

УДК 556.535.6/537(551.435.11) © 1990г.

СИДОРЧУК А. Ю. 

## О РАСЧЕТАХ СКОРОСТИ СМЕЩЕНИЯ ДОННЫХ ГРЯД И РАСХОДА ВЛЕКОМЫХ НАНОСОВ

Для сложного иерархически построенного комплекса активных гряд на дне речного русла учитывается влияние движения мелких гряд и транзитных влекомых наносов на скорость перемещения и переформирование крупных гряд. Получены формулы для определения расхода влекомых наносов как суммы расходов наносов, переносимых в форме активных гряд разных классов, с учетом положения мелких гряд на крупных и транзитного расхода влекомых наносов.

Метод оценки расхода влекомых наносов по величине изменений во времени отметок речного дна вошел в самые первые советские руководства по измерению твердого стока [2]. Б. В. Поляков использовал для этого переформирование в системе плес — пережат [9]. Г. В. Лопатин [8] при изысканиях на реках Волга, Луга и Кемка в 1935—1936 гг. впервые предложил рассчитывать объемный расход влекомых наносов на единицу длины гребня гряды  $q_s$  по данным о высоте  $h$  и скорости ее смещения  $c_r$ :

$$q_s = \sigma h c_r \quad (1)$$

Здесь  $\sigma$ —коэффициент формы гряды (у Г. В. Лопатина  $\sigma = 0,6$ ). Формула (1) вошла в основные руководства по расчету стока наносов [10] и динамики русла [3], а с широким распространением эхолотов в изыскательской практике стала использоваться в научных и проектных разработках [6].

Применение формулы (1) базируется на допущении, что расход влекомых наносов равен расходу наносов, перемещающихся в форме донных гряд, т. е. все частицы наносов, смытые с верхового откоса гряды, откладываются на ее низовом откосе. При использовании для расчетов данных о морфологии и динамике крупных гряд, по поверхности которых перемещаются более мелкие, предполагается, что материал, слагающий мелкие гряды на верховом откосе крупной гряды, также полностью аккумулируется на низовом ее откосе.

Такое допущение правомерно при изучении движения гряд с крутыми низовыми откосами, близкими к естественному откосу слагающего гряды материала в воде. В этом случае на низовом скате гряд перенос частиц наносов происходит в основном под действием силы тяжести. Такие гряды обычно образуются в конце спада половодья и в межень. Если у гряд всех классов в иерархическом комплексе формируются крутые низовые откосы, то не имеет значения выбор класса гряд, по динамике и морфологии которых проводится расчет расхода влекомых наносов: формула (1) дает одинаковые результаты для гряд разных классов. Так, во время межени 1979 г. в русле р. Нигер у пос. Аджакута зафиксированы донные гряды двух классов (рис. 1, б): двумерные плоские дюны средней длиной 130 м, высотой 1 м, со скоростью смещения 2,5 м/сут и трехмерные крутые дюны средней длиной 14 м, высотой 0,5 м, со скоростью смещения 5 м/сут. Трехмерные дюны перемещаются по поверхности двумерных, и их материал полностью откладывается на крутом низовом откосе двумерных дюн, способствуя их пассивному смещению вниз по реке. Расходы наносов, перемещаемых в виде этих двух классов дюн, одинаковы, они составляют  $1,45 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$  на 1 м фронта гряд как для активных трехмерных, так и для пассивных двумерных дюн. Для такого случая справедливы методы расчета скорости смещения крупной гряды по данным о морфологии и динамике более мелких гряд, предложенные Н. С. Знаменской [5] и З. Д. Копалиани [7].

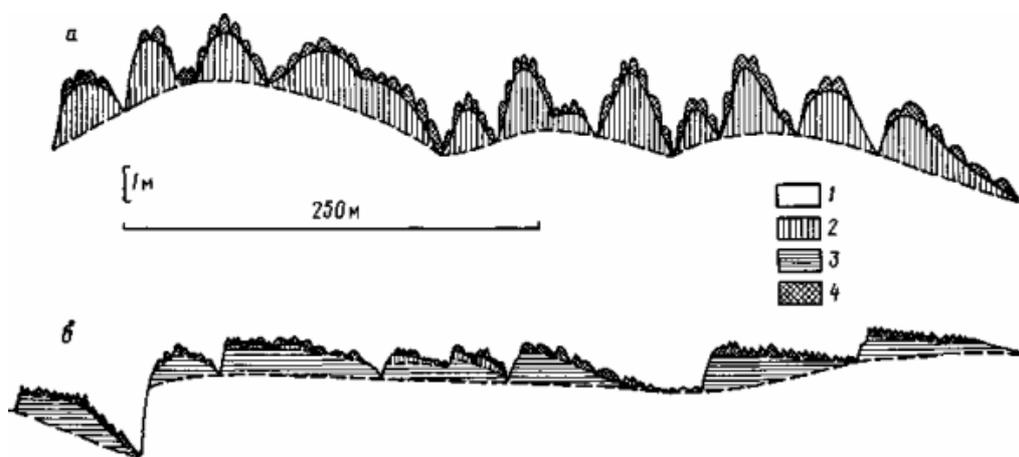


Рис. 1. Иерархически построенный комплекс донных гряд в русле р. Нигер во время половодья 1978 г. (а) и в межень (б). 1 — заструги; 2, 3 — трехмерные и двумерные дюны; 4 — рифели

Однако даже в межень не все гряды иерархического комплекса донных форм руслового рельефа характеризуются крутизной низового откоса, достаточной для задержания всех попадающих сюда частиц наносов. А во время половодья и паводков, когда переносится основная масса влекомых наносов, крутизна низовых откосов донных гряд существенно меньше угла естественного откоса для слагающего их материала в воде. Так, на пике половодья 1978 г. на р. Нигер у пос. Аджаокута на дне русла сформировались гряды трех классов (рис. 1, а): рифели высотой 0,3—0,5 м и длиной 4—7 м, дюны высотой 1,0—2,5 м и длиной 30—50 м и заструги высотой 0,5—1,0 м и длиной 120—250 м [11]. Крутизна низового откоса для рифелей составляла в среднем 0,14—0,16, для трехмерных дюн — 0,06—0,07, для заструг — 0,011. Крутизна естественного откоса в воде для слагающего гряды крупного песка 0,5—0,7. В этом случае некоторая доля влекомых наносов транзитом проходит подвалья самых мелких гряд — рифелей, так же как рифели частично проходят по низовым откосам дюн, а дюны — по низовым откосам заструг. Расчеты по формуле (1) дают существенно заниженную оценку реального расхода наносов; ошибка тем больше, чем более крупные гряды из иерархического комплекса донных форм используются для расчетов. Для р. Нигер в половодье 1978 г. расход влекомых наносов, рассчитанный по дюнам, составил  $4,5 \cdot 10^{-5}$ , по застругам —  $1,17 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ . На р. Лена у пос. Мохсоголлох на спаде половодья 1986 г. расход наносов по рифелям был равен  $39,5 \cdot 10^{-5}$ , по дюнам —  $9,54 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$  на погонный метр ширины русла.

Анализ этого явления, следуя [4], проведем с помощью уравнения деформации дна

$$\frac{\partial z_{01}}{\partial t} = -\frac{\partial q_s}{\partial x} \quad (2)$$

где  $z_{01}$  — отметка дна на поверхности самых мелких гряд 1 класса; направление оси  $x$  совпадает с направлением движения донных гряд. Так как для каждой конкретной отметки дна полная производная по времени равна нулю

$$\frac{dz_{01}}{dt} = \frac{\partial z_{01}}{\partial t} + \frac{\partial z_{01}}{\partial x} \frac{dx}{dt} = 0$$

то

$$\frac{\partial z_{01}}{\partial x} \frac{dx}{dt} = c_{z1} \frac{\partial z_{01}}{\partial x} = \frac{\partial c_{z1} z_{01}}{\partial x} - z_{01} \frac{\partial c_{z1}}{\partial x} = \frac{\partial q_s}{\partial x} \quad (3)$$

Здесь

$$\frac{dx}{dt} = c_{z1} = \frac{\partial q_s}{\partial z_{01}} \quad (4)$$

— скорость перемещения точки дна с отметкой  $z_{01}$ . Эту скорость можно отождествить со скоростью перемещения  $c_1$  (в общем случае переменной по  $x$ ) самой малой донной гряды (1-го класса) в точке с отметкой дна  $z_{01}$ .

Интегрируя (3) по  $x$ , получим следующий общий интеграл:

$$q_s = c_{z1}z_{01} - \int_{z_{01}} \frac{\partial c_{z1}}{\partial x} dx + F(t) \quad (5)$$

Произвольную функцию  $F(t)$  определим по условиям в ложбине самой малой гряды:

$q_s = q_{s11}$ ,  $z_{01} = z_{011}$ ,  $c_{z1} = c_{z11}$ . Тогда

$$F(t) = q_{s11} - c_{z11}z_{011} + \int_{z_{011}} \frac{\partial c_{z11}}{\partial x} dx$$

и

$$q_s = q_{s11} + c_{z1}z_{01} - c_{z11}z_{011} - \int_{z_{011}} \frac{\partial c_{z1}}{\partial x} dx + \int_{z_{011}} \frac{\partial c_{z11}}{\partial x} dx$$

Таким образом, в случае деформирующихся при перемещении гряд расход наносов меняется по их длине пропорционально отметкам их профиля с поправкой на степень неравномерности движения разных точек профиля. Необходимо также учитывать расход наносов и динамику дна в подвальях гряд.

Осредняя (5) по длине гряды  $L_1$  получим формулу для среднего расхода влекомых наносов в форме деформирующихся во времени гряд с учетом транзита наносов в их подвальях:

$$\bar{q}_{s1} = \bar{q}_{s11} + \frac{1}{L_1} \int_0^{L_1} \left( c_{z1}z_{01} - \int_{z_{01}} \frac{\partial c_{z1}}{\partial x} dx - c_{z11}z_{011} + \int_{z_{011}} \frac{\partial c_{z11}}{\partial x} dx \right) ds$$

или в более привычном и удобном для практического применения виде

$$\bar{q}_{s1} = \bar{q}_{s11} + \sigma_1^* h_1 \bar{c}_1 \quad (6)$$

Здесь вводится динамический коэффициент формы гряды

$$\sigma_1^* = \frac{\frac{1}{L_1} \int_0^{L_1} \left( c_{z1}z_{01} - \int_{z_{01}} \frac{\partial c_{z1}}{\partial x} dx - c_{z11}z_{011} + \int_{z_{011}} \frac{\partial c_{z11}}{\partial x} dx \right) ds}{h_1 \bar{c}_1}$$

При неизменной по длине гряды скорости перемещения точек ее поверхности

(для гряд, не изменяющих при движении свою форму) динамический коэффициент формы гряды совпадает со статическим коэффициентом формы гряды

$$\sigma = \frac{F}{h_1 c_1}$$

где  $F$  — площадь продольного сечения гряды.

С учетом (6) можно записать формулу для скорости смещения гряд 1-го класса в интегральной форме:

$$\bar{c}_1 = \frac{\bar{q}_{s1} - \bar{q}_{sv1}}{\sigma_1^* h_1} \quad (7)$$

Формулы (4), (6) и (7) применимы для расчетов скорости смещения и расхода влекомых наносов для наиболее простых гряд, поверхность которых не осложнена более мелкими. Для большинства рек такими грядами являются рифели или дюны.

Если в уравнение деформации (2) поставить вместо местного расхода влекомых наносов  $q_s$  расход влекомых наносов, осредненных по длине наиболее мелких гряд  $\bar{q}_{s1}$ , и провести те же операции, получим формулу для среднего по длине крупной гряды 2 класса расхода влекомых наносов:

$$\begin{aligned} \frac{\partial z_{02}}{\partial t} &= -\frac{\partial c_{z2} z_{02}}{\partial x} + z_{02} \frac{\partial c_{z2}}{\partial x} = -\frac{\partial \bar{q}_{s1}}{\partial x} \\ \bar{q}_{s1} &= q_{sv2} + c_{z2} z_{02} - c_{z12} z_{012} - \int z_{02} \frac{\partial c_{z2}}{\partial x} dx + \int z_{012} \frac{\partial c_{z12}}{\partial x} dx \\ \bar{q}_{s2} &= \bar{q}_{sv2} + \sigma_2^* h_2 \bar{c}_2 = \bar{q}_{sv1,2} + (\sigma_1^* h_1 \bar{c}_1)_{1,2} + \sigma_2^* h_2 \bar{c}_2 \end{aligned} \quad (8)$$

Формулу (4) можно трансформировать для расчета скорости смещения крупной гряды 2-го класса, осложненной мелкими (1-го класса)

$$c_{z2} = \frac{\partial \bar{q}_{s1}}{\partial z_{02}} = \frac{\partial}{\partial z_{02}} \left( \bar{q}_{sv1} + \sigma_1^* h_1 \frac{\partial \bar{q}_s}{\partial z_{01}} \right) \quad (9)$$

Исходя из равенства  $q_{s1}$  и  $q_{s2}$  (в среднем за продолжительный период времени), из (8) и (6) можно записать скорость смещения гряд 2-го класса в интегральном виде

$$\bar{c}_2 = \frac{\bar{q}_{sv1} + \sigma_1^* h_1 \bar{c}_1 - \bar{q}_{sv1,2} - (\sigma_1^* h_1 \bar{c}_1)_{1,2}}{\sigma_2^* h_2} \quad (10)$$

Для следующих в иерархическом ряду гряд 3-го класса, по поверхности которых смещаются более мелкие гряды двух классов,

$$\bar{q}_{s3} = \bar{q}_{s13} + \sigma_3^* h_3 \bar{c}_3 = \bar{q}_{s1.12.13} + (\overline{\sigma_1^* h_1 c_1})_{12.13} + (\overline{\sigma_2^* h_2 c_2})_{13} + \sigma_3^* h_3 \bar{c}_3 \quad (11)$$

$$c_{z3} = \frac{\partial \bar{q}_{s2}}{\partial z_{03}} = \frac{\partial}{\partial z_{03}} \left[ \bar{q}_{s1.12} + \left( \overline{\sigma_1^* h_1 \frac{\partial q_s}{\partial z_{01}}} \right)_{12} + \sigma_2^* h_2 \frac{\partial}{\partial z_{02}} \left( \bar{q}_{s1} + \sigma_1^* h_1 \frac{\partial q_s}{\partial z_{01}} \right) \right] \quad (12)$$

$$\bar{c}_3 = \frac{\bar{q}_{s1.12} + (\sigma_1^* h_1 \bar{c}_1)_{12} - \bar{q}_{s1.12.13} - (\overline{\sigma_1^* h_1 c_1})_{12.13} + \overline{\sigma_2^* h_2 c_2} - (\sigma_2^* h_2 \bar{c}_2)_{13}}{\sigma_3^* h_3} \quad (13)$$

$$\bar{c}_3 = \frac{\bar{q}_{s1} + \sigma_1^* h_1 \bar{c}_1 - \bar{q}_{s1.13} - (\sigma_1^* h_1 \bar{c}_1)_{13}}{\sigma_3^* h_3} \quad (13a)$$

Подобного рода формулы несложно получить для ряд последующих классов, однако такие сложные комплексы уже трудно использовать для оценки стока влекомых наносов.

Таким образом, при определении расхода влекомых наносов по параметрам донных гряд в период их активного развития необходимо учитывать классы гряд, по характеристикам которых проводятся эти расчеты. Если имеется информация о скоростях смещения и высотах гряд простой формы — рифелей, дюн без рифелей или более крупных простых гряд, то, как следует из формулы (6), нужно учитывать дополнительно расход влекомых наносов, транзитом проходящих по низовым откосам этих гряд. При использовании крупных активных гряд, осложненных более мелкими, необходимо, как отмечено Н. И. Алексеевским [1], рассчитывать расход влекомых наносов как сумму расходов наносов, переносимых в форме всех гряд иерархического комплекса. Однако анализ формул (8), (11) и т. п. показывает, что при этом расчете в первую очередь следует учитывать положение более мелких гряд на более крупных, а также оценивать величину расхода влекомых наносов, проходящих транзитом в форме частиц по низовым откосам гряд.

Из формул (4) — (11) следует, что скорости смещения гряд всех классов могут варьировать в широких пределах, становятся равными нулю и даже отрицательными (смещение гребня гряды вверх по реке) в зависимости от соотношения расходов влекомых наносов в той или иной форме на верховом и низовом откосах гряд. Возможны также любые соотношения скоростей смещения гряд разных классов, в том числе более быстрое смещение гребней крупных гряд, чем расположенных на них мелких гряд (за счет аккумуляции на низовом откосе крупной гряды наносов, транзитом проходящих по низовым откосам мелких

гряд). При этом длина крупной гряды может увеличиваться даже при неизменных гидравлических характеристиках потока. Возможна также обратная ситуация, в которой за счет повышенного транзита наносов на низовом откосе гряды ее длина уменьшается.

Формула (6) может быть записана в виде:

$$\bar{q}_{s1} = \bar{q}_{s1} - \sigma_1^* h_1 \bar{c}_1 = \left(1 - \frac{\sigma_1^* h_1 \bar{c}_1}{\bar{q}_{s1}}\right) \bar{q}_{s1} = K_{TP} \bar{q}_{s1} \quad (14)$$

Здесь вводится коэффициент транзита наносов  $K_{TP}$ .

Величина расхода наносов, проходящих транзитом по низовому откосу гряд и не участвующих в их перемещении  $q_{sl}$ , практически не поддается прямому измерению в полевых условиях. В лаборатории  $q_{sl}$  может быть измерен по разности объемов наносов, аккумулирующихся в отстойнике и транспортируемых в форме гряд. По данным полевых наблюдений возможна косвенная оценка  $q_{sl}$ . Если в потоке развиты в основном гряды 2-го класса, с пологим низовым откосом, поверхность которых покрыта грядами 1-го класса, но у отдельных крупных гряд низовой склон достиг угла естественного откоса для слагающего гряды материала в воде, такие гряды могут рассматриваться как локальные отстойники для транзитных наносов. Здесь формула (8) редуцируется до

$$\bar{q}_{s2} = \sigma_2^* h_2 \bar{c}_2 = \bar{q}_{s1} = \bar{q}_{s1} + \sigma_1^* h_1 \bar{c}_1$$

и тогда

$$\bar{q}_{s1} = \sigma_2^* h_2 \bar{c}_2 - \sigma_1^* h_1 \bar{c}_1$$

или

$$\bar{q}_{s1} = \frac{\sigma_2^* h_2 \bar{c}_2 - \sigma_1^* h_1 \bar{c}_1}{\sigma_2^* h_2 \bar{c}_2} \bar{q}_{s1} = K_{TP} \bar{q}_{s1} \quad (14)$$

Коэффициент транзита  $K_{TP}$  в этом случае, согласно (14), рассчитывается как

$$K_{TP} = \frac{F_{HH} - F_{PB}}{F_{HH}} \quad (15)$$

$F_{HH}$  и  $F_{PB}$  — площадь намыва наносов на низовом откосе крутой гряды 2-го класса и площадь размыва на верховом ее откосе соответственно. Использование формулы (15) освобождает от необходимости измерять скорость смещения самых мелких гряд, что обычно сопряжено с техническими сложностями.

На р. Терек ниже устья р. Сунжа, у с. Парабоч, в период половодья 1982 г. в

диапазоне средних скоростей потока 0,5—2,5 м/с, глубин 0,5—8,0 м проведено исследование морфологии и динамики сложного комплекса гряд, включающего рифели, дюны и заструги. Средние длины  $L$  и высоты  $h$  этих гряд описываются формулами

$$h = a\sqrt{H} \frac{U - U_0}{U_0} \exp\left(-b \frac{U - U_0}{U_0}\right) \quad (16)$$

$$L = c\sqrt{UH} \quad (17)$$

где коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$  для рифелей равны 0,27, 0,33, 3,6; для дюн 0,27, 0,17, 11; для заструг 0,27, 0,15, 35 соответственно. Здесь  $U_0$  — срывающая скорость по формуле Г. И. Шамова.

На перекатах формируются рифели и дюны, а в глубоких плесовых лощинах глубиной 7—8 м при скоростях потока 2,0—2,5 м/с рифели смываются с поверхности дюн, которые выполаживаются, и в их ложбинах происходит интенсивный транзит наносов. В плесах образуются наиболее крупные донные гряды — заструги длиной до 90—120 м и высотой до 4 м с крутым низовым откосом, где откладываются практически все влекомые наносы, перемещающиеся как в форме дюн, так и транзитом отдельными частицами. Расчеты по формуле (15) для самой верхней по течению на продольных профилях крутой заструги показывают, что  $K_{TP}$  увеличивается с уменьшением средней крутизны низового откоса мелких гряд на верховом откосе этой заструги (рис. 2). На р. Нигер у пос. Аджакута на спаде половодья 1978 г. пологие трехмерные дюны начали трансформироваться в двумерные дюны с крутым низовым откосом. Скорость трансформации у высоких дюн больше, чем у низких, и уже в начале спада половодья в русле сосуществовали пологие дюны с рифелями и транзитным перемещением наносов и крутые дюны, на низовом откосе которых полностью аккумулировался материал, поступающий сверху. Результаты расчетов по формуле (15) для этих дюн показывают ту же зависимость  $K_{TP}$  от крутизны низового откоса мелких гряд (рис. 2). Вид, связи не зависит от типа гряд: на Тереке это были дюны, на Нигере — рифели. Следует отметить, что рифели на Нигере примерно вдвое мельче, чем на Тереке, — коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$  в формулах (16) и (17) для них соответственно равны 0,27, 0,66 и 1,8.

Коэффициент транзита стока влекомых наносов может быть определен также по скорости изменения морфологии одной и той же гряды, смещающейся вниз по руслу. Если исходить из гипотезы, что время полной утраты грядами их начальной морфологии  $t_{TP}$  соответствует времени полной замены наносов в гряде, то

$$q_{sl} = \frac{\sigma^* hL}{t_{TP}} = \frac{\sigma^* hc\tau}{t_{TP}}$$

$$K_{TP} = \frac{\sigma^* hc\tau}{q_s t_{TP}} = \frac{\sigma^* hc\tau}{\left(\sigma^* hc + \frac{\sigma^* hc\tau}{t_{TP}}\right) t_{TP}} = \frac{\tau}{\tau + t_{TP}}$$

где  $\tau$  — период смещения гряды на полную длину. Время  $t_{TP}$  можно оценить по пересечению нулевой линии корреляционной функцией рядов морфологических элементов одних и тех же гряд в разные моменты времени (рис. 3).

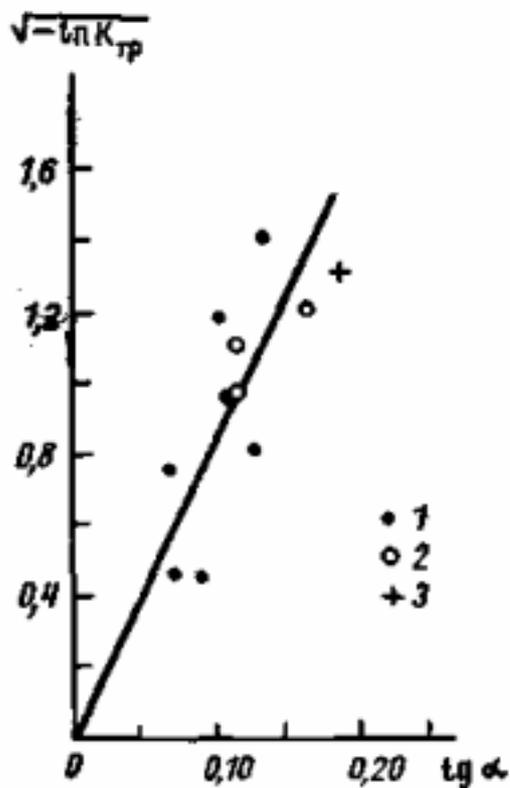


Рис. 2. Зависимость коэффициента транзита наносов от крутизны низового откоса гряд для рифелей Нигера (1), дюн Терека (2) и рифелей Верхней Оби (3)

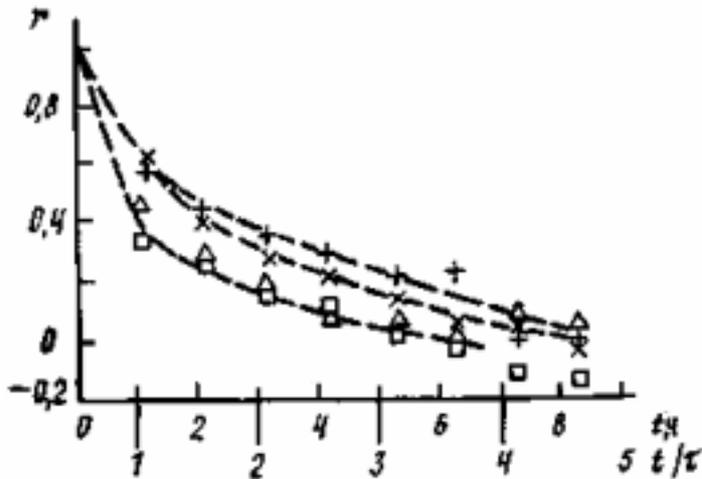


Рис. 3. Корреляционная функция для морфологических характеристик одних и тех же рифелей (Верхняя Обь) в разные моменты времени  $t/\tau$ . 1—4—длина, высота, крутизна и асимметрия рифелей соответственно

На спаде половодья 1985 г. на р. Обь ниже слияния рек Бия и Катунь были проведены наблюдения за морфологией и динамикой наиболее мелких гряд — рифелей высотой 0,1—0,3 м и длиной 1,5—4,0 м. Продольники длиной 70—100 м закреплялись на акватории надежно заякоренной плавучей обстановкой — накачанными воздухом волейбольными камерами, расставленными через 20—30 м. Это позволило с большой точностью проходить на катере с эхолотом по одному и тому же продольнику через 1 ч 10—12 раз в сутки. На соседних по времени эхограммах без особых затруднений определялось положение одних и тех же рифелей в разные моменты времени.

Анализ корреляционных функций (рис. 3) показывает, что более консервативными во времени характеристиками рифелей являются высота и длина, более изменчивыми — крутизна  $h/L$  и асимметрия  $L_H/L_B$  ( $L_H$  — проекция на горизонтальную плоскость низового,  $L_B$  — верхового откосов рифеля). Исходя из того, что объем рифелей определяется их длиной и высотой, по этим характеристикам оценивались время полной утраты грядами их начальной морфологии и коэффициент транзита.

В первом приближении зависимость коэффициента транзита от средней крутизны низового откоса гряд  $\text{tg}\alpha$  описывается формулой

$$K_{TP} = \exp(-64\text{tg}^2\alpha) \quad (18)$$

Формула (18) позволяет вычислять скорость смещения донных гряд разных классов с помощью данных о расходе влекомых наносов в форме частиц  $q_s$  и морфологии

более мелких гряд:

$$c_{z_2} = \frac{\partial}{\partial z_{02}} \left( K_{TP1} \bar{q}_s + \sigma_1^* h_1 \frac{\partial \bar{q}_s}{\partial z_{01}} \right) \quad (19)$$

$$c_{z_3} = \frac{\partial}{\partial z_{03}} \left[ K_{TP1} K_{TP2} \bar{q}_s + K_{TP2} \sigma_1^* h_1 \frac{\partial \bar{q}_s}{\partial z_{01}} + \sigma_2^* h_2 \frac{\partial}{\partial z_{02}} \left( K_{TP1} \bar{q}_s + \sigma_1^* h_1 \frac{\partial \bar{q}_s}{\partial z_{01}} \right) \right] \quad (20)$$

Если использовать для вычисления расхода влекомых разнозернистых наносов формулу вида

$$q_s = aU^n$$

а для расчета скорости течения

$$U = \frac{q}{\xi - z_0}$$

где  $q$  — удельный расход воды, то скорость смещения рифелей и гряд других классов, не осложненных более мелкими грядами, можно рассчитать по формуле

$$c_{z_1} = \frac{\partial q_s}{\partial z_{01}} = aq^n \frac{\partial}{\partial z_{01}} \left( \frac{1}{\xi - z_{01}} \right)^n = na \frac{U^n}{H} \quad (21)$$

скорость смещения дюн с рифелями (или заструг с дюнами) — по формуле

$$c_{z_2} = \frac{\partial}{\partial z_{02}} \left( K_{TP1} \bar{q}_s + \sigma_1^* h_1 \frac{\partial \bar{q}_s}{\partial z_{01}} \right) = aK_{TP1} q^n \frac{\partial}{\partial (z_{01} + h_1)} \left( \frac{1}{\xi - z_{02}} \right)^n + \\ a\sigma_1^* h_1 q^n \frac{\partial}{\partial (z_{01} + h_1)} \left[ \frac{\partial}{\partial z_{01}} \left( \frac{1}{\xi - z_{01}} \right)^n \right] = nK_{TP1} a \frac{U^n}{H + h_1} + n(n+1)a\sigma_1^* h_1 \frac{U^n}{H^2} \quad (22)$$

скорость смещения заструг с дюнами и рифелями — по формуле

$$c_{z_3} = \frac{\partial}{\partial z_{03}} \left[ K_{TP1} K_{TP2} \bar{q}_s + K_{TP2} \sigma_1^* h_1 \frac{\partial \bar{q}_s}{\partial z_{01}} + \sigma_2^* h_2 \frac{\partial}{\partial z_{02}} \left( K_{TP1} \bar{q}_s + \sigma_1^* h_1 \frac{\partial \bar{q}_s}{\partial z_{01}} \right) \right] = \\ nK_{TP1} K_{TP2} a \frac{U^n}{H + h_1 + h_2} + n(n+1)aK_{TP2} \sigma_1^* h_1 \frac{U^n}{(H + h_2)^2} + n(n+1)aK_{TP1} \sigma_2^* h_2 \frac{U^n}{(H + h_1)^2} + \\ n(n+1)(n+2)a\sigma_1^* h_1 \sigma_2^* h_2 \frac{U^n}{H^3} \quad (23)$$

Проверка формул (21) — (23) и оценка параметров  $a$  и  $n$  осуществлялись на основе более чем 40 измерений морфологии гряд, скорости их перемещения и гидравлических характеристик потока на реках Лена (пос. Мохсоголлох), Нигер (пос. Аджакута), Обь (р. Бия — р. Ануй), Терек (с. Парабоч). При  $n = 4$  и  $a = 3,7 \cdot 10^{-4}$  получено

удовлетворительное совпадение рассчитанных и фактических скоростей смещения гряд разных классов (рис. 4, а). Если не использовать в вычислениях формулы (21) — (23) члены, появляющиеся при учете иерархической структуры донного рельефа русла и транзита наносов, соответствие измерений расчетным данным гораздо хуже (рис. 4, б).

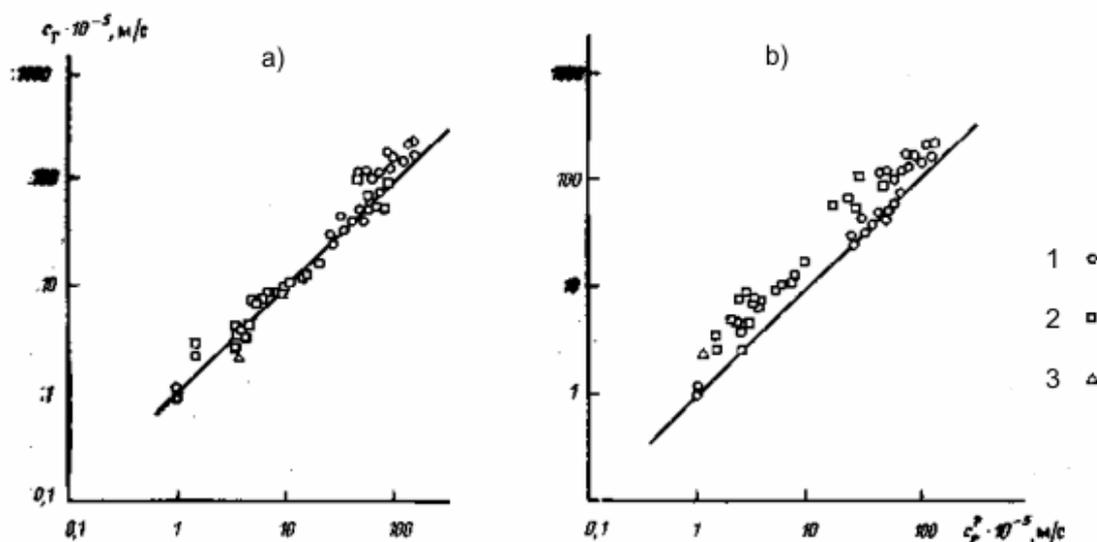


Рис. 4. Сопоставление измеренных и рассчитанных скоростей смещения гряд: а, б — расчеты с учетом сложности грядового комплекса и без него. 1—3 — гряды 1—3-го классов соответственно

Существенная особенность динамики сложного комплекса донных гряд — возможность вариации скоростей смещения крупных гряд только за счет случайного изменения морфологии мелких гряд при неизменных гидравлических характеристиках потока. Так, увеличение высоты и крутизны малых гряд приводит к быстрому уменьшению величины второго члена в формуле (22) и существенно снижает скорости смещения крупных гряд. Уменьшение высоты и крутизны малых гряд повышает скорости крупных, а при полном смыве мелких гряд скорость смещения крупных нужно рассчитывать уже по формуле (21).

С гидравлическими характеристиками потока тесно связаны только средние морфологические параметры гряд. Однако высоты и длины конкретных гряд при одинаковой глубине и скорости потока варьируют в очень широких пределах, как в пространстве, так и во времени. Они хорошо аппроксимируются гамма-распределением ( $C_v = 0,4—0,5$  и  $C_s = 2C_v$ ).

Например, на р. Терек у с. Парабоч во время паводка летом 1982 г. на протяжении

одних суток при мало изменяющихся скоростях и глубинах потока высоты дюн на застругах изменялись от 0 до 1,2 м. Соответственно скорости смещения заструг отличались почти в 2 раза — от 50—70  $10^{-5}$  в периоды наличия дюн до 120—160  $10^{-5}$  м/с в периоды их смыва. Подобные пульсации скорости сложных гряд делают неоднозначными оценки расходов влекомых наносов даже с использованием формул типа (21) - (23), если не проведены достаточно частые во времени повторные промеры для выявления изменчивости морфологии гряд.

1. *Алексеевский Н. И., Горбатенко А. В.* Физико-географические аспекты транспорта влекомых наносов на равнинных реках//Вести. МГУ. Сер. 5, География. 1989. № 4. С. 61—68.
2. *Апполов Б. А., Лукешин М. А.* Практическая гидрометрия твердого расхода наносов. Тифлис, 1929. 383 с.
3. *Великанов М. А.* Русловой процесс. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1958. 395 с.
4. *Гришанин К. В.* Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 312 с.
5. *Знаменская Н. С.* Движение наносов. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 188 с.
6. *Капитонов Н. М., Караушев А. В., Разумихина К. В.* Изучение движения наносов в нижних бьефах ГЭС//Тр. ГГИ. 1974. Вып. 210. С. 98—112.
7. *Копалиани З. Д.* Приближенный метод расчета перемещений мезоформ речногорусла//Тр. ГГИ. 1983. Вып. 288. С. 9—15.
8. *Лопатин Г. В.* Наносы рек СССР. М.: Географгиз, 1952. 366 с.
9. *Поляков Б. В.* Исследование стока взвешенных и донных наносов. Л.: ГГИ, 1934. 129 с.
10. *Поляков Б. В.* Методика исследования речных наносов и перекатов. М.; Л.: ГИМИЗ, 1940. 76 с.
11. *Сидорчук А. Ю.* Динамика грядового рельефа русла р. Нигер//Гидрофизические процессы в реках и водохранилищах. М.: Наука, 1985. С. 162—168.