

УДК 556.5; 556.012; 556.043

С.Р. Чалов¹, В.А. Ефимов²

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ: ХАРАКТЕРИСТИКИ, КЛАССИФИКАЦИИ, ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ

Проанализированы подходы к исследованию гранулометрического состава взвешенных наносов. Рассмотрено соответствие механических, гидромеханических и миграционных классификаций, на этой основе обосновано определение речных наносов, к которым относят нерастворенные вещества с крупностью более 0,001 мкм, являющиеся продуктами разрушения горных пород, почв, органических соединений и трансформирующиеся под воздействием флокуляции и сорбционных процессов. При этом «методологическое» определение, связанное с характеристиками используемых фильтров, предполагает отнесение к речным наносам частиц, перемещаемых в толще воды и имеющих крупность более 0,45 мкм. На основании обработанной базы данных (736 определений на 36 реках) рассмотрены особенности взвешенных наносов рек разных природных территорий. Их средний диаметр составил 0,083 мм; доля фракций менее 0,001 мм – 4%; с диаметром 0,001–0,01 мм – 37%; с диаметром 0,01–0,1 мм – 44%. Среди рек разных природных условий преобладает двумодальный (49% случаев) и одномодальный (46%) гранулометрические составы взвешенных наносов. Равнинные реки имеют преимущественно двумодальные и в некоторых случаях трехмодальные распределения фракций, связанные с наличием третьего максимума крупных фракций (>0,75 мм). Для горных ледниковых рек характерно наличие примерно одинаковых пиков мутности (0,005–0,01 и 0,05–0,1 мм), для полугорных и равнинных рек пики мутности смещаются в сторону более мелких фракций (0,001–0,005 и 0,01–0,03 мм). У полугорных рек максимально выражен пик 0,01–0,03 мм (до 35–50% от общего содержания наносов), который уменьшается по мере роста расходов воды и смены типа русла вниз по течению. Наибольшая степень дискриминации фракций характерна для равнинных и полугорных рек относительно горных ледниковых. Особые группы образуют распределения фракций взвешенных наносов рек лахаровых долин, Терека, Колымы и Лены.

Ключевые слова: речные наносы, крупность частиц, механический состав, формирование взвешенных наносов

Введение. Движение различных материальных сред (жидкости, твердых тел, дисперсных систем) в пределах эрозионно-русловых систем определяет нисходящий литодинамический поток материкового вещества. В постоянном взаимодействии и взаимном влиянии этих сред под действием текущей воды формируется перенос нерастворенных (твердых) веществ – речных наносов [Алексеевский, 1998; Маккавеев, 1955]. К ним относятся, помимо минеральных частиц – продуктов разрушения горных пород, вещества неорганического и органического происхождения, в том числе почвенные конгломераты, продукты разложения органического вещества, водоросли, органические кислоты [Sediment cascades..., 2010]. Они имеют разный минералогический, петрографический и гранулометрический составы, однако участвуют в едином эрозионно-аккумулятивном процессе взаимодействия с грунтами, слагающими водосборы и русла рек.

Гранулометрический состав (ГС) взвешенных наносов – относительное содержание частиц различных размеров в толще воды, интегральная характеристика происхождения и свойств поведения частиц в потоке. Он является главным фактором дифференциации химического состава наносов [Horowitz,

Elrick, 1987; Petersen et al., 1996] и, следовательно, широко востребован в геохимических и геоэкологических исследованиях [Vanmaercke et al., 2010; Касимов и др., 2016], используется для выявления закономерностей формирования и форм переноса материала в речных водах [Bouchez et al., 2011; Lupker et al., 2011]. В результате данные о ГС используются в смежных научных дисциплинах – учении об эрозионно-аккумулятивном процессе [Маккавеев, 1955; Knighton, 1998], эрозиоведении [Заславский, 1983; Современные проблемы..., 2012] и русловедении [Чалов, 2008], гидрологии в целом и науке о стоке наносов [Караушев, 1977; Алексеевский, 1998; Julien, 2010], геохимии ландшафтов (механической миграции веществ или механогенеза) [Перельман, Касимов, 1999] и экогеохимии [Касимов, 2013]. На их основе проводится классификация наносов по признакам гидромеханического [Караушев, 1977; Росинский, Дебольский, 1980; Поздняков, 2011] состава, условиям транспорта [Knighton, 1998; Алексеевский, 1998] и формам миграции микроэлементов (химическому составу) [Линник, Набиванец, 1986; Савенко, 2010]. Однако из-за несогласованности этих подходов понятие речных наносов оказывается довольно размытым. Одновременно при наличии под-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, доцент, канд. геогр. н.; e-mail: srchalov@geogr.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, аспирант; e-mail: Roxifixat@yandex.ru

робных данных о сезонной изменчивости ГС [Лопатин, 1952; Шамов, 1959] и их изменений по длине отдельных рек, отсутствует единое представление о территориальных факторах его формирования и межбассейновых отличиях. В последние десятилетия развитие технологий вакуумного фильтрования и определения гранулометрического состава наносов методами лазерного рассеяния привели к созданию новых массивов данных о ГС взвешенных наносов. На географическом факультете МГУ накоплена информация о гранулометрическом составе взвешенных наносов на 86 реках России, Монголии и Швеции. На этой основе стало возможным обобщение методов и подходов к его изучению и выявление основных пространственных особенностей его формирования, что и стало основной целью данной статьи. В работе приводится обзор существующих подходов к характеристике гранулометрического состава наносов, дается определение наносов с позиций анализа характерных размерностей переносимых речными потоками частиц, рассматривается пространственная изменчивость распределения фракций взвешенных наносов на основе базы данных натурных наблюдений. Полученные результаты позволяют проследить связь между крупностью взвешенных наносов и характеристиками рек.

Материалы и методы исследований. Работа основана на результатах 916 определений гранулометрического состава проб взвешенных наносов методом лазерного рассеяния с помощью лазерного гранулометра Fritch Analysette 22. Для этого пробы взвешенных наносов отбирались в реках батометром или погружным насосом. Они фильтровались с помощью вакуумной фильтровальной установки через стандартный мембранный фильтр Millipore, представляющий собой смесь эфиров целлюлозы, с диаметром пор 0,45 мкм. Полученный на фильтре осадок высушивался при температуре 105°C. После измерения веса фильтра и определения мутности воды s (мг/л) выполнялась подготовка проб методом растирания с пирофосфатом натрия для достижения десегрегации [Мельников, 1956]. Результаты анализировались в виде кумулятивной кривой, отображающей процентное распределение частиц взвешенных наносов, графика плотности распределения и таблицы с величинами процентного содержания.

При обобщении полученных данных, все результаты определений сводились в базу данных в программе Microsoft Excel 2010. Место отбора наносов идентифицировалось по gps-координатам, определялись площадь водосбора (F , км²), длина реки от истока до створа (L , км), абсолютная высота (H , м) створа отбора пробы. По классификации [Чалов, 2008] на рассматриваемых реках (36 объектов) проявлялись горный ($n = 9$), полугорный ($n = 12$) или равнинный ($n = 15$) типы русловых процессов. В работе использована информация по двум горным рекам, протекающим в районах современного оледенения (р. Тарфала, Скандинавские горы; р. Джанку-

ат, Кавказ) и горным рекам Хибинского горного массива, Монголии и Сахалина. Полугорные реки были классифицированы как крупные и малые (притоки р. Селенги; Кавказ). Равнинные реки подразделялись на средние (бассейны Оки, Западной Двины) крупные (притоки крупнейших арктических рек) и крупнейшие (Енисей, Лена, Колыма, Обь). В рамках выполнения дискриминантного анализа учитывались только продолжительные по времени определения гранулометрического состава наносов рек. Отдельно рассматривались участки рек, на которых ведется хозяйственная деятельность. Так, реки Лангери, Дербыш, Туул, Тугнуй преобразованы масштабной добычей россыпей, а реки Юкспоррийок и Вуоннемйок Хибинского горного массива представляют собой объекты сброса дренажных вод рудников. Отдельный массив информации представлен данными по р. Кабеку, протекающей в долине, сложенной селевыми отложениями вулканического происхождения (т. н. лахары) на склоне вулкана Шивелуч. Все реки разделены на следующие группы: Ia – высокогорные ледниковые ($n = 78$); Ib – горные ($n = 16$); IIa – малые полугорные ($Q < 50 \text{ м}^3/\text{с}$) ($n = 42$); IIb – крупные полугорные ($Q > 50 \text{ м}^3/\text{с}$) ($n = 107$); IIIa – средние равнинные ($Q < 500 \text{ м}^3/\text{с}$) ($n = 75$); IIIb – крупные равнинные ($Q = 500\text{--}5000 \text{ м}^3/\text{с}$) ($n = 99$); IIIc – крупнейшие равнинные ($Q > 5000 \text{ м}^3/\text{с}$) ($n = 252$); IVa – реки лахаровых долин ($n = 24$); IVb – водотоки сбросов дренажных вод (техногенные водотоки) ($n = 14$); IVc – реки в районах разработки россыпных месторождений ($n = 29$).

Отборы проб и анализ осуществлялись в период с 2006 по 2020 гг. Данные для рек Швеции, Российской Арктики, Сахалина, а также бассейна р. Селенги собраны как в многоводные, так и маловодные периоды в течение нескольких лет. Часть базы данных (53 объекта, 180 измерений) составляют реки с эпизодическими измерениями ГС (1–2), которые не учитывались при статистическом анализе.

Для всех серий проб считались статистические характеристики, описываемые ниже при обобщении гранулометрического состава взвешенных наносов. Для выявления группировок рек по сходному распределению фракций взвешенных наносов был выполнен дискриминантный анализ в программе Statistica 10. Для проведения дискриминантного анализа выбирались группирующие переменные (группа рек, мутность, высотное положение створа, средний расход, длина водотока выше створа отбора проб) и зависимые, характеризующие доли 12 фракций гранулометрического состава взвешенных наносов. На основе стандартного метода выбора переменных с помощью критерия Уилкса (W) определялся процент верной классификации, проверялся уровень значимости F -критерия ($p < 0,00001$) и вычислялись канонические корни – выражения, каждое из которых объясняет уникальную долю изменчивости между двумя наборами переменных [Халафян, 2007]. Рассматривались группировки, имеющие хорошую или среднюю степень дискриминации ($0,2 < W < 0,6$). По двум наиболее значи-

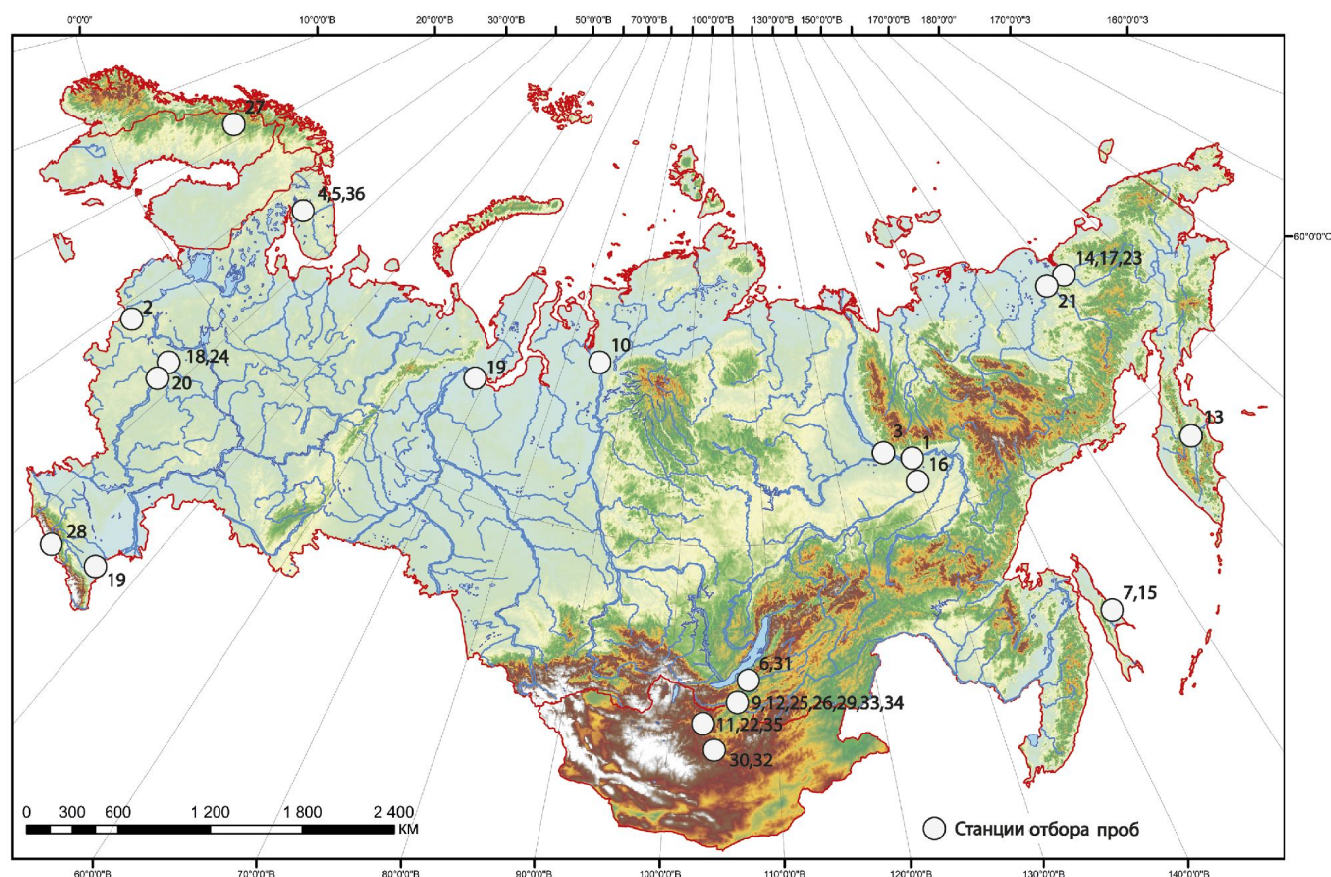


Рис. 1. Места отбора проб, данные по которым использованы в работе (табл. 1)
 Fig. 1. Location of sampling sites, which data were analyzed for the study (table 1)

мым каноническим корням, определяющим максимальные доли дискриминирующей мощности, строились графики распределения канонических значений переменных.

Характеристики гранулометрического состава взвешенных наносов. ГС описывается размером (диаметром) частиц d (мм) – соотношением доли фракций I (мм) разного размера в составе наносов d_i (%). Важнейшим параметром является медианный диаметр (или средняя крупность) d_{50} (мм), который разделяет пробу наносов массой m_s на две равные части по весу и оценивается по соотношению веса m_i разных фракций i , характеризующихся средним диаметром частиц d_{0i} :

$$d_{50} = \frac{\sum m_i d_{0i}}{m_s}. \quad (1)$$

Величина d_{50} может определяться по кривой обеспеченности. Часто используются такие метрики крупности наносов, как d_{84} и d_{90} , соответствующие диаметру, меньше которого находится 84% или 90% частиц пробы. Доля каждой i -фракции в составе речных наносов определяется как

$$m_i (\%) = \frac{m_i}{m_s}. \quad (2)$$

В зарубежных классификациях для характеристики их состава используют логарифмические единицы ϕ [Tipping, 1988], для получения положительных величин принимаемые с отрицательным знаком

$$\phi = -\log_2 d. \quad (3)$$

На основе величины d (мм) характеризуется физическая форма переноса частиц речными потоками: в грубодисперсном состоянии (крупность более 0,0001 мм), в коллоидно-дисперсном состоянии (в составе коллоидов, крупностью от 0,000001 до 0,0001 мм), в молекулярно-(ионно)дисперсном состоянии (в истинно-растворенной форме, или в растворенной форме, соответствующей диаметру частиц менее 0,000001 мм). Наличие поверхности раздела между ними (дисперсная фаза) и водой (дисперсная среда) позволяет относить грубодисперсные и коллоидно-дисперсные системы к гетерофазным (разнофазным) физико-химическим системам [Wilkinson, Lead, 2007]. Они осуществляют постоянное взаимодействие с растворенной фазой компонентов, коллоидной органической гидрофобной фазой и гидробиологической фазой в водной массе (планктон, рыбы, водные растения) и донных осадках (бентос), что определяет гетерогенность состава речных наносов. Нижняя граница, при которой гетерогенная система переходит в гомогенный молеку-

лярный раствор, составляет около 0,001 мкм [Глазовская, Геннадиев, 1995]. Именно этот размер частиц следует считать физической границей речных наносов, которыми в таком случае следует называть нерастворенные вещества (с крупностью более 0,001 мкм – коллоиды, глинистые, илистые, песчаные и крупнообломочные частицы), являющиеся продуктами разрушения горных пород, почв, органических остатков, трансформирующиеся под воздействием флокуляции и сорбционных процессов, которые в данной гидроклиматической обстановке могут перемещаться речными потоками. В практике в качестве нижней границы диапазона речных наносов широко используются размеры пор фильтров, используемых при выделении взвеси (с диаметром пор 0,3 или 0,45 мкм), соответственно проводится разделение «условно растворенных» и нерастворенных форм. Именно частицы, переносимые в толще потока и имеющие диаметр более 0,45 мкм, являются объектом исследования в настоящей работе и в целом при изучении взвешенных наносов в мировой практике. В нашей базе данных их средний диаметр составил $d_{50} = 0,083$ мм, доля наносов крупностью менее 0,001 мм – 4%; 0,001–0,01 мм – 37%; 0,01–0,1 мм – 44%; >0,1 мм – 15%.

Важным свойством наносов являются экстремумы функции распределения i -ой фракции в составе наносов $d_i(\%) = f(d)$. При наличии одного максимума крупности $d_i(\%)$ в ряду всех значений d взвешенные наносы формируют одномодальные системы распределения, при двух максимумах $d_i(\%)$ – двумодальные, при трех – трехмодальные. Критерием выделения пика концентрации определенной фракции в пробе служит достижение локального максимума функции, которое превышает локальные минимумы более чем на 10%. Важность оценки модальности

гранулометрического состава связана с разным химическим составом i -ых фракций наносов.

Результаты исследований и их обсуждение.
Классификации гранулометрического состава взвешенных наносов. Можно выделить несколько групп классификаций, применяемых при изучении речных наносов: механических (для грунтов, наносов, почвенной массы и почв), миграционных (см. табл. 1). Гидромеханические классификации речных наносов, принятые в гидрометрии и используемые на сети Росгидромета [Караушев, 1977], охватывают лишь часть спектра крупности переносимых частиц и предполагают выделение в их составе глинистых (менее 0,001 мм), илистых (0,001–0,01 мм), пылеватых (0,01–0,1 мм), песчаных (0,1–1 мм), гравийных (1–10 мм), галечных (10–100 мм) и обломков горных пород (валуны и глыбы) размером более 100 мм. Классификации гранулометрического состава речных наносов [Friedman, Sanders, 1978; Guy, 1969] основаны на градациях элементов, граничные значения которых связаны с целыми значениями числа ϕ , обычно выделяемых в геометрической прогрессии числа 2, согласно шкале Уэнтворта [Wentworth, 1922]. Эти подходы отличаются от шкал размеров частиц, принятых при типизации элементов почвенной массы и почв. Например, согласно Международной шкале 1926 г., все частицы подразделяются на крупнозем (гравелистая и каменная часть почвенной массы) и мелкозем [Глазовская, Геннадиев, 1995]. Последний состоит из фракций песка крупного и среднего – 2–0,2 мм, мелкого песка – 0,2–0,074 мм, пыли – 0,074–0,002 мм, глины (ила) – <0,002 мм. Одновременно наличие свойств глины у частиц размером менее 0,01 мм определяет отнесение этого класса частиц в почвоведении и грунтоведении к физической глине.

Таблица 1

Основные подходы к классифицированию речных наносов

Классификация	Критерий выделения	Выделяемые типы наносов	Пример классификации
Гидромеханическая классификация частиц речных наносов	Диаметр частиц, мм	Глина Ил Пыль Песок Гравий Галька, валуны	[Караушев, 1977]
Механическая классификация элементов почвенной массы	Диаметр частиц, мм	Крупнозем Мелкозем (глина, пыль, мелкий песок, крупный и средний песок)	[IUSS..., 2015]
Механическая классификация почв	Диаметр частиц, мм (соотношение доли физического песка, пыли и глины)	Тяжелые глины Средние глины Легкие глины Тяжелый суглинок Средний суглинок Легкий суглинок Супесь Связный песок Рыхлый песок	[Глазовская, Геннадиев, 1995]
По физической форме миграции	Форма миграции	Грубодисперсное Коллоидно-дисперсное	[Янин, 2002]

Несогласованность разных подходов определяет тот факт, что разным диапазонам крупности «почвенные» и «гидрологические» классификации предлагают одинаковые термины. Например, под понятие «глина» попадают частицы менее 0,01 мм [Глазовская, Геннадиев, 1995] или менее 0,001 мм [Караушев, 1977]. Для решения этих противоречий

целесообразно использовать классификацию в диапазоне размеров от 0,001 мкм, основанную на численных индексах, задающих нижнюю и верхнюю границы выделяемого диапазона. Такой индекс может иметь название РМ (от англ. Particulate Matter), по аналогии с широко применяемым в смежных науках (в частности, при изучении аэрозолей) обозна-

Таблица 2

Обобщенные сведения о гранулометрическом составе взвешенных наносов исследуемых рек

№ п/п	Река	Бассейн	Количество измерений	Диапазон значений мутности, мг/л	Средний диаметр (d_{50}), мм	±SD	Доля частиц взвешенных наносов в диапазоне РМ0, 45–2500 (0,00045–2,5мм), %					Группа
							РМ0,45–1	РМ1–10	РМ10–100	РМ100–1000	РМ1000–2500	
1	Алдан	Лена	6	3–8	0,17	0,05	3	22	54	11	11	IIIb
2	Велеса	Западная Двина	32	2–50	0,09	0,11	5	32	50	10	3	IIIa
3	Виллой	Лена	6	10–31	0,06	0,02	2	16	54	28	0	IIIb
4	Вуоннемйок ³	Нива	2	3–2000	0,02	0,00	1	72	28	0	0	Ib/IVb
5	Гакман	Нива	2	1–2	0,17	0,16	7	58	18	9	8	Ib
6	Селенга ⁴	Селенга	79	50–436	0,07	0,14	5	48	40	5	2	IIb
7	Дербыш ³	Лангери	4	593–1256	0,04	0,01	5	29	65	2	0	IVc
8	Джанкуат	Терек	42	12–35597	0,05	0,10	2	58	38	2	1	Ia
9	Джида	Селенга	4	7–20	0,11	0,15	4	31	49	16	0	IIIb
10	Енисей	Енисей	53	5–794	0,07	0,09	4	44	43	9	1	IIIc
11	Ероо	Селенга	4	7–10	0,26	0,28	3	36	31	25	5	Ib
12	Загустай	Селенга	3	2–3	0,19	0,14	4	45	31	15	6	Ib
13	Кабеку	Камчатка	24	8–93	0,11	0,08	3	37	35	26	0	IVa
14	Колыма	Колыма	65	3–300	0,07	0,09	6	43	44	3	4	IIIc
15	Лангери ³	Лангери	19	43–14043	0,29	0,39	3	31	44	7	15	Ib/IVc
16	Лена	Лена	69	3–41	0,08	0,07	2	16	49	32	1	IIIc
17	Малый Анюй	Колыма	3	19–44	0,06	0,08	8	48	39	1	4	IIIb
18	Москва ⁵	Волга	16	9–24	0,01	0,01	8	42	35	13	1	IIIa
19	Обь	Обь	65	5–216	0,08	0,08	3	33	52	11	1	IIIc
20	Ока	Волга	11	11–19	0,07	0,05	2	16	69	10	3	IIIa
21	Омолон	Колыма	5	5–6	0,01	0,01	8	56	35	0	0	IIIb
22	Орхон	Селенга	20	1–1699	0,10	0,13	5	40	41	12	2	IIb
23	Пантелеиха	Колыма	4	33–163	0,08	0,13	5	26	54	12	2	IIIa
24	Протва	Волга	12	6–10	0,07	0,09	2	23	62	11	2	IIIa
25	Селенга	Селенга	49	10–197	0,05	0,12	5	45	45	5	0	IIb
26	Тамир	Селенга	3	4–567	0,14	0,15	3	28	45	24	0	IIa
27	Тарфала	Каликсэльвен	36	2000–15872	0,04	0,01	0	42	57	2	0	Ia
28	Терек	Терек	12	3–241	0,02	0,02	16	54	30	0	0	IIb
29	Тугнуй ³	Селенга	10	1–135	0,08	0,07	4	34	48	14	0	IVc
30	Туул ³	Селенга	27	1–289	0,09	0,12	8	39	49	3	0	IIa/IVc
31	Уда	Селенга	9	20–23	0,16	0,19	4	31	40	24	1	IIb
32	Хара	Селенга	14	6–618	0,13	0,22	3	35	47	14	1	IIa
33	Хилок	Селенга	3	3–4	0,02	0,01	4	35	61	0	0	IIb
34	Чикой	Селенга	3	9–11	0,32	0,40	3	29	29	36	3	IIb
35	Шарын-гол	Селенга	4	12–201	0,23	0,39	2	20	53	22	2	IIa
36	Юкспоррийок ³	Нива	16	1–600	0,25	0,34	2	41	33	14	11	Ib/IVb
Прочие (1–3 измерения на объект) ³			180									
Всего			916									

³ В речном бассейне ведется добыча полезных ископаемых.

⁴ Дельта Селенги.

⁵ Река Москва выше г. Москвы.

чением [Hinds, 1999]. Например, для частиц диаметром 0,05–1 мм он может быть записан как PM50–1000, где 50 – нижний диапазон выделяемого интервала (50 мкм), 1000 – верхний диапазон выделяемого интервала (1000 мкм). Частицы с диаметром менее 10 мкм имеют название PM10. Индекс PM1–10 характеризует частицы 0,001–0,01 мм (илистые, по классификации [Караушев, 1977]), PM10–100 – пылеватые (0,01–0,1 мм), PM100–1000 – песчаные (0,1–1 мм), PM1000–10 000 – гравийные (1–10 мм) и PM10 000–100 000 – галечные (10–100 мм). Отдельный класс частиц размером менее 1 мкм (PM1) соответствует классу глинистых частиц, по классификации [Караушев, 1977]. В соответствие с этой записью, средний состав взвешенных наносов по нашей базе данных можно представить в следующем виде: <PM1 = 4%; PM1–10 = 37%; PM10–100 = 44%; PM100–2500 = 15% (табл. 2).

Пространственная неоднородность распределения фракций наносов. Для фракций гранулометрического состава наносов характерны закономерные пространственные изменения. При увеличении размера рек и переходе от горных и полугорных к равнинным участкам происходит увеличение содержа-

ния мелких частиц. Доля PM100–1000 уменьшается с 10–15% до 7–8% (рис. 2), что объясняется уменьшением скоростей потока и снижением его транспортирующей способности. Значительная часть взвешенных частиц, переносимых равнинными реками, принадлежит мелким органическим формам. Это приводит к смещению максимумов функции $d_i(\%) = f(d)$ для горных рек относительно полугорных и равнинных. Наиболее отчетливо разделяются по особенностям состава ледниковые горные (Ia) и полугорные и крупнейшие равнинные реки (IIa–IIb; IIIc): у ледниковых рек максимальная концентрация приходится на фракции PM5–10 и PM50–100, а у полугорных и равнинных рек – на PM1–5 и PM10–30. Для горных (Ib) и малых полугорных рек (IIa) характерно наличие повышенных концентраций PM300–2000.

Во всех рассмотренных объектах преобладают двумодальные распределения состава взвешенных наносов (49% случаев). Одномодальные и трехмодальные распределения наносов характерны для 46 и 5% рек, соответственно (см. рис. 3). Одномодальные распределения наиболее характерны для малых полугорных и равнинных рек (до 70% проб), двумодальные – для ледниковых и крупных равнин-

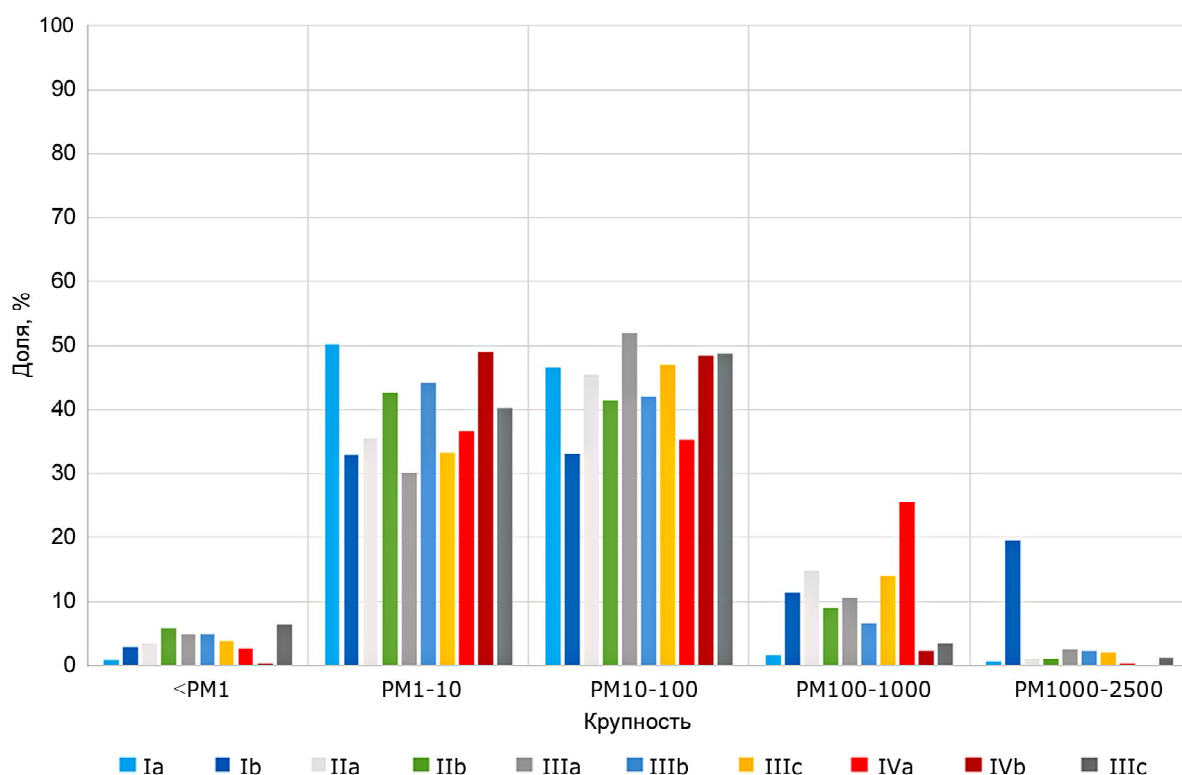


Рис. 2. Распределение содержания фракций взвешенных наносов для выделенных групп рек. Группы рек: Ia – горные ледниковые; Ib – горные; IIa – малые полугорные ($Q < 50 \text{ м}^3/\text{с}$); IIb – крупные полугорные ($Q > 50 \text{ м}^3/\text{с}$); IIIa – средние равнинные ($Q < 500 \text{ м}^3/\text{с}$); IIIb – крупные равнинные ($Q 500–5000 \text{ м}^3/\text{с}$); IIIc – крупнейшие равнинные ($Q > 5000 \text{ м}^3/\text{с}$); IVa – лахаровых долин; IVb – техногенные водотоки; IVc – реки в районах разработки россыпных месторождений

Fig. 2. Distribution of the suspended sediment fractions by the groups of rivers. River groups: Ia – mountain glacial rivers; Ib – mountain rivers; IIa – small semi-mountain rivers ($Q < 50 \text{ м}^3/\text{с}$); IIb – large semi-mountain rivers ($Q > 50 \text{ м}^3/\text{с}$); IIIa – medium lowland rivers ($Q < 500 \text{ м}^3/\text{с}$); IIIb – large lowland rivers ($Q 500–5000 \text{ м}^3/\text{с}$); IIIc – the largest lowland rivers ($Q > 5000 \text{ м}^3/\text{с}$); IVa – rivers of lahar valleys; IVb – technogenic watercourses; IVc – rivers in the areas of placer deposits development

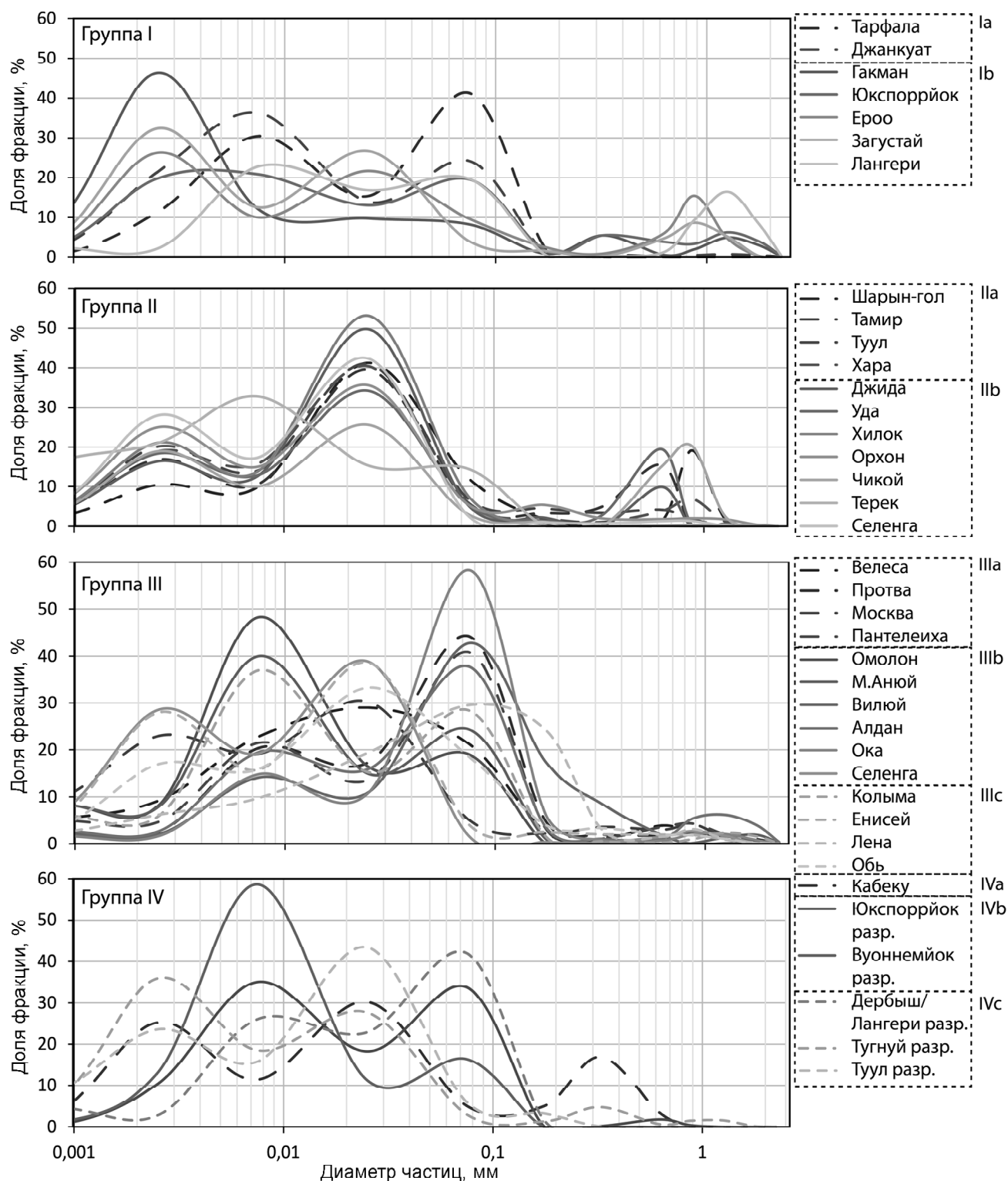


Рис. 3. Осредненные значения гранулометрического состава взвешенных наносов для исследуемых рек. Группы рек: Ia – горные ледниковые; Ib – горные; IIa – малые полугорные ($Q < 50 \text{ м}^3/\text{с}$); IIb – крупные полугорные ($Q > 50 \text{ м}^3/\text{с}$); IIIa – средние равнинные ($Q < 500 \text{ м}^3/\text{с}$); IIIb – крупные равнинные ($Q 500\text{--}5000 \text{ м}^3/\text{с}$); IIIc – крупнейшие равнинные ($Q > 5000 \text{ м}^3/\text{с}$); IVa – лахаровых долин; IVb – техногенные водотоки; IVc – реки в районах разработки россыпных месторождений

Fig. 3. Average grain size values of suspended sediments for the studied rivers. River groups: Ia – mountain glacial rivers; Ib – mountain rivers; IIa – small semi-mountain rivers ($Q < 50 \text{ м}^3/\text{с}$); IIb – large semi-mountain rivers ($Q > 50 \text{ м}^3/\text{с}$); IIIa – medium lowland rivers ($Q < 500 \text{ м}^3/\text{с}$); IIIb – large lowland rivers ($Q 500\text{--}5000 \text{ м}^3/\text{с}$); IIIc – the largest lowland rivers ($Q > 5000 \text{ м}^3/\text{с}$); IVa – rivers of lahar valleys; IVb – technogenic watercourses; IVc – rivers in the areas of placer deposits development

ных рек (55–70% проб). В горных и полугорных реках практически не наблюдаются трехмодальные распределения: третий пик (PM750–1250) составляет всего 2–4% от общего содержания фракций. Единичные повышенные значения этого пика встречаются в нескольких пробах на реках с низкой мутностью, что мы можем объяснить только методическими нюансами определения: единичные частицы диаметром более PM100 могут влиять на результат при детектировании в условиях низкой мутности. В итоге, трехмодальные распределения представлены для 8% проб крупнейших равнинных рек, отобранных в многоводные фазы водного режима. Более обоснованным следует признать наличие трехмодальных распределений для лахаровой р. Кабеку (21% проб). Этому способствует малый вес крупного пирокластического материала и большое количество разнообразных источников поступления наносов в долине лахаровой реки, включая продукты эрозии вулканических отложений [Чалов, Цыпленков, 2017].

Реки районов добычи полезных ископаемых могут представлять все виды распределений. Выраженность пиков зависит от способа добычи полезных ископаемых, а также от близости станции отбора проб к источнику поступления взвешенных наносов. Наличие постоянного источника наносов, связанного с поступлением техногенной взвеси при разработке полезных ископаемых, приводит к формированию ярко выраженной одномодальной структуры (до 60% массы пробы) даже разных по размеру рек, как, например, в среднем течении р. Туул (расходы воды

до 30 м³/с), р. Тугнуй (расходы воды до 10 м³/с), в верховьях р. Лангери и ее притоках (измеренные расходы воды до 5 м³/с). На характерное распределение фракций наносов в них накладывается поступление илистых и пылеватых фракций в результате сброса измельченных вод с промприборов [Чалов и др., 2015]. Поэтому пик растянутый и имеет небольшие, невыраженные максимумы PM8 и PM70. Фракции PM5–90 в этих реках преимущественно поступают с отвалов пустой породы и в результате сброса вод, использующихся для промывки золота.

Результаты дискриминантного анализа характеризуют различие состава взвешенных наносов рек (рис. 4, 5), отличающихся по величине среднего расхода, типу русловых процессов, длине, мутности и высотному положению. Выделено пять сходных по распределению ГС групп рек (см. рис. 4). К группе 1 преимущественно относят техногенные водотоки (Ia; Ib; IVb). Эти реки характеризуются одномодальными и двумодальными распределениями ГС, с повышенной концентрацией PM5–10 и PM50–100. В группу 2 входят реки полугорные и равнинные, а также реки лахаровых долин и россыпных месторождений (IIa; IIb; IIIb; IVa; IVc). По сравнению с группой 1 в реках группы 2 возрастает доля фракции PM10–45 и происходит смещение пиков мутности влево (частицы 0,01–0,045 мм). Для крайних правых точек графика (IIb) характерно наличие пика концентраций для PM500–700 (15–20% от общего содержания наносов) и трехмодальное распределение. В группу 3 отнесены пробы рек IIIa и IIIc, за исключением

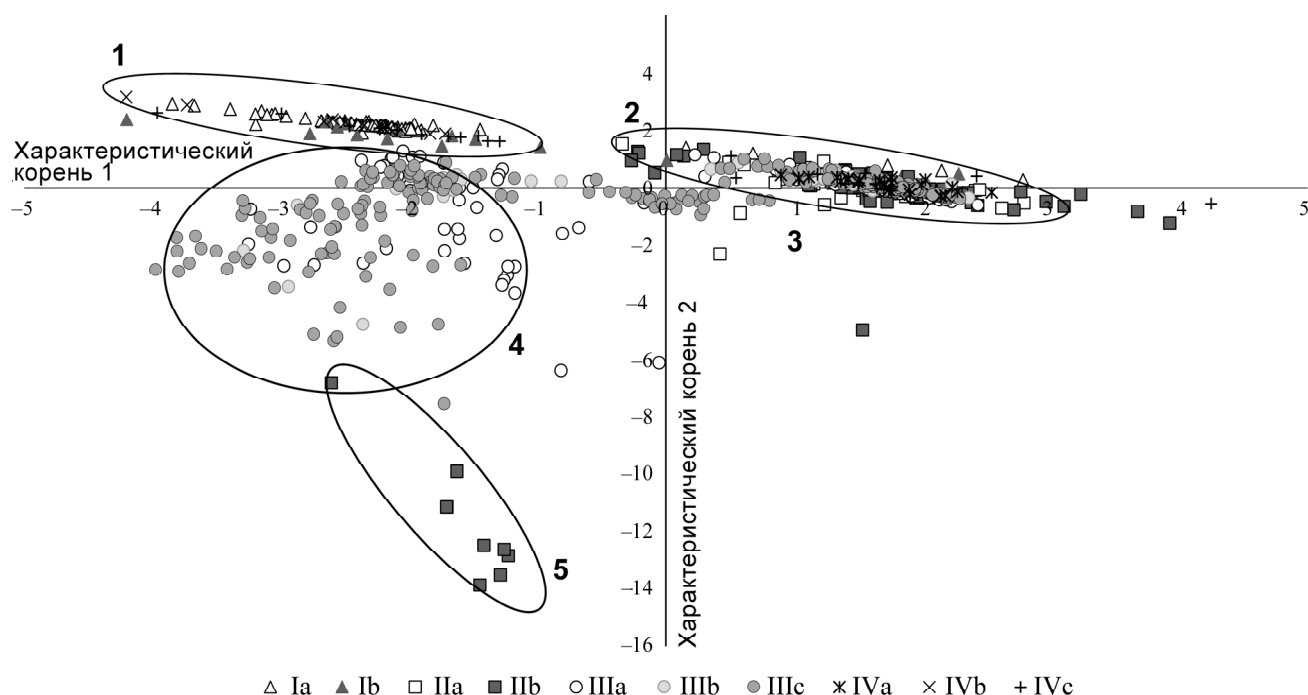


Рис. 4. Совокупность количественных характеристик (диаграмма рассеяния канонических значений) гранулометрического состава наносов рек разного типа (обозначения см. в тексте и на рис. 3)

Fig. 4. Aggregate quantitative characteristics (as a scattering diagram of canonical values) of the grain size of river sediments in different groups of rivers (see description in the text and in Fig. 3)

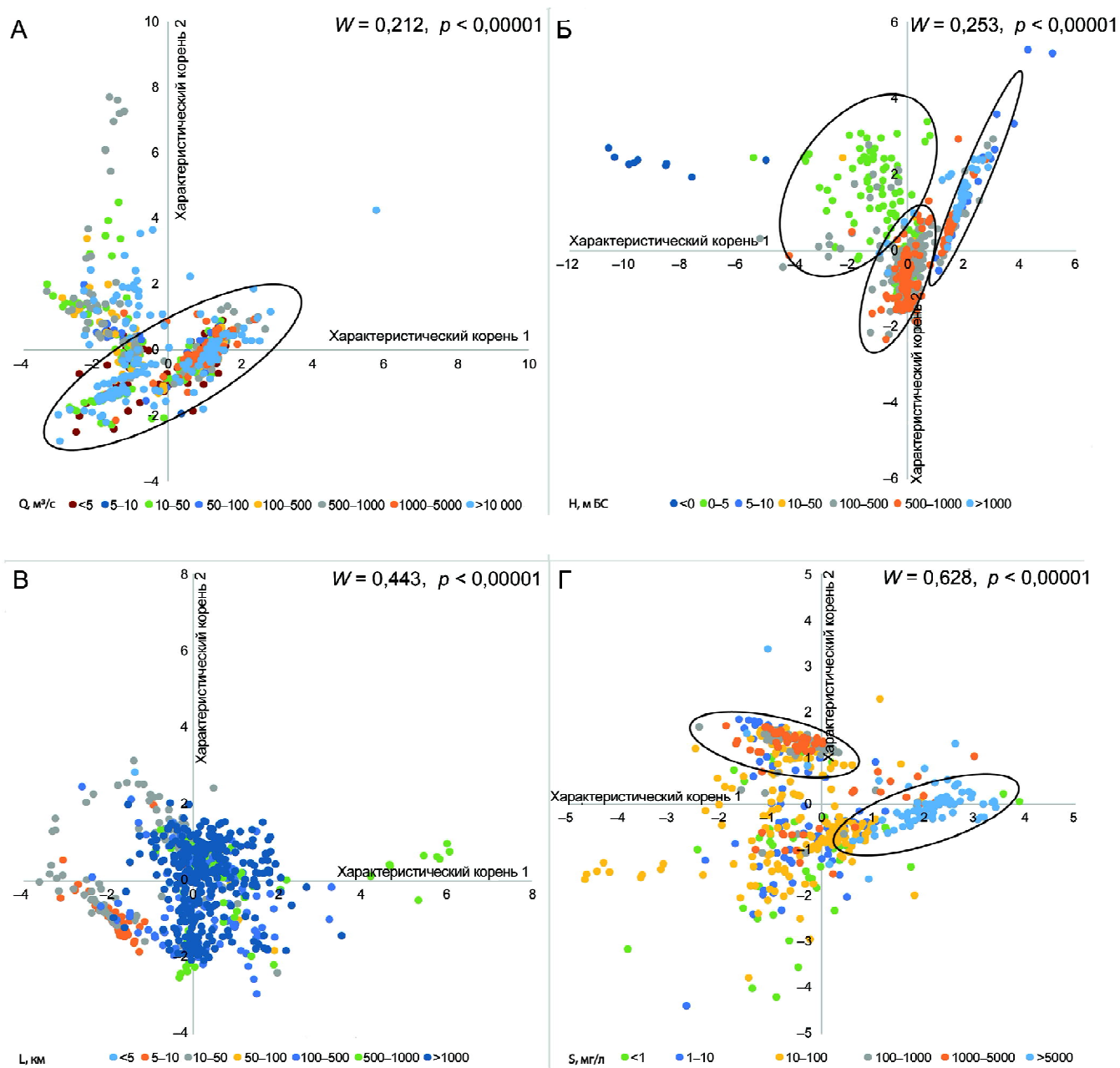


Рис. 5. Дискриминантные группировки рек в створах отбора проб: А – по расходу воды; Б – по высотному положению; В – по длине реки; Г – по мутности воды

Fig. 5. Discriminant groupings of rivers in the sampling points: А – by water discharge; Б – by altitude; В – along the length of the river; Г – turbidity of water

отобранных в многоводный период проб р. Енисей (измеренные расходы воды около $90\,000 \text{ м}^3/\text{с}$) и части проб р. Лены (расходы воды в период отборов проб не превышали $15\,000 \text{ м}^3/\text{с}$). Для рек группы 3 (Велеса, Ока) характерно наличие одномодального и двумодального распределения с невыраженными пиками концентраций. Специфический вид распределения фракций, относительно других групп рек, отмечен для р. Колымы (нижнее течение, расходы менее $8\,000 \text{ м}^3/\text{с}$). Пробы имеют различные виды распределений, но с характерными максимумами PM_{5-10} и PM_{50-100} , составляющими 30–35% от

общего содержания взвешенных наносов. В отличие от горных рек, в большинстве проб также присутствует максимум PM_{1000} , достигающий 14%. Взвешенные наносы р. Терек (нижнее течение, ниже Каргалинского гидроузла, расходы воды около $200 \text{ м}^3/\text{с}$) также отличаются от других объектов и характеризуются наличием двух пиков PM_7 (30%) и PM_{800} (20%) и значительной долей фракции $\text{PM}_{0,45-3}$.

Классификация с облучением выявила разную дискриминацию ГС по группам рек. В реках сходного размера часто отмечаются контрастные условия стока наносов, что в особенности характерно

для малых расходов воды (5–50 м³/с), сильно различающиеся по гранулометрическому составу за счет влияния локальных факторов. С увеличением расходов рек (500–10 000 м³/с) разброс распределений уменьшается, за исключением проб, отобранных в период половодья (см. рис. 5). Распределения ГС относительно четко различаются между реками разных высотных зон: 0–10 м, 500–1000 м и более 1000 м. Четкой зависимости от длины реки в представленных результатах не наблюдается. Лучшее всего с ГС взвешенных наносов связана мутность воды. Горные (Ia) реки с высокими значениями мутности (>5000 мг/л) образуют отдельную группу точек в правой части графика. Также можно выделить отдельную группу точек со значениями 500–5000 мг/л, соответствующую р. Кабеку и рекам в районах разработок россыпного золота (Ib; IVa; IVc). Остальные реки не образуют отдельных группировок вследствие сильной зависимости от местных гидрологических условий. Наибольший разброс точек характерен для рек (Ib; IIIa), поскольку они при низкой мутности (<1 мг/л) имеют очень неоднородный гранулометрический состав.

Выводы:

– в работе обобщена информация о гранулометрическом составе взвешенных наносов рек разных природных территорий. Проанализированные данные не охватывают всего многообразия условий, однако, на данный момент это наиболее полный обзор. В этой связи полученные оценки можно рассматривать как репрезентативные, по крайней мере, для рек России. Дальнейшее накопление информации позволит уточнить полученные в работе выводы;

– классификацию крупности частиц предлагается выполнять на основе индекса РМ (от англ. Particulate Matter) в диапазоне единиц от 0,001 мкм и основывать ее на численных индексах, задаю-

щих нижнюю и верхнюю границы выделяемого диапазона;

– на основе существующей базы данных определений гранулометрического состава взвеси ($n = 736$) для 36 рек выявлен характерный состав взвешенных наносов: средний диаметр 0,083 мм; доля фракций менее РМ1 (<0,001 мм) – 4%; РМ1–10 (0,001–0,01 мм) – 37%; РМ10–100 (0,01–0,1 мм) – 44%; более РМ100–2 500 (0,1–2,5 мм) – 15%. Среди рек в разных природных условиях преобладают двумодальный гранулометрический состав взвешенных наносов (49% случаев). Одномодальные и трехмодальные взвешенные наносы для 46 и 5% рек, соответственно;

– равнинные реки имеют преимущественно двумодальные и в некоторых случаях трехмодальные распределения фракций, в связи с наличием третьего максимума крупных фракций РМ750–1250. Для горных ледниковых рек характерно наличие примерно одинаковых пиков мутности РМ5–10 и РМ50–100, для полугорных и равнинных рек пики мутности смещаются в сторону более мелких фракций РМ1–5 и РМ10–30. У полугорных рек максимально выражен пик РМ10–30 (до 35–50% от общего содержания наносов в пробе), который затем уменьшается с увеличением расходов воды в реке и сменой типа русла;

– результаты исследования открывают перспективы для изучения гидролого-геохимических закономерностей химического состава наносов. Интегральная роль крупности взвешенных наносов определяет перспективы исследования гранулометрического состава для объяснения геохимической специализации рек. Наконец, дискриминация гранулометрического состава в реках разных типов позволяет объяснить некоторые глобальные закономерности механической миграции вещества.

Благодарности. Авторы благодарят коллег, работавших в экспедициях, где были отобраны пробы, проанализированные в данной работе. Отдельное спасибо тем, кто участвовал в трудоемкой работе на лазерном гранулометре – в первую очередь М.П. Пашкиной, Е.В. Промаховой, А.О. Романченко, В.О. Базиловой, А.С. Цыпленкову, В.А. Иванову, К.Н. Прокопьевой.

Полевые работы на реках Арктики выполнены в рамках проекта РФФИ 18-05-60219, на притоках Каспийского моря – проекта РФФИ 18-05-80094, на р. Москве – проекта РНФ 19-77-30004, на реках Камчатки проекта – РНФ 18-17-00086, на реке Лене – проекта РНФ 21-17-00181. Обобщение данных выполнено в рамках проекта РФФИ 19-05-50109.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 202 с.
Глазовская М.А., Геннадиев А.Н. География почв с основами почвоведения. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 463 с.
Заславский М.Н. Эрозиоведение. М.: Высшая школа, 1983. 320 с.
Караушев А.В. Теория и методы расчетов речных наносов. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 272 с.
Касимов Н.С., Лычагин М.Ю., Чалов С.Р., Шинкарева Г.Л., Пашкина М.П., Романченко А.О., Промахова Е.В. Бассейновый

анализ потоков веществ в системе Селенга–Байкал // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 3. С. 67–81.

Касимов Н.С. Экогеохимия ландшафтов. М.: ИП Филимонов М.В., 2013. 208 с.

Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 272 с.

Лопатин Г.В. Наносы рек СССР. М.: Географиз, 1952. 366 с.

Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: АН СССР, 1955. 353 с.

Мельников П.Ф. Исследования по разработке метода подготовки засоленных и карбонатных грунтов к гранулометрическому анализу // Ученые записки МГУ. 1956. Вып. 177. Кн. 4. С. 81–94.

Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель-2000, 1999. 610 с.

Поздняков Ш.Р. Наносы в реках, озерах и водохранилищах в расширенном диапазоне размера частиц: автореф. ... докт. геогр. наук. СПб., 2011. 40 с.

Росинский К.И., Дебольский В.К. Речные наносы. М.: Наука, 1980. 216 с.

Савенко В.С. О подобию интегрального химического состава материкового стока и верхней части континентальной коры // Геохимия. 2010. № 4. С. 446–448.

Современные проблемы эрозиоведения: монография / Ф.Н. Лисецкий, А.А. Светличный, С.Г. Черный // А.А. Светличный; НИУ БелГУ. Белгород : Константа, 2012. 456 с.

Халяфян А.А. Statistica 6. Статистический анализ данных. М.: Бином, 2007. 512 с.

Чалов С.Р., Школьный Д.И., Промахова Е.В., Леман В.Н., Романченко А.О. Формирование стока наносов в районах разработок россыпных месторождений // География и природные ресурсы. 2015. № 2. С. 22–30.

Чалов Р.С. Руслководение: теория, география, практика. Т. 1: Руслвые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.

Чалов С.Р., Цыпленков А.С. Сток наносов малых рек районов современного вулканизма (р. Сухая Елизовская, Камчатка) // Геоморфология. 2017. № 1. С. 104–116.

Шамов Г.И. Речные наносы. Л.: Гидрометеиздат, 1959. 378 с.

Янин Е.П. Руслвые отложения равнинных рек (геохимические особенности условий формирования и состава). М.: ИМГРЭ, 2002. 139 с.

Bouchez J., Gaillardet J., France-Lanord C., Maurice L., Dutra-Maia P. Grain size control of river suspended sediment geochemistry: Clues from Amazon River depth profiles, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2011, vol. 12(3), p. 1–24, DOI: 10.1029/2010GC003380.

Chalov S., Moreido V., Sharapova E., Efimova L., Efimov V., Lychagin M., Kasimov N. Hydrodynamic controls of particulate metals partitioning along the lower Selenga river – main tributary of the lake Baikal, *Water*, 2020, vol. 12(1345), p. 1–17.

Friedman G.M., Sanders J.E. *Principles of Sedimentology*, NY., Wiley & Sons Publ., 1978, 792 p.

Guy H.P. *Laboratory theory and methods for sediment analysis*. Washington, DC, USA: US G. P. O., 1969, 58 p.

Hinds W.C. Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles, *Journal of Aerosol Science*, 1999, vol. 14(2), 175 p., DOI: 10.1016/0021-8502(83)90049-6.

Horowitz A.J., Elrick K.A. The relation of stream sediment surface area, grain size and composition to trace element chemistry, *Applied Geochemistry*, 1987, vol. 2(4), p. 437–451, DOI: 10.1016/0883-2927(87)90027-8.

IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, World Soil Resources Reports, no. 106, FAO, Rome, 2015, 192 p.

Julien P.Y. *Erosion and sedimentation*, Second edition, Cambridge University Press, 2010, vol. 9780521830386, 371 p.

Knighton D. *Fluvial forms and processes*, London, John Wiley & Sons, 1998, 218 p.

Lupker M., France-Lanord C., Lavü J., Bouchez J., Galy V., Mütivier F., Gaillardet J., Lartiges B., Mugnier J.-L. A Rouse-based method to integrate the chemical composition of river sediments: Application to the Ganga basin, *Journal Geophys. Res.*, 2011, vol. 116, p. 1–24, DOI: 10.1029/2010JF001947.

Petersen L.W., Moldrup P., Jacobsen O.H., Rolston D.E. Relations between specific surface area and soil physical and chemical properties, *Soil Science*, 1996, vol. 161(1), p. 9–21, DOI: 10.1097/00010694-199601000-00003.

Sediment Cascades: An Integrated Approach, T.P. Burt, R.J. Allison (eds.), NY., Wiley & Sons Publ., 2010, 471 p., DOI: 10.1002/9780470682876.

Tipping E. Colloids in the aquatic environment, *Chem. Ind.*, 1988, vol. 15, p. 485–490.

Vanmaercke M., Zenebe A., Poesen J., Nyssen J., Verstraeten G., Deckers J. Sediment dynamics and the role of flash floods in sediment export from medium-sized catchments: A case study from the semi-arid tropical highlands in northern Ethiopia, *Journal of Soils and Sediments*, 2010, vol. 10(4), p. 611–627, DOI: 10.1007/s11368-010-0203-9.

Wentworth C.K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments, *Journal Geol.*, 1922, vol. 30(5), p. 377–392.

Wilkinson K.J., Lead J.R. *Environmental Colloids and Particles: Behaviour, Separation and Characterisation*, NY., Wiley & Sons Publ., 2007, 687 p., DOI: 10.1002/9780470024539.

Поступила в редакцию 13.06.2020

После доработки 02.12.2020

Принята к публикации 21.01.2021

S.R. Chalov¹, V.A. Efimov²

PARTICULATE COMPOSITION OF SUSPENDED SEDIMENTS: CHARACTERISTICS, CLASSIFICATIONS AND SPATIAL VARIABILITY

The approaches to the study of the grain size of suspended sediments are analyzed. The congruency of mechanical, hydromechanical and migratory classifications is considered, and thereupon river sediments are defined as insoluble substances with grain size larger than 0,001 mm, which are the products of destruction of rocks, soils or organic compounds transformed by flocculation and sorption processes. At the same time, the "methodological" definition relevant to the filters parameters considers river deposits to be particles larger than 0,45 mm moving in the water column. Following on the database of processed sediment samples (736 samples for 36 rivers) the features of suspended river sediments of various natural territories are described. The average particle diameter of suspended sediments is 0,083 mm; fractions less

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Associate Professor, PhD in Geography; e-mail: srchalov@rambler.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, PhD Student; e-mail: Roxifixat@yandex.ru

than 0,001 mm account for 4%; 0,001–0,01 mm for 37% and 0,01–0,1 mm for 44%. Two-modal (49% of cases) and single-modal (46%) grain-size compositions of suspended sediments prevail in the rivers of different natural conditions. Lowland rivers have mainly two-modal and in some cases three-modal fraction distributions, due to the presence of a third maximum of large fractions ($>0,75$ mm). Approximately identical turbidity peaks (0,005–0,01 and 0,05–0,1 mm) are characteristic of mountain glacial rivers, while in semi-mountain and plain rivers the turbidity peaks shift towards smaller fractions (0,001–0,005 and 0,01–0,03 mm). The peak of 0,01–0,03 mm (up to 35–50% of the total sediment amount) reaches its maximum in semi-mountain rivers; it decreases as the discharge increases and the channel type changes downstream. The greatest degree of discrimination of fractions is typical for lowland and semi-mountain rivers relative to mountain glacial rivers. The rivers of lakhar valleys, as well as the Terek, Kolyma and Lena rivers, are specific groups in terms of the distribution of fractions of suspended sediments.

Key words: river sediments; particle size; grain size composition, formation of suspended sediments

Acknowledgments. The authors express their gratitude to all colleagues who worked in expeditions, taking samples which were analyzed during the study. Special thanks to those who participated in the laborious work with the laser granulometer, first of all, M.P. Pashkina, E.V. Promakhova, A.O. Romanchenko, V.O. Bazilova, A.S. Tsyplenkov, V.A. Ivanov, K.N. Prokopenko.

Field work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 18-05-60219 for the Arctic rivers, project no. 18-05-80094 for the tributaries of the Caspian Sea) and the Russian Science Foundation (project no. 19-77-30004 for the Moscow River, project no. 18-17-00086 for the rivers of Kamchatka), project no. 21-17-00181 for the Lena River. Integration of data was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 19-05-50109).

REFERENCES

- Alekseevskij N.I. *Formirovanie i dvizhenie rechnykh nanosov* [Formation and movement of river sediments], Moscow, MSU Publ., 1998, 202 p. (In Russian)
- Bouchez J., Gaillardet J., France-Lanord C., Maurice L., Dutra-Maia P. Grain size control of river suspended sediment geochemistry: Clues from Amazon River depth profiles, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2011, vol. 12(3), p. 1–24, DOI: 10.1029/2010GC003380.
- Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika, T. 1, Ruslovy protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel* [Channel studies: theory, geography, practice. Vol. 1. Channel processes: factors, mechanisms, forms of manifestation and formation conditions of river channels], Moscow, LKI Publ., 2008, 608 p. (In Russian)
- Chalov S.R., Shkol'nyi D.I., Promakhova E.V., Leman V.N., Romanchenko A.O. Formation of the sediment yield in areas of mining of placer deposits, *Geography and natural resources*, 2015, no. 2, p. 124–131.
- Chalov S.R., Tsyplenkov A.S. Stok nanosov mal'kh rek raionov sovremennogo vulkanizma (r. Sukhaya Elizovskaya, Kamchatka) [Sediment discharge of small rivers in areas of active volcanisms (River Sukhaya Elizovskaya, Kamchatka)], *Geomorfologiya*, 2017, no. 1, p. 104–116. (In Russian)
- Chalov S., Moreido V., Sharapova E., Efimova L., Efimov V., Lychagin M., Kasimov N. Hydrodynamic controls of particulate metals partitioning along the lower Selenga river – main tributary of the lake Baikal, *Water*, 2020, vol. 12(1345), p. 1–17.
- Friedman G.M., Sanders J.E. *Principles of Sedimentology*, NY., Wiley & Sons Publ., 1978, 792 p.
- Glazovskaya M.A., Gennadiyev A.N. *Geografiya pochv s osnovami pochvovedeniya* [Soil Geography with Fundamentals of Soil Science], Moscow, MSU Publ., 1995, 463 p. (In Russian)
- Guy H.P. *Laboratory theory and methods for sediment analysis*, Washington, D.C., USA, US G. P. O., 1969, 58 p.
- Hinds W.C. Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles, *Journal of Aerosol Science*, 1999, vol. 14(2), p. 175, DOI: 10.1016/0021-8502(83)90049-6.
- Horowitz A.J., Elrick K.A. The relation of stream sediment surface area, grain size and composition to trace element chemistry, *Applied Geochemistry*, 1987, vol. 2(4), p. 437–451, DOI: 10.1016/0883-2927(87)90027-8.
- IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015, *International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*, World Soil Resources Reports, no. 106, FAO, Rome, 2015, 192 p.
- Julien P.Y. *Erosion and sedimentation*, Second edition, Cambridge University Press, 2010, vol. 9780521830386, 371 p.
- Karaushev A.V. *Teoriya i metody raschetov rechnykh nanosov* [Theory and methods of river sediments calculation], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1977, 272 p. (In Russian)
- Kasimov N.S. *Ekogeokhimiya landshaftov* [Landscape Ecogeochimistry], Moscow, IP Filimonov M.V. Publ., 2013, 208 p. (In Russian)
- Kasimov N.S., Lychagin M.Yu., Chalov S.R., Shinkareva G.L., Pashkina M.P., Romanchenko A.O., Promakhova E.V. Basseinovy analiz potokov veshchestv v sisteme Selenga – Baikal [Catchment-based analysis of matter flows in the Selenga-Baikal system], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2016, no. 3, p. 67–81. (In Russian)
- Khalyafyan A.A. *Statistika 6. Statisticheskii analiz dannykh* [Statistica 6. Statistical data analysis], Moscow, Binom Publ., 2007, 512 p. (In Russian)
- Knighton D. *Fluvial forms and processes*, London, John Wiley & Sons, 1998, 218 p.
- Linnik P.N., Nabivanets B.I. *Formy migratsii metallov v presnykh poverkhnostnykh vodakh* [Forms of metals migration in fresh surface waters], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986, 272 p. (In Russian)
- Lopatin G.V. *Nanosy rek SSSR [Sediments of the USSR rivers]*, Moscow, Geografiz. Publ., 1952, 366 p. (In Russian)
- Lupker M., France-Lanord C., Lavé J., Bouchez J., Galy V., Métiévier F., Gaillardet J., Lartiges B., Mugnier J.-L. A Rouse-based method to integrate the chemical composition of river sediments: Application to the Ganga basin, *Journal Geophys. Res.*, 2011, vol. 116, p. 1–24, DOI: 10.1029/2010JF001947.

Makkaveev N.I. *Ruslo reki i eroziya v ee basseine* [River channel and erosion in the river basin], Moscow, AN USSR Publ., 1955, 353 p. (In Russian)

Mel'nikov P.F. Issledovaniya po razrabotke metoda podgotovki zasolennykh i karbonatnykh gruntov k granulometricheskomu analizu [Studies on the development of a method of preparing salt-affected and carbonate soils for granulometric analysis], *Uchenye zapiski MGU*, 1956, vol. 177(4), p. 81–94. (In Russian)

Perel'man A.I., Kasimov N.S. *Geokhimiya landshafta* [Landscape geochemistry], Moscow, Astreya-2000 Publ., 1999, 610 p. (In Russian)

Petersen L.W., Moldrup P., Jacobsen O.H., Rolston D.E. Relations between specific surface area and soil physical and chemical properties, *Soil Science*, 1996, vol. 161(1), p. 9–21, DOI: 10.1097/00010694-199601000-00003.

Pozdnyakov Sh.R. *Nanosy v rekakh, ozerakh i vodokhranilishchakh v rasshirennom diapazone razmera chastits* [Sediments in rivers, lakes and reservoirs in a wider range of grain size], Avtoref. dokt. geogr. nauk, St. Petersburg, 2011, 40 p. (In Russian)

Rossinskii K.I., Debol'skii V.K. *Rechnye nanosy* [River sediments], Moscow, Nauka Publ., 1980, 216 p. (In Russian)

Savenko V.S. O podobii integral'nogo khimicheskogo sostava materikovogo stoka i verkhnei chasti kontinental'noi kory [On the similarity between the chemical compositions of the integral continental runoff and the upper continental crust], *Geochemistry International*, 2010, no. 4, p. 419–421.

Sediment Cascades: An Integrated Approach, T.P. Burt, R.J. Allison (eds.), N.Y., Wiley & Sons Publ., 2010, 471 p., DOI: 10.1002/9780470682876.

Shamov G.I. *Rechnye nanosy* [River sediments], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1959, 378 p. (In Russian)

Sovremennye problemy eroziy i eroziy: monografiya [Actual issues of erosion studies], F.N. Lisetskii, A.A. Svetlichnyi, S.G. Chernyi, A.A. Svetlichny (eds.), NIU BelGU, Belgorod, Konstanta Publ., 2012, 456 p. (In Russian)

Tipping E. Colloids in the aquatic environment, *Chem. Ind.*, 1988, vol. 15, p. 485–490.

Vanmaercke M., Zenebe A., Poesen J., Nyssen J., Verstraeten G., Deckers J. Sediment dynamics and the role of flash floods in sediment export from medium-sized catchments: A case study from the semi-arid tropical highlands in northern Ethiopia, *Journal of Soils and Sediments*, 2010, vol. 10(4), p. 611–627, DOI: 10.1007/s11368-010-0203-9.

Wentworth C.K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments, *Journal Geol.*, 1922, vol. 30(5), p. 377–392.

Wilkinson K.J., Lead J.R. *Environmental Colloids and Particles: Behaviour, Separation and Characterisation*, N.Y., Wiley & Sons. Publ., 2007, 687 p., DOI: 10.1002/9780470024539.

Yanin E.P. *Ruslovyje otlozheniya ravninnykh rek (geokhimicheskie osobennosti uslovii formirovaniya i sostava)* [Channel deposits of lowland rivers (geochemical features of formation and composition)], Moscow, IMGRE Publ., 2002, 139 p. (In Russian)

Zaslavskii M.N. *Eroziy i eroziy* [Erosion studies], Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1983, 320 p. (In Russian)

Received 13.06.2020

Revised 02.12.2020

Accepted 21.01.2021