

ЗЕМЕЛЬНЫЕ И ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ:

противоэрозионная
защита и
регулирование русел

Под редакцией Р. С. Чалова

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
1990

МОРФОЛОГИЯ И ДИНАМИКА РЕЛЬЕФА РУСЛА В НИЖНЕМ ТЕЧЕНИИ ТЕРЕКА

Нижнее течение Терека находится под сильным воздействием хозяйственной деятельности. Максимальную нагрузку на природный комплекс низовий реки создают мероприятия, связанные с покрытием сезонных дефицитов воды в этом районе и предупреждением катастрофических наводнений в дельте Терека.

Нижний Терек имеет разветвленно-извилистое русло, расположенное в пределах гривы, возвышающейся на 4—6 м над окружающей местностью и сформулированной вследствие аккумуляции наносов. В русле реки развивается сложный комплекс русловых форм: побочни, осередки, песчаные волны, шалыги (мезоформы) и заструги, дюны, рифели (микроформы). Динамика этих русловых образований определяет характер вертикальных и горизонтальных переформирований русла реки.

Объем годового стока воды ниже устья р. Сунжи составляет 10,9 км³, стока наносов — 17,6 млн т. По своему генезису взвешенные наносы делятся на две категории: русловые, поступающие в поток в процессе взаимодействия потока и русла — их движение отражается на характере русловых переформирований; нерусловые, формирующиеся на речном водосборе и воздействующие на формирование поймы и интенсивность горизонтальных деформаций. К нерусловым наносам Терека относятся частицы диаметром <0,05 мм. Анализ 450 проб донных грунтов нижнего Терека показывает, что эти фракции формируют в среднем 0,5% состава донных грунтов. Нерусловые наносы кольматируют поры в крупнозернистых песках (пористость их достигает 40—50%) и практически не влияют на изменение отметок дна. Лишь 1,5—2% площади русла занято заиленными песками, в составе которых содержание нерусловых наносов достигает 40—70%. Обычно такой состав донных отложений характерен для отмирающих протоков, тиховодов и затонов. По длине нижнего Терека не наблюдается заметного изменения содержания нерусловых наносов в русловом аллювии.

В пределах пояса меандрирования высокая пойма нижнего Терека возвышается над меженным уровнем воды на 1,5—

2,0 м. Она сложена легкими и средними суглинками. Содержание нерусловых наносов составляет в них 70—95%. Нижняя часть разреза высокой поймы сложена русловым аллювием. Так как ширина поймы в последние 80 лет ограничена дамбами обвалования до 400—600 м, количество нерусловых наносов, оседающих здесь в период прохождения высоких паводков, относительно невелико — в среднем не более 0,8 млн т в год (за период 1967—1979 гг.). Примерно такое же количество нерусловых наносов поступает в поток вследствие размыва берегов. На верхней границе участка реки (в/п Степное) объем годового стока нерусловых наносов равен 10, на нижней границе (в/п Каргалинская) — 7,3, а в русло Дзержинского коллектора отвлекается до 0,7 млн т нерусловых наносов. Таким образом, можно говорить об отрицательном балансе нерусловых наносов вдоль нижнего Терека.

Русловые наносы реки представлены крупными и средними песками; в ряде случаев (на побочнях, осередках) к русловым фракциям относятся средние, мелкие, иногда заиленные пески. Перемещение русловых наносов вдоль потока осуществляется как во взвешенном, так и во влекомом состоянии. Особенности и характер движения взвешенных наносов детально изучены в 1981—1982 гг. Период измерений совпал с прохождением летних паводков, что позволило выявить закономерности переноса взвешенных наносов в толще потока в диапазоне изменения средней скорости $v=0,5—2,2$ м/с и глубины $h=0,7—5,2$ м. Полученные данные о вертикальном распределении мутности потока и механическом составе наносов, формирующих эту мутность, выявили хорошее соответствие между натурными и рассчитанными по формуле Рауза-Великанова эпюрами мутности:

$$\rho_i(y) = \rho_i(\Delta) \left(\frac{h-y}{ly} \cdot \frac{\Delta}{h-\Delta} \right)^{\frac{u}{v_* \beta}} \quad (1)$$

Здесь κ — постоянная Кармана, h — глубина потока, y — глубина точки над поверхностью дна, v_* — динамическая скорость. Физическая природа коэффициента β в формуле (1) изучена недостаточно. По-видимому, его величина корректирует значение гидравлической крупности наносов. Введение β приводит к лучшему согласованию фактических и расчетных распределений частной мутности. Поправочный параметр β в области мелких частиц (с гидравлической крупностью $u \leq 0,005$ м/с) уменьшается с возрастанием диаметра наносов вследствие увеличения затрат энергии турбулентности на взвешивание этих частиц. В области более крупных наносов ($d > 0,1$ мм) коэффициент β , наоборот, увеличивается с возрастанием крупности взвешиваемых частиц вследствие увеличения подвижности песчаных фракций в турбулентном потоке.

Мутность потока (кг/м³) в придонном горизонте (на высоте $\Delta=5 \div 7$ см) для частиц с гидравлической крупностью удов-

детворительно (коэффициент вариации отношений расчетных фактических мутностей $\sim 0,5$) можно рассчитать по эмпирической зависимости:

$$\rho_i(\Delta) = 1,2 \cdot 10^{-5} \left(\frac{v}{u_i} \right)^3 \alpha_i, \quad (2)$$

здесь α_i — доля i -той фракции наносов в донных грунтах.

Годовой сток взвешенных русловых фракций наносов на нижнем Тереке составляет около 7,0 млн т.

Значительная часть русловых наносов перемещается во влекомом состоянии. Объемный расход наносов на единице ширины потока q_s можно, учитывая (2), определить по формуле

$$q_s = 0,015 \left(\frac{v}{v_0} \right)^3 (v - v_0) nd, \quad (3)$$

где v_0 — неразмывающая скорость (Шамов, 1952), nd — мощность слоя влечения частиц наносов. Для условий нижнего Терека $q_s = 0,6$ млн т в год, что не превышает 3% от стока взвешенных наносов Терека. Однако эта категория транспортируемых наносов определяет сложность строения и особенности динамики руслового рельефа исследуемого участка реки.

Отражением процесса перемещения по дну влекомых наносов является формирование донных микроформ. В русле нижнего Терека они представлены рифелями и дюнами. Рифели — малые формы руслового рельефа длиной 1—4 м на мелководьях и 15—20 м в плесах. Высота рифелей в среднем равна 0,2—0,4 м, в плесах может увеличиваться до 1,0—1,5 м. Крутизна рифелей достигает 0,10—0,13. В продольном разрезе эти грядовые образования симметричны, имеют выпуклый верховой и низовой откосы крутизной не более 15—20°. Средняя длина рифелей изменяется в соответствии с колебаниями удельного расхода воды:

$$\bar{L}_p = 3,6 \sqrt{v\bar{h}}. \quad (4)$$

При постоянном удельном расходе на участке реки существуют рифели, имеющие длину L_p , большую или меньшую, чем \bar{L}_p . Повторяемость P длин L_p в некотором интервале dL_p характеризуется гамма-распределением

$$P = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} L_p^{\alpha-1} \exp(-\beta L_p) dL_p. \quad (5)$$

Коэффициенты α и β связаны со средней длиной рифелей и дисперсией длин σ_L^2 соотношениями $\bar{L}_p = \alpha/\beta$; $\sigma_L^2 = \alpha/\beta^2$. Для рифелей русла нижнего Терека характерно, что $\sigma_L = 0,425 \bar{L}_p$. В этом случае $\alpha = 5,54$, $\beta = 5,54/\bar{L}_p$ и гамма-функция $\Gamma(\alpha) = 56,0$.

Средняя высота рифелей \bar{h}_p увеличивается с ростом относительного превышения скорости потока над неразмывающей

скоростью $(v-v_0)v_0$. Максимальные значения h_{rp} достигаются при относительном превышении скоростей, равном 3. При дальнейшем увеличении $(v-v_0/v_0)$ средняя высота рифелей уменьшается

$$\bar{h}_p = 0,2 \sqrt{h} \frac{v-v_0}{v_0} \exp \left(-0,33 \frac{v-v_0}{v_0} \right). \quad (6)$$

При этом изменчивость высот рифелей характеризуется распределением Вейбулла — Гнеденко

$$P = \lambda h_p^{\mu-1} \exp(-\lambda h_p) dh_p. \quad (7)$$

Коэффициенты μ и λ в этом уравнении связаны с \bar{h}_p и σ_h^2 соотношениями

$$\sigma_h^2/\bar{h}_p^2 = \Gamma(2/\mu + 1)/[\Gamma(1/\mu + 1)]^2 - 1; \quad \bar{h}_p = \lambda^{-1/\mu} \Gamma(1/\mu + 1).$$

Для условий нижнего Терека $\sigma_h = 0,5\bar{h}_p$, тогда $\mu = 2,0$ и $\lambda = \pi/4\bar{h}_p^2$.

Другим видом микроформ являются дюны. Длина дюн на мелководьях равна 10—15, в глубоких плесах — 60—70 м. Их высота может достигать 2,5 м, крутизна — 0,05—0,08. В низовьях Терека дюны наблюдаются в активной и пассивной стадиях развития. В активной стадии дюны в продольном разрезе практически симметричны. Они имеют выпуклые верховой и низовой откосы крутизной 5—7°, т. е. гораздо меньше угла естественного откоса. На дюнах в активной стадии развития рифели отсутствуют. В стадии пассивного движения форма дюн трансформируется к треугольной, резко асимметричной в продольном разрезе. Верховой откос еще более выполаживается, покрывается рифелями. Низовой откос становится крутым, близким к 33—35°, т. е. углу естественного откоса. Рифели на пассивных дюнах меньше по размерам по сравнению с рифелями, формирующимися на поверхности более крупных русловых форм.

Средние длины дюн \bar{L}_d связаны с изменением удельного расхода воды

$$\bar{L}_d = 11,0 \sqrt{vh}, \quad (8)$$

а средние высоты дюн — с изменениями глубины и относительного превышения средней скорости над v_0 :

$$\bar{h}_d = 0,167 \sqrt{h} \frac{v-v_0}{v_0} \exp \left(-0,27 \frac{v-v_0}{v_0} \right). \quad (9)$$

Кривые распределения фактических длин и высот дюн описываются уравнениями (5) и (7) с теми же коэффициентами. Как видно из формул (6) и (9), смыв дюн начинается при больших скоростях потока, чем смыв рифелей.

В общем случае скорости смещения рифелей и дюн вдоль потока можно получить из уравнения деформаций

$$(1-\varepsilon) \frac{\partial Z_0}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0. \quad (10)$$

При неизменных отметках свободной поверхности потока характеристическое уравнение для скорости перемещения точек дна с фиксированными глубинами примет вид

$$\frac{dx}{dt} = - \frac{1}{1-\varepsilon} \frac{dq_s}{dh}. \quad (11)$$

Если расход влекомых наносов q_s рассчитать по (3), то скорость смещения донных микроформ в активной стадии их развития получается из (11) в виде

$$v_{га} = 0,015 \frac{nd}{h} \left(\frac{v}{v_0} \right)^3 (4,5v_0 - 3,33v_0). \quad (12)$$

Подстановка в (22) выражения для v_0 , по Г. И. Шамову, приводит к уравнению, близкому по структуре к зависимости, полученной Б. Ф. Снищенко, З. Д. Копалиани, О. А. Твалаладзе (1977).

Сравнение измеренных и вычисленных по (12) скоростей движения рифелей и активных дюн обнаруживает их удовлетворительное совпадение. коэффициент вариации ряда отношений фактических и расчетных величин составляет 1,03. По заданным значениям характеристик гряд и скорости смещения микроформ руслового рельефа удается оценить мощность слоя влечения.

Скорости смещения активных донных форм в плесовых ложбинах нижнего Терека при скоростях течения 1,1—3,0 м/с и глубинах 2,5—6,5 м составляют 1—8 м/ч. В пассивной стадии дюны перемещаются примерно в 3 раза медленнее. Переход дюн от активного к пассивному движению и наоборот происходит без особого изменения гидравлических характеристик, т. е. при близких значениях скоростей и глубин потока. Скорость их движения вдоль реки, следовательно, также резко изменяется или пульсирует.

Наиболее крупные из микроформ руслового рельефа — застрugi — имеют в среднем длину 40 м на мелководьях (при $\sigma_L = 15$ м) и 100—120 м в плесах. Их высота достигает 4,5, крутизна — 0,04. Движение заструг может происходить в активной форме при скоростях потока 2,5—3,0 м/с и глубинах 6—8 м. В большинстве случаев они находятся в стадии пассивного смещения.

Малые мезоформы руслового рельефа — шалыги и песчаные волны — обычно формируются на мелководьях (в пределах побочной или осередков). Средняя длина шалыг достигает 90 м при $\sigma_L = 27$ м, песчаных волн — 230 м (при $\sigma_L = 71$ м).

Большую часть года мезоформы этого класса малоподвижны. При значительном увеличении расходов воды в реке они перемещаются вдоль потока. Скорость их движения не превышает 30—40 м/год. Малая подвижность шалыг сочетается с высокой изменчивостью их планового положения в пределах поперечного сечения реки из-за блуждания динамической оси потока.

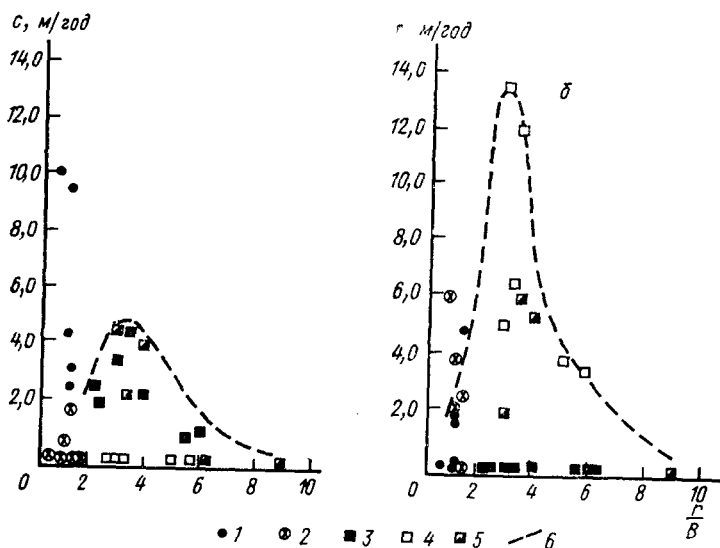
Средняя длина побочней и осередков на нижнем Тереке составляет 600 м (при $\sigma_L=140$ м). Эти грядовые образования обычно представляют собой комплекс нескольких объединившихся песчаных волн или шалыг. На участках прямолинейного русла и в условиях малой изменчивости ширины потока побочни соединяются в цепочки с шахматным расположением в русле. Скорости движения побочней и осередков в среднем равны 10—15 м/год. Динамика побочней у выпуклых берегов излучин или в их вершине полностью определена морфометрическими характеристиками русла и речных излучин: шириной потока B , его глубиной h и радиусом кривизны r .

В условиях благоприятного климата и высокой мутности реки стабильные побочни и осередки быстро зарастают, покрываются пойменным наилком и превращаются в острова или участки прибрежной поймы. Возникновение островов ведет к замедлению движения русловых форм, примыкающих к ним, и дальнейшему увеличению размеров побочней и островов. Длина островов в этом случае составляет в среднем 930 м ($\sigma_L=275$ м). Сопоставление аэрофотоснимков за 1951 и 1971 гг. показало, что практически все песчаные формы, сохранившие свое местоположение, покрылись пойменным аллювием и растительностью. Время формирования островной поймы не превышает 20 лет.

Средний шаг излучин λ русла нижнего Терека составляет 1750 м ($\sigma_L=240$ м), коэффициент формы излучин s/λ в среднем равен 1,4. По морфологии и динамике излучины подразделяются на две группы: устойчивые и неустойчивые. В пределах устойчивых излучин русло характеризуется соотношениями $r/B > 2,0$ и $B/h < 100$. Стрежень потока располагается вдоль вогнутого берега. Вдоль выпуклого берега наблюдается аккумуляция наносов. Устойчивые излучины перемещаются вниз по течению реки со скоростями до 10 м/год. Одновременно происходит поперечное смещение излучин, достигающее 5 м/год. Скорость продольного и поперечного смещений этих излучин определена критерием r/B . При $r/B \approx 3-4$ скорости смещения излучин максимальны; при больших и меньших значениях происходит уменьшение подвижности излучин (см рисунок).

На нижнем Тереке широко представлены крутые излучины с широким руслом: при ширине потока 500—600 м радиус кривизны составляет 400—700 м. Соотношение r/B в этом случае меньше 2; иногда оно снижается до 0,7. В пределах таких излучин динамическая ось потока неустойчива. Она располага-

ется периодически у вогнутого или выпуклого берега излучины У противоположного берега формируется побочень или осередок, постепенно превращающийся во фрагмент поймы. Сохранение у берега пойменных протоков приводит через некоторое время к перемещению в эту зону основного стока реки. При этом происходит переработка пойменного массива



Зависимость скорости (C) поперечного (a) и продольного (b) смещения излучин нижнего Терека от отношения радиусов кривизны и ширины русла r/B

Неустойчивые излучины 1 — с побочнями у выпуклого берега, 2 — с побочнями у вогнутого берега Устойчивые излучины 3 — преимущественно продольного смещения, 4 — преимущественно поперечного смещения, 5 — продольно поперечного смещения, 6 — верхняя огибающая поля точек

вплоть до его полного размыва. Время расположения стрежня потока у одного берега не превышает 20 лет.

Неустойчивые излучины, располагаясь непосредственно друг за другом, развиваются сопряженно, т. е. миграция динамической оси потока к одному берегу на верхней излучине вызывает изменение положения стрежня в противоположном направлении на нижележащей излучине. На длинных и пологих изгибах русла неустойчивость оси потока возникает локально. Формирование относительно стационарного побочня вызывает локальный ускоренный размыв берега и образование местного расширения русла. В этом расширении наблюдается блуждание стрежня потока.

Устойчивые излучины могут перейти в группу неустойчивых, если происходит их сжатие (в условиях преобладания продоль-

ного смещения верхнего крыла излуины по сравнению со смещением нижнего крыла) и уменьшение радиуса кривизны. Обычно это происходит при существенных переформированиях участка русла, расположенного выше устойчивой излуины или при возведении берегоукрепительных сооружений в ее нижнем крыле. Возникающее при этом отложение наносов у вогнутого берега дестабилизированной излуины сопровождается увеличением радиуса искривления оси потока, и излуина вновь становится устойчивой.

Динамика неустойчивых излуин существенно зависит от положения зоны аккумуляции наносов. Поперечное смещение излуин при аккумуляции наносов у выпуклого берега ведет к резкому увеличению (до 10 м/год) скорости поперечного смещения и ее уменьшению в случае накопления речных наносов у вогнутого берега. Скорость продольного смещения неустойчивых излуин обычно невелика вследствие их большой кривизны.

В результате сложного сочетания эрозионных и аккумулятивных процессов на излуинах нижнего Терека размыв характерен для 60% протяженности берегов за период 1932—1972 гг. составляет 2,7 м/год, что соответствует ежегодному поступлению в поток 0,8 млн т наносов мелких фракций. Локально скорость размыва берегов может достигать 10—15 м/год в среднем более чем за 50-летний период.

Таким образом, ниже устья р. Сунжи горизонтальные и вертикальные деформации русла определены процессами движения взвешенных и влекомых наносов, динамикой форм руслового рельефа и развитием излуин. По балансу нерусловых наносов участок реки неустойчив: часть их (около 2 млн т) накапливается в отмирающих рукавах русловых разветвлений. Примерно 0,8 млн т ежегодно накапливается на поверхности поймы. Накопление наносов на пойме компенсируется размывом берегов. Баланс русловых наносов близок к нулю.

Большой сток русловых и нерусловых наносов будет определять темпы заиления проектируемого Хамаматюртовского водохранилища. Отсек первой очереди этого водохранилища (объемом 250 млн м³) при водоподаче 3,2 км³/год может заполниться на 77% за 50 лет. При условии сооружения второй очереди, когда объем водохранилища увеличится до 1480 млн м³, водоподача возрастет до 6,8 км³/год, оно заилится за этот же срок на 30%.

Блуждание динамической оси потока в пределах неустойчивых излуин с $r/B < 2$ и $B/h > 100$ делает подобные участки малопригодными для размещения головных сооружений крупных стационарных водозаборов. Заметим, что именно на вогнутом берегу неустойчивой излуины построены головные сооружения Дзержинского канала, по которому обеспечивается поступление воды к орошаемым землям Бабаюртовского района Дагестанской АССР. По-видимому, целесообразно перенести сооружения

этого канала, а также все проектируемые водозаборы на участки вогнутых берегов устойчивых излучин.

Малые скорости горизонтальных деформаций дают возможность размещать дамбы обвалования на небольшом удалении от русла реки, что позволит использовать естественные повышенные береговые валы и будет способствовать рациональному хозяйственному использованию пойменных земель. Берегоукрепление необходимо в областях расположения вершин и нижних крыльев наиболее динамичных излучин с $r/B=2,8 \div 3,6$ и $B/h=25 \div 50$.

ЛИТЕРАТУРА

- Снищенко Б. Ф., Копалиани З. Д., Твалавадзе О. А. О масштабе времени русловых деформаций при моделировании на размываемых моделях речных русел // Тр. ГГИ. 1977. Вып. 242. С. 55—60.
- Шамов Г. И. Формулы для определения предельной скорости и расходов донных наносов // Тр. ГГИ. 1952. Вып. 36(90). С. 3—17.