

УДК 627.152.122

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ РУСЛОВЫХ НАНОСОВ РЕКИ ОБЬ НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА БАРНАУЛА

К. В. Марусин, А. В. Дьяченко, А. А. Коломейцев, А. А. Вагнер

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, E-mail: kat@iwer.ru

Представлены результаты гранулометрического анализа проб русловых наносов, отобранных в 24 точках на участке реки протяженностью 30 км. Русловые наносы представлены в основном песком с медианным диаметром 0.26 мм. В целом для протяженных участков реки характеристики гранулометрического состава (характеристики крупности) наносов достаточно однородны. Показано, что имеющиеся вариации этих характеристик оказывают на результаты расчета расхода русловых наносов существенно меньшее влияние, чем выбор собственно расчетной формулы.

Ключевые слова: русловые наносы, гранулометрический анализ, характеристики крупности, расход влекомых наносов, Обь, Барнаул.

DOI: 10.24412/2410-1192-2022-16403

Дата поступления: 28.02.2022

Непрерывные изменения во времени рельефа и плановых очертаний речного русла (морфодинамика русла) обусловлены перемещением водным потоком русловых наносов, т.е. рыхлого материала, покрывающего дно реки и формирующего различные русловые формы (пляжи, косы, осерёдки).

Русловые наносы представляют собой смесь частиц (гранул) различного размера. Однако, в науке и инженерной практике принято рассматривать поведение этой смеси как единой субстанции, а не отдельных частиц, её образующих. При этом используют обобщенные характеристики размеров частиц

наносов, или, иначе говоря, характеристики их крупности.

Неоднородность наносов по размерам частиц описывается интегральной функцией распределения вероятностей размера (диаметра) частиц. Эмпирический аналог такой функции строится в ходе гранулометрического анализа пробы наносов, когда эта проба просеивается через набор сит с ячейками различного диаметра (d), а вероятность выражается в отношениях веса части пробы, прошедшей через сито данного диаметра, к общему весу пробы. В большинстве случаев распределение вероятностей размеров частиц близко к логарифмическому.

рифмически нормальному распределению. Его параметрами служат математическое ожидание величины $lg(d)$ и коэффициент вариации этой величины. Однако, на практике принято пользоваться более простыми характеристиками распределения – диаметрами (размерами) с определенной вероятностью превышения или, иначе, «процентными диаметрами» (d_{10} , d_{50} , d_{90} и т.п.). Например, 50%-диаметр или медианный диаметр (d_{50}) означает, что 50% веса пробы мельче указанной величины.

Перемещение наносов водным потоком, иначе говоря, транспорт наносов, количественно характеризуется величиной их расхода в массовом (кг/с) или объемном (m^3/c) выражении через заданное поперечное (перпендикулярное к направлению транспорта) сечение. Размеры частиц являются одним из главных факторов, определяющих этот процесс. Поэтому параметры, характеризующие крупность русловых наносов (процентные диаметры), входят во все известные расчетные зависимости (формулы) для определения их расхода. В свою очередь эти формулы являются обязательной компонентой любой математической модели морфодинамики речного русла, включая простейшие инженерные методики [Гришанин, 1979; Гришанин, 1990; Барышников, 2006; Чалов, 2016].

В данной статье изложены результаты натурных исследований характеристик гранулометрического состава (характеристик крупности) русловых наносов р. Обь на территории г. Барнаула и сделаны некоторые оценки их влияния на результаты расчета расхода наносов.

Результаты натурных исследований

В августе – сентябре 2021 г. был выполнен специальный комплекс натурных и камеральных работ, а именно, отбор проб русловых наносов, их гранулометрический анализ и определение по результатам этого анализа (по эмпирическим кривым распределения) значений характерных параметров крупности (процентных диаметров).

Отбор проб наносов производился двумя сериями – 17 августа и 15 сентября на участке реки Обь протяженностью 30 км в гидрологических условиях постепенного перехода к осенней межени. Отметки уровня воды на гидрологическом посту Барнаул Росгидромета на даты отбора – 113 и 57 см над нулем поста, соответственно [Информационная система, 2022].

Точки отбора проб располагались на осушенной поверхности различных русловых форм (кос, пляжей, осередков и островов), по возможности, на незначительном удалении от уреза воды. В

условиях половодья эти места обычно затоплены на значительную глубину (рис. 1, 2).

В каждой точке отбиралось три пробы: с поверхности русловой формы и с глубин 25 и 50 см от поверхности.

Отметим, что такая схема отбора изначально не предполагала изучение распределения параметров крупности наносов по вертикали, а была обусловлена лишь стремлением повысить репрезентативность выборки в точке. По данным натурных наблюдений амплитуда вертикальных деформаций русла за период открытой воды может составлять несколько метров [Марусин и др., 2017; Зиновьев и др., 2021], так что для исследования именно вертикальной дифференциации русловых наносов глубины отбора проб должны иметь тот же порядок. В нашем случае можно говорить лишь о характеристиках крупности русловых наносов в их поверхностном слое.

Номера-идентификаторы точек отбора, приведенные на рисунке 1, будут использоваться далее по тексту для указания на нужную точку (например, точка №17). Для ссылки на конкретную пробу, отобранную в данной точке, будут указываться номер точки и горизонт (глубина) отбора пробы. Например, записи проба №17–00, проба №17–25, означают, что речь идет о пробах, ото-

бранных в точке №17 с поверхности и с глубины 25 см, соответственно.

В точках №19 и №22 из-за незначительного возвышения поверхности русловой формы над урезом воды отобрать пробу с глубины 50 см не удалось, поскольку шурф затапливался водой. Именно этим фактором вкупе со стремлением получить максимальное количество проб объясняется расположение некоторых точек отбора довольно далеко от уреза воды.

В точке №8 при проходке шурфа на глубине 50 см от поверхности встретился слой плотного (связного) глинистого грунта, и проба с этого горизонта не отбиралась.

Собственно процесс получения пробы состоял во вдавливании в рыхлый грунт открытой горловиной вниз «основной» алюминиевой банки из комплекта Полевой лаборатории Литвинова ПЛЛ-9 (рис. 3).

Объем каждой отобранной пробы грунта в естественном состоянии составлял не менее 100 см³.

Всего было взято 69 проб в 24 точках. Во всех пробах отобранный материал, по визуальной оценке, представлял собой песок. Примесей гравия и гальки совсем не наблюдалось. В некоторых пробах обнаруживались отдельные глинистые частицы размером 1–2 мм, которые при незначительном механическом усилии разрушались в пыль.

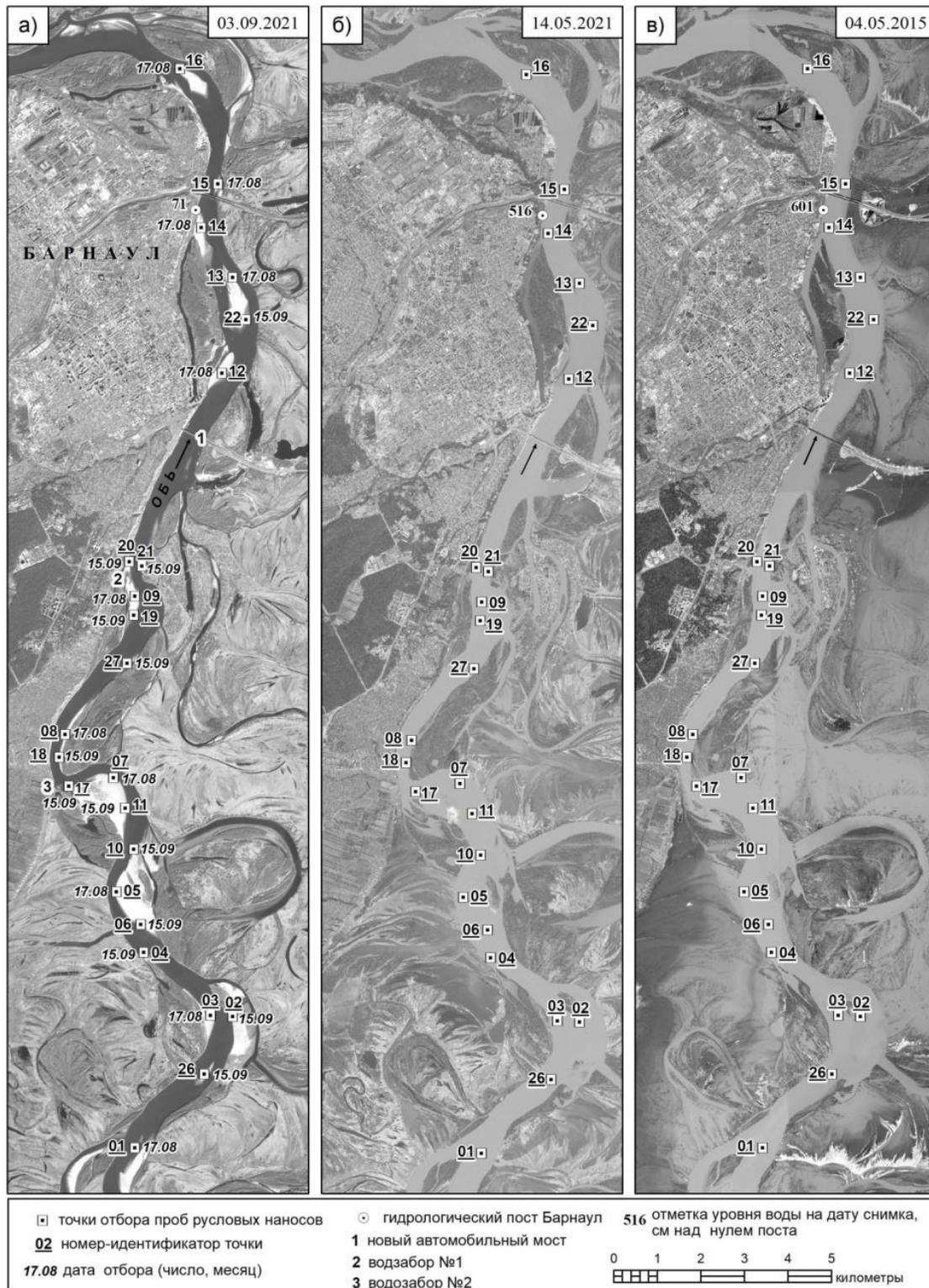


Рис. 1. Местоположение точек отбора проб русловых наносов на участке р. Обь на территории г. Барнаула в августе – сентябре 2021 г.
 Подложка – космические снимки, характеризующие состояние русла реки в различных гидрологических условиях: а – снимок спутника Канопус-В5; б, в – космические снимки из коллекции Google Digital Globe [Google Earth, 2022]

Fig. 1. The locations of the sediment sample point in Ob river channel at Barnaul city in August – September, 2021.
 The satellite images taken under various hydrological situations are used as the backgrounds: а – Kanopus-V5; б, в - Google Digital Globe collection [Google Earth, 2022]



Рис. 2. Виды русла р. Обь в точках отбора проб. Номер на фотографиях соответствует номеру точки, указанному на рисунке 1

Fig. 2. The photographs of the river channel at the sediment sample sites. The picture number corresponds to the sample point identification number shown in Figure 1



Рис. 3. Оборудование для гранулометрического анализа проб русловых наносов:
1–2 – основная алюминиевая банка из комплекта ПЛЛ-9; 3–6 – сита с размерами отверстий 2, 0.5, 0.25, 0.1 мм соответственно; 7 – поддон; 8 – батарея сит из комплекта ПЛЛ-9 в сборе; 9 – электронные настольные весы МК-3.2-А22.

Fig. 3. The equipment used for the sediment sieve analysis.
1–2 – the aluminum sediment containers; 3–6 – the sieves with a hole size 2, 0.5, 0.25, 0.1 mm correspondingly; 7 – the tray; 8 – the sieve set with the cap and the tray; 9 – the electronic scales.

Собранные пробы высушивались естественным путем в камеральных условиях.

Гранулометрический анализ выполнялся с помощью комплекта сит, входящего в состав ПЛЛ-9. Этот комплект содержит сита с диаметрами отверстий в свету: 0.1 мм, 0.25 мм, 0.5 мм и 2 мм. Общие размеры каждого сита: диаметр рабочей поверхности – 90 мм, высота – 25 мм (рис. 3).

Гранулометрический анализ заключался в просеивании пробы рыхлого грунта через батарею сит, поставленных друг на друга в порядке возрастания размера отверстия снизу вверх (рис. 3), и, определении доли (процента) веса фракции материала, оставшейся на каждом из сит и в поддоне, от общего веса пробы. Просеивание пробы осуществлялось вручную в течение 5–7 минут.

Определение общего веса пробы и весов фракций материала после просеивания производилось на электронных настольных весах МК-3.2–А22.

Оптимальный объем анализируемой пробы определяется вместимостью сита (его общими размерами), способом просеивания (механически или вручную), точностью весов, а также особенностями гранулометрического состава исследуемого материала. С одной стороны, всегда есть стремление

увеличить объем пробы, чтобы фракции с относительно малым процентным содержанием надежно определялись. С другой стороны, при преобладании в смеси частиц определенного диапазона крупности материал скапливается на одном из сит в значительном количестве, затрудняя поступление более мелких частиц на нижележащие сита, и, соответственно, процесс просеивания требует больше времени и усилий.

Опытным путем было установлено, что такой оптимальный объем пробы в нашем случае составляет примерно 56 см³ сухого рыхлого материала (одна полная основная банка ПЛЛ-9). При этом вес материала в анализируемых пробах имел значения 75–90 грамм.

По данным гранулометрического анализа каждой пробы строилась эмпирическая функция распределения размеров частиц в ней $F(d)$, показывающая процентное содержание фракции с размером частиц меньше d в общем весе пробы.

Суммируя значения веса фракций на соответствующих ситах для проб, принадлежащих одной точке, можно построить обобщенную функцию распределения в целом для точки. Аналогичный подход использован и для получения обобщенных функций распределения, как для всего набора данных, так и для отдельных групп точек.

При построении эмпирических функций распределения учитывался тот факт, что после просеивания каждой пробы сито с диаметром отверстий 2 мм всегда оставалось пустым, то есть $F(d) = 100\%$ для $d = 2$ мм. В пробе №27–50

$$lg(d_0) = lg(d_2) - F_2 \frac{lg(d_1) - lg(d_2)}{F_1 - F_2}, \quad d_2 > d_1, F(d_0) = 0 \quad (1)$$

где d - размера частиц (отверстий сита) в миллиметрах; $F(d)$ - значение эмпирической функции распределения для данного размера в процентах.

Примеры построенных эмпирических функций распределения представлены на рисунке 4.

По построенным эмпирическим функциям распределения находились значения следующих процентных диаметров – d_{10} , d_{50} , d_{90} . Параметры d_{50} и d_{90} используются в формулах расхода

$$d_{90} = \sigma^{1.3} d_{50}, d_{10} = \sigma^{-1.3} d_{50}, \frac{d_{90}}{d_{10}} = \sigma^{2.6} \quad (2)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение (квадратный корень из дисперсии).

Получить значения искомым процентных диаметров непосредственно в ходе гранулометрического анализа не удалось, поскольку экспериментальные

$$g(d_x) = lg(d_1) + (X - F_1) \frac{lg(d_2) - lg(d_1)}{F_2 - F_1}, \quad d_2 > d_x > d_1, F_2 > X > F_1 \quad (3)$$

где d – размера частиц (отверстий сита) в миллиметрах; $F(d)$ – значение

материал отсутствовал также и на сите 0.5 мм.

Значение d , при котором $F(d) = 0$, вычислялось по известным значениям путем линейной экстраполяции:

наносов, первый – практически всегда, второй – весьма часто [Гришанин, 1979; Гришанин, 1990; Барышников, 2006; Van Rijn, 1993].

Кроме того, в теоретическом логарифмически нормальном распределении медиана (d_{50}) совпадает с математическим ожиданием (средним значением), а величина d_{90}/d_{10} характеризует его дисперсию, поскольку для теоретического распределения имеют место следующие соотношения [Van Rijn, 1993]:

точки не попадали на нужные линии ординат. Поэтому величины d_{10} , d_{50} , d_{90} находились по эмпирическим функциям распределения линейной интерполяцией между известными (экспериментальными) значениями, а именно:

эмпирической функции распределения для данного размера в процентах; X –

искомый процент непревышения (значение функции распределения).

Результаты расчетов значений d_{10} , d_{50} , d_{90} для проб и в целом для точек представлены на рисунках 5 и 6, а для пространственных групп точек – в таблице 1.

Значения процентных диаметров, как видно из рисунков 5 и 6 демонстрируют существенные вариации от пробы к пробе и от точки к точке. Тем не менее, для групп точек, покрывающих достаточно протяженные участки русла (два и более километра), они изменяются весьма незначительно.

Из таблицы 1 можно заключить, что, в целом, величина d_{10} составляет примерно 0.1–0.12 мм; $d_{50} \approx 0.25$ –0.27 мм; $d_{90} \approx 0.45$ –0.46 мм.

Несколько выбивается из этого ряда значение d_{50} , полученное для группы точек, расположенной у водозабора №1. Однако этот район имеет специфическую морфодинамику и испытывает существенные техногенные воздействия [Марусин и др., 2017].

Следует также отметить, что на тех участках, где наблюдается преимущественная аккумуляция (накопление) наносов (точки №№ 2, 10, 17, 18, 8, 27, 13, 16) их крупность относительно мала. Там же где ведущим морфодинамическим процессом является размыв, например, на выпуклых берегах в верхних крыльях излучин (точки № 6, 11, 19), крупность наносов существенно выше.

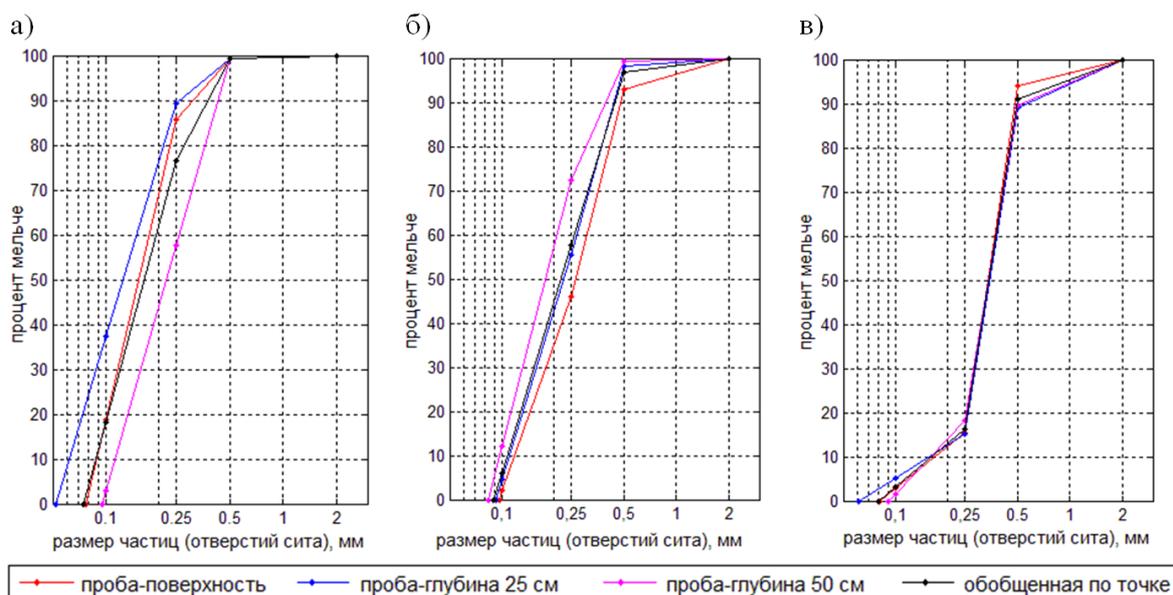


Рис. 4. Эмпирические функции распределения, построенные по результатам гранулометрического анализа проб русловых наносов, отобранных в точках №10 (а), №14 (б) и №20 (в)

Fig. 4. The empirical sediment size distribution functions for the samples taken at point №10(a), №4(б), №20(в)

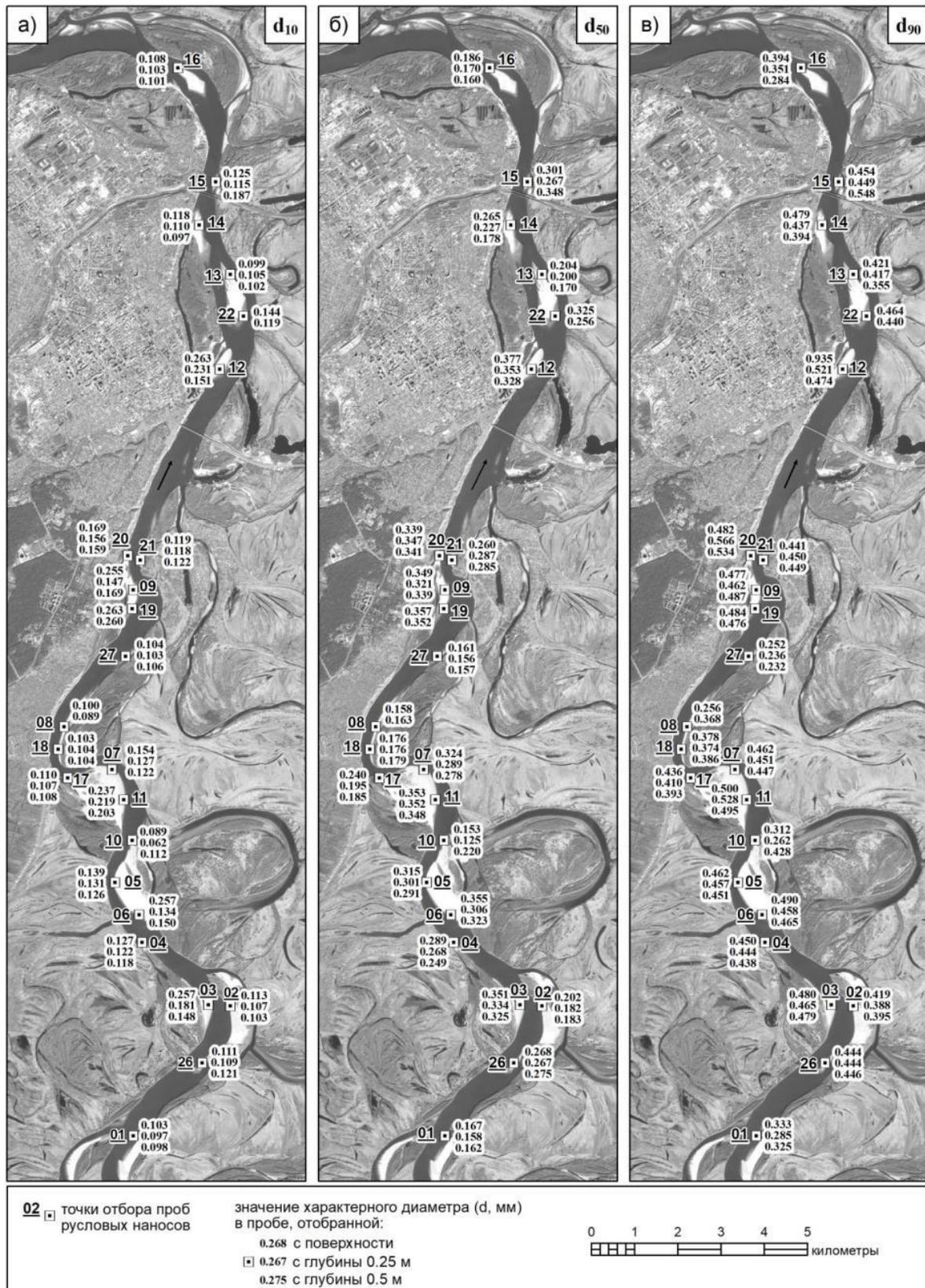


Рис. 5. Значения процентных диаметров d_{10} (а), d_{50} (б), d_{90} (в) по эмпирическим функциям распределения для проб русловых наносов, отобранных на участке р. Обь у г. Барнаул в августе – сентябре 2021 г.

Подложка – снимок спутника Канопус-В5, дата съемки 03 сентября 2021 г.

Fig. 5. The sediment size characteristics d_{10} (a), d_{50} (б), d_{90} (в) derived from the empirical distribution functions for the sediment samples taken in Ob river channel at Barnaul city in August – September, 2021.

Kanopus-V5 satellite image taken on September 03, 2021 is used as the background

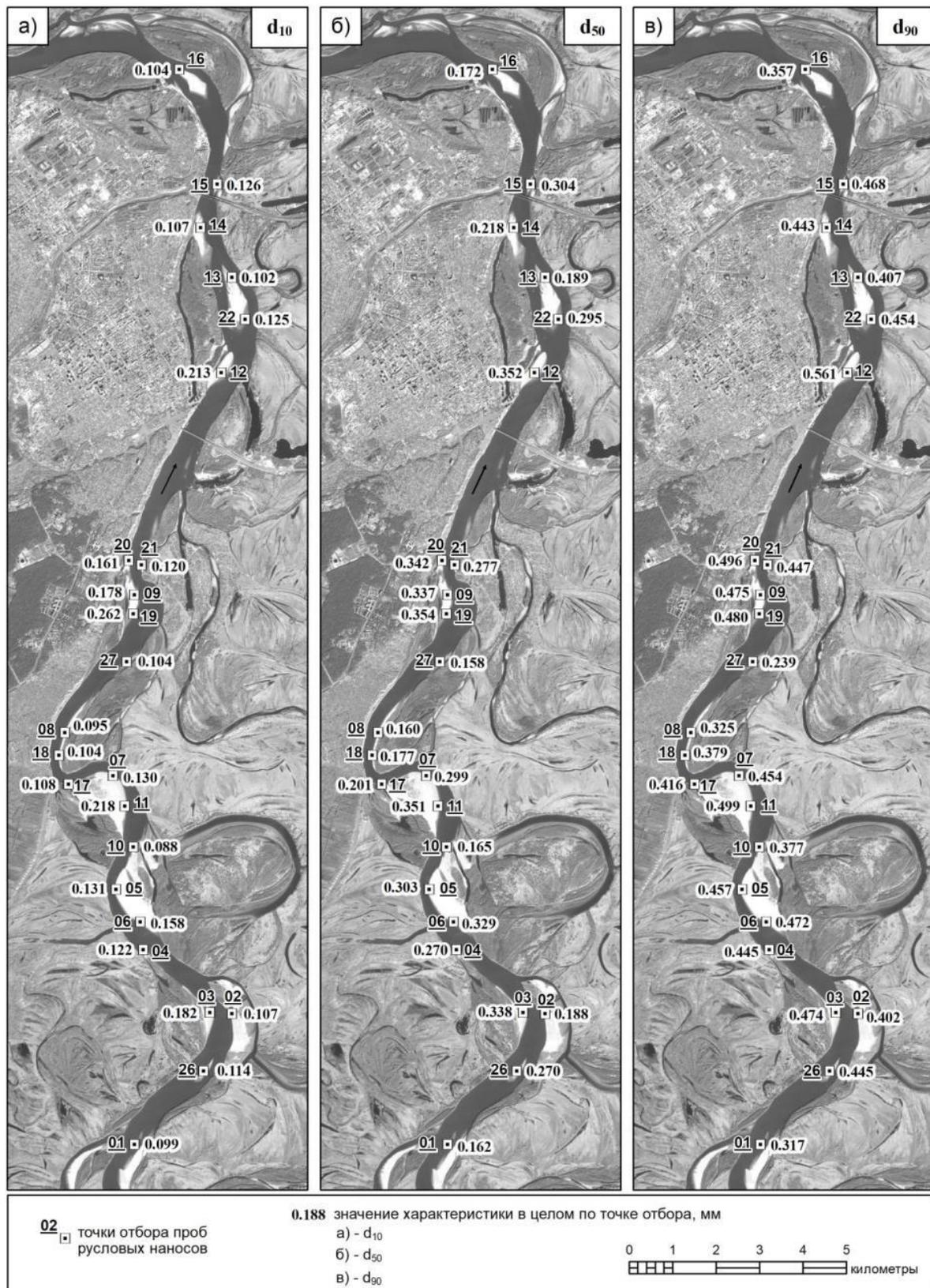


Рис. 6. Значения процентных диаметров d_{10} (а), d_{50} (б), d_{90} (в) по обобщенным эмпирическим функциям распределения для точек отбора проб.

Подложка – снимок спутника Канопус-В5, дата съемки 03 сентября 2021 г.

Fig. 6. The sediment size characteristics d_{10} (a), d_{50} (б), d_{90} (в) derived from the overall empirical distribution functions for the sediment sample points.

Kanopus-V5 satellite image taken on September 03, 2021 is used as the background

Таблица 1

Значения процентных диаметров d_{10} , d_{50} , d_{90} по обобщенным эмпирическим функциям распределения для пространственных групп точек.

Table 1

The sediment size characteristics d_{10} , d_{50} , d_{90} derived from the overall empirical distribution functions for the sediment sample point spatial groups.

Участок русла реки (рис. 1)	Группа точек	Кол-во точек	d_{10} , мм	d_{50} , мм	d_{90} , мм
Весь участок отбора проб	Весь набор	24	0.113	0.265	0.453
Выше нового автомобильного моста	Весь набор, исключая точки №12–16, 22	18	0.114	0.267	0.453
Ниже нового автомобильного моста	Точки 12–16, 22	6	0.112	0.259	0.456
Водозабор №1	Точки №9, 19–21, 27	5	0.123	0.296	0.466
Водозабор №2	Точки №7, 10, 11, 17, 18	5	0.108	0.246	0.448
Участок трех излучин выше водозабора №2	Точки № 4–8, 10, 11, 18	9	0.112	0.262	0.450

Влияние характеристик крупности русловых наносов на результаты расчета расхода наносов

В речных условиях наиболее значительная часть русловых наносов перемещается в форме «влекомых» наносов, т.е. путем качения по поверхности дна, сальтации (коротких прыжков) или в виде скользящего по его поверхности слоя, концентрация частиц в котором близка к плотности их упаковки в состоянии покоя. При таком движении частицы наносов не удаляются далеко от поверхности дна и не теряют контакта с ним на длительное время. Процесс перемещения влекомых наносов осуществляется

практически на всем протяжении периода открытой воды [Гришанин, 1990].

На сегодняшний день существует несколько десятков формул для расчета расхода влекомых наносов, как отечественных, так и зарубежных авторов [Гришанин, 1979; Барышников 2006; Van Rijn, 1993]. Рассмотрим здесь две такие зависимости, которые достаточно часто используются для решения практических задач: формулу Гришанина, называемую также формулой ЛИВИТа, и формулу Ван Рейна (*Van Rijn*) 1984 года.

Формула Гришанина имеет вид [Чекренев, Гришанин, 1975]:

$$q = 0.015 \left(\frac{U}{U_{cr}} \right)^3 d_{50} (U - U_{cr}) \quad (4)$$

где q – расход наносов через поперечное сечение единичной длины, $\text{м}^3/\text{с}\cdot\text{м}$; U – осредненная по глубине скорость течения, $\text{м}/\text{с}$; U_{cr} – «критическое» значение скорости течения, при котором начинается перемещение материала,

$\text{м}/\text{с}$; d_{50} – медианный (50%) диаметр наносов, м .

Для вычисления критической скорости в выражении (4) применяется соответствующая формула Гончарова:

$$U_{cr} = 0.96 \sqrt{g} (d_{50} + 0.0014)^{0.3} \left(\frac{d_{50}}{d_{90}} h \right)^{0.2} \quad (5)$$

где U_{cr} – «критическое» значение скорости течения, при котором начинается перемещение материала, $\text{м}/\text{с}$; d_{50} – медианный (50%) диаметр наносов, м ; d_{90} – 90% диаметр наносов, м ; h – глу-

бина потока, м ; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Формула Ван-Рейна 1984 года имеет вид [Van Rijn, 1993]:

$$q = 0.005 \cdot U h \cdot \left(\frac{U - U_{cr}}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) g d_{50}}} \right)^{2.4} \cdot \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{1.2} \quad (6)$$

где q – расход наносов через поперечное сечение единичной длины, $\text{м}^3/\text{с}\cdot\text{м}$; U – осредненная по глубине скорость течения, $\text{м}/\text{с}$; U_{cr} – «критическое» значение скорости течения, при котором начинается перемещение материала, $\text{м}/\text{с}$; d_{50} – медианный (50%) диаметр наносов, м ; h – глубина потока, м ; ρ_s –

плотность наносов, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ – плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Критическая скорость в формуле Ван Рейна для наносов с медианным диаметром, лежащем в интервале 0.1–0.5 мм, определяется как:

$$U_{cr} = 0.19 (d_{50})^{0.1} \lg \left(\frac{12h}{3d_{90}} \right) \quad (7)$$

где U_{cr} – «критическое» значение скорости течения, при котором начинается перемещение материала, $\text{м}/\text{с}$; d_{50} – медианный (50%) диаметр наносов, м ;

d_{90} – 90% диаметр наносов, м ; h – глубина потока, м ; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Как видно из выражений (4) – (7) рассматриваемые формулы Гришанина и Ван-Рейна используют один и тот же набор параметров, описывающих водный поток и наносы, а также весьма сходную общую структуру. В них расход влекомых наносов является функцией от величины превышения скорости потока над ее критическим значением, т.е. $q \approx f(U - U_{cr})$. Такое сходство, помимо широкого практического использования и различного происхождения (отечественное / зарубежное), и обусловило выбор именно этих формул.

Для анализа чувствительности формул расхода наносов к характеристикам их крупности рассмотрим три варианта таких характеристик, взятых из представленных выше натуральных данных. Описание этих вариантов приведено в таблице 2.

Следует отметить, что наименьшее значение медианного диаметра для точки наблюдается в точке №27 (рис. 6).

Однако в таблицу 2 была включена точка №8, поскольку, при мало отличающихся значениях d_{50} , она имеет более значительный разброс значений d_{50} и d_{90} .

Значения глубины и скорости течения, необходимые для расчета расхода наносов по формулам (4)–(7), были взяты из данных натуральных измерений, выполненных в 2017 и 2020 гг. в ближайшей окрестности некоторых точек отбора проб наносов [Дьяченко и др., 2018; Зиновьев и др., 2021]. Эти значения, совместно с данными, характеризующими общие гидрологические условия в момент измерений, представлены в таблице 3.

Подчеркнем, что, подбирая информацию для таблицы 3, мы стремились, прежде всего, отразить возможные вариации значений глубин и скоростей потока, имеющие место на рассматриваемом участке реки в различных гидрологических условиях.

Таблица 2

Варианты характеристик крупности русловых наносов для расчета их расхода по формулам (4) и (6)

Table 2

The sediment size characteristic options for bed load calculations by formulas (4) and (6)

Вариант №	Группа точек / Точка	Процентные диаметры, мм		Примечание
		d_{50}	d_{90}	
1	Весь набор	0.265	0.453	Обобщенные данные по участку (таблица 1)
2	Точка №19	0.354	0.480	«Крупные наносы» (максимум d_{50}) (рисунок 6)
3	Точка №8	0.160	0.325	«Мелкие наносы» (рисунок 6)

Таблица 3

Глубины воды и скорости течения в окрестности точек отбора проб русловых наносов по данным натурных измерений

Table 3

The river flow velocity and depth observed at the sediment sample points under various hydraulic conditions

№ п/п	Глубина воды, м (h)	Средняя по глубине скорость течения, м/с (U)	Точка отбора проб №	Дата измерений скорости и глубины потока	Расход воды на участке измерений, м ³ /с	Уровень воды на гидропосту Барнаул, см над нулем
1	1.37	0.60	19	22.06.2020	1957	230
2	1.75	0.71	9	19.05.2020	2973	379
3	2.20	0.43	20	19.05.2020	2973	379
4	2.40	0.50	27	22.06.2020	1957	230
5	2.65	0.84	19	19.05.2020	2973	379
6	3.35	0.96	20	23.05.2017	4380	544
7	3.54	1.00	9	23.05.2017	4380	544
8	4.08	1.04	19	23.05.2017	4380	544
9	4.41	1.00	5	22.07.2017	2040	267
10	5.13	0.93	27	23.05.2017	4380	544
11	7.22	1.00	7	22.07.2017	2040	267
12	8.07	1.04	5	24.05.2017	4285	547
13	8.28	1.28	7	24.05.2017	4285	547

Пространственная привязка к точкам отбора проб была принята для того, чтобы сократить объем рассматриваемых данных. Несмотря на ограниченность выборки, она, по нашему мнению, перекрывает достаточно большой диапазон изменения глубин (1.37–8.28 м) и скоростей (0.43–1.28 м/с). В таблице присутствуют как относительно высокие скорости течения при малых глубинах, так и, наоборот, относительно низкие скорости при сравнительно большой глубине.

Как уже говорилось выше, в рассматриваемых формулах расход наносов существенно зависит от величины критической («неразмывающей») ско-

рости потока. При скорости течения меньше или равной критическому значению, расход наносов равен нулю. В свою очередь, критическая скорость, как видно из выражений (5) и (7), зависит от глубины потока и характеристик крупности наносов (d_{50} , d_{90}).

Рассмотрим, насколько чувствительно значение критической скорости к вариациям характеристик крупности наносов. На рисунке 7 представлены результаты расчетов значений критической скорости потока по формулам (5) и (7) в интервале глубин потока, включающем в себя данные таблицы 3, для трех вариантов характеристик крупности наносов, представленных в таблице 2.

Как видно из рисунка 7 в обеих рассматриваемых зависимостях (5) и (7) критическая скорость увеличивается с ростом глубины и крупности наносов. Вместе с тем формула Гончарова (5) более чувствительна к вариациям в крупности наносов, чем соответствующая формула Ван Рейна (7). Однако гораздо более важен тот факт, что значения скорости, вычисленные по данным формулам при одних и тех же характеристиках крупности наносов, различаются в 1.3–1.5 раза, что значительно превосходит разброс, обусловленный изменениями этих характеристик, причем формула Гончарова стабильно дает более высокие величины критической скорости, чем формула Ван Рейна.

Безусловно, эти различия должны проявиться и при вычислении значений расхода влекомых наносов по формулам (4) и (6). Результаты таких расчетов для

гидродинамических ситуаций (значений глубин и скоростей течения), описанных в таблице 3, и вариантов характеристик крупности русловых наносов из таблицы 2 приведены в таблице 4. Отметим, что в данной таблице, чтобы избежать слишком малых величин, значение расхода наносов дается в час ($\text{м}^3/(\text{час}\cdot\text{м})$), а не в секунду, т.е. результат вычислений по формулам (4) и (6) умножался на 3600.

Как видно из таблицы 4 в формуле Ван Рейна с уменьшением крупности наносов значение их расхода возрастает, что на наш взгляд, является физически оправданным. Чем мельче материал, тем в больших количествах он будет перемещаться при одинаковых гидродинамических условиях. В формуле Гришанина наблюдается обратная зависимость.

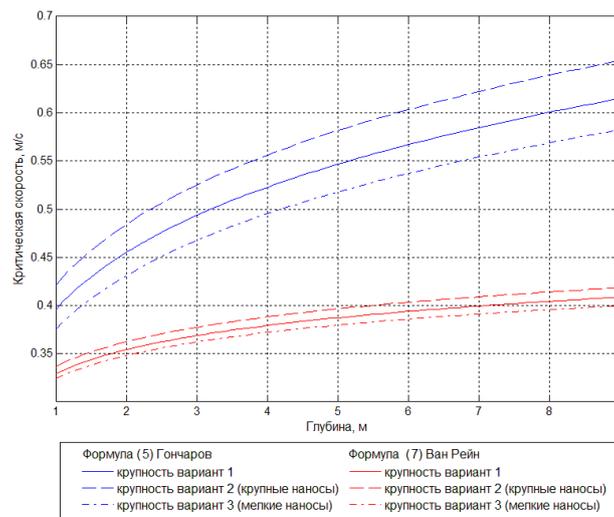


Рис. 7. Критическая скорость потока по формулам (5) и (7) для вариантов крупности наносов из таблицы 2 в интервале глубин 1–9 м

Fig. 7. The critical flow velocity calculated by formulas (5) and (7) in the water depth range 1–9 m for the sediment size options presented in Table 2

Что касается чувствительности значения расхода наносов к вариациям характеристик их крупности, то для рассмотренных ситуаций в обеих формулах она оказалась примерно одинаковой. Если для заданных величин глубины и скорости потока принять за основу значение расхода наносов, найденное для варианта 1, то значения для других вариантов крупности будут отличаться от него в формуле Гришанина на 1–34%, а в формуле Ван Рейна на 2–25%.

Наибольшие различия в результатах расчетов закономерно наблюдаются

между самими формулами. Формула Ван Рейна (6) для рассмотренных гидродинамических ситуаций дает значение расхода наносов, в 1.9–5.8 раз превышающее величину, полученную по формуле Гришанина (4).

Впрочем, этот факт не является неожиданностью. Хорошо известно, что результаты расчета расхода наносов по различным формулам могут различаться на порядок и более при одних и тех же исходных данных [Гришанин, 1979; Барышников, 2006; Шестова, 2007].

Таблица 4

Расход влекомых наносов, вычисленный по формулам (4) и (6) для гидродинамических ситуаций из таблицы 3 и вариантов крупности наносов из таблицы 2

Table 4

The sediment bed load ($m^3/(hrs \cdot m)$) calculated by formulas (4) and (6) for hydraulic conditions from Table 3 and sediment size options from Table 2

№ п/п	Глубина воды, м (h)	Скорость течения, м/с (U)	Расход влекомых наносов через поперечное сечение единичной длины в час, $m^3/(час \cdot м)$					
			Формула Гришанина (4)			Формула Ван Рейна (6)		
			Наносы Вариант 1	Наносы Вариант 2	Наносы Вариант 3	Наносы Вариант 1	Наносы Вариант 2	Наносы Вариант 3
1	1.37	0.60	0.007322	0.006891	0.005847	0.014103	0.013102	0.014807
2	1.75	0.71	0.015702	0.015569	0.012123	0.035004	0.033146	0.036359
3	2.20	0.43	0	0	0	0.000429	0.00032	0.000522
4	2.40	0.50	0.000475	0	0.000637	0.002358	0.002029	0.002622
5	2.65	0.84	0.027235	0.027617	0.020704	0.074042	0.070890	0.076491
6	3.35	0.96	0.044866	0.046243	0.033714	0.133852	0.129091	0.137664
7	3.54	1.00	0.052766	0.054635	0.039519	0.160298	0.154903	0.164644
8	4.08	1.04	0.057325	0.059446	0.042885	0.184579	0.178593	0.18949
9	4.41	1.00	0.044084	0.045331	0.033181	0.148761	0.143558	0.153077
10	5.13	0.93	0.026392	0.026573	0.020163	0.098149	0.094176	0.101517
11	7.22	1.00	0.028915	0.029144	0.022075	0.125625	0.120844	0.12983
12	8.07	1.04	0.032402	0.032789	0.024668	0.146956	0.141612	0.151706
13	8.28	1.28	0.091632	0.095826	0.068127	0.387282	0.376991	0.396403

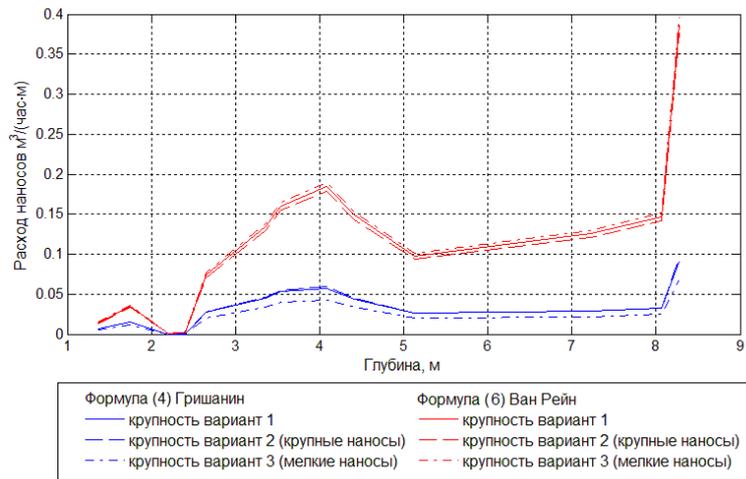


Рис. 8. Результаты расчета расхода влекомых наносов по формулам Гришанина и Ван Рейна из таблицы 4
 Fig. 8. The plot of the sediment bed load calculation results by Grishanin and Van Rijn formulas presented in Table 4

В данном случае, различия получились менее значительными (не в десять, а в шесть раз), вероятно, потому что рассмотренные формулы имеют сходную общую структуру и одинаковый набор параметров.

Для того чтобы сделать отмеченные выше различия более наглядными, результаты расчетов расхода наносов по формулам Ван Рейна (6) и Гришанина (4) из таблицы 4 представлены в графическом виде на рисунке 8. Отметим, что поскольку значения глубины воды уникальны, установить соответствие между таблицей и рисунком достаточно просто.

Заключение

Разумеется, выполненная работа не свободна от недостатков. Натурные данные охватывали лишь поверхностный слой наносов и только в надводной части русла. Примитивные средства гранулометрического анализа (ограни-

ченный набор сит, ручное просеивание, сравнительно высокая погрешность весов) обусловили достаточно грубое построение эмпирических кривых распределения. Также следовало бы разнообразить сравнительный анализ результатов расчета расхода наносов по различным зависимостям, как за счет включения в него других формул, так и за счет расширения набора рассматриваемых реальных гидродинамических ситуаций.

Тем не менее, результаты проведенных исследований позволяют, по нашему мнению, сделать следующие предварительные выводы.

1. Несмотря на локальные вариации, в целом для протяженных участков русла характеристики крупности наносов достаточно однородны.

2. Русловые наносы р. Обь на территории г. Барнаула представлены в основном песком средней крупности с медианным диаметром около 0,26 мм.

3. Практически неизбежные неточности и\или неопределенности в оценке характеристик крупности русловых наносов оказывают на результаты рас-

чета их расхода существенно меньшее влияние, чем выбор собственно расчетной формулы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflict of interest.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ «Прогнозирование опасных гидрологических ситуаций на участках речных водозаборов на основе математического моделирования и натурных исследований русловых процессов (на примере реки Обь у г. Барнаула)» (№ 19-41-220001).

Список литературы

1. Барышников Н.Б. Русловые процессы. Учебник. СПб.: изд. РГГМУ, 2006. 439 с.
2. Гришанин К.В. Динамика русловых потоков: Изд. 2-е. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 312 с.
3. Гришанин К.В. Основы динамики русловых потоков: Учебник для институтов водн. трансп. М.: Транспорт, 1990. 320 с.
4. Дьяченко А.В., Марусин К.В., Коломейцев А.А., Вагнер А.А. Натурные исследования поля скоростей течения в излуцинах реки Обь на территории города Барнаула // Известия АО РГО. 2018. №2(49). С. 58–66.
5. Зиновьев А.Т., Дьяченко А.В., Кошелев К.Б., Марусин К.В. Моделирование и наблюдения русловых процессов на реках Сибири на примере реки Обь у города Барнаула // Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XVII Междунар. науч. конгр. (19–21 мая 2021 г., Новосибирск): Сб. материалов в 8 т. Т. 4: Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». Новосибирск: СГУГиТ, 2021. С. 126–136.
6. Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России // ГИС-портал Центра регистра и кадастра. URL: <http://gis.vodinfo.ru> (дата обращения 15.02.2022).
7. Марусин К.В., Дьяченко А.В., Коломейцев А.А., Вагнер А.А. Современная динамика русла реки Обь в районе Барнаульского водозабора №1 по данным натурных наблюдений // Известия АО РГО. 2017. №4(47). С. 52–61.

8. Чалов Р.С. Русловые процессы (русловедение): учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2016. 565 с.

9. Чекрышев А.И., Гришанин К.В. Водные пути. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Транспорт, 1975. 472 с.

10. Шестова М.В. Гидрологический режим нижних бьефов ГЭС и его влияние на условия судоходства: Дис. ... канд. техн. наук. Н. Новгород, 2007. 177 с.

11. Google Earth. URL: <https://www.google.com/earth/> (дата обращения 15.02.2022).

12. Van Rijn L.C. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. The Netherlands: Aqua Publications, 1993. 689 p.

References

1. Baryshnikov N.B. Ruslovyje processy. Uchebnik. [Channel processes. A Textbook]. St. Petersburg, RSHU Publisher, 2006. 439 p. (in Russian).

2. Grishanin K.V. Dinamika ruslovyh potokov: Izd. 2-e. [Fluvial channel dynamics. 2nd ed.] Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979. 312 p. (in Russian).

3. Grishanin K.V. Osnovy dinamiki ruslovyh potokov: Uchebnik dlja institutov vodn. transp. [Principles of the fluvial channel dynamics. A Textbook]. Moscow: Transport, 1990. 320 p. (in Russian).

4. D'jachenko A.V., Marusin K.V., Kolomejcev A.A., Vagner A.A. Naturnye issledovaniya polja skorostej techeniya v izluchinah reki Ob' na territorii goroda Barnaula [Field study of the flow velocity pattern in Ob river meanders at Barnaul city] // Izvestiya AO RGO [Bulletin AB RGS]. 2018. No 2(49). P. 58–66. (in Russian).

5. Zinov'ev A.T., D'jachenko A.V., Koshelev K.B., Marusin K.V. Modelirovanie i nabljudeniya ruslovyh processov na rekah Sibiri na primere reki Ob' u goroda Barnaula [Modeling and field observations of channel processes of the Siberian rivers/ Ob river at Barnaul city site as a case study] // Interjekspo GEO-Sibir'. XVII Mezhdunar. nauch. kongr., (19–21 maja 2021 g., Novosibirsk): sb. materialov v 8 t. T. 4: Mezhdunar. nauch. konf. «Distancionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetrija, monitoring okruzhajushhej sredy, geojekologija» [Proc. XVII int. congr. InterExpo GEO-Sibir. (May 19–21, 2021)]. Vol. 4. Novosibirsk: SGUGiT, 2021. P. 126–136. (in Russian).

6. Informacionnaja sistema po vodnym resursam i vodnomu hozjajstvu bassejnov rek Rossii // GIS-portal Centra registra i kadastra [Federal center of cadaster. The Information System of Water Resources]. URL: <http://gis.vodinfo.ru> (accessed: 15.02.2022).

7. Marusin K.V., D'jachenko A.V., Kolomejcev A.A., Vagner A.A. Sovremennaja dinamika rusla reki Ob' v rajone Barnaul'skogo vodozabora №1 po dannym naturnyh nabljudenij [Field study of Ob river morphodynamics at municipal water intake No1 of Barnaul city] // Izvestiya AO RGO [Bulletin AB RGS]. 2017. No 4(47). P. 52–61. (in Russian).
8. Chalov R.S. Ruslovyje processy (ruslovedenie): uchebnoe posobie [Channel processes. A Textbook]. Moscow: INFRA-M, 2016. 565 p. (in Russian).
9. Chekrenev A.I., Grishanin K.V. Vodnye puti. Izd. 2-e, pererab. i dop. [Water ways. 2nd ed]. Moscow: Transport, 1975. 472 p. (in Russian).
10. Shestova M.V. Hidrologicheskij rezhim nizhnih b'efov GJeS i ego vlijanie na uslovija sudohodstva [Hydropower station lower bief hydrological regime and its effect on the shipping conditions]: PhD (Cand. of Tech.) thesis. N. Novgorod, 2007. 177 p. (in Russian).
11. Google Earth. URL: <https://www.google.com/earth> (accessed: 15.02.2022).
12. Van Rijn L.C. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. The Netherlands: Aqua Publications, 1993. 689 p.

SEDIMENT SIZE CHARACTERISTICS IN THE OB RIVER AT BARNAUL CITY

K. V. Marusin, A. V. Dyachenko, A. A. Kolomeytsev, A. A. Vagner

Institute for Water and Environmental Problems of the SB RAS, Barnaul, E-mail: kat@iwep.ru

The sieve analysis results of the sediment samples obtained from the channel at 24 locations in the 30 kilometers long river branch are presented. The river channel is formed mainly of sand with median size of 0.26 mm. The sediment size characteristics could be considered as uniform for rather long sections of the river channel. It is shown that the variations of the sediment size parameters have much less effect on the value of bed load sediment transport predicted than the choice of the calculation formula.

Key words: river sediment, sediment sieve analysis, sediment size characteristics, sediment transport, bed load, Ob river, Barnaul city.

Received February 28, 2022

Сведения об авторах

Марусин Константин Валерьевич – научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1, ИВЭП СО РАН. E-mail: kat@iwep.ru.

Дьяченко Александр Владимирович – научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1, ИВЭП СО РАН. E-mail: dychenko@iwep.ru.

Коломейцев Андрей Алексеевич – ведущий инженер Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1, ИВЭП СО РАН. E-mail: kolomeycev@iwep.ru.

Вагнер Анна Александровна – ведущий инженер Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1, ИВЭП СО РАН. E-mail: wagnerrotanova77@yandex.ru.

Information about the authors

Marusin Konstantin Valer'evich – researcher of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. E-mail: kat@iwep.ru.

D'jachenko Aleksandr Vladimirovich – researcher of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. E-mail: dychenko@iwep.ru.

Kolomejcev Andrej Alekseevich – senior engineer of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. E-mail: kolomeycev@iwep.ru.

Vagner Anna Aleksandrovna – senior engineer of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. E-mail: wagnerrotanova77@yandex.ru.