

К. М. БЕРКОВИЧ, А. Ю. СИДОРЧУК 

ДИНАМИКА РУСЛОВОГО РЕЛЬЕФА НИЖНЕГО НИГЕРА

В национальных программах развития хозяйства стран Африканского континента большое внимание отводится освоению гидроэнергетических ресурсов, ирригационному строительству, улучшению судоходных условий и использованию воды для промышленных и бытовых нужд. Для функционирования гидротехнических сооружений необходимо знание как естественного руслового режима рек, так и взаимного влияния работы гидротехнических сооружений и руслового процесса. Однако русловой режим многих, даже крупнейших африканских рек мало исследован, а при составлении проектов сооружений в руслах рек и на пойме его изучению часто уделяется недостаточное внимание.

Русловой процесс на Нигере ниже впадения в него р. Бенуэ в последнее время привлекает большое внимание. Это связано с началом реализации в Федеративной Республике Нигерии трех крупных проектов: 1) плотины и водохранилища гидроэлектростанции «Локоджа»; 2) металлургического завода у г. Аджакута, часть территории которого будет расположена на пойме реки, а водозаборные и водоотводящие сооружения — в русле; 3) землечерпательных и выправительных работ на протяжении всего нижнего Нигера для улучшения условий судоходства. Кроме того, здесь намечаются строительство речного порта, разработка карьеров в русле реки для добычи строительных материалов, сооружение мостов. Из всех перечисленных проектов лишь для комплексов металлургического завода, проектируемого советскими специалистами, были проведены подробные русловые исследования. Их осуществляли сотрудники Проектного и научно-исследовательского института инженерного строительства Госстроя СССР и Проблемной лаборатории эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ при участии авторов. В настоящем сообщении на основании проведенных нами русловых изысканий на 60-километровом участке реки ниже устья р. Бенуэ и материалов Нигерийского управления внутренних водных путей даются характеристика естественного руслового режима реки и оценка его вероятных изменений под влиянием водохранилища ГЭС «Локоджа».

Река Нигер — крупнейшая река Западной Африки. Ее длина 4160 км, площадь бассейна 2092 тыс. км², объем годового стока 180 км³, твердый сток — 40 млн. т наносов в год. Годовой сток основного притока р. Нигера — р. Бенуэ при длине

1400 км и площади бассейна 337 тыс. км² составляет 100 км³, а сток наносов ~25 млн. т [5].

Водный режим нижнего Нигера складывается под совместным влиянием верхнего Нигера и Бенуэ, различающихся по срокам наступления и продолжительности фаз гидрологического режима. Начало подъема уровней воды на нижнем Нигере приходится на май (как и в бассейне Бенуэ), но особенно интенсивное нарастание водности характерно для июля-августа, когда одновременно на верхнем Нигере и Бенуэ происходит подъем уровня воды. Половодье растягивается на 1—2 месяца (сентябрь-октябрь), иногда выделяются два его максимума. Максимальный расход половодья у г. Локоджи за период 1957—1978 гг. достиг 27140 м³/с (1969 г.), средний за этот период максимальный расход воды равен 21100 м³/с. Спад уровней воды происходит в ноябре-декабре, вначале очень быстро (в 1,5—2 раза быстрее, чем подъем), затем темпы его снижаются. В январе начинается меженный период, водность реки при практически полном отсутствии дождей в бассейне поддерживается подземными водами (в основном из бассейна р. Бенуэ) и водами так называемого черного паводка, который формируется во время влажного сезона в верховьях Нигера и, пройдя область внутренней дельты в засушливой зоне сахельской саванны, достигает нижнего течения реки в январе — марте. С середины 70-х годов произошло некоторое увеличение меженных расходов воды за счет регулирующего влияния водохранилища ГЭС «Каинджи», расположенного в 975 км от устья. В апреле водность нижнего Нигера минимальна: у г. Локоджа минимальный расход воды составил 772 м³/с в 1961 г., средний за 1957—1978 гг. минимальный расход — 1180 м³/с.

Наносы нижнего Нигера можно разделить на транзитные и руслообразующие. Максимум мутности воды за счет транзитных наносов составляет 0,20—0,25 кг/м³, приходится на май-июнь, когда на оголенную после сухого сезона поверхность водосбора выпадают обильные ливни начала влажного сезона. Размеры частиц транзитных наносов не превосходят 0,05 мм, их сток за гидрологический 1978/79 г. в створе г. Аджакута составил 17,4 млн. т. Сток руслообразующих наносов тесно связан с водностью реки. Он сосредоточен в придонных горизонтах. В период половодья мутность здесь достигает 2,0—3,0 кг/м³, в межень она уменьшается до 0,5—0,7 кг/м³. В 1978/79 гидрологическом году в створе г. Аджакута сток руслообразующих наносов составил 18,6 млн. т. Донные грунты на нижнем Нигере изменяются от грубых песков с медианным диаметром Md=0,7—0,8 мм в

верхней его части до $Md=0,4—0,6$ мм в низовьях. На кривых гранулометрического состава донных грунтов на участке реки от г. Локоджи до г. Идах выделяются два пика механического состава наносов — на фракциях 1—2 и 0,5—0,25 мм. Если второй пик характеризует фоновую крупность наносов нижнего Нигера, то первый отражает результат размыва потоком выступающих в русле коренных пород.

Влияние водного режима на русловые деформации оценивается, по Н. И. Маккавееву [1], величиной, пропорциональной стоку руслообразующих наносов, проходящих при данном расходе воды:

$$\Lambda = \sigma Q^2 I p \quad (1)$$

Здесь Q — расход воды; I — уклон русла; p — повторяемость расхода воды; σ — параметр, вводимый в расчет с момента выхода воды на пойму, уменьшающийся с уменьшением соотношения ширины русла и залитой водой части поймы. Из зависимости Λ от Q для в/п Локоджа за период 1914—1978 гг. следует, что главное воздействие на русло нижнего Нигера оказывают расходы паводков в пределах от 16 до 24 тыс. m^3/c , наблюдаемые после затопления низкой поймы.

В рельефе русла Нигера выделяются формы трех структурных уровней (см. рисунок). К структурному уровню макроформ относятся следующие русловые формы: меандры, сопряженные системы рукавов, побочни. Песчаные волны занимают на нижнем Нигере промежуточное положение между макро- и мезоформами. К структурному уровню мезоформ относятся шалыги, заструги и дюны. В меженный период дюны могут переходить в микроформы. К микроформам относятся рифели и рябь. Размеры макро- и мезоформ (табл. 1) увеличиваются с ростом руслоформирующих расходов воды Q_{ϕ} , т. е. расходов воды, соответствующих максимальным значениям показателя русловых деформаций (Λ).

Средний размер меандров нижнего Нигера составляет 46,6—59,2 км. Они весьма пологи, отношение длины излучины по руслу к длине по прямой (шагу меандров) между теми же точками не превышает 1,06. На участке нижнего Нигера от г. Локоджи до г. Идаха (так называвши Скалистый участок) меандры врезаны в коренные породы. На остальном протяжении русла реки в основном развиты свободные меандры. Излучины часто спрямлены соединительными протоками, причем основная часть расхода воды часто проходит по более прямому и короткому рукаву. На излучинах, лишенных спрямляющего протока в пределах Скалистого участка),

стрежень потока также стремится прижаться к выпуклому берегу. Этим объясняется крайне малая скорость поперечного перемещения излучин. Вниз по руслу врезанные излучины практически не смещаются, для свободных меандров скорость смещения составляет около 1—2 м/год.

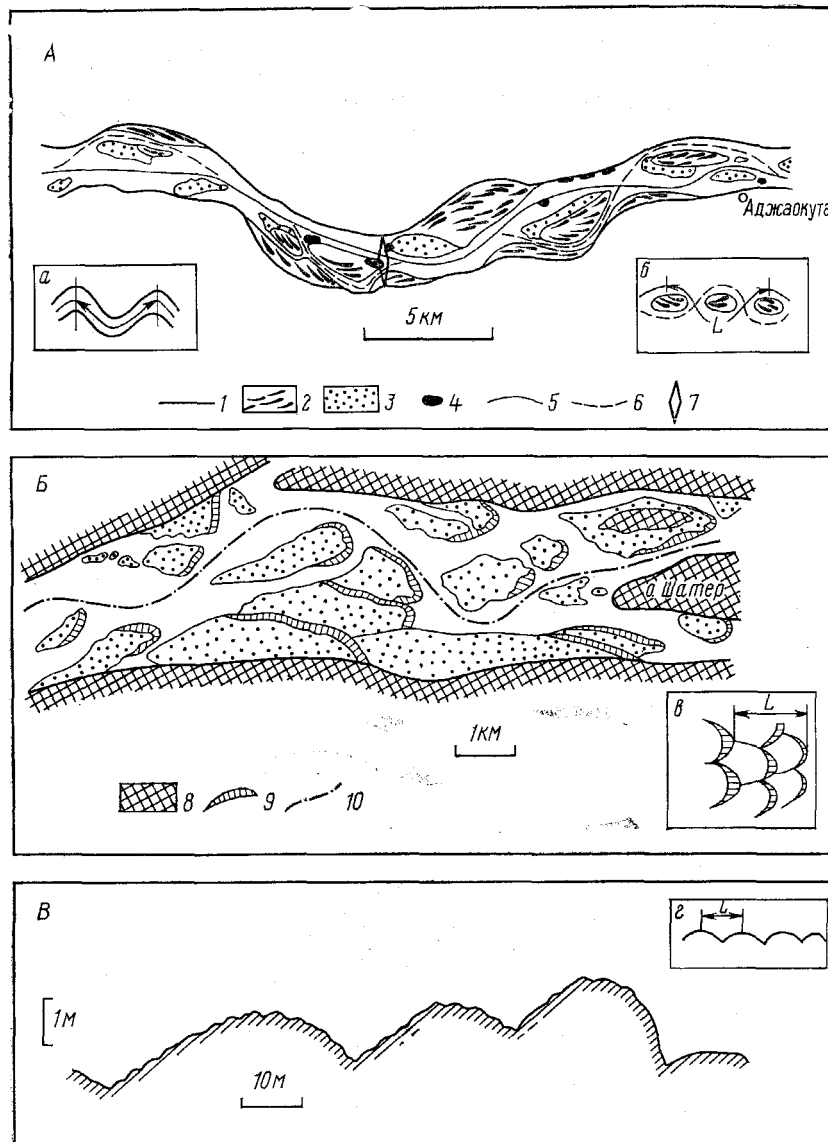


Рис.1. Русловые формы разных структурных уровней на участке р. Нигер, 520—580 км от устья. А — излучина с сопряженными системами рукавов и побочными; Б — побочни с песчаными волнами и шалыгами; В — заструга с дюнами и рифелями. На врезках характерные размеры L русловых форм: а — излучин и побочней, б — сопряженных систем рукавов и осередков, в — песчаных волн, шалыг, г — заструг, дюн, рифелей. 1 — границы излучины, 2 — гривистая пойма, 3 — надводные части побочней, 4 — скальные выступы 5 — фарватер основного русла, 6 —

второстепенного русла, 7 — створ плотины ГЭС «Локоджа», 8 — высокая пойма, 9 — подвалья дюн, 10 — границы побочней

Таблица 1. Изменение величин руслоформирующих расходов и размеров русловых форм по длине рек Нигер и Бенуэ.

		Величина Q_f и его обеспеченность				Русловые формы		
		верхний интервал		нижний интервал		меандры	сопряженные системы рукавов	побочни
Река, рукав	Створ	м ³ /с	%	м ³ /с	%	км	км	км
Бенуэ	Макурди	10500	5,07	5520	21,1			5,2
Нигер	Баро	7800	6,03	2400	26,8		7,5	3,8
	Локоджа	20800	5,75	3900	38,4	46,6	16,1	7,4
	Онитша	24000	5,75	3200	54,8	59,2	24,6	7,3
Форкадос	Самабри	12600	1,65			17,5		
	Сагбама	8800	1,70			12,0		
	Бомади	5400	3,20			7,2		
	Сиама	2500	3,20			3,4		

Средний размер сопряженных систем рукавов на нижнем Нигере составляет 16,1—24,6 км, т. е. в среднем на одну излучину приходится 2,5—3 сопряженные системы рукавов. Они относятся к простым сопряженным системам нормального или удлиненного типа, по Р. С. Чалову [3]. Средняя длина островов, образующих русловые рукава, составляет 4,8 км, в половодье их поверхность практически не заливается водой, распределение расходов воды по рукавам в узлах разветвлений в большинстве случаев неравномерное — в половодье на основной рукав приходится 85—90% стока, в межень до 100%. В пределах Скалистого участка следы отмершего второстепенного рукава сопряженной системы на некотором протяжении прослеживаются только в рельефе поймы. Некоторые острова довольно быстро смещаются вниз по течению. Так, о. Шатер, расположенный в 523 км от устья реки

(расстояния определяются от маяка в устье рукава Форкадос) ниже г. Аджаокуты, перемещается на 5—7 м/год, острова Гроуб и Дак (579 км от устья ниже г. Локоджи) — на 16—20 м/год, о. Лонг (394 км от устья выше г. Онитши) — на 8 м/год. Время, в течение которого второстепенный рукав системы становится основным (полуцикл системы), зависит от устойчивости русла, которая в целом уменьшается вниз по течению Нигера. Так, в сопряженных рукавах выше г. Онитши (385—400 км) в 1858 г. экспедицией доктора У. Б. Бейки [5] было отмечено положение фарватера, противоположное современному, т. е. здесь полуцикл сопряженной системы рукавов составляет менее 100 лет. Коэффициент стабильности по Н. И. Маккавееву [2]: $K_c = 1000 d/IB$, где I — уклон русла; B — ширина русла, м; d — медианный диаметр донных грунтов, м; для этого участка равен 2,4. В системе сопряженных рукавов у г. Аджаокуты (540—560 км), где $K_c = 5,3$, тогда же морфология русла была близка к современной (т. е. полуцикл узла более 100 лет), хотя следы перехода основного рукава из одних сопряженных рукавов в другие хорошо прослеживаются в рельефе грив на пойме.

В нижнем течении Нигера сопряженные системы рукавов образовались относительно недавно. Древнее переуглубленное русло реки (мощность аллювия здесь достигает 80 м), сформировавшееся около 20 тыс. лет назад, в эпоху низкого стояния уровня Мирового океана, прослеживается в пределах лишь второстепенных рукавов сопряженных систем. Это свидетельствует об отсутствии тогда основных рукавов современных систем, коренное ложе русла которых в настоящее время на 20—60 м выше ложа древнего русла.

Средние размеры побочней и осередков в нижнем течении Нигера составляют 7,3—7,4 км, т. е. в пределах системы сопряженных рукавов насчитывается 2—3 побочня. Во время высоких паводков в расширениях русла происходит отрыв стрежня потока от берега и образуются участки замедленного течения или водовороты. Здесь аккумулируются наносы и зарождаются побочни. В многоводные периоды эти формы увеличиваются и перемещаются вниз по руслу со скоростями 100—150 м/год; на участках перегиба основного русла или развития вдоль берега коренных пород они часто отрезаются от берега и превращаются в осередки. В маловодные периоды происходит размыв побочней и осередков. В течение одного гидрологического года происходит существенное переформирование побочней и осередков.

Средние размеры песчаных волн в нижнем течении Нигера составляют 1,4—1,7 км. В районе островов Смарт и Шатер скорость их смещения вниз по руслу в 1962—1964

гг. составляла 165 м/год, что в 1,5 раза больше, чем скорость смещения побочней, на которых песчаные волны были расположены. На верхнем Нигере скорость движения песчаных волн достигает 300 м/год. В свою очередь по песчаным волнам перемещаются шалыги, размеры которых составляют — 0,7 км, а средняя скорость их движения — 330 м/год. Побочни и осередки определяют положение фарватера русла, их движение приводит к изменению фарватера от года к году. Перемещение песчаных волн и шалыг определяет местное изменение фарватера внутри года.

Заструги и дюны оказывают малое влияние на плановые деформации русла. У г. Аджакута в половодье скорость смещения дюн вниз по руслу составляет 6—10, в межень — 1—3 м/сут; их длина соответственно 70 и 30 м. Высота дюн при спаде уровней половодья, когда глубина в правой протоке у осередка напротив г. Аджакуты уменьшается с 8 до 4 м, практически не меняется и колеблется в зависимости от скорости течения от 1,0 до 1,5 м. При дальнейшем спаде уменьшении глубин с 4 до 2 м высота дюн быстро уменьшается до 0,5 м и с дальнейшим уменьшением глубины, вплоть до выхода на поверхность, мало изменяется. Запаздывание размыва дюн при уменьшении горизонта воды приводит к резкому увеличению их роли в распределении местных глубин и шероховатости русла в самом на чале меженного периода. Лишь к концу межени, в апреле, высота дюн приходит в соответствие с параметрами потока. Характерно, что длина дюн изменяется практически сразу вслед за изменением гидравлических условий.

Микроформы — рифели и рябь — в среднем характеризуются длиной соответственно 6—19 и 0,1—0,6 м и высотой 0,2—0,3 м и 0,05—0,01 м. По их параметрам была рассчитана та часть руслообразующих наносов, которая перемещается в форме гряд по дну. Эта доля общего стока руслообразующих наносов крайне незначительна в половодье (до 2,7%), в межень возрастает до 55%.

Сооружение гидроузла «Локоджа» приведет к усилению неустановившегося режима течения — распространению волн суточного и недельного регулирования ниже плотины на участке русла длиной не сколько десятков км. Они обычно вызывают интенсивный размыв дна и берегов нижнего бьефа гидроузла. Этому способствует прекращение поступления наносов в нижний бьеф водохранилища. Размыв дна обычно продолжается до образования отстойки из наиболее крупных частиц наносов, для условий нижнего бьефа ГЭС «Локоджа» диаметр отстойки составит 5 мм. Расчеты показывают, что размыв дна ниже зоны водобоя составит 1,6—1,8 м с уменьшением вниз по течению. Длина зоны размыва составит около 25 км. Размыв берегов будет

продолжаться! после формирования отмошки, вследствие чего изменится форма русла.

Водоохранилище ГЭС «Локоджа» обеспечит высокую степень регулировки стока реки. Полезный объем водохранилища составит, согласно проекту [4], 48 км^3 ; сток маловодного сезона (декабрь — июль), может быть, возрастет до $98,8 \text{ км}^3$ (в естественных условиях он составляет $50,8 \text{ км}^3$), что соответствует среднему месячному расходу воды $4700 \text{ м}^3/\text{с}$. Аккумуляция в водохранилище части стока половодья (объем которого в среднем составляет 134 км^3) обеспечит сброс в нижний бьеф в период половодья (август — ноябрь) 86 км^3 . Преобразование стока в результате его регулирования водохранилищем характеризуется данными табл. 2.

Таблица 2. Характеристика стока половодья р. Нигер

	естественный режим		режим после строительства ГЭС "Локолжа"	
	объем стока, 10^9 м^3	расход воды $\text{м}^3/\text{с}$	объем стока, 10^9 м^3	расход воды $\text{м}^3/\text{с}$
Месяц				
Июль	13,3	4863	13,3	4863
Август	26,3	9825	16,8	6272
Сентябрь	43,5	16776	27,9	10764
Октябрь	46,7	17426	29,0	10827
Ноябрь	17,4	6728	12,2	4707

В высокие паводки обеспеченностью в 1 % сброс в нижний бьеф гидроузла может превысить 160 км^3 , тогда максимальный средний месячный расход воды достигнет $18\,000 \text{ м}^3/\text{с}$. Расчет зависимости Λ от Q с учетом новых характеристик гидрологического режима показывает, что она приобретет двухпиковый характер с максимумами Λ при расходах около $11\,000$ и $5\,000 \text{ м}^3/\text{с}$.

Таблица 3. Вероятные размеры русловых форм на нижнем Нигере после сооружения гидроузла «Локоджа»

Величина Q_f по в/п Локоджа и его обеспеченность				Русловые формы, км			
верхний интервал		нижний интервал		меандры	сопряженные системы рукавов	побочни	песчаные волны
м ³ /с	%	м ³ /с	%				
11000	9,0	5000	50,0	16,0	8,0	5,0	1,5

Подобное изменение гидрологического режима реки приведет к существенной трансформации рельефа русла. По данным табл. 1 были построены связи между размерами русловых макроформ и соответствующими величинами руслоформирующих расходов верхнего интервала, определяющими эти размеры. По этим связям, исходя из рассчитанных величин руслоформирующих расходов в условиях зарегулированного русла, были оценены новые размеры русловых макроформ (табл. 3), о масштабах изменений которых можно судить по сравнению с данными, приведенными в табл. 1 для створа «Локоджа».

Снижение величины руслоформирующего расхода верхнего интервала должно привести к уменьшению размеров излучин, однако на врезанных и адаптированных меандрах это скажется в малой степени. Они превратятся в реликтовые формы русла. Более вероятна трансформация свободных излучин.

Особенно заметные изменения произойдут в сопряженных системах рукавов. Сократятся их размеры и ширина пояса разветвления, возрастет кривизна отдельных рукавов. Трансформация сопряженных систем рукавов будет идти по пути отмирания маловодных рукавов, возникновения новых островов в рукавах, в которых сосредоточится основной сток. Так как в изменившихся условиях размеры сопряженных систем рукавов станут близки к размерам современных побочней и осередков, наиболее вероятно образование новых островов на основе уже имеющихся осередков и преобразование протоков вокруг них в системы рукавов. Этому будут способствовать существенное уменьшение скорости перемещения осередков вниз по руслу и малая частота их затопления, увеличение стабильности русла.

Во вновь образовавшихся рукавах будут формироваться новые побочни и осередки. Их размеры будут определяться величинами руслоформирующих расходов как верхнего, так и нижнего интервалов, а это приведет к относительно меньшему сокращению их размеров. Поскольку скорость движения побочней и осередков пропорциональна максимальному расходу, то ее уменьшение будет более

значительным, чем уменьшение размеров; увеличится устойчивость этих русловых форм. Этому будут способствовать глубинная эрозия и трансформация формы русла — возрастание полноты живого сечения.

Характеристики песчаных волн определяются в основном руслоформирующим расходом нижнего интервала, они мало изменяются в условиях регулирования стока. Мезоформы и микроформы руслового рельефа быстро приспосабливаются к изменениям гидравлических условий, они будут близки по размерам и динамике к современным.

Таким образом, трансформация гидрологического режима нижнего Нигера под влиянием плотины и водохранилища ГЭС «Локоджа», хотя и не приведет к значительным изменениям всей формы русла реки в плане, но зато вызовут коренную перестройку всего внутрируслового рельефа. Эта перестройка сильно скажется на функционировании всех намеченных гидротехнических сооружений, расположенных ниже плотины. Так, боковая и глубинная эрозия непосредственно ниже плотины поставит под угрозу размыва береговые сооружения металлургического завода в г. Аджакута. Превращение в остров осередка напротив Аджакуты и возможное отмирание правобережной протоки затруднят подход судов к городу, где намечено строительство речного порта. Полностью изменится положение фарватера реки. Поэтому в проектах всех гидротехнических сооружений при выполнении дноуглубительных и выправительных работ необходимо учитывать вероятные изменения хода русловых процессов в нижнем течении Нигера.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Маккавеев Н. И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955, с. 346.
2. *Маккавеев Н. И., Шатаева С. Г., Митякова М. Н.* Показатель устойчивости русла реки.— Метеорол. и гидрология, 1967, № 5, с. 82.
3. *Чалов Р. С.* Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во Моск.ун-та, 1979, с. 234.
4. Motor-Columbus Consulting Engineers Inc. Lokoja, Makurdi, Ikom hydroelectric projects. Lagos: NEPA, 1976, p. 84.
5. NEDECO (Netherlands Engineering Consultants). River studies and Recommendation on improvement of Niger and Benue. Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1959, p. 1000.