

УДК 627.141.1(292.52)  
DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-4-93-99

## АНАЛИЗ НАНОСНОГО РЕЖИМА ГОРНО-ПРЕДГОРНЫХ УЧАСТКОВ РЕК ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

*Г.И. Логинов, Б.Б. Курумшиев, Т.К. Сыдыков*

*Аннотация.* Рассмотрены основные факторы, определяющие наносный режим горно-предгорных участков рек Центральной Азии, которые необходимо учитывать при проектировании речных гидротехнических сооружений. Представлены расчётные зависимости по определению расхода наносов и методики для расчёта фракционного состава наносных смесей, применяемые при расчёте параметров речных гидротехнических сооружений. В частности, с учетом их параметров определяются размеры и режимы работы русловых отстойников, наносозащитных и нанососбросных устройств водозаборных гидроузлов, регуляционных сооружений, используемых для защиты берегов и выравнивания русел и др.

*Ключевые слова:* мутность; наносы; расходы воды; частицы; поток; реки; русла.

---

## БОРБОРДУК АЗИЯНЫН ДАРЫЯЛАРЫНЫН ТОО ЭТЕКТЕРИНДЕГИ УЧАСТОКТОРУНУН ЧӨКМӨЛӨР РЕЖИМИНЕ ТАЛДОО ЖҮРГҮЗҮҮ

*Г.И. Логинов, Б.Б. Курумшиев, Т.К. Сыдыков*

*Аннотация.* Борбордук Азиянын дарыяларынын тоо этектериндеги участкторунун чөкмөлөр режимин аныктоочу негизги факторлор каралат, алар дарыянын гидротехникалык курулуштарын долбоорлоодо эске алынууга тийиш. Чөкмөлөрдүн агымын аныктоонун эсептелген көз карандылыктары жана дарыянын гидротехникалык курулуштарынын параметрлерин эсептөөдө колдонулган чөкмө аралашмалардын фракциялык курамын эсептөө ыкмалары келтирилген. Атап айтканда, алардын параметрлерин эсепке алуу менен дарыянын нугундагы чыпкалардын, суу алуучу гидроэлектрдик курулмалардын чөкмөлөрдөн коргоочу жана чөкмө агызуучу түзүлүштөрүнүн, жээктерди коргоо жана дарыянын нугун тегиздөө үчүн колдонулуучу жөнгө салуучу түзүлүштөрдүн жана башкалардын өлчөмдөрү жана иштөө режимдери аныкталат.

*Түйүндүү сөздөр:* булгануу; чөкмөлөр; суу чыгымдары; бөлүкчөлөр; агым; дарыялар; дарыянын нугу.

---

## ANALYSIS OF THE SUPPLY REGIME OF MOUNTAIN-FOOTHILL RIVERS IN CENTRAL ASIA

*G.I. Loginov, B.B. Kurumshiev, T.K. Sydykov*

*Abstract.* The article considers the dependence of the sediment regime of the mountain-foothill areas of the rivers of Central Asia, which must be taken into account when designing river hydraulic structures. Calculated dependencies for determining sediment discharge and methods for calculating the fractional composition of sediment mixtures are used in the design of river hydraulic structures. In particular, they are used to determine the parameters of channel sedimentation tanks, sediment protection and sediment discharge devices for water intake hydroelectric systems, regulatory structures used to protect banks and align channels, etc.

*Keywords:* turbidity; sediment; water discharge; particles; flow; rivers; channels.

Реки Центральной Азии отличаются высокой эрозионной деятельностью и соответственно большей средней годовой мутностью, которая изменяется в широком диапазоне – от 0,01 до 18 кг/м<sup>3</sup>. Наибольшую мутность имеют южные реки. Если мутность северных рек не превышает 0,2–0,3 кг/м<sup>3</sup>, то у южных рек мутность больше 3 кг/м<sup>3</sup> (рисунок 1).



Рисунок 1 – Движение двухфазного потока (вода-наносы) на участке р. Талгар в отмошке, предварительно сформированной паводковыми расходами

Наносный режим рек зависит от гидрологических топографических – рельефных, морфометрических, почвенно-геологических условий местности.

Горные участки рек, в зависимости от направления течения, имеют ряд особенностей твердого стока, которые необходимо учитывать при проектировании речных гидротехнических сооружений. Этому вопросу посвящены работы многих ученых, занимающихся гидроморфометрией рек, проблемами водозабора, проектирования дорог и мостов, защитой территорий от селей и затоплений и др. [1–6].

В общем случае можно отметить следующие особенности рек региона, в зависимости от их расположения [3, 6]:

1. Малые и средние реки, текущие поперек хребтов, имеют:
  - высокую интенсивность нарастания уровней (до 20 см/мин) и расходов (до 185 м<sup>3</sup>/мин), особенно в период нарастания паводков;
  - малое количество наносов в межень и большое их количество в паводок;
  - ярко выраженную зависимость величины содержания наносов от колебания расходов воды, чередования годов с различной водностью;
  - высокую плановую устойчивость русла в паводок и неустойчивость в меженные периоды;
  - высокую вертикальную устойчивость русла в межень и неустойчивость в паводок.
2. Средние и большие реки, текущие вдоль хребтов, кроме перечисленных особенностей, отличаются транспортом значительного количества наносов в межень (до 1 кг/м<sup>3</sup>). Прогноз русловых деформаций на долинных участках затруднен, а в ряде случаев практически не возможен.
3. Крупность наносов, проходящих в паводок в реках, протекающих поперек хребтов, составляет более 500 мм, больше чем у рек, протекающих вдоль хребтов – не более 150 мм.

Движение воды на горных и предгорных участках рек в основном имеет бурный характер течения, и обладает большим запасом гидравлической энергии. Это является причиной для выноса вниз по течению большого количества наносов, основная масса которых откладывается на долинном участке.

Фракционный состав наносов изменяется в широком диапазоне – от мельчайших частиц до крупных камней и валунов диаметром 500–600 мм и более [2, 7].

Основными факторами, определяющими транспортирующую способность водного потока, являются уклоны дна рек и расходов воды, которые изменяются в значительных пределах. Эта закономерность выражена на переходном участке горных водотоков с изменением уклона дна русла или с изменением гидравлических условий. На предгорных участках, как правило, с уменьшением скорости течения и продольных уклонов по дну реки перемещаются наносы более мелкого состава, которые имеют вид песчано-галечниковых гряд.

Основную часть транспортируемых наносов составляют взвешенные, доля которых в общем балансе наносного стока изменяется от 0,4 до 1,0. Количество и фракционный состав взвешенных наносов меняется не только для различных рек и различных по водоносности лет, но и для различных участков одной и той же реки [7]. Большая часть стока взвешенных наносов, как и донных, приходится на период больших расходов, особенно на период дождевых пиков, когда склоновая эрозия достигает наибольших размеров. Однако тесной связи между мутностью и расходами воды не обнаруживается: при одном и том же расходе воды в реке в начале пика паводка насыщенность потока наносами заметно выше, чем на его спаде [8].

Наносный режим рек также зависит от эрозионной деятельности, которую можно характеризовать интенсивностью смыва с поверхности склонов водосборов. В среднем интенсивность смыва не превышает 10 т с 1 км<sup>2</sup> в год. Максимальный смыв наносов превосходит 2500 т с 1 км<sup>2</sup>. Большие скорости течения и мутность рек Центральной Азии приводят обычно к сильной изменчивости русел на равнинных участках [2, 8].

Транспорт наносов представляют, как проявление глобального флювиального геоморфологического процесса. Количественное и качественное содержание наносов в реках определяется несколькими основными факторами [9, 10]:

- количеством и характером осадков, выпадающих в водосборном бассейне;
- видом и количеством растительности;
- температурным режимом;
- свойствами почвогрунтов и горных пород, слагающими водосборную поверхность;
- энергетическими характеристиками отдельных районов бассейна (уклоны и формы склонов);
- антропогенным воздействием.

Плотность материала наносов изменяется в небольших пределах – от 2055 до 2800 кг/м<sup>3</sup>. Наиболее распространенными являются наносы с плотностью 2650 кг/м<sup>3</sup>. При этом наносы, в зависимости от геометрических размеров отдельных частиц, подразделяются на глиноземы размером более 0,001 мм, а начиная с 0,01 – кремнеземы и гравелисто-галечниковые седименты [11].

В странах бывшего Советского Союза пользуются шкалой гидравлической крупности В.Н. Гончарова [3]:

1) для наносов с диаметром частиц менее 0,20 мм (ламинарная область обтекания при  $Re_d \leq 1$ )  $w = 0,66d^2$ , м/с ( $d$ , мм);

2) для наносов с крупностью частиц от 0,2 до 1,5 мм (переходная область обтекания при  $1 < Re_d \leq 300$ )  $w = 0,11d^{1,04}$  м/с ( $d$ , мм);

3) для наносов крупнее 1,5 мм (турбулентный режим обтекания при  $Re_d > 300$ )  $w = 0,134d^{0,5}$  м/с ( $d$ , мм).

Наносы с геометрической крупностью менее 0,2 мм устойчиво удерживаются внутри потока воды. Большая их часть проходит путь от истока до устья реки за один год. Под влиянием различных факторов и величин времени отложения, состоящие из таких частиц, способны уплотняться и развивать значительные силы сцепления, делаясь трудно размываемыми.

Наносы, состоящие из песчаных фракций, не имеют сил сцепления и удерживаются на дне водотоков только за счет силы тяжести. Наиболее легко размываемыми отложениями наносов в природе являются песчаные частицы крупностью от 0,2 до 0,4 мм [11].

Частицы песчаных наносов до 2 мм представляют собой отдельные части горной породы или кристаллы минералов. Принято считать, что частицы, с диаметром меньше указанного размера, не меняют форму по пути следования от момента образования в пределах водосборного бассейна до отложения в устьях рек. Скальные частицы крупностью от 2 до 5 мм в составе речных наносов встречаются редко, что, как считается, обусловлено особенностью процессов их образования и выветривания горных пород [2, 3, 11–13].

Более крупные частицы относят к гравелисто-галечниковым наносам, которые представляют собой окатанные зерна, форма которых близка к трехосному эллипсоиду. Как показали результаты многочисленных исследований, окатанная форма крупных камней, частиц гравия и галечника получается в результате обтекания их водой при их остановке или более медленном перемещении [14]. После достижения определенной конфигурации окатка отдельностей замедляется, или прекращается. При этом исследования показали, что отдельные частицы наносов не подвергаются истиранию по ходу перемещения по реке, а поддаются процессу сортировки, который активно проявляется при прохождении руслоформирующих расходов воды [11, 15, 16].

В практике оценки наносов и отмосток русел используется диаграмма Хьюлстрема, которая определяет связь скоростей водного потока с русловыми наносами и отложениями  $V_n \sim d$ , которая приведена на рисунке 2 [17].

На диаграмме видно, что зона транспорта наносов сужается в зоне перехода илистых частиц к песчаным образованиям, и имеет узкий диапазон транспортирующих скоростей, при которых транспортируются наносы.

Это определяет их остановку при снижении скорости воды. В то же время наносы с  $d < 0,01$  мм взвешиваются при малых скоростях течения [18]. Продолжение кривых в область наносов больших диаметров показывает, что транспорт и перемещение частиц происходят при таких скоростях, которые наблюдаются только при паводковых расходах. В период межени их транспорт прекращается, а остановка наносов приводит к образованию аллювиальной отмостки из материала, крупность которого превышает критическую для данной скорости воды.



Рисунок 2 – Диаграмма, приближенно иллюстрирующая влияние средней скорости водного течения на транспортировку, отложение или, наоборот, размыв (эрозию) ранее отложенных частиц разного размера

Более мелкие наносы ( $d < d_{кр}$ ) выносятся на нижерасположенные участки русла с меньшими уклонами, где они образуют свою отмостку. Транспорт песчаных наносов в межень не прекращается, но его область сужается, так как скорости течения в периферийных зонах становятся меньше неразмывающих.

В инженерной практике считается, что на участках рек, находящихся в одинаковых природных условиях, относительное соотношение фракций транспортируемых наносов с различной крупностью остается постоянным, которое можно выразить в количественной форме. В своих работах К.Ф. Артамонов, В.Ф. Талмаза и А.Н. Крошкин [6, 8] рекомендовали использовать номограмме (рисунок 3).

Эта номограмма используется для расчетов при определении осредненного фракционного состава влекомых наносов при рассмотрении сооружений, устраиваемых на участках горных рек с уклонами от 0,02 до 0,08, и расходами 10–100 м<sup>3</sup>/с.

Для работы по номограмме средний диаметр русловых отложений определяется по формуле [2, 3, 6]:

$$d_{cp} = Ki^{0,9} \left( \frac{Q_{рф}}{\sqrt{g}} \right)^{0,4}, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент, равный: 3,0 – при рассмотрении русловых отложений или наносов, транспортируемых руслоформирующим расходом; 1,6 – при расчете среднего диаметра наносов, транспортируемых расходами воды с величинами меньше руслоформирующих;  $i$  – уклон дна реки;  $Q_{рф}$  – руслоформирующий расход воды расход.

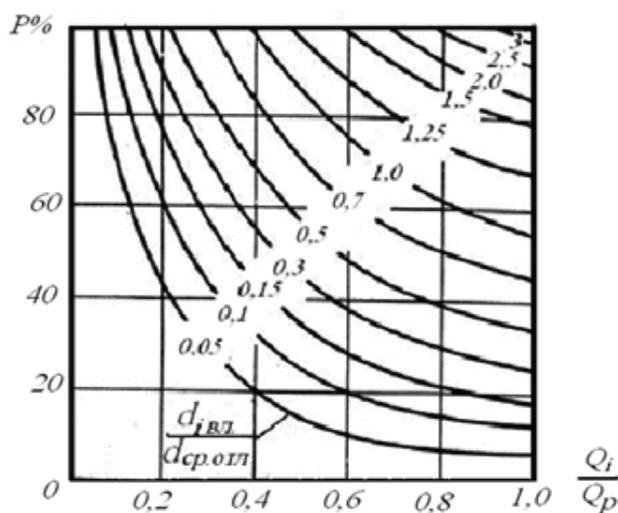


Рисунок 3 – Номограмма для определения фракционного состава влекомых наносов в зависимости от отношений рассматриваемых речных расходов  $Q_i$  к руслоформирующим расходам  $Q_p$  и расчетных фракций наносов  $d_{i,отл}$  к средневзвешенному диаметру русловых отложений

Транспортирующую способность водного потока оценивают в зависимости от величины превышения средней скоростью потока значений критических скоростей сдвига расчетных фракций наносов, имеющих средний диаметр в смеси.

Влекомые наносы формируют шероховатое дно речного русла, образуют многочисленные выступы. Поток воды, соприкасаясь с этими выступами, циркулируя и срывая частички с верхнего слоя, перемещает их и затрачивает на это часть энергии, что уменьшает скорость воды. Таким образом, транспорт частиц наносов зависит от характера их сопротивления силовому воздействию воды. Основными

критериями устойчивости частиц в естественном речном русле на горно-предгорных участках является показатель разницы средней скорости потока и скорости воды при остановке наносов [3, 6].

Расход влекомых наносов на участке реки определяется по формуле:

$$G_H = q_H B_H, \quad (2)$$

где  $q_H$  – удельный расход влекомых наносов, кг/с, м;  $B_H$  – ширина рассматриваемого участка русла с активным движением наносов:

- для первой паводковой волны удельный расход влекомых наносов [3]:

$$q_H = 0,14 \frac{(v)^4}{\sqrt{h}} (1,2v - 0,12v_{o.H}), \quad (3)$$

- для второй паводковой волны:

$$q_H = 0,035 \frac{(v)^4}{\sqrt{h}} (0,8v - 0,67v_{o.H}). \quad (4)$$

Ширина рассматриваемого участка русла с активным движением наносов определяется по формуле [12]:

$$B_H = B \sqrt{\frac{m}{m+1}}, \quad (5)$$

где  $B$  – ширина водного потока в речном русле, при отношении  $B/h > 10$  ( $h$  – средняя глубина водного потока), водный поток приводится к прямоугольному поперечному сечению, для горно-предгорных участков рек ширина водного потока определяется по формуле [2, 6]:

$$B = \frac{2,6}{i^{0,2}} \left( \frac{Q_i}{\sqrt{g}} \right)^{0,4} \times K, \quad (6)$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий величину рассматриваемого расхода; при руслоформирующем расходе равен (1,0); для расходов меньше руслоформирующих, определяется по формуле [12, 13]:

$$K = \left( \frac{Q_i}{Q_{r\phi}} \right)^{\frac{0,4(1,06-i^{0,06})}{i^{0,06}}}, \quad (7)$$

где  $Q_i$  – рассматриваемый расход водного потока.

При этом скорость воды, соответствующая остановке наносов, рассчитывается по формуле [6]:

$$v_{o.H} = 2 \frac{m-1,5}{m+1} \left( \frac{h}{d_{om}} \right)^{\frac{1}{m}} \sqrt{\frac{\gamma_H - \gamma}{\gamma} g d_{i.c.p.}}, \quad (8)$$

где  $m$  – знаменатель показателя степени при степенном законе распределения скорости по вертикали потока для горно-предгорных участков рек [6]:

$$m = 1,5 + 0,314C / \sqrt{g}; \quad (9)$$

$\gamma$  и  $\gamma_H$  – плотность воды и материала наносов, принимается равной 1000 и 2650 кг/м<sup>3</sup> соответственно;  $h$  – средняя глубина воды на прямолинейном участке;  $C$  – коэффициент Шези.

Средняя глубина на прямолинейном участке русла:

$$h = \left( \frac{Q_i}{5B_i^{0,2}} \right)^{\frac{1}{1,74/i+1,5}}. \quad (10)$$

$$d_{i,CP} = d_{om} \left( \frac{Q_i}{Q_{p\phi}} \right)^{1,1}, \quad (12)$$

где  $d_{om}$  – средний диаметр отмытки русла:

$$d_{om} = 4,5i^{0,9}; \quad (11)$$

$d_{i,CP}$  – средний диаметр транспортируемых наносов; при рассмотрении руслоформирующих расходах  $Q_{p\phi}$  применяется равенство:  $d_{i,CP} = d_{om}$  [12].

**Выводы.** Приведенный анализ наносного режима горно-предгорных участков рек представляет собой синтез результатов научно-практических исследований ученых, занимавшихся определением количественных и качественных характеристик речных наносов и отложений на территории Центральной Азии и Казахстана. Обобщение материала позволило усовершенствовать методику расчета морфометрических характеристик русел горно-предгорных участков рек и предложить алгоритм определения фракционного состава наносной смеси, который можно использовать при рассмотрении малых, средних и крупных естественных водотоков региона.

Поступила: 17.01.22; рецензирована: 28.01.22; принята: 07.02.22.

### Литература

1. Алтунин Н.П. Водозаборные узлы и водохранилища / Н.П. Алтунин. М.: Колос, 1964. 429 с.
2. Филончиков А.В. Проектирование автоматизированных водозаборных узлов на горных реках / А.В. Филончиков. Фрунзе: Кыргызстан, 1990. 376 с.
3. Логинов Г.И. Гидравлические процессы при водозаборе из горных рек / Г.И. Логинов. Бишкек: «Кут-Бер», 2014. 320 с.
4. Алтунин С.Т. Регулирование русел рек при водозаборе / Н.П. Алтунин. М.: Сельхозгиз, 1950. 335 с.
5. Бижанов Н.К. и др. Безопасность и контроль гляциальных селей в Казахстане / Н.К. Бижанов и др. Алматы: Гылым, 1998. 102 с.
6. Артамонов К.Ф. Методические указания по расчету устойчивых аллювиальных русел горных рек при проектировании гидротехнических сооружений / К.Ф. Артамонов, А.Н. Крошкин, В.Ф. Талмаза. М.: Колос, 1972. 64 с.
7. Большаков М.Н. Водные ресурсы рек Советского Тянь-Шаня и методы их расчета / М.Н. Большаков. Фрунзе: Илим, 1974. 307 с.
8. Талмаза В.Ф. Особенности изменений расходов влекомых наносов на горных реках и их влияние на регулирование пропуска наносов при водозаборе / В.Ф. Талмаза // Гидроавтоматика в мелиорации: сб. науч. тр. Фрунзе: Кирг. СХИ, 1989. С. 67–72.
9. Лопатин Г.В. Наносы рек СССР / Г.В. Лопатин. М.: Географгиз, 1952. 366 с.
10. Магай А.Б. Некоторые результаты лабораторного исследования движения воды на повороте открытого русла / А.Б. Магай // Тр. Ин-та энергетики. Т. III, 1961. Алма-Ата: Изд. АН. КазССР. С. 167–177.
11. Лапшенков В.С. Прогнозирование русловых деформаций в бьефах речных гидроузлов / В.С. Лапшенков. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 237 с.
12. Мельников Б.И. Наносоперехватывающее устройство с двойными циркуляционными порогами при водозаборе / Б.И. Мельников // Информ. листок № 105 (2556). Сер. 2. Фрунзе: КиргизИНТИ, 1979. 4 с.
13. Изменение климата и гидрология в Центральной Азии: исследование отдельных речных бассейнов. Алматы: Региональный экологический центр Центральной Азии (РЭНЦА), 2019. 24 с.
14. Гидротехнические сооружения для малой энергетики горно-предгорной зоны / под ред. Н.П. Лаврова. Бишкек: Салам, 2009. 496 с.
15. Соболин Г.В. Земельно-водные ресурсы, гидрологическая характеристика рек и паспорта водозаборных узлов оросительных систем регионов республики / Г.В. Соболин. Фрунзе: КиргНИИ, 1990.
16. Алтунин С.Т. Регулирование русел рек при водозаборе / С.Т. Алтунин. М.: Сельхозгиз, 1950. 335 с.
17. Справочник по литологии / под ред. Н.Б. Вассоевича, В.Л. Либровича, Н.В. Логвиненко, В.И. Марченко. М.: Недра, 1983. 509 с.
18. Чалов Р.С. Русловые процессы (русловедение): учеб. пособие / Р.С. Чалов. М.: ИНФРА-М, 2016. 565