речных русел [1] выделяются (с различными вариантами названий) три основных их типа вне зависимости от того, являются реки широкопойменными или врезанными: извилистые (меандрирующие), разветвленные на рукава и относительно прямолинейные, неразветвленные. Наиболее хорошо изучены первые из них, исследования которых начались по существу с самого зарождения учения о русловых процессах благодаря трудам французского инженера Л. Фарга. Начиная с конца 50-х годов много сделано в отношении познания морфологии, деформаций и типизации разветвленных русел (работы МГУ, НИИВТа). Изученность прямолинейных русел остается на очень низком уровне. В частности, до сих пор не существует достаточно обоснованных критериев отделения этого типа русел от других морфодинамических типов — меандрирующих или разветвленных.

Обычно отнесение русла в целом к прямолинейному, меандрирующему или разветвленному или выделение отдельной формы русла (прямолинейного отрезка, излучины, узла разветвления) зависит от протяженности участка. Первое, наиболее соответствующее понятию «тип русла», производится для участков рек большой протяженности и осуществляется по преобладающему распространению тех или иных форм русла. В частности, русло реки определяется на данном участке как «прямолинейное», если преобладают прямолинейные отрезки, что, однако, не исключает наличия в его пределах отдельных излучин или разветвлений. Протяженные участки, в пределах которых формы русла данного морфодинамического типа преобладают, а остальные не имеют сплошного распространения, образуя, как правило, одиночные образования, обычно рассматривают как «морфологически однородные» [1, 2]. Совокупность преобладающих элементарных форм — излучин, узлов разветвлений, прямолинейных отрезков на таких участках показывает, что под действием факторов, влияющих на взаимодействие потока и русла, возникает ведущий процесс, определяющий развитие того или иного типа русла.

В обоих случаях основой для выделения морфологически однородных участков или отдельных форм русла служат различия в плановой форме (конфигурации русла) и наличие в русле островов; разделение неразветвленных русел на меандрирующие и прямолинейные определяется их очертаниями в пла-

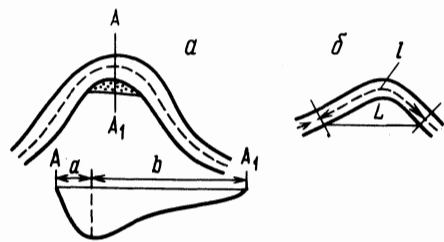
не. В зарубежной литературе для оценки этих различий обычно применяется такой количественный показатель, как извилистость русла, представляющий собой отношение длины русла к длине оси долины (в пределах рассматриваемого участка). Для прямолинейных русел верхняя граница численного значения такого показателя принимается равной 1,5 [3]. Однако это значение показателя как критическое не является физически обоснованным. Действительно, при соотношении длины русла и шага излучины (то же самое, что отношение к длине по оси долины), равном уже 1,6, излучины утрачивают гидравлическую выгодность извилистой формы и при благоприятных условиях (большая глубина затопления во время половодья пойменного сегмента) спрямляются. Если этого не происходит, то интенсивность деформаций русла при дальнейшем увеличении отношения постепенно уменьшается [4, 5]. Н. В. Попов [2] на основе статистического анализа меандрирующих русел показал, что средний коэффициент их извилистости также равен 1,6. Таким образом, значение показателя извилистости 1,5 указывает на то, что это развитая излучина, потенциально близкая к спрямлению. Иногда, учитывая это обстоятельство, границу разделения прямолинейных и меандрирующих русел опускают несколько ниже — до 1,26, а русла с пологими изгибами классифицируют как переходный тип [6]. Однако и в этом случае физического обоснования численного значения показателя как критерия не приводится. Кроме того, использование показателя извилистости для выделения прямолинейных русел как морфологически однородных участков не является критерием для типизации русла, так как его значения могут попадать в интервал, указанный выше, но прямолинейные отрезки как элементарные формы русла не являются при этом преобладающими; в таком случае относить русло на участке реки к прямолинейному типу было бы ошибочно. Неопределенность возникает также из-за того, что неясен объект оценки — отдельная излучина, их серия или морфологически однородный участок.

Показатель извилистости перестает быть формальным при его использовании для выделения морфологически однородных участков или отдельных форм русла, когда он соотносится с формой русла, т. е. результатом воздействия на него потока: каждому типу русла соответствует вполне определенная структура потока [4] — поле скоростей, циркуляционные течения и т. д., определяющие распределение в русле зон эрозии и аккумуляции наносов. Относительно прямолинейное русло как морфологически однородный участок в ряде случаев из-за местных или случайных причин может иметь в плане форму дуги, т. е. образовывать пологий изгиб. Чтобы оценить, несет ли подобный изгиб русла случайный или закономерный характер, показатель извилистости должен быть связан с некоторой характеристикой, дающей представление о наличии (проявлении) процесса меандрирования. Такой характеристикой может служить асимметрия поперечного сечения русла в районе вершины изгиба. Она может быть выражена через коэффициент асимметрии $K_{ас}$, указывающий на положение линии максимальных глубин относительно берегов (рис. 1, а): он определяется как отношение расстояния от выпуклого берега b к расстоянию от вогнутого берега a до линии максимальных глубин.

Как известно, прямолинейное течение является неустойчивой формой движения, и поток поэтому приобретает извилистую в плане форму. В деформируемом русле извилистость динамической оси потока закрепляется в форме русла только при определенных условиях. Одно из них — формирование расположенных в шахматном порядке побочней, которые огибает поток — начальная стадия процесса меандрирования [4, 5, 7]. Другое важнейшее условие — изменение эрозионной и транспортирующей способности и направленности движения наносов из-за возникновения особой кинематической структуры потока, характерной для процесса меандрирования. С момента возникновения такой структуры динамическая ось потока, а следовательно, и линия максимальных глубин, постепенно смещается в сторону одного из берегов. Это приводит к асимметрии поперечного сечения и формированию изгиба русла по мере размыва одного

Рис. 1. Зависимость коэффициента асимметрии поперечного сечения русла $K_{ас}$ от показателя кривизны русла l/L

а, б — способы определения соответственно $K_{ас} = b/a$ и величин l и L ; в — график связи $K_{ас} = f(l/L)$



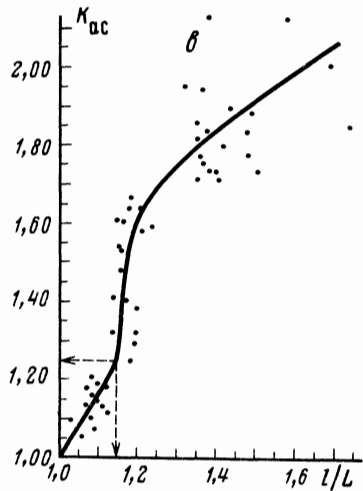
берега и наращивания, благодаря аккумуляции наносов, другого — начинается следующая стадия процесса меандрирования, когда прямолинейное русло становится извилистым. Дальнейшее изменение показателя извилистости или, что то же самое, степени развитости излучины [4] сопровождается увеличением коэффициента асимметрии поперечного профиля русла.

Для проверки этого положения на ряде рек СССР были выбраны одиночные изгибы русел, для которых определялись величины отношения длины по руслу в их пределах l к расстоянию по прямой L или шагу излучины l/L (рис. 1, б) — показатель, определяющий в меандрирующем русле степень развитости излучины, и коэффициент асимметрии поперечного сечения $K_{ас}$, который вычислялся как среднее из суммы частных коэффициентов.

В результате была получена зависимость изменения коэффициента асимметрии поперечного сечения $K_{ас}$ от степени развитости излучины русла l/L (рис. 1, в). Анализ ее показывает, что при изгибе с соотношением l/L более 1,15 даже небольшое увеличение показателя извилистости сопровождается резким ростом коэффициента асимметрии. По-видимому, это значение является пороговым для возникновения процесса меандрирования. Участки с изгибами, для которых отношение длины по руслу к длине по прямой меньше, чем 1,15, можно считать морфологически относительно прямолинейными. Увеличение l/L с 1,15 до 1,25 приводит к росту коэффициента асимметрии с 1,25 до 1,65, после чего на графике наблюдается большой разброс точек. По-видимому, достигнув такой кривизны, излучины начинают развиваться по-разному в зависимости от конкретных условий — литологии берегов, взаимоотношения с пойменными потоками в половодье, положения среди смежных излучин и т. д.

У прямолинейных и разветвленных русел плановые формы (в пределах береговых бровок) могут совпадать. В таком случае разделение русел обычно проводят по степени их разветвленности. В литературе степень разветвленности русла описывается с помощью показателя, оценивающего количество островов, приходящихся на единицу длины русла [8, 9]. При этом принято иногда считать [9], что русло не является разветвленным, если этот показатель меньше 1. Недостатком предложенного показателя как критерия является отсутствие определения рассматриваемого участка (является ли он формой русла, морфологически однородным участком, его длина и т. д.). Например, при наличии цепочки островов, удаленных друг от друга на расстояние, превышающее принятую единицу длины русла, численное значение показателя разветвленности может оказаться меньше 1, хотя участок характеризуется закономерной гидравлической структурой потока, соответствующей разветвленным руслам.

Некоторыми исследователями [6] деление русел на разветвленные и неразветвленные проводилось по различиям площадей, занимаемых островами.



Русло считалось неразветвленным, если площадь разветвлений (острова или островов) не превышала 5% от общей площади русла в пределах рассматриваемого участка. Используя этот критерий (как и предыдущий), невозможно оценить, является ли разветвление одиночной самостоятельной формой русла в пределах морфологически однородного прямолинейного участка или представляет собой форму второго порядка по отношению к прямолинейному отрезку русла, если на реке развита иерархия вложенных друг в друга русловых форм [10].

Основная причина образования разветвлений — возникновение в русле осередков, которые впоследствии покрываются растительностью и превращаются в пойменные острова [4, 5, 11]. Образование осередков в русле может носить случайный или закономерный характер. В первом случае они формируются в местах возникновения отдельных препятствий на пути потока. Во втором — их образование определяется гидравлической структурой потока, наличием в нем нескольких динамических осей, возникающих при значительной расплывчатости русла, блужданием динамической оси потока, сопровождающемся отторжением побочной от берегов, развитием крупных гряд — макроформ руслового рельефа в виде осередков. Сформировавшиеся осередки в свою очередь подобно побочным при развитии меандрирования влияют на структуру потока; поэтому развивающиеся на их основе острова характеризуются закономерным соотношением линейных размеров. Форма острова и его линейные размеры в свою очередь влияют на гидравлическую структуру потока [4, 12], что подтверждено экспериментальными исследованиями [13]. Наименьшее общее сопротивление, создаваемое островами потоку, отмечалось при их каплевидной форме, когда соотношение между линейными размерами (отношение длины острова l к его ширине b) принимало значения 3,5—4. При меньших значениях этого соотношения увеличение сопротивления происходило за счет сопротивления формы, при больших — за счет сопротивления трения. В первом случае при минимальных значениях l/b , когда создается сопротивление формы, идет развитие излучин рукавов; во втором, отвечающем максимальным значениям l/b , происходит увеличение потерь энергии по длине за счет сопротивления трения, т. е. идет удлинение острова.

В результате конфигурация и размеры островов, наблюдаемых в естественных условиях, могут быть весьма разнообразными. Если русло разветвленное, то возле острова всегда происходит увеличение ширины русла, а вызываемый островом изгиб потока обуславливает разрыв противоположного острову берега. Эти обстоятельства вызывают образование специфической структуры потока на всем протяжении узла разветвления — от места деления потока до слияния рукавов. Очевидно, если образование острова не сопровождается подобным изменением структуры потока, то русло следует относить к прямолинейному типу, а соответствующее ему разветвление — к русловой форме второго порядка.

Было проведено исследование изменения ширины русла в пределах участка с одиночными островами при различных соотношениях их линейных размеров. На ряде рек СССР были выбраны относительно прямолинейные участки с одиночными островами, линейные размеры которых сильно варьировали. Для каждого острова определялись его длина l и ширина b . Изменение плановых форм русла в узле разветвления фиксировалось с помощью показателя B/B_{cp} , где B — максимальная ширина русла между бровками берегов в узле разветвления (суммарная, вместе с островами); B_{cp} — средняя ширина русла на прилегающих прямолинейных неразветвленных участках. Полученные данные позволили построить график изменения ширины русла в зависимости от соотношения l/b (рис. 2). Минимум функции, соответствующий отсутствию расширения русла в узле разветвления ($B/B_{cp} = 1$), наблюдается при значениях $l/b = 3,5—4,0$. Левая и правая ветви графика, за исключением области минимальных значений B/B_{cp} , указывают на различия форм развития острова. В обоих случаях при типизации участок с одиночными узлами разветвления не может рассматри-

Рис. 2. Изменение ширины русла $B/B_{\text{ср}}$ в одиночных узлах разветвления в зависимости от размеров островов l/b

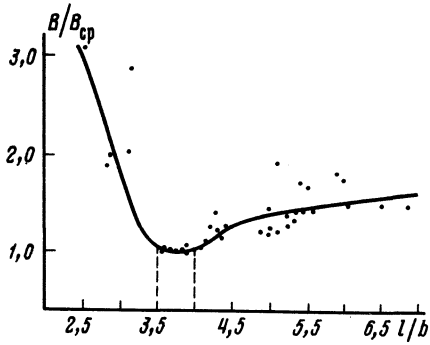
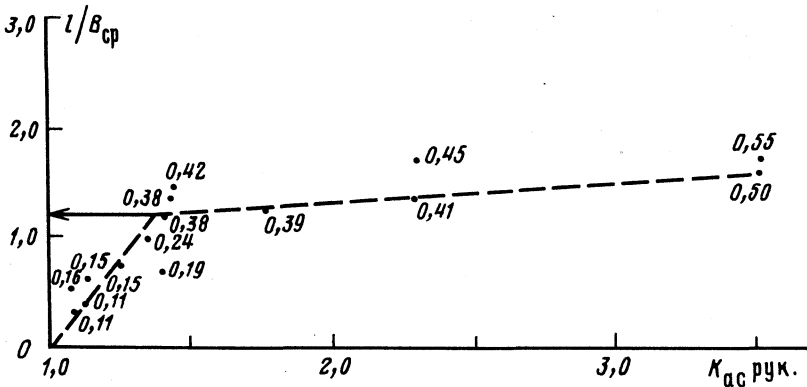


Рис. 3. Зависимость соотношения длины островов и ширины русла на неразветвленных участках $l/B_{\text{ср}}$ с размерами островов и коэффициентом асимметрии поперечного сечения русла рукава $K_{\text{ас р.к.}}$



ваться как морфологически однородный с прямолинейным. При минимуме функции $B/B_{\text{ср}} = f(l/b)$ можно предположить, что разветвления являются формой второго порядка по отношению к прямолинейному руслу, так как остров не оказывает сколько-нибудь заметного сопротивления движению потока.

В то же время одна конфигурация островов не является достаточной для оценки морфологической однородности одиночного разветвления с прилегающими прямолинейными участками (или, что то же самое, отнесение узла разветвления к первому или второму порядку русловых форм). Линейные размеры острова и его положение относительно оси русла могут создать предпосылки для изменения структуры потока как в самом узле разветвления, так и на некотором расстоянии выше и ниже по течению. Если разделение русла не симметрично или скорости течения справа и слева от оголовка острова неодинаковы, возможен перекося водной поверхности в сторону одного из рукавов, что приводит к возникновению поперечных циркуляционных течений и увеличению количества наносов, поступающих в этот рукав [4, 13, 14]. Перекося водной поверхности может возникать и при симметричном положении островов, но в этом случае формирование циркуляционного течения будет зависеть от угла, образуемого потоком при обтекании оголовка острова. Этот угол в свою очередь зависит от линейных размеров острова — чем больше его ширина, тем больше угол; при меньшей ширине угол меньше и меньше вероятность образования циркуляционного течения и изменения скоростного поля потока.

Наличие циркуляционных течений приводит к формированию изгиба динамической оси потока по крайней мере в одном из рукавов и, при достаточном количестве поступающих наносов, отражению этого изгиба в форме поперечного сечения его русла — возникает асимметрия последнего. Естественно, что в данном случае считать одиночное разветвление морфологически однородным с соседними прямолинейными неверно; оно представляет самостоятельную форму русла.

Для выявления различий между узлами разветвления как формы русла и прямолинейных участков с разветвлением второго порядка был проведен следующий анализ. На ряде рек СССР были выбраны участки одиночных разветвлений с соотношением линейных размеров островов, соответствующих минимуму общего сопротивления, т. е. с $l/b=3,5-4$. Для каждого острова были определены его ширина B и длина l . Влияние порядка реки на линейные характеристики островов исключалось рассмотрением их в безразмерном виде — $l/B_{\text{ср.}}$, $b/B_{\text{ср.}}$, где $B_{\text{ср.}}$ — средняя ширина русла на смежных неразветвленных прямолинейных участках. Для выявления возможности меандрирования одного из рукавов определялась асимметрия поперечного сечения рукава — коэффициент его асимметрии $K_{\text{ас. рук.}}$. В данном случае этот коэффициент определялся, как отношение расстояния от острова, образующего выпуклый берег, и расстояния от вогнутого берега рукава до линии максимальных глубин; расчет производился по створу максимальной ширины острова, что соответствует вершине излучины рукава. По полученным данным был построен график изменения $K_{\text{ас. рук.}}$ в зависимости от значений относительных размеров островов (рис. 3). График показывает, что резкое нарастание коэффициента асимметрии происходит при значениях $l/B_{\text{ср.}}=1,20-1,30$, что соответствует относительной ширине острова $b/B_{\text{ср.}}=0,35-0,40$. Это позволяет сделать вывод, что рукава возле одиночного острова, создающего минимум гидравлического сопротивления потоку и имеющего ширину до 40% от средней ширины русла, не образуют изгиба, в котором создается соответствующая ему структура потока; в этом случае разветвление можно рассматривать как форму второго порядка в прямолинейном русле. При превышении этой величины в рукавах может начаться процесс меандрирования, что повлечет за собой изменения плановой формы русла. Такой участок следует относить тогда к разветвленному.

Полученные критерии разделения прямолинейных русел от других типов позволяют сформулировать определение относительно прямолинейного русла: *прямолинейным руслом следует считать участки рек с относительно прямолинейными берегами, включающие отдельные пологие изгибы и небольшие острова, не вносящие устойчивого изменения в структуру потока и не вызывающие ее изменений по всей ширине русла.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чалов Р. С. О классификации речных русел // Геоморфология. 1980. № 1. С. 3—16.
2. Попов И. В. Деформация речных русел и гидротехническое строительство. Л.: Гидрометеоздат, 1965. 328 с.
3. Leopold L. B., Wolman M. G. River channel patterns: braided, meandering, straight // US Geol. Survey. 1957. 282-B. P. 1—85.
4. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 346 с.
5. Чалов Р. С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
6. Trent R. E., Brown S. A. An overview of factor effecting river stability // Transport Res. Rew. 1984. N 3. P. 156—163.
7. Знаменская Н. С. Донные наносы и русловые процессы. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 190 с.
8. Беркович К. М., Чалов Р. С. О развитии русел рек, разветвленных на рукава (на примере среднего и верхнего течения р. Оби) // Вестн. Моск. ун-та. География. 1973. № 4. С. 55—60.
9. Rust B. R. Sedimentation in an arid-zone anastomistic fluvial system. Cooper Creek Central Australia // J. Sediment. Petrol. 1981. N 3. P. 121—128.
10. Чалов Р. С. Факторы русловых процессов и иерархия русловых форм // Геоморфология. 1983. № 2. С. 16—26.
11. Ржаницин Н. А. Руслоформирующие процессы рек. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 263 с.
12. Baker V. R. Erosional processes in chanelized water flows on Mars // J. Geophys. Res. 1979. N 84. P. 7985—7993.
13. Kotar P. D. Indeces of flow asymmetry in natural streams: difinition and performance // J. Hydraul. 1984. N 73. P. 1—19.
14. Проектирование судовых ходов на свободных реках / Ред. Н. И. Маккавеев // Труды ЦНИИ экономики и эксплуатации водного транспорта. 1964. Вып. 36. 203 с.

Summary

Hydrological and morphological criteria are established to distinguish straight unbraided channels from meandering and braided ones. Straight channels are shown to occupy a certain position within the channel forms hierarchy, and good grounds are given for including them into the morphodynamic classification as a specific type of channels.

УДК 551.4(571.661)

Ю. А. НАУМОВ

О МОРФОЛИТОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ И ФОРМАХ РЕЛЬЕФА ПЕНЖИНСКОЙ ГУБЫ

Примечательная особенность Пенжинской губы — самые высокие (до 14 м) приливы среди всех морей СССР. Если же учесть высокую активность волнового режима Охотского моря, то становится понятным отнесение Пенжинской губы к заливам, где мощность энергии волноприливного поля достигает наивысших значений, а приливный тип морфолитогенеза проявляется наиболее ярко [1].

До последнего времени крайне малая изученность пенжинского шельфа препятствовала решению целого ряда вопросов [2, 3]. Только широкий комплекс геолого-геофизических работ, выполненных объединением «Дальморгеология» в 1986—1987 гг. в северной половине губы, позволил получить значительный по объему фактический материал, который и был положен в основу данной статьи. Проведенные работы включали бурение с судна по всей северной акватории губы и, на отдельных участках, детальное бурение с плавучих буровых установок, а также непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСП), эхолотирование, каппаметрию, радиометрию, гидромагнитную съемку, гидролокацию бокового обзора и маршрутные исследования.

Доминирующий фактор, определяющий направленность и мощность морфолитодинамических процессов Пенжинской губы, — приливо-отливные колебания. Наблюдения над динамикой приливов между полуостровами Елистратова и Маметчинским показали, что во время полусуточного цикла максимальная скорость течения на глубине 15 м достигала 1,65 м/с, во время действия суточного прилива 2,06 м/с, минимальные скорости составляли 0,05—0,1 м/с. Заметное берегоформирующее влияние имеет и ветровое волнение. Наиболее часты шторма осенью, когда доля волнений в 6—7 баллов составляет 5—10%, а повторяемость волнений до 3 баллов 20—35%. Крутые волны образуются при встречных приливах или отливах и средней силе ветра. Следует отметить суровый ледовый режим Пенжинской губы. По средним многолетним данным, уже в первой декаде ноября вся северная половина губы покрывается дрейфующим льдом и очищается от него лишь к концу мая.

Наиболее эффективно воздействие волноприливного фактора на берега и шельф в северо-западной части Пенжинской губы — области неотектонического опускания отдельных блоков. Последнее способствовало особенно быстрому наступлению моря на побережье, интенсивному разрушению слагающих его рыхлых комплексов и созданию условий для зарождения достаточно мощных потоков наносов, сильно различающихся по направлению движения, наносодвижущей силе и фракционному составу самих наносов (рис. 1).