

# ЭРОЗИЯ ПОЧВ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Выпуск 9

(РАБОТЫ ПО ПРОБЛЕМНОЙ  
МЕЖФАКУЛЬТЕТСКОЙ ТЕМАТИКЕ МГУ)

ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

1983

---

*К. М. Беркович, Р. В. Лодина, А. Ю. Сидорчук*

## **РУСЛОВОЙ РЕЖИМ Р. НИГЕР В РАЙОНЕ СООРУЖЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА У Г. АДЖАОКУТА**

Развивающиеся страны тропической и экваториальной Африки богаты водными ресурсами. Не удивительно поэтому, что в национальных программах развития хозяйства этих стран большое внимание отводится использованию рек для нужд энергетики, ирригации, водоснабжения, водного транспорта. Для реализации проектов освоения водных ресурсов необходим анализ руслового режима рек и прогнозы его возможных изменений под влиянием сооружений водозаборов, прорезей и т. д. В противном случае не только не может быть гарантирована безаварийная работа построенных объектов, но и не обеспечивается выполнение основных требований, призванных содействовать охране окружающей среды. Однако гидрологический и тем более русловой режим крупнейших рек Африки изучен совершенно недостаточно: имеются лишь обзорные работы, посвященные режиму стока в бассейнах рек и содержащие отдельные характеристики речных русел. При составлении проектов некоторых гидротехнических сооружений даже эти обзорные материалы не используются, не говоря уже о проведении специальных исследований руслового режима рек.

На р. Нигер ниже слияния его с р. Бенуэ в настоящее время проектируются или уже сооружаются несколько объектов. Гидрологические и русловые изыскания проводились в течение одного гидрологического года (1978—1979) на участке реки протяженностью около 13 км от пос. Герегу до г. Аджаокута. Кроме того, были использованы данные гидрологических наблюдений Нигерийского управления внутренних водных путей и Нидерландской фирмы инженеров-консультантов NEDECO, любезно предоставленные сотрудниками этих организаций, а также проведено рекогносцировочное обследование русла реки на 50 км вверх и вниз по течению от г. Аджаокута (соответственно — до г. Локоджа и г. Идах).

## ГЕОЛОГИЯ И ГЕОМОРФОЛОГИЯ ДОЛИНЫ

Район исследований располагается в нижнем течении Нигера после его выхода из долины прорыва (Rocky Section), где река пересекает выступ докембрийского фундамента, и на ее берегах и в русле широко развиты выходы кварцитов, гранито-гнейсов, гранитов, сланцев. Поэтому в районе г. Локоджи русловые деформации в значительной степени ограничены выходами скальных пород. Ниже г. Аджакута они развиваются преимущественно свободно, хотя в некоторых местах горизонтальным смещениям русла препятствуют выходы сланцев мелового возраста. Долина Нигера здесь образует очень крупные пологие врезанные излучины в коренных берегах (рис. 1). Излучина долины в районе г. Аджакута имеет длину  $l$  (по реке) 41,1 км, длина ее шага  $L$  составляет 39 км,

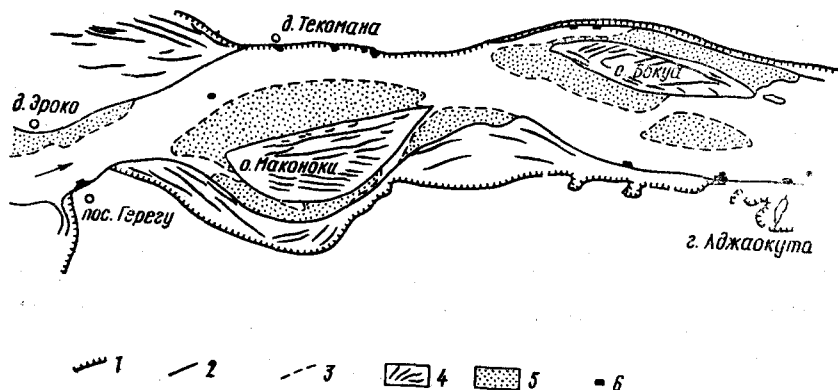


Рис. 1. Морфология русла р. Нигера на участке изысканий: 1 — шов поймы; 2 — бровка поймы; 3 — границы русловых отмелей; 4 — гривы на пойме; 5 — русловые отмели; 6 — выходы скал в русле.

степень выраженности незначительна  $l/L=1,06$ . Дно долины в целом узкое: ширина русла с поймой не превышает 3 км, местами составляя всего около 1 км. Большая часть поймы — цокольная. Буровыми работами вскрыта древняя долина, дно которой залегает на отметках (у г. Аджакута) —30÷—50 м абс, а мощность аллювия достигает 80 м. Погребенная долина прослежена и под руслом р. Бенуэ, где мощность аллювия в районе г. Макурди составляет 30÷40 м. Современное русло использует зону древней долины лишь частично, пересекая ее и врезаясь в обрамляющие ее скалистые участки.

В эпоху, предшествовавшую последнему ледниковому периоду, более многоводный Нигер образовывал пологие круп-

ные излучины русла на отметках, несколько больших современных, так что заливалась поверхность низкой цокольной террасы с отметками 40—41 абс. м. С наступлением ледникового периода произошло падение уровня Мирового океана приблизительно на 80 м и аридизация климата саванн (Фейрбридж, 1968). Более маловодный, чем теперь, Нигер врезался, образуя врезанные излучины с шагом почти втрое меньшим, чем в многоводную эпоху. Ширина русла не превосходила тогда 500 м. Склон долины реки расчленялся многочисленными логами — водотоками, имевшими паводочный режим. В послеледниковое время по мере роста уровня Мирового океана и водности Нигера происходило заполнение долины, что вывело реку на более высокие, чем теперь, отметки. Об этом свидетельствует рельеф правобережной поймы, где имеются округлые болотистые понижения в ее тыловой части, языками вдающиеся в поверхность пологого склона низкой террасы. Эти болота образовались на месте подпружиненных устьевых участков логов. В них отмечаются толщи озерно-болотных отложений мощностью до 5 м. В период климатического оптимума голоцена водность Нигера, видимо, была максимальной за послеледниковый период. В это время произошло спрямление относительно крутых излучин древней долины современным руслом, которое в целом наследует форму русла доледникового времени. В процессе горизонтальных деформаций и врезания обнажились скалы на берегах и в русле реки.

### ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

Река Нигер — крупнейшая в западной Африке. Площадь ее водосбора (с сухими долинами) составляет 2092 тыс. км<sup>2</sup>. Она несет в Гвинейский залив Атлантического океана 180 км<sup>3</sup> воды и 40 млн. т взвешенных наносов в год. Крупнейший приток Нигера — р. Бенуэ, при площади водосбора 337 тыс. км<sup>2</sup> имеет годовой сток воды 100 км<sup>3</sup> и сток наносов 25 млн. т. Сток реки формируется на территории с большим разнообразием физико-географической обстановки. Истоки Нигера располагаются на высотах более 2000 м, в зоне влажных лесов. В среднем течении река пересекает в зоне саванны обширную равнину с высотами 250—300 м и крупную холмистую гряду с высотами 400—600 м. Низовье реки вновь расположено в зоне влажных болотистых лесов. Река Бенуэ в основном дренирует территорию с высотами 600—1600 м в зоне саванны. Большая часть водосбора Нигера расположена в пределах низкотеррасы.

Главным источником питания реки являются дожди, связанные с тропическими муссонами и выпадающие с марта по октябрь. Длительность дождливого сезона уменьшается с юга на север; в том же направлении убывает и количество

осадков. На среднем Нигере за год выпадает 250 мм осадков, в районе г. Аджакута — 1000—1400 мм, а на побережье в устьевой области Нигера — более 4000 мм. Максимальное среднемесячное количество осадков отмечается в июле — октябре (200—260 мм). Величина испарения с поверхности водосбора увеличивается от дождливого к сухому сезону и уменьшается к югу от 2500 мм на среднем Нигере до 1000 мм на побережье. Коэффициент стока в среднем составляет 0,35. Среднегодовой модуль стока для в/п Локоджа — 5,5 л/с·км<sup>2</sup>, модуль максимального стока — 20 л/с·км<sup>2</sup>.

Водный режим реки у г. Аджакута формируется под совместным влиянием верхнего Нигера и Бенуэ. Их водность примерно одинакова, но сроки наступления и продолжительность отдельных фаз гидрологического режима различны. Подъем уровня воды на нижнем Нигере начинается в мае, когда увеличивается водность Бенуэ, но наиболее интенсивное нарастание расходов на нижнем Нигере происходит в июле — августе, когда одновременно поднимаются уровни и верхнего Нигера, и Бенуэ. В этот период уровень у г. Аджакута увеличивается на 6 см/сут, а расходы воды — на 200 м<sup>3</sup>/сут в средний по водности год. На общий подъем уровня воды накладываются небольшие паводочные волны с амплитудой 0,2—0,5 м и периодом 10—20 сут. Общий подъем уровня воды в среднем составляет 8 м, но может превышать 12 м.

Пик половодья на нижнем Нигере растянут на два месяца (сентябрь — октябрь) из-за несовпадения максимумов на верхнем Нигере и Бенуэ; иногда имеет двухпиковую форму. Средние максимальные расходы воды составляют на в/п Локоджа 21 100 м<sup>3</sup>/с, максимальные — 27 140 м<sup>3</sup>/с (1969 г.).

Спад уровней воды на верхнем Нигере и Бенуэ по времени совпадает: на нижнем Нигере он приходится на ноябрь — декабрь, продолжаясь более слабыми темпами в январе — марте. Особенно сильно происходит спад уровня в ноябре, причем скорость его в 1,5—2 раза быстрее, чем подъем. Уменьшение расходов воды составляет 300—400 м<sup>3</sup>/с за сутки. Монотонность спада нарушается паводочными волнами, особенно заметными в период его замедления.

С конца декабря устанавливается межень. Минимальные уровни и расходы отмечаются в апреле — мае. На в/п Локоджа средний минимум расхода воды — 1180 м<sup>3</sup>/с, абсолютный минимум (1961 г.) равен 772 м<sup>3</sup>/с. Меженный сток воды формируется при полном отсутствии дождей в бассейне реки грунтовыми водами (в основном из Бенуэ) и водами так называемого «Черного паводка», который наблюдается во время влажного сезона в верховьях Нигера. С начала 70-х годов некоторое увеличение меженного стока связано с регулирующим влиянием гидроузла Каинджи, расположенного в 500 км выше г. Аджакута.

Водный сток Нигера в многолетнем плане испытывает отчетливые колебания. За период 1914—1978 гг. выделяются два крупных максимума водности, приходящихся на середину 20-х и середину 50-х годов. Максимумы разделены периодами относительно низкой водности в начале 40-х и начале 70-х годов. Таким образом, продолжительность периода колебаний водности составляет около 30 лет. При этом экстремальные значения годового стока в период высокой водности смещены к началу цикла — они приходится примерно на 10-й год от его начала. Исходя из этого, можно предполагать, что в настоящее время (в начале 80-х годов) водность реки будет относительно высокой.

Суммарное влияние водного режима на русловые деформации оценивается, по Н. И. Маккавееву (1955), максимумом величины руслоформирующего расхода, пропорциональной стоку руслообразующих наносов (или удельной мощности потока), проходящих при данном расходе воды

$$R = \sigma Q^2 IP,$$

где  $I$  — гидравлический уклон при данном расходе воды  $Q$ , повторяемости  $P$ ;  $\sigma$  — параметр, вводимый в расчет с момента выхода воды на пойму и учитывающий влияние кинематического эффекта. Анализ связи  $R = R(Q)$  по водопосту Локоджа за 1914—1978 гг. показывает, что главное воздействие на русло нижнего Нигера в многолетнем плане оказывают расходы паводка после затопления низкой поймы (16—21 тыс. м<sup>3</sup>/с), так как именно при этих расходах величина  $R$  достигает максимума. Эти расходы являются руслоформирующими.

#### ГИДРАВЛИКА ПОТОКА И МОРФОЛОГИЯ РУСЛА

В пределах нижней части долины прорыва и ниже по течению в русле Нигера наблюдается отчетливое чередование плесовых и перекатных участков. В сужении долины в районе пос. Коджи (25—27 км выше г. Аждаокута) расположен протяженный плесовый участок в скалистом русле с глубинами в начале подъема паводка около 9—10 м. Ниже по течению, за пределами скалистого участка, средняя глубина плесовых лодин на той же фазе режима составляет 6—8 м. На перекатных участках глубины колеблются в пределах 2—3 м. Извилистая форма долины не оказывает существенного влияния на распределение глубин потока по длине реки. Более важную роль играет ширина дна долины и макроформы современного русла.

Морфологически русло представляет собой сопряженную систему рукавов, образованную островами Бофорт (находящимися еще в пределах долины прорыва), Маконоки и Бокуа. Основные рукава осложнены в ряде случаев осередками, при-

чем ниже г. Аджакута количество осередков увеличивается. В сужении долины система сопряженных рукавов выражена слабо. Острова редко затапливаются в паводок, ядра некоторых из них составлены скальными выступами (о. Бофорт). Протяженность (шаг) узлов разветвления (звеньев сопряженной системы) составляет около 16,1 км. На выпуклых берегах основных рукавов развиты крупные массивные побочни длиной до 7 км. В нижнем звене системы (о. Бокуа) отмечается вторичная извилистость стержня потока, связанная с наличием русловых форм меньших размеров: побочень у оголовка о. Бокуа, периодически возникающий правобережный побочень выше г. Аджакута, осередок у него же.

Осредненные значения уклонов водной поверхности на протяжении врезанной излучины долины приводятся в работе НЕДЕСО (1959) по данным 1956—1957 гг. На подъеме половодья 1956 г. при отметке уровня у г. Аджакута 34,9 м абс. средний уклон составлял  $0,094\text{‰}$  и практически не менялся по длине реки. На пике половодья (уровень 37,1 м) средний уклон возрос до  $0,107\text{‰}$ , причем наблюдалось его увеличение вниз по течению, т. е. формировалась кривая спада. В межень 1957 г. (уровень 30,3 м) одновременно с общим уменьшением уклона до  $0,066\text{‰}$  водная поверхность приобрела черты кривой подпора. По-видимому, такие изменения уклонов связаны с постепенным расширением дна долины вниз по течению и одновременным уменьшением глубин русла.

Эта осредненная картина осложняется наличием в русле островов и осередков. Для выявления детального распределения уклонов водной поверхности было проведено 12 односторонних связок уровней по 20 временным водомерным постам на 13-километровом участке от пос. Герегу до г. Аджакута. Выше узлов разветвления русла островом или осередком водная поверхность повывышается, что приводит к уменьшению продольного уклона; при этом его величина изменяется только в зависимости от уровня воды. Если проанализировать форму свободной поверхности на различных в морфологическом отношении участках (А — выше оголовка о. Маконоки, Б — от оголовка до ухвостья о. Маконоки, В — от ухвостья о. Маконоки до оголовка о. Бокуа, Г — от оголовка о. Бокуа до приверха осередка у г. Аджакута; Д — ниже приверха осередка), то выявляются следующие закономерности.

На пике половодья при уровнях по в/п Аджакута 36,4 м средний уклон на участке составлял  $0,098\text{‰}$ . В области А формируется кривая подпора, уклон здесь не превышает  $0,08\text{‰}$ . В области Б отмечается кривая спада — уклон увеличивается до  $0,14\text{—}0,15\text{‰}$ . В области В снова формируется кривая подпора водной поверхности, уклоны уменьшаются до  $0,07\text{—}0,1\text{‰}$ , причем подпор распространяется и на область Г, где уклоны равны  $0,05\text{—}0,06\text{‰}$ . Ниже приверха осередка на-

блюдается значительный спад, уклоны увеличиваются до 0,11—0,12‰.

С уменьшением уровней происходит общее уменьшение уклона при сохранении неизменной в целом формы свободной поверхности, хотя в отдельных областях наблюдается усиление или ослабление явлений спада или подпора. Так, вплоть до середины спада уровней в верхних двух областях и на подъеме паводка степени подпора или спада, которые можно характеризовать соответственно отношениями  $I_{\text{ср}}/I_{\text{под}}$  и  $I_{\text{сп}}/I_{\text{ср}}$  остались практически прежними (здесь  $I_{\text{ср}}$  — средний уклон на участке,  $I_{\text{сп}}$  — уклон в зоне кривой спада,  $I_{\text{под}}$  — уклон в зоне кривой подпора).

Степень подпора увеличилась в области В, откуда подпор распространился в область Б. В области Г степень подпора при уровнях 32,8 м в г. Аджакута значительно уменьшилась, а при уровнях 31,4 м здесь появляется отрезок кривой спада ниже оголовка о. Бокуа. Значительно уменьшилась и степень спада в области Д (при уровнях 33,0—31,0 м), где уклоны стали практически равны средним на участке (0,075—0,065‰). В межень при уровнях 29,3—29,7 м степень подпора в области А сильно увеличивается, при средних уклонах 0,04—0,045‰ здесь они не превышают 0,015‰. Уменьшается степень спада в области Б — сюда на значительное расстояние проникает подпор из областей В и Г. Соответственно, в последних степень подпора значительно увеличивается. Также намного увеличивается степень спада ниже приверха осередка: уклоны здесь достигают 0,13‰, т. е. становятся максимальными за весь период наблюдений. Однако, начало спада водной поверхности смещается здесь к гребню осередка.

В целом можно констатировать, что в сравнительно маловодный 1978—1979 гидрологический год форма кривой свободной поверхности воды в пределах системы сопряженных рукавов полностью соответствовала общей конфигурации дна реки. Лишь в области осередка у г. Аджакута в высокую воду наблюдалась форма свободной поверхности воды, зеркальная по отношению к форме дна: при средних уровнях уклоны здесь по длине практически не менялись, свободная поверхность была прямолинейной, в межень форма свободной поверхности стала соответствовать форме дна русла.

Более мелкие формы руслового рельефа также влияют на конфигурацию водной поверхности. В областях развития рифелей в высокую воду отчетливо выделяются зоны выхода на поверхность вихрей циклонального и антиклонального типов, которым соответствовали воронки и бугры водной поверхности, по форме изометричные, размерами порядка 6—10 м. Местные уклоны в этих образованиях, по-видимому, значительно превышали средние уклоны водной поверхности, так как отмечались обратные по отношению к общему направлению те-



чения. С падением уровней частота выхода на поверхность вихрей уменьшилась, а размеры воронок и бугров резко дифференцировались — наряду с мелкими образованиями размерами порядка 1—3 м фиксировались крупные водоворотные зоны до 20 м в диаметре.

Наиболее значительное влияние на поле скоростей потока оказывает система сопряженных рукавов. Характерной их чертой является преимущественная концентрация стока в одном из рукавов системы, забирающих 85—88% общего стока реки. Максимальные скорости течения в половодье в основных рукавах почти вдвое превышают таковые во второстепенных (2,2 и 1,2 м/с, соответственно). Изменение соотношения водности рукавов сопряженной системы со снижением уровней зависит от местных условий. Так, относительная водность правого второстепенного рукава у о. Маконоки выдерживается сравнительно постоянный вплоть до падения общего расхода воды в реке до 5000 м<sup>3</sup>/с, а с дальнейшим уменьшением расходов резко падает. Это связано со значительным усилением струенаправляющего влияния на поток скальных выступов у пос. Герегу и формированием в истоках второстепенного рукава скоростной тени при уровнях менее 30,0—31,0 м у г. Аджакута. Водность левого второстепенного рукава у о. Бокуа снижается постепенно, так как струенаправляющие выступы скал выше истока этого рукава отжимают поток от левого берега и при всех уровнях по мере их снижения воздействие скальных выступов на поток усиливается. При общих расходах воды в реке менее 3000 м<sup>3</sup>/с второстепенные рукава сопряженной системы пересыхают.

В основном рукаве верхнего звена сопряженной системы (левый рукав у о. Маконоки) стержень потока слабо меняет свое положение с изменением уровней воды. Этот рукав имеет криволинейные очертания с радиусом кривизны вогнутого берега около 5 км и располагается в районе вершины врезанной излучены долины. Выше узла разветвления стержень потока совпадает с линией максимальных глубин, однако в начале рукава он отклонился к правому выпуклому берегу, где глубины меньше максимальных в рукаве. Сбой течения связан с тенденцией к потенциальной схеме течения на поворотах руслах, а также с отклоняющим влиянием скальных выступов посередине реки (скала Эллиот) и вдоль левого берега рукава.

Ниже слияния рукавов верхнего звена системы (выше о. Бокуа) главное течение реки резко переваливает к правому берегу. Его положение на перекате существенно зависит от горизонта воды. На пике половодья стержень потока отжимается от правого берега — проявляется тенденция к спрямлению течения. Однако уже при расходах воды в русле менее 10000 м<sup>3</sup>/с стержень потока прижимается к правому берегу.

Ниже о. Бокуа поле скоростей основного рукава русла Нигера отличается большой сложностью и определяется наличием осередка. Для получения детальной характеристики скоростного поля здесь было проведено шесть серий наблюдений по шести закрепленным поперечным сечениям. Динамическая ось потока делится в районе осередка на две ветви. На подъеме половодья при уровнях 34,0 м по в/п Аждаокута разделение динамической оси потока происходит в 1,5 км выше приверха осередка. Одна из ветвей стержня следует вдоль правого берега, прижимаясь к нему против приверха осередка. Вторая ветвь отходит к левому берегу, обтекая подводный осередок и возвращаясь к правому берегу ниже г. Аждаокута, где обе ветви стержня объединяются. Скорости течения близки в обеих ветвях (1,04—1,17 м/с). На пике половодья происходит отрыв динамической оси потока от правого берега на всем протяжении рассматриваемой области. Зона деления динамической оси смещается вниз по течению и располагается в 0,5 км от приверха осередка. В начале разветвления скорость течения максимальна у левого берега (1,56 м/с против 1,41 м/с у правого берега), однако вниз по течению скорости вдоль левой ветви динамической оси уменьшаются до 1,26—1,29 м/с, а вдоль правой возрастают до 1,52—1,57 м/с. В это время в правобережной протоке у осередка проходит более половины (53—56%) общего расхода воды в русле.

В начале спада половодья поле скоростей у осередка значительно перестраивается. Область разделения стержня потока смещается вверх по течению и располагается в 2,5 км выше оголовка осередка. Правая ветвь стержня вновь прижимается к берегу и лишь у приверха осередка несколько отходит от него. Кривизна левой ветви увеличивается, и она прижимается к берегу в устье о. Бокуа. Наибольшие скорости отмечаются в правой ветви стержня (1,26 м/с против 1,09 м/с в левой), что соответствует преобладающей доле расхода воды в правобережной протоке.

В конце спада половодья и в начале межени зона разделения стержня снова смещается вниз по течению, располагаясь в 1,5 км выше приверха осередка. Правая ветвь стержня прижимается к берегу ниже приверха осередка, крутизна левой ветви также увеличивается. Максимальные скорости течения фиксируются уже в левой ветви, соответственно больший расход воды проходит по левой протоке.

В глубокую межень, когда осередок полностью выходит на поверхность, область разделения динамической оси перемещается еще ниже по течению и располагается в 0,5 км от приверха осередка. Правая ветвь стержня отжимается от берега отмелями, а левая приобретает максимальную кривизну. Здесь фиксируются максимальные скорости потока (до 0,91 м/с против 0,82 м/с в правой ветви), по левой протоке проходит

несколько больший расход воды. В целом скорости течения в межень в районе осередка не меньше, чем на спаде половодья из-за значительного уменьшения площади живого сечения русла.

Сравнение изменений поля скоростей и формы свободной поверхности выше осередка (участок Г) показывает, что смещение области деления динамической оси потока вверх по течению совпадает с периодом после максимального подпора и приходится на начало подъема или спада уровня, когда степень подпора наименьшая. Наоборот, крайнее нижнее по течению положение область деления занимает в периоды наибольшего подпора от осередка — на пике половодья и в межень. По-видимому, в течение фаз подъема уровней и пика происходит аккумуляция наносов на участке выше осередка, поэтому к началу спада точки деления стержня отстывает. В течение фазы спада размыв этих отложений способствует ее смещению вниз по течению, так что в межень она занимает наименее положение. В начале подъема, в связи с резким возрастанием подпороного влияния осередка, точка деления вновь отстывает, однако на пике половодья в связи с большим слоем воды над затопленным осередком и уменьшением сопротивлений движению потока, она смещается вниз по течению.

#### ДОННЫЕ ГРУНТЫ И РУСЛОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ

Характер скоростного поля отражается в особенностях распространения русловых отложений различной крупности. В их составе преобладают в основном пески средне- и крупнозернистые, часто с примесью гравия. Изменения средней крупности определяются морфологией русла и скальными выступами. На отрезках, примыкающих к ним, встречается каменистая отмостка, занимающая до 5% площади русла на участке. Полоса наиболее крупных наносов приурочена как в период подъема паводка, так и в межень к основным рукавам в каждом узле разветвления — левому у о. Маконоки и правому у о. Бокуа. Так, на подъеме паводка средняя крупность частиц руслового аллювия составляет в них от 0,68 мм у п. Герегу до 0,86 мм у г. Аджакута, увеличиваясь в целом вниз по течению. Заметное укрупнение аллювия отмечается при этом в районе скалы Элиотта в начале левого рукава в верхнем звене сопряженной системы (0,87 мм). Размеры аллювия во второстепенных рукавах заметно меньше — в правом рукаве у о. Маконоки — 0,35—0,41 мм, в левом у о. Бокуа — 0,65—0,79 мм. Жила наиболее крупных наносов в основном рукаве у о. Маконоки отклоняется от левого вогнутого берега рукава и проходит посередине русла, разделяясь затем на две ветви,

одна из которых заходит во второстепенный (левый) рукав у о. Бокуа.

Вместе с тем отмечается внутригодовое изменение крупности руслового аллювия. На участке около г. Аджакута от начала подъема к пику паводка средняя его крупность убывает от 0,86 до 0,70 мм, а к межени вновь растет до 0,93 мм. Это отражает характер вертикальных деформаций, развивающихся в районе крупного осередка. На подъеме паводка здесь отмечаются три жилы гравелистых песков: вдоль правого берега с постепенным укрупнением грунтов вниз по течению; вдоль осередка и вдоль ухвостья о. Бокуа. На пике паводка в соответствии с перестройкой скоростного поля основное значение приобретает центральная жила гравелистых песков и гравия (возле осередка), которая практически объединяется с правой жилой. На спаде паводка эти жилы вновь разделяются зоной мелких и средних песков, а в левой части русла начинают преобладать средние пески. Левая жила крупных грунтов формируется лишь в межень.

В переформированиях русла Нигера у г. Аджакута различаются многолетние и сезонные деформации. Первые определяются многолетними колебаниями речного стока, морфологией долины, геологическим строением берегов и русла. Главной тенденцией многолетних деформаций является врезание русла, лишь отчасти совпадающего с древней долиной. Об этом свидетельствует antecedентный характер скалистого участка (Rocky Section), наличие незатопляемых останцовых холмов на пойме и островах.

За последние 22 года (время проведения съемок) существенных изменений крупных форм рельефа русла не отмечалось — узлы разветвления и распределение в них стока существенно не изменились. Во всяком случае, еще в 1958 г. в системе сопряженных рукавов морфология русла была близка к современной. Можно отметить лишь разрастание в ширину о. Маконоки и рост вверх по течению о. Бокуа.

На протяжении 1978—1979 гидрологического года второстепенные рукава системы сопряженных рукавов были практически стабильны. Отметки дна в них несколько увеличились здесь лишь в меженный период, когда происходило их заиление мелкими наносами. В пределах основных рукавов наблюдается отчетливые сезонные вертикальные деформации системы плес — перекат, подчиняющиеся в основном классической схеме — аккумуляция на перекате и размыв плесовых лоцин на подъеме паводка, обратная картина на его спаде. Особенно отчетливо виден сезонный ход отметок дна на перекате, расположенном в начале левого рукава у о. Маконоки: они уменьшились за период спада уровней на 1—2 м. Перекат, расположенный у оголовка о. Бокуа подвержен менее ярким деформациям в связи с распространяющимся сюда подпором от осе-

редка. Он размывается только в глубокую межень. Вертикальные деформации развиваются неодновременно по длине. В период размыва переката у о. Маконоки перекат у о. Бокуа и его нижний побочень продолжают еще повышать отметки своего дна.

Побочни перекаатов в целом отличаются сравнительно стабильными положениями в плане и очертаниями, располагаясь в зонах замедления потока в паводок. Спрявление динамической оси потока на подъеме и пике в левом рукаве у о. Маконоки отражается в размыве в этот период приверха побочня, развитого на правом выпуклом берегу. Наиболее динамичными переформированиями отличается участок, непосредственно прилегающий к г. Аджаокута и расположенный в правом рукаве у о. Бокуа. Современное русло пересекает здесь отрезок древней долины и расширяется. Стабильность русла существенно снижалась по сравнению с вышележащим участком: коэффициент стабильности, по Н. И. Маккавееву (1967), для этого отрезка в паводок равен 6,6, в межень — 14; выше по течению он составляет соответственно 5,6 и 28.

В целом русло Нигера чувствительно к многолетней и внутригодовой изменчивости стока. В многоводные периоды, когда преобладают повышенные расходы паводка, динамическая ось потока спрямляется. Это приводит к тому, что у правого берега выше г. Аджаокута формируется зона тиховода или даже возникает противотечение. Здесь происходит аккумуляция наносов и образуется небольшой побочень. Такая ситуация наблюдалась в конце 50-х — начале 60-х годов, когда отмечался экстремум периода высокой водности. При этом вдоль яра и ухвостья о. Бокуа сохраняется обширный массивный побочень. Можно предполагать, что последний в предыдущий период низкой водности (40-е годы) существовал в виде осередка, подобного современному, и сместился в сторону левого берега при мощных половодьях. В маловодный период, который наступил в конце 60-х годов (минимум стока в 1971—1973 гг. усугублен заполнением водохранилища Каинджи), происходило искривление динамической оси потока выше г. Аджаокута, отторжение правобережного побочня, смещение его вниз по течению и превращение его в осередок, который в настоящее время делит русло у г. Аджаокута на две протоки. В свою очередь, левобережный побочень, располагавшийся у о. Бокуа, отторгался от него и также смещается вниз по течению. За четыре года (1975—1979) ухвостье осередка сместилось вниз по течению на 400 м, при этом плановое положение его приверха осталось неизменным. Это связано с тем, что ежегодно на подъеме и пике половодья у правого берега в районе выбоины формируется подводная отмель значительных размеров (500—700 м длиной). Образование ее связано с двумя причинами: во-первых, со спрявлением динамической оси потока,

во-вторых, с наличием ниже по течению скалистых выступов, формирующих в выбоине дополнительный подпор. На спаде половодья аккумулятивная отмель отторгается от правого берега и надвигается на приверх осередка, наращивая его. Протоки, обтекающие осередок, по-разному реагируют на изменение водности внутри года. Левая протока на подъеме половодья несколько мелеет, на спаде и в межень — размывается. Размыв правой протоки происходит на подъеме паводка, к его концу он сменяется аккумуляцией. В целом в результате знакопеременных деформаций общий объем русловых форм к началу и к концу паводка остается примерно одинаковым.

Гораздо более динамичны малые формы руслового рельефа. Дно русла и песчаных отмелей Нигера покрыто множеством самых разнообразных по размерам донных гряд — заструг, рифелей. Так как выявление характеристик грядового рельефа довольно сложно производить визуально, выделение систем гряд разного размера и определение их размеров проводится способом спектрального анализа (рис. 2). Обработке подвергались продольные профили глубин реки, полученные эхолотом ЭИР по одному и тому же профилю в разные фазы гидрологического режима. Величина спектральной плотности  $S(l)$  в целом убывает с уменьшением длин волн. Однако на фоне

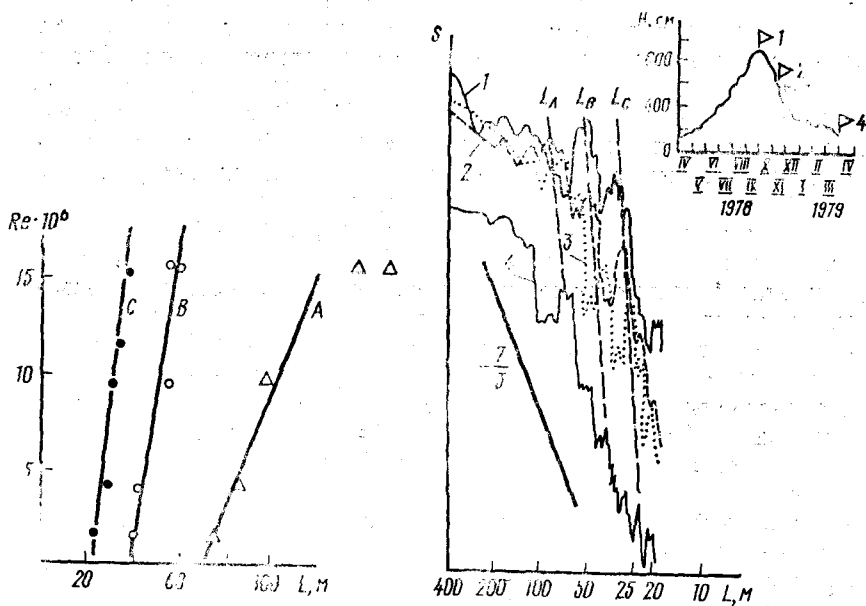


Рис. 2. Функции спектральной плотности грядового рельефа Нигера у г. Аджаокута: 1 — график, соответствующий пику паводка; 2—4 — то же для начала и конца спада и межени.

«красного шума» четко выявляются довольно узкополосные пики, характеризующие наличие в исходной реализации близких к периодическим составляющих, т. е. донных гряд. Выделяются три системы донных гряд, которые можно обозначить как А, В, С. Длины волн  $L$ , соответствующих каждой системе гряд, снимались с оси волновых чисел графика спектральной плотности, оценки высот гряд рассчитывались по формуле

$$h = \sqrt{\frac{2\pi}{L} S(L)}.$$

Сравнение размеров систем гряд с водностью реки показало наличие прямой пропорциональной зависимости между длинами и высотами гряд каждой системы и числом Рейнольдса. Если длины и высота гряд систем В и С полностью успевают принять размеры, соответствующие динамическим характеристикам потока, то высоты гряд системы А с уменьшением числа Рейнольдса до  $10,0 \cdot 10^6$  изменяются мало, и лишь при меньшей водности они быстро уменьшают высоту. Подобная ситуация приводит к тому, что с уменьшением уровня воды мало изменившиеся крупные гряды занимают большую часть живого сечения потока при глубинах его 2,5—4 м, обуславливая значительное сопротивление потоку. Это явление наиболее четко прослеживается в правой протоке у осередка.

Весьма характерным показателем является форма гряд. На пике половодья гряды системы В имеют симметричную форму продольного профиля, оба откоса их выпуклые, пологие с углом откоса в средней части не более 10—15°. Форма гряд хорошо описывается эллиптической функцией  $dn$ . Скорость их перемещения достигает 10—14 м/сут, хотя переносимый в грядах объем русловых наносов не превышает 2% общего их расхода. Большие скорости течения, превышающие в 1,5—2 раза неразмывающие для руслового аллювия Нигера, способствуют перемещению большей части руслообразующих наносов в виде взвеси, в основном сосредоточенной в придонной области. На подобное явление указывает К. В. Гришанин (1969). Гряды в этот период не являются главной формой перемещения руслообразующих наносов. По-видимому, системе гряд соответствует определенная структура скоростного поля, вместе с которой вниз по течению перемещаются и гряды. По мере уменьшения водности потока происходит деформация гряд системы В. Верховой их откос становится пологим и длинным, низовой — коротким и крутым с углом, приближающимся к углу естественного откоса (33—35°). Форма гряд становится треугольной. Они оказывают сильное сопротивление потоку, в ложбинах между ними формируются вальцы с обратными придонными струями, которых не было при симметричных грядах. Перемещение рифелей становится пассивным. Это уже не

движение единой структуры, а результат перемещения более мелких гряд системы С, которые, двигаясь по верховому откосу, сваливаются по крутому низовому склону и наращивают его вниз по течению. Скорость перемещения треугольных гряд вниз по течению уменьшается до 2—3 м/сут, а в межень до 0,5 м/сут. В эту фазу режима практически все русловые наносы перемещаются в форме гряд.

При прохождении донных гряд отметки дна в данной точке сильно изменяются. Амплитуда колебаний отметок может достигать в высокую воду 3 м, в низкую воду размах отметок дна значительно уменьшается, но может достигать 1 м.

В результате сооружения и ввода в эксплуатацию гидроэлектростанции Локоджа в 16 км выше г. Аджаокута, участок реки в районе сооружения металлургического завода окажется в нижнем бьефе гидроузла, в зоне, подверженной интенсивному суточному и сезонному регулированию. Для приплотинных участков нижних бьефов характерна интенсивная глубинная эрозия, являющаяся следствием повышения транспортирующей способности потока в результате возникновения неустановившегося режима и недогруженности потока наносами.

Можно предположить, что в межень при попуске высотой 1 м средние скорости потока здесь возрастут до 1,3—1,4 м/с, т. е. в 2 раза против бытовых (по динамической оси потока). В половодье при таком же попуске существенного прироста средних скоростей не произойдет. Приращение скоростей вызовет увеличение активного слоя наносов и вынос частиц более крупных, чем в естественном состоянии. Размывы русла будут продолжаться до тех пор, пока оно не приспособится к неустановившемуся режиму потока, т. е. пока не сформируется слой отмостки, а уклон не уменьшится до таких значений, когда скорости станут неразмывающими для частиц, слагающих отмостку. Если принять, что размеры частиц отмостки составят 5—7 мм (максимальные, встреченные в донных грунтах), то критический уклон, рассчитанный по зависимостям В. С. Лапшенкова (1964) и С. Т. Алтунина (1958) составит 0,04‰. Наибольшая глубина размыва в этих условиях по формуле С. Т. Алтунина оценивается в 1,6—1,8 м. Понижение уровней воды составит при наибольших расходах 0,6—0,7 м, в среднюю межень — 1,1 м. Длина зоны размыва достигает 25 км, причем глубина размыва будет убывать вниз по течению в соответствии с распластыванием волн попусков и постепенным насыщением потока насосами.

Этот вывод в целом согласуется с накопленными в настоящее время данными о зонах интенсивного размыва дна на приплотинных участках нижних бьефов, где формируется единая плесовая ложина, выстланная отмосткой (Маккаев, 1960; Федоров, 1969; Беркович и др., 1981). С участка размыва, согласно проведенным расчетам, должен быть вынесен



материал в объеме среднегодового стока наносов в бытовом состоянии. Следовательно, продолжительность процесса размыва будет невелика — 2—3 года, а с учетом переотложения размывных наносов по длине реки — 4—5 лет. Процесс интенсивного размыва русла является первой стадией трансформации русла в нижнем бьефе гидроузла. На второй стадии фронт глубинной эрозии смещается вниз по течению. Одновременно происходит изменение формы живого сечения, обязанное сезонному регулированию стока. В результате понижение уровней будет продолжаться, по формуле Б. Г. Федорова (1969), со скоростью 11—12 см/год.

К существенной трансформации русла приведет также сезонное регулирование стока. Оно полностью преобразует вид кривой руслоформирующих расходов, которая в естественных условиях имеет отчетливо выраженный верхний интервал и гораздо менее определенный нижний (рис. 3). Аналогичные

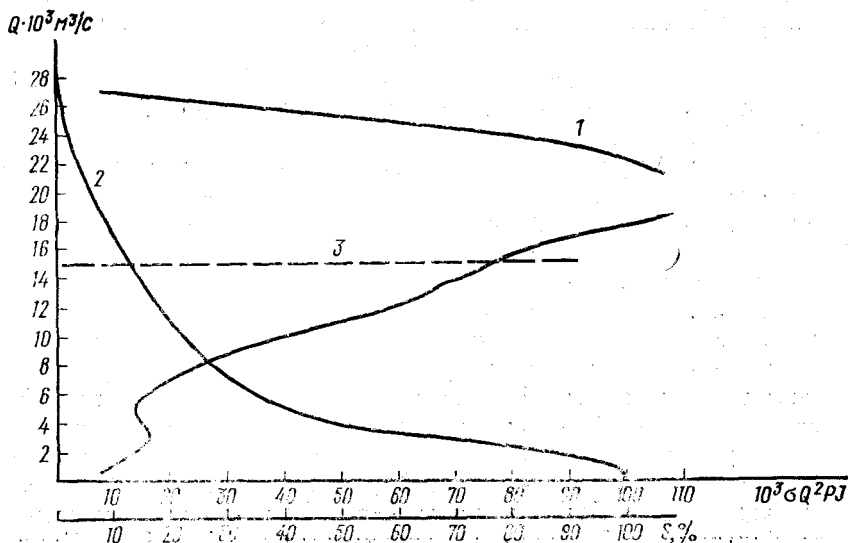


Рис. 3. Эпюра руслоформирующих расходов Нигера на в/п Локоджа: 1 — кривая руслоформирующих расходов; 2 — кривая обеспеченности расходов; 3 — расход, соответствующий началу затопления поймы.

кривые получены для Нигера и Бенуэ. Размеры русловых форм разных типов хорошо связываются с величинами руслоформирующих расходов верхнего интервала, а начиная с побочной — с величинами нижнего интервала. Сезонное регулирование стока уменьшит величину руслоформирующего расхода верхнего интервала до 11 тыс. м<sup>3</sup>/с и увеличит руслофор-

мирующий расход нижнего до 5000 м<sup>3</sup>/с. Вводя эти данные, в зависимости размеров русловых форм от величины руслоформирующего расхода можно получить новые размеры русловых форм, которые сложатся на нижнем Нигере после ввода в эксплуатацию ГЭС Локоджа. Врезанные излучины долины перестанут оказывать влияние на скоростной режим потока, а средний шаг излучин русла приблизится к размерам современных систем сопряженных рукавов. Следует также ожидать отмирания второстепенных рукавов у островов Маконоки и Бокуа и увеличения извилистости русла. Отмиранию второстепенных рукавов будет способствовать также глубинная эрозия, которая будет преобладать в основном рукаве. Радиусы кривизны излучин в условиях уменьшения руслоформирующего расхода уменьшатся, и это повлечет за собой некоторую интенсификацию размыва берегов. Но так как вогнутые берега бронированы скальными выступами, этот размыв не будет значительным.

Размеры системы сопряженных рукавов должны сократиться до 8 км, уменьшится также ширина пояса разветвления, но возрастет кривизна отдельных рукавов. Так как в изменившихся условиях размеры звеньев системы сопряженных рукавов станут соизмеримы в современных осередках и побочнях, то наиболее вероятно образование новых островов на основе уже имеющихся осередков и преобразование протоков вокруг них в системы сопряженных рукавов. Этому будут способствовать уменьшение скорости перемещения осередков вниз по руслу, малая частота их затопления и закрепление их растительностью.

На участке русла, непосредственно примыкающем к г. Аджакута, сложившийся в настоящее время рисунок русла сохранится. Но в случае, если периодические деформации, связанные с многолетними циклическими колебаниями водности, ко времени заполнения водохранилища ГЭС уже совершатся, здесь следует ожидать очень интенсивных деформаций, обусловленных резким уменьшением водности, в том числе отторжения правобережного побочня и образования осередка. При этом условия для большей концентрации стока создадутся в левобережной протоке, проходящей вдоль ухвостья о. Бокуа, так как размыв дна в правобережной протоке ограничен выходами скал. Следует ожидать также закрепления осередка растительностью и превращения его в остров, который войдет в систему сопряженных разветвлений.

Выше по течению относительно благоприятные условия для разделения потока имеются в современном узле выше о. Маконоки, но эта зона расположена очень близко к намечаемому створу плотины и скорее всего глубинная эрозия будет препятствовать формированию здесь аккумулятивных тел. Другой возможный участок возникновения нового узла

разветвления — пережат у ухвостья о. Маконоки, где в бытовых условиях отмечается значительная миграция стрежня.

В естественных условиях и с учетом возможных перестроек руслового рельефа после сооружения ГЭС Локоджа наиболее благоприятен для размещения водозаборных сооружений металлургического завода в г. Аджакута участок правого берега выше выбоины его и ниже стрелки слияния основного рукава с протокой за о. Маконоки. В бытовом состоянии здесь располагается плесовая ложина с глубинами в межень 6—7 м, стрежень потока проходит вблизи берега, скорости течения изменяются от 1,7 в половодье до 0,7 м/с в межень. Мутность транзитных наносов не превосходит 150 г/м<sup>3</sup>. Колебания отметок дна за счет перемещения донных гряд могут достигать 4,2 м, что следует учесть при проектировании водозаборного устройства. При трансформации рельефа русла в результате работы ГЭС этот участок берега будет располагаться между двумя узлами разветвления русла. Поскольку правый берег здесь вогнутый, то при уменьшении водности в результате регулирования стока вдоль него будет проходить стрежень, что обеспечит устойчивое функционирование водозабора. Однако в районе предполагаемого водозабора правый берег реки интенсивно размывается. Скорость отступления его бровки составляет в среднем около 5 м/год. В случае сооружения ГЭС Локоджа при трансформации русла размыв берега в первые несколько лет резко возрастет. Поэтому при сооружении водозабора необходимо предусмотреть достаточно надежное крепление размываемого пойменного берега. Кроме того, следует учесть также понижение уровней, которое может составить к моменту стабилизации русла 1,5—1,7 м.

Строительство речного порта в области выбоины правого берега следует признать неудачным. Акватория порта будет подвергаться значительному заилению, а подходы к нему для судов из-за наличия скальных выступов будут затруднены. Видимо, порт следовало бы перенести вверх по реке в район пос. Герегу, где в сравнительно узком русле при условии глубокой эрозии нет особых оснований опасаться неблагоприятных явлений.

В заключении следует отметить отсутствие ярко выраженных отличий характера русловых процессов на реке тропической зоны, какой является Нигер в районе г. Аджакута, по сравнению с реками умеренного пояса. Здесь формируется аналогичный комплекс русловых форм, соотношения между которыми и динамика подчиняются тем же закономерностям, что и на хорошо изученных реках умеренного пояса нашей страны. Это связано с выполнением принципа ограниченности естественных комплексов сформулированного М. А. Великановым (1958) и принимаемого Н. И. Маккавеевым (1976) в качестве одного из законов развития эрозионно-аккумулятивных

процессов. Поэтому при исследовании и прогнозировании русловых переформирований на реках тропической зоны можно с успехом использовать тот значительный опыт, который накоплен в отечественной школе русловых исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Алтуний С. Т. Завление водохранилищ и размыв русла в нижнем бьефе плотин.— В кн.: Русловые процессы. М., 1958.
- Беркович К. М. и др. Формирование русла р. Оби в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС.— Труды Зап. сиб. регион. НИИ, вып. 52, 1981.
- Великанов М. А. Русловой процесс. М., 1958.
- Гришанин К. В. Динамика русловых потоков. Л., 1969.
- Лапшенков В. С. О расчете общего размыва аллювиальных русел в нижних бьефах гидроузлов.— Труды координац. совещ. по гидротехнике, вып. 15, 1964.
- Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М., 1955.
- Маккавеев Н. И. Общие закономерности эрозионно-русловых процессов.— В кн.: Русловые процессы. (Труды IV Всесоюзн. гидрол. съезда, т. 10). Л., 1976.
- Маккавеев Н. И., Шатаева С. Г., Митякова М. Н. Показатель устойчивости русла реки.— Метеорология и гидрология, 1967, № 5.
- Федоров Б. Г. Эрозия в нижнем бьефе ГЭС и экономическое обоснование глубины заложения подачи шлюза.— Труды ЦНИИЭВТ, вып. 68, 1969.
- Фейрбридж Ф. В. Аридность климата ледниковых эпох в Африке.— В кн.: Проблемы палеоклиматологии. М., 1968.
- Netherlands engineering consultants (NEDECO) River studies and recommendation of improvement of Niger and Benue. Amsterdam, 1959.