

ДИНАМИКА ГРЯДОВОГО РЕЛЬЕФА РУСЛА Р.НИГЕР



А.Ю.Сидорчук

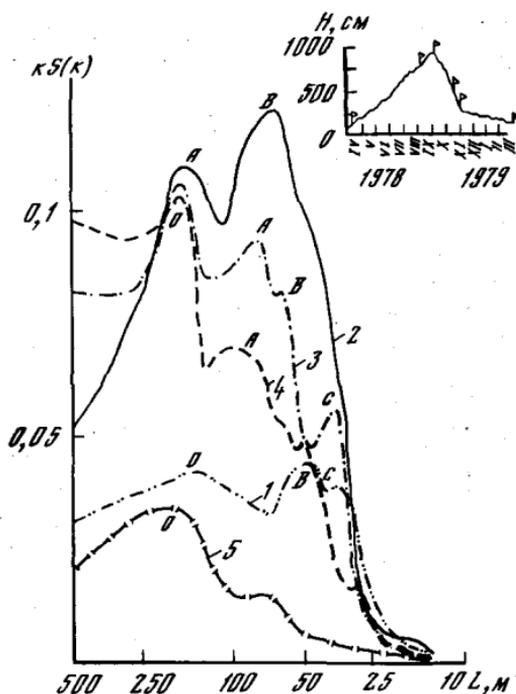
Нигер – третья по величине река Африки: ее длина 4100 км, площадь водосбора 2092 км², годовой сток воды 180 км³ и сток наносов 40 млн. т. В 1978–1979 гг. русло Нигера было исследовано экспедицией в/о "Тяж-промэкспорт" на участке Герегу–Аджакута (440–420 км от порта Варри) с целью выбора площадки для промышленного водозабора металлургического комбината. Проведены измерения уровней, уклонов водной поверхности, расходов воды и наносов, отбор проб донного грунта, промер глубин по закрепленным поперечным и продольным профилям /1/. Гидрологический режим Нигера характеризуется отчетливо выраженными половодьем (около 8 месяцев) и меженью. В 1978 г. подъем уровня воды начался в апреле,

интенсивность подъема составила 2,3-5,4 см/сут, увеличение расходов воды до $200 \text{ м}^3/\text{с}$ за сутки. Пик половодья пришелся на 25.09-07.10.78, максимальный подъем уровня составил 8 м (36,6 м абс.), расход воды - $16800 \text{ м}^3/\text{с}$ (год 90%-ной обеспеченности). Спад уровней воды в октябре-декабре шел со скоростью 6-12 см/сут, при уменьшении расходов воды до $400 \text{ м}^3/\text{с}$ за сутки. С января 1979 г. установилась межень с минимальным уровнем воды 28,9 м абс. и расходом воды $730 \text{ м}^3/\text{с}$. Уклон водной поверхности во время половодья составил 0,1-0,14‰, в межень - 0,006-0,017‰. Средние по вертикали скорости на оси потока изменялись соответственно от 1,2-1,7 м/с до 0,4-0,8 м/с. Во время половодья дно было сложено средне- и крупнозернистыми песками с гравием средним размером 0,7-0,9 мм. По мере понижения уровня воды в глубоких плесах происходило заиление донных отложений, на мелководных плесах и на отмелях формировалась отмостка из гравия.

Русло Нигера на исследованном участке образует пологую врезанную излучину, осложненную крупными, затопляемыми только в самые высокие половодья, островами. В образованной ими системе сопряженных рукавов мелководные второстепенные рукава функционируют только в высокую воду, забирая не более 10-12% расхода воды. В верхней части основного рукава у о.Маконоки расположен массивный стационарный побочень, вдоль которого проходит глубокий плес. В нижней части (около о.Бокуа) основной рукав разбит на короткие и неглубокие плесовые ложины и побочные протоки небольшими подвижными побочнями и осередками.

При осмотре отмелей, анализе батиметрических карт и эхограмм выявлено три главных типа донных гряд: заструги, дюны и рифели. По характерным перегибам функции спектральной плотности отметок дна реки /3/ заструги и дюны отнесены к структурному уровню микроформ, а рифели - к структурному уровню ультрамикроформ.

Заструги представляют собой двумерные гряды, поверхность которых покрыта дюнами и рифелями. Длина и высота заструг зависят от удельного руслоформирующего расхода воды и составляют на участке Нигера от пос.Герегу до пос.Аджакута 170-300 м и 0,5-1,5 м соответственно. Изменение размеров заструг при изменении водности реки в течение гидрологического года изучено повторными промерами дна на закрепленном продольнике М по неглубокой плесовой ложине. Для уменьшения степени субъективизма ряды отметок дна подвергнуты спектральному анализу (рис.1). На функциях спектральной плотности отметок дна $\kappa S(\kappa)$ выделена область первого максимума, соответствующая застругам. Она ограничена волновыми числами κ_1 и κ_2 , соответствующими двум первым минимумам функции. Длины заструг L_3 определены по волновому числу κ_3 , соответствующему максимуму величины $\kappa S(\kappa)$ в этой области. Высоты заструг A_3 вычислены по доли дисперсии ряда, относящейся к этой области: $A_3 = 2,0 \sqrt{\int_{\kappa_1}^{\kappa_2} S(\kappa) d\kappa}$. Сложившиеся при подъеме половодья длины заструг практически не изменяются с уменьшением расхода воды и уро-



Р и с. I.

Главные типы гряд на функциях спектральной плотности $S(k)$ отметок дна русла: заструги (0); двумерные дны (A); трехмерные дны (B, C)

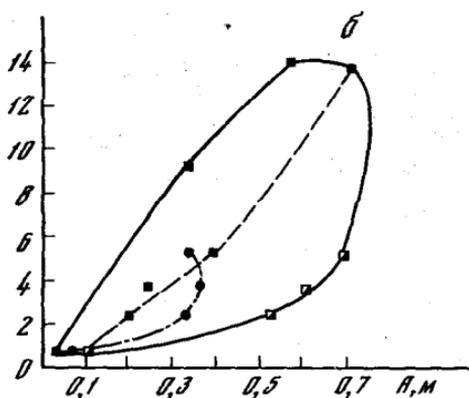
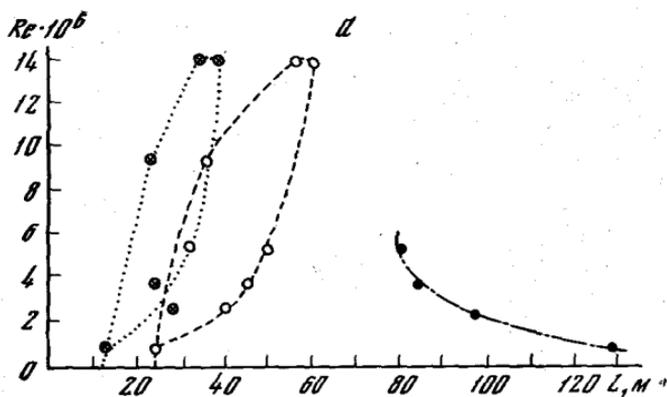
I - 31.08.78; 2 - 07.10.78;
3 - 09.11.78; 4 - 28.11.78; 5 -
11.04.79

вней. Высоты заструг увеличиваются на подъеме и на пике половодья, во время спада остаются практически постоянными, и лишь в конце спада и во время межени, когда средние глубины воды в плесе становятся меньше 4,0 м, заструги начинают расплываться. В то же время существенные изменения претерпевает форма заструг: из симметричных гряд с пологими выпуклыми откосами они становятся резко асимметричными. Верховой откос выполаживается, становясь практически горизонтальным, длина его приближается к шагу заструг. Крутизна низового склона заструги достигает угла внутреннего трения - $33-35^\circ$. Скорость смещения заструг вниз по течению на пике половодья достигает 4,5 м/сут, на спаде половодья - 2,3 м/сут, в межень - 0,3 м/сут.

Дно представляет собой наиболее отчетливо выраженный элемент микрорельефа русла нижнего Нигера. Их морфология на подъеме и пике половодья однозначно определяется местным удельным расходом воды (или местной глубиной). Так, для подъема и пика половодья 1978 г. высоты дна, осредненные по метровым интервалам глубин, связаны с глубиной зависимостью $A_g = 0,12H + 0,27$. Свободный член соответствует остаточным высотам дна на обсохших отмелях. На спаде половодья в русле нижнего Нигера по характеру трансформации дна выделяются две области. I. Область замедленной трансформации дна, совпадающая с наиболее глубокими плесами, где глубины даже в межень превышают 7,0 м, а значения чисел Re более $6 \cdot 10^6$. С уменьшением расходов воды и всех гидравлических характеристик потока в этой области остаются неизменными не только средние высоты и длины дна и вид кривых распределения

для них, но и форма отдельных днн. 2. Область неравномерной трансформации днн, совпадающая с неглубокими плесами и большей частью площади побочней и осередков. Здесь в начале спада половодья, когда глубины больше 5-7 м, а $Re > (5+6) \cdot 10^6$, трансформация днн замедлена. По мере уменьшения расходов воды и снижения уровней в диапазоне глубин потока 7-7,5 м и чисел $Re (1,5+6,0) \cdot 10^6$ происходит ускоренная трансформация днн - высоты и длины их уменьшаются почти в два раза быстрее, чем увеличивались на подъеме половодья. В диапазоне глубин 0+2,5 м при числах $Re < 1,5 \cdot 10^6$ скорость трансформации днн при понижении уровня такая же, как и при его повышении. На подъеме, пике и в период замедленной трансформации на спаде паводка днн трехмерны - их ширина практически равна шагу. На функциях спектральной плотности днн соответствуют два характерных ловальных максимума - В и С. В-максимум соответствует шагу днн, С-максимум связан с асимметрией днн. Ему соответствует длина волны в 1,5-1,6 раза меньшая, чем В-максимуму. Доля дисперсии ряда отметок глубин, приходящаяся на зону спектра, соответствующую С-максимуму, невелика (относительно В-максимума) на пике половодья; увеличивается на подъеме и спаде. Соответственно, трехмерные днн на пике половодья часто практически симметричны, с выпуклыми и пологими ($I4-I6^0$) верховым и низовым откосами. На подъеме и в начале спада половодья степень асимметрии трехмерных днн, характеризуемая отношением заложений низового L_n и верхового L_s откосов, увеличивается: среднее значение $L_n/L_s = 0,67$. Скорость перемещения трехмерных днн в этот период составляет 5-12 м/сут и хорошо описывается формулой /4/.

Период ускоренной трансформации днн характеризуется появлением новой категории гряд - двумерных днн. Они возникают в результате дифференцированного развития трехмерных днн при понижении уровня воды: у днн с большой высотой она не изменяется или даже увеличивается, а у днн с небольшой высотой, особенно у расположенных в подвалах больших днн, высота быстро уменьшается. В результате несколько соседних днн сливаются в одну двумерную. По мере уменьшения уровня воды в процесс слияния вовлекается все больше трехмерных днн (рис.2). Шаг двумерных днн увеличивается от 1,6 шага трехмерных днн в начале периода ускоренной трансформации до 10 и более в его конце. Высота двумерных днн (доля дисперсии в диапазоне соответствующих им длин волн) меньше высоты трехмерных днн в начале периода ускоренной трансформации, в середине периода она заметно увеличивается и превосходит высоты трехмерных днн, в дальнейшем уменьшается медленнее, чем высота трехмерных днн. Трехмерные днн, таким образом, не исчезают полностью во время образования двумерных днн. В соответствии с уменьшением местного удельного расхода воды они становятся положе, ниже, короче, однако сохраняют довольно симметричный продольный профиль - $L_n/L_s = 0,7-0,8$. Трехмерные днн продолжают активно смещаться вниз по течению со ско-



Р и с. 2.

Изменение размеров дон при прохождении волны половодья

а - длины трехмерных дон С-пика (1), В-пика (2) и двумерных дон А-пика (3); б - высоты двумерных (3) и трехмерных дон (4); суммарная высота дон (5)

ростями 2,7-3,5 м/сут по верховому откосу двумерных дон. Двумерные донья в этом отношении являются пассивными формами руслового рельефа. У них пологий верховой откос, крутой (соответствующий углу внутреннего трения) низовой, $L_n/L_v = 0,05-0,1$. Они смещаются вниз по течению со скоростью 1,5-2,5 м/сут в основном за счет наращивания низового откоса материалом трехмерных дон.

Рифели - наиболее мелкие формы в русле Нигера. Их длина изменяется от 1 до 8 м, высота - от 0,1 до 0,3 м. Рифели покрывают большую часть русла реки, не выражены только в областях, где скорости потока меньше размывающей, т.е. в зонах заиления и в подвальях крупных гряд. Размеры рифелей более сильно реагируют на изменения гидравлических характеристик потока. Шаг рифелей практически равен шагу самых малых энергонесущих турбулентных вихрей с размерами порядка глубины потока H . Шаг вихрей L_{ax} из соображений подобия предполагается равным $L_{ax} = (u')^3/\varepsilon$, где u' - величина пульсаций скорости, $\varepsilon = \bar{u}gJ$ - поток диссипации энергии. Для величины u' можно применять $u' = 4,0u_* / \sqrt{2}$. Тогда шаг вихрей $L_{ax} = 4,0\sqrt{2}gH^3/\bar{u}$. По структуре это выражение напоминает формулу /2/, выведенную из близких предпосылок. Высота рифелей A_p в первом приближении прямо связана с кинетичностью потока.

Сложное сочетание гряд с разной высотой, крутизной и тенденцией развития в разные фазы гидрологического режима приводит к сложной картине изменений общего гидравлического сопротивления русла Нигера с изменением уровня воды (или числа Re). Коэффициент сопротивления λ уменьшается с ростом числа Re в конце подъема уровней в половодье и достигает минимальных значений на пике половодья. В это время все гряды имеют максимальную высоту, и относительная глубина не превышает значения, характерного для периода подъема уровней ($H/A_0 \approx 17$), но, видимо, не все типы гряд одинаково участвуют в формировании общего гидравлического сопротивления. Наибольшая крутизна свойственна рифелям (A_p/L_p достигает 0,08). В их подвальях образуются присоединенные вихри, которые отрываются от придонной области и всплывают на поверхность потока, формируя изометрические бугры диаметром 4-5 м, часто с обратными течениями. В подвальях трехмерных дон, симметричных и пологих ($A_0/L_0 \approx 0,03$), непосредственными измерениями скоростей и направлений течений присоединенных вихрей не обнаружено. Вероятно, дюны и застрugi не оказывают в это время сопротивления формы, лишь несколько увеличивая сопротивление по длине. Доля диссипации энергии на единицу длины от кинетической энергии потока ε/E составляет не более $3 \cdot 10^{-4}$.

В период замедленной трансформации дон и заструг на спаде половодья с уменьшением глубин потока увеличивается относительная высота этих типов гряд, растет их асимметрия. Соответственно увеличивается гидравлическое сопротивление. Максимум оно достигает в конце периода замедленной трансформации дон, при значениях $Re = 6 \cdot 10^6$, когда λ составляет 0,01-0,018, а $\varepsilon/E = (6 \pm 14) \cdot 10^{-5}$. В конце спада половодья и в межень, в период ускоренной трансформации дон, сопротивления русла уменьшаются. Однако это объясняется не изменением относительной глубины потока (H/A_0 в это время $\approx 5-7$, т.е. меньше, чем на пике половодья), а уменьшением роли рифелей в сопротивлении русла. В конце спада и во время межени размеры рифелей в основном уменьшаются, в заиленных подвальях группных гряд они вообще исчезают. Главный вклад в сопротивление русла начинают вносить асимметричные двумерные дюны и застрugi, в подвальях которых ниже крутого откоса появляются присоединенные вихри значительной протяженности. Коэффициент сопротивления λ составляет в этот период 0,001-0,0025, доля диссипации энергии на единицу длины $\varepsilon/E = (0,9 \pm 4) \cdot 10^{-4}$.

Приведенные закономерности трансформации грядового рельефа русла не являются универсальными. Они полностью определяются величинами руслоформирующих расходов воды, формой гидрографа и характером донных грунтов Нигера. В иных природных условиях закономерности изменения морфологии гряд будут другими. Так, в низовьях Терека гряды из мелкопесчаного аллювия перестраиваются гораздо быстрее при большей скорости изменения гидравлических характеристик потока. По-видимому, только

для размеров рифелей в естественных потоках можно подобрать универсальные зависимости от гидравлических характеристик потока. Трансформация более крупных гряд - дюн, заструг и т.п., и создаваемые ими гидравлические сопротивления определяются широким набором природных характеристик и требуют географического изучения.

Л и т е р а т у р а

1. Беркович К.М., Лодина Р.В., Сидорчук А.Ю. Русловой режим р.Нигер в районе сооружения металлургического завода у г.Аджакута. - В кн.: Эрозия почв и русловые процессы, 1983, вып.9, с.127-145.
2. Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 311 с.
3. Сидорчук А.Ю. Структура рельефа речного русла. - Вестн. МГУ. Сер. геогр., 1984, № 2, с.17-23.
4. Смищенко Б.Ф., Копалиани З.Д. О скорости движения гряд в реках и лабораторных условиях. - Тр. ГТИ, 1978, вып.252, с.30-37.