

ЛИТОЛОГИЯ

УДК 551.312.3: 552.123

Эволюция гранулометрического состава крупнообломочного руслового аллювия от гор к равнинам**Б.М. Осовецкий**

Пермский государственный национальный исследовательский университет

614990, Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: opal@psu.ru

(Статья поступила в редакцию 22 октября 2020 г.)

Рассматриваются основные показатели изменения гранулометрического состава крупнообломочного аллювия русловой фации при переходе от гор к равнинам. В полевых условиях проведены опробование и ситовой рассев отложений многих рек бывшего СССР. Использована дробная гранулометрическая шкала, проведено сравнение соответствующих генетических характеристик речных осадков (субраспределенный, модальных классов и др.). Сделан вывод о том, что эволюция гранулометрического состава заключается в преобразовании полимодального распределения обломков, характерного для горного аллювия, в бимодальное, типичное для равнинного.

Ключевые слова: *русловой аллювий, горные и равнинные реки, дробная шкала, эволюция грансостава.*

DOI: 10.17072/psu.geol.19.4.359

Введение

Крупнообломочные отложения занимают особое положение среди терригенных пород благодаря широкому распространению на нашей планете. Они являются (часто дефицитными) полезными ископаемыми в качестве повсеместно используемого строительного сырья, а также вмещающими отложениями для россыпей золота, платиноидов, алмазов, касситерита, ильменита и др.

Определение гранулометрического состава крупнообломочных терригенных пород – один из наиболее распространенных методов оценки условий их образования, свойств, состава и практического применения. Оно широко применяется литологами, гидрологами, геоморфологами, инженер-геологами, нефтяниками и другими специалистами. В частности, данные по гранулометрии этих отложений используются при литолого-фациальных и палеогеографических исследованиях, расчленении и корреляции разрезов, изучении процессов россыпеобразования, оценке качества строительного сырья и т.д.

Методы определения гранулометрического состава речных отложений существенно различаются. Так, в гидрологии широко распространено измерение таких количественных характеристик, как гидравлическая крупность зерен, т.е. скорость свободного падения в воде. Для геоморфологов речные долины и заполняющие их отложения являются важнейшими компонентами природного ландшафта. Поэтому диапазон применяемых ими методов при оценке размерности обломков аллювия очень широкий и включает некоторые количественные характеристики. В частности, нередко геоморфологами применяется методика изучения гранулометрического состава крупнообломочного аллювия на основе измерения обломков на специально выделенной площадке прирусловой отмели реки. В пределах этого небольшого полигона замеряются все крупные обломки, что позволяет при обработке результатов использовать обширную количественную информацию.

В литологии среди методов изучения состава крупнообломочных отложений общепринятым является ситовой гранулометриче-

ский анализ. В зависимости от способа применения и задач исследования при этом выбираются различные наборы грохотов и сит, охватывающих весь диапазон крупности обломочного материала. Наиболее распространенным является анализ с использованием традиционного литологического набора грохотов и сит с ячейками (в мм): 80, 40, 20, 10, 5 и т.д. В инженерной геологии и для строительных целей используются другие специальные наборы сит. Количество выделяемых размерных фракций при этом составляет около 10.

Идея применения дробной гранулометрической шкалы при изучении крупнообломочных речных отложений была впервые реализована на практике сотрудником Берлинского университета Г. Иббекеном (Ibbeken, 1974). В частности, с этой целью им была сконструирована установка с набором сит, соответствующих логарифмической шкале $1/3 \phi$ (в нашей стране она получила название шкалы γ -Батурина), которая обеспечивала производительность отсева материала крупностью менее 100 мм до 1 т в день. При этом валуны замерялись поодиночке с помощью специальных ячеек и относились к фракциям той же шкалы. В полевых условиях отсеивались обломки крупностью более 16 мм, а из более мелкого материала отбиралась навеска массой в несколько килограммов для ситового отсева в лаборатории. В результате гранулометрического анализа крупнообломочного аллювия 19 горных рек Италии (всего 72 пробы) в интервале крупности обломков от 250 до 0,063 мм было выделено 35 фракций. При обработке результатов были получены в основном бимодальные кривые распределения обломков с двумя модами: преобладающей галечной (около 50 мм) и подчиненной песчаной (0,5 мм). Однако для некоторых рек распределения оказались одномодальными с модой в районе 50 мм (Ibbeken, 1983).

Мы начали изучение структуры крупнообломочного аллювия по такой же дробной гранулометрической шкале в 1977 г. Были исследованы многие реки бывшего СССР. Полученные результаты представлены в статьях (Осовецкий, 1982; Осовецкий, Трушин, 1993; Осовецкий, Копылов, 2013 и др.) и в монографии (Осовецкий, 1993).

Задачей данной статьи является обращение к одному из недостаточно изученных вопросов с целью акцентирования внимания будущих исследователей на проблеме эволюции гранулометрического состава аллювия в пространстве и во времени. Данная тема неоднократно рассматривалась в литологической литературе (Лазаренко, 1964; Лебедева, 1966; Лунев, 1967; Верзилин, 1976; Knighton, 1982; Komar, Carling, 1991; McLaren, Bowles, 1985 и др.). Однако в основном такие исследования проводились на примере равнинного песчаного аллювия или на небольших по протяженности участках горных рек. Методика исследования авторов различалась, но никто из них не применял дробный ситовый анализ.

С учетом возможностей дробного гранулометрического анализа с новых позиций может быть рассмотрена проблема эволюции структуры руслового аллювия от гор к равнинам. В наших работах (Осовецкий, 1982, 1993 и др.) приводились примеры таких наблюдений для отдельных рек. Однако недостаточно исследованы наиболее общие закономерности, не выделены типовые модели гранулометрического состава горных, предгорных и равнинных рек. Именно этим вопросам и посвящена настоящая статья.

Объекты и методика исследований

Объектами нашего исследования являлись крупнообломочные отложения горных (Кубань, Днестр, Белая, Средняя Терсь – бассейн р. Томи и Курчум – бассейн р. Иртыш), предгорных (Манья – приток р. Лозьвы, Чикман – приток р. Яйвы) и равнинных (Кама, Вятка, Дон, Виллой, Печора, Онега) рек территории бывшего СССР.

Отбор проб в горных и предгорных реках проводился на прирусловых отмелях с проходкой небольших траншей, из которых обломочный материал отбирался отдельными порциями. Русловой аллювий равнинных рек опробовался в обнажениях террас и на прирусловых отмелях с галечным обломочным материалом, использовался также керн скважин.

В горных реках исходная масса пробы составляла до нескольких тонн в зависимости от размера наиболее крупного обломка. Для

получения такого объема рыхлой массы на отмели намечалась площадка размером до 5x5 м. В пределах этой площадки сначала из верхнего слоя наносов глубиной до 0,5 м отбирался наиболее крупный валунный обломочный материал. Поперечники крупных валунов замерялись линейкой, мелких – с помощью проволочных петель и относились к фракциям дробной шкалы γ -Батурина (в мм): 400–315, 315–250, 250–200, 200–160, 160–125, 125–100, 100–80, 80–63 и 63–50. Масса мелких валунов устанавливалась с помощью напольных весов (пределный вес 150 кг), а крупных – расчетом на основе рассчитанного объема и стандартных значений плотности соответствующей породы. Для отсева средне- и мелкогалечного, а также крупногравийного материала на той же площадке отбиралась средняя проба массой порядка 200 кг. Последняя обрабатывалась на полевом грохоте с габаритами 30x30x70 см, сконструированном А.М.Трушиным (Осовецкий, Трушин, 1993). В полевых условиях грохот подвешивался на сборной треноге. Рассев проводился на классы (мм): 50–40; 40–31,5; 31,5–25; 25–20; 20–16; 16–12,5; 12,5–10; 10–8; 8–6,3 и 6,3–5. Материал в грохот загружался отдельными порциями по 10–15 кг. Для взвешивания галечно-гравийного материала использовался безмен.

Из оставшегося после отсева в поле обломочного материала крупностью менее 5 мм отбиралась представительная проба массой 1–2 кг для изучения в лабораторных условиях. Ситовой сев этой пробы проводился в две стадии. На первой стадии выполнялся сев по дробной шкале в интервале 5–1 мм с помощью ротата. Затем из класса частиц размером менее 1 мм отбиралась представительная навеска массой 200–300 г, из которой отмучивались частицы размером менее 0,05 мм. Завершался анализ севом материала крупностью от 1,0 до 0,05 мм также на ротате.

Таким образом, общее количество выделенных фракций дробной гранулометрической шкалы в интервале от 400 до 0,05 мм составляет 40. Полученные данные обрабатывались с применением графических методов построения кривых (или гистограмм) распределения обломков по крупности и

расчета статистических параметров распределения.

Для руслового аллювия предгорных и равнинных рек методика отбора проб и их отсева в полевых условиях была менее трудоемкой в связи с незначительным количеством или полным отсутствием валунов. Из аллювия предгорных рек отбиралась проба массой до 200 кг, равнинных рек – до 100 кг.

Горный аллювий

Аллювий высокогорных рек в значительной степени формируется за счет коллювиальных обрушений с крутых склонов долин. Наиболее крупные скальные фрагменты в руслах рек измеряются метрами, они не способны переноситься горным потоком и не дают никакой информации о нем. Состав высокогорного аллювия описывается как преимущественно крупновалунный материал с небольшой примесью галечного (Костенко, 1966; Карташов, 1972; Чистяков, 1978 и др.). Отбор проб на дробный гранулометрический анализ из таких отложений невозможен.

Среднегорный аллювий. В пределах среднегорных участков рек применение методики дробного гранулометрического анализа грубообломочного аллювия становится возможным, но сопряжено с большими трудностями, поскольку требует отбора представительных проб соответствующего объема, который зависит от размера наиболее крупного обломка (формула Ричардса – Чечотта).

Описанная выше процедура дробного отсева была реализована нами только несколько раз. Наиболее интересные и представительные данные получены, в частности, для среднегорного руслового аллювия р. Средняя Терсь (Кузнецкий Алатау) (табл. 1).

Основной особенностью гранулометрического состава этого аллювия является полимодальность кривой распределения (или гистограммы) обломков по крупности с последовательным уменьшением доли обломков модальных классов от крупных к мелким. Формирование аллювиального осадка такого типа, по предложению ряда исследователей (Dyer, 1970; Moss, 1972), можно представить как сочетание множества субраспределений обломочных частиц, каждое из которых характеризуется своей модой. Обломки мо-

дальних классов принадлежат только одному субраспределению, а остальных частично перекрываются с соседними. Предполагается, что каждое субраспределение обломков имеет генетическую связь с породами определенного источника питания.

При физическом выветривании питающих пород характер их трещиноватости определяет и крупность образующихся в коре выветривания обломков.

В среднегорном водотоке р. Средняя Терсь наиболее крупным по размеру обломков является субраспределение в интервале от 400 до 160 мм с модой в классе 315–250 мм. Следующее по крупности субраспреде-

ление – с размером обломков от 200 до 80 мм и модой 160–125 мм и т.д. Всего, по данным дробного анализа, выделено 10 субраспределений обломков и зерен в диапазоне от валунной до алевритовой части гранулометрического спектра (см. табл. 1, рис. 1).

Формирование такой структуры крупнообломочного аллювия обусловлено, с одной стороны, высокой скоростью горного речного потока, способного переносить и частично сортировать валунно-галечный материал, и, с другой, – обилием разнородного обломочного материала, поступающего со склонов и притоков в русло.

Таблица 1. Характеристики субраспределений обломков среднегорного аллювия р. Средняя Терсь

Субраспределение	Часть гранулометрического спектра	Границы субраспределения, мм		Мода, мм	Доля модального класса, %
		от	до		
a	Валунная	400	160	315–250	9,10
b	«	200	80	160–125	8,20
c	Галечная	125	31,5	80–63	7,15
d	«	50	12,5	40–31,5	6,35
e	«	31,5	5	16–12,5	5,60
f	Гравийная	6,3	1,6	5–4	3,75
g	«	2,0	0,315	2–1,6	2,85
h	Песчаная	1,25	0,20	0,8–0,63	1,25
i	«	0,5	0,125	0,25–0,2	0,75
j	Алевритовая	0,16	0,05	0,1–0,08	0,25

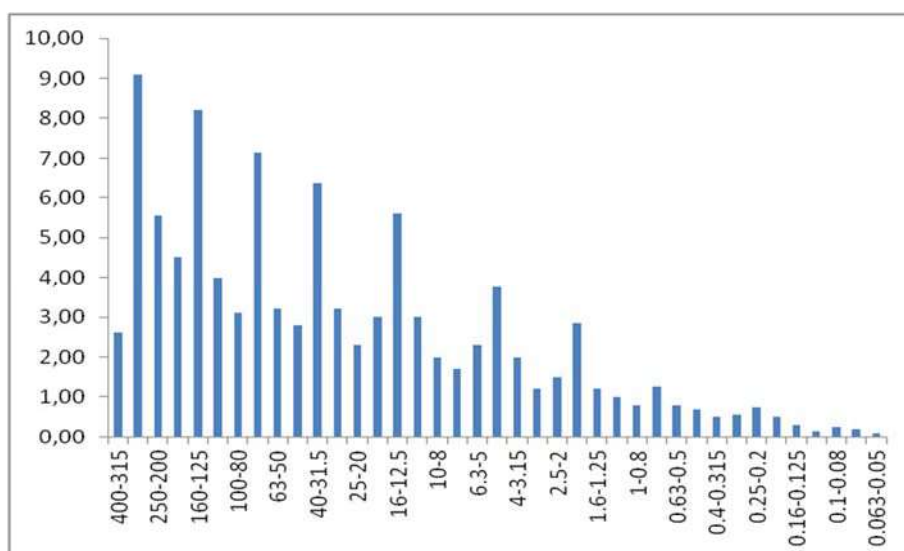


Рис. 1. Гистограмма гранулометрического состава крупнообломочного среднегорного аллювия (по оси ординат – %, по оси абсцисс – мм, здесь и далее)

Низкогорный аллювий. В руслах рек в пределах низкогорных участков долин сни-

жается средняя скорость руслового потока, существенно уменьшается интенсивность

поступления обломочного материала с бортов долины, меньшее влияние на состав аллювия оказывают притоки. Это сказывается на изменении структуры аллювия. Основными результатами являются практическое исчезновение в осадке крупных и средних валунов, смещение наиболее высокой моды в область крупногалечной части спектра.

Особенности гранулометрического состава низкогорного аллювия детально исследованы нами на примере долины р. Белой (приток р. Камы) на значительном протяжении (от г. Белорецка до г. Стерлитамака). Всего на этом участке изучено 25 проб. Применение здесь дробного гранулометрического анализа позволило выявить присутствие семи субраспределений обломков, положение которых в спектре сохраняется на всем протяжении низкогорного участка долины реки. Сводные данные для каждого субраспределения приведены в табл. 2.

В частности, в составе валунного и крупногалечного субраспределений преобладают обломки кварцитов с довольно низкой степенью окатанности. Подчиненную роль играют обломки эффузивов и песчаников. Для средне- и мелкогалечного субраспределений характерно увеличение разнообразия петро-

графических типов пород с заметным присутствием сланцев и некоторое увеличение степени их окатанности. В составе гравийных и песчаных зерен преобладает кварц.

В то же время отмечены некоторые особенности гранулометрического состава, которые заслуживают специального рассмотрения. Во-первых, на разных участках долины наблюдается смещение модального класса в пределах галечного и песчаного субраспределений. Во-вторых, установлены существенные количественные изменения в процентном соотношении субраспределений. Так, по средним данным заметно преобладает в аллювии субраспределение крупногалечных обломков (доля 40%, моды от 80 до 50 мм). Однако местами оно уступает по распространенности валунному или среднегалечному.

Причину этих вариаций удалось выяснить после учета тектонического строения территории. В частности, на участках интенсивного неотектонического подъема земной коры состав аллювия заметно крупнее, что выражается в смещении моды к более крупному классу, повышении доли валунного материала и размера наиболее крупного обломка.

Таблица 2. Характеристики субраспределений обломков низкогорного аллювия р. Белой

Субраспределение	Часть гранулометрического спектра	Мода, мм	Доля в осадке, %			Средний балл окатанности	Петрографический (минеральный) состав
			от	до	среднее		
a	Валунная	160 – 125	5	30	15	2	Кварциты
b	Крупногалечная	80–63 или 63–50	23	53	40	2	Кварциты , эффузивы, песчаники
c	Среднегалечная	40–31,5 или 31,5–25	12	30	20	3	Кварциты , эффузивы, песчаники, сланцы, кварц
d	Мелкогалечная	20–16 или 16–12,5	8	18	14	3,5	Сланцы , кварц, кварциты, эффузивы, песчаники, гнейсы
e	Крупногравийная	8–6,3	8	12	10	3	Кварц , сланцы, кварциты, эффузивы, известняки
f	Среднегравийная	4,0–3,15	3	8	6	2,5	Кварц , кварциты, известняки, сланцы,
g	Песчаная	от 1–0,8 до 0,315–0,25	1	12	7	2,5	Кварц , полевые шпаты, слюды

Примечание: жирным шрифтом выделены преобладающие разности.

Наоборот, на стабильных и неотектонически опускающихся участках изменения обратные, причем на последних преобладающий в аллювии модальный класс может смещаться даже в мелкогалечную часть гранулометрического спектра (субраспределение d, табл. 3).

Моделирование структуры горного аллювия. Анализ гистограмм распределения обломков среднегорного аллювия позволяет отметить следующие главные их особенности: большое количество субраспределений, закономерное снижение доли субраспределений по мере уменьшения крупности обломков и довольно постоянное расстояние между модами (обычно три интервала шкалы γ -Батурина). Соответственно формирование такой структуры горного аллювия может быть объяснено с помощью модели плотных шаровых упаковок, для которых типичны вышеперечисленные признаки.

Преобладающее в осадке и наиболее крупное по размеру обломков субраспределение с позиции этой модели можно рассматривать как каркасообразующее. Скопления крупных обломков в валунном каркасе допускают существование достаточно большого объема пустотного пространства между ними, которое неизбежно будет заполняться обломками меньшей крупности, соответствующей размеру пустот. Доли каждого из субраспределений более мелких обломков последовательно уменьшаются в соответствии с размером остающихся пустот.

Однако расчет доли обломков каркасообразующего валунного субраспределения для горного аллювия разных рек дает значение до 50% (для модели плотнейшей шаровой упаковки оно составляет около 74%). Объяснить такое расхождение можно различием размеров и формы обломков каркаса. Поэтому с целью моделирования структуры горного аллювия можно применять разные теоретические модели, основанные на геометрических законах плотной упаковки фигур непостоянного размера и формы. Наиболее подходящей для реальных условий является модель кубической упаковки, для которой объем сфер обломочного каркаса составляет 52,36%, а заполняющих пустоты между ними сфер – 20,51%. Размер заполняющих сфер при этом составляет 0,73 относительно размера сфер обломочного каркаса, что очень близко к реальному осадку. Объем сфер следующего (третьего) уровня в такой упаковке составляет около 9%, четвертого – около 5,5% и пятого – менее 3,5%. Аналогия со структурой крупнообломочного горного аллювия очевидна.

Использование теоретических моделей гранулометрического состава горного аллювия может быть применено для разработки принципиально новой его систематики, которая может оказаться полезной при проведении прогнозно-поисковых работ на россыпные месторождения в палеодолинах рек.

Таблица 3. Содержание обломков модальных классов на разных участках низкогорного аллювия р. Белой

Проба	Субраспределение (см. табл. 2)							Доля валунов, %
	a	b	c	d	e	f	g	
Неотектонически поднимающийся блок								
1	3,5	9,9	4,8	3,3	3,1	2,4	2,4	15
2	2,9	8,6	7,2	5,7	4,6	3,7	2,4	12
Тектонически стабильный блок								
3	2,3	8,2	9,9	4,3	3,1	2,4	2,3	10
4	1,8	6,1	8,1	5,5	3,8	2,5	3,9	8
5	2,1	7,8	9,5	4,6	4,0	2,7	3,1	9
6	2,0	7,1	7,2	6,3	5,1	3,4	2,8	5
Неотектонически опускающийся блок								
7	1,5	3,6	5,1	5,3	3,2	1,8	2,4	5

Примечание: жирным шрифтом выделены наиболее высокие моды (здесь и далее).

Известно, что концентрации россыпеобразующих минералов контролируются многими факторами, среди которых ведущими являются гранулометрические характеристики аллювиальных отложений.

Предгорный аллювий

Гранулометрический состав аллювия предгорных рек формируется путем закономерной трансформации структуры низкогорного аллювия. Она происходит благодаря существенному снижению скорости и турбулентности руслового водного потока, который уже не способен переносить крупные валунные обломки.

Распределение обломков по крупности здесь также является полимодальным, однако структуры типа плотных упаковок трансформируются с существенным перемещением модальных классов. При этом мелкогалунные обломки (размером несколько больше 100 мм) в предгорном аллювии в небольшом количестве нередко присутствуют, но они практически всегда являются частью крупногалечного субраспределения. Последнее имеет подчиненное значение в гранулометрическом спектре предгорного аллювия.

Наиболее высокая мода смещается в среднегалечную часть гранулометрического спектра и приурочена к интервалу от 63 до 31,5 мм. Мелкогалечное субраспределение (обычно 20–16 мм), как правило, является вторым по распространенности. Гравийная часть гранулометрического спектра нередко представлена двумя субраспределениями, из которых более крупноразмерное с модой 8–6,3 мм существенно преобладает. Характерно появление достаточно высокой моды (более 5%) в крупно- или среднепесчаной части спектра, что было исключено для горного аллювия.

В качестве примера приведена типичная гистограмма распределения по крупности обломков предгорного аллювия с наиболее характерными модами (рис. 2). Для данного образца отмечено присутствие 7 модальных классов и соответствующих субраспределений. Можно отметить ряд характерных особенностей гистограммы: приуроченность наиболее высоких мод к галечной области гранулометрического спектра, присутствие относительно высокой моды в пределах крупнопесчаного интервала и заметно пониженное (менее 1%) содержание частиц в узкоразмерном классе на стыке гравийной и песчаной составляющих спектра.

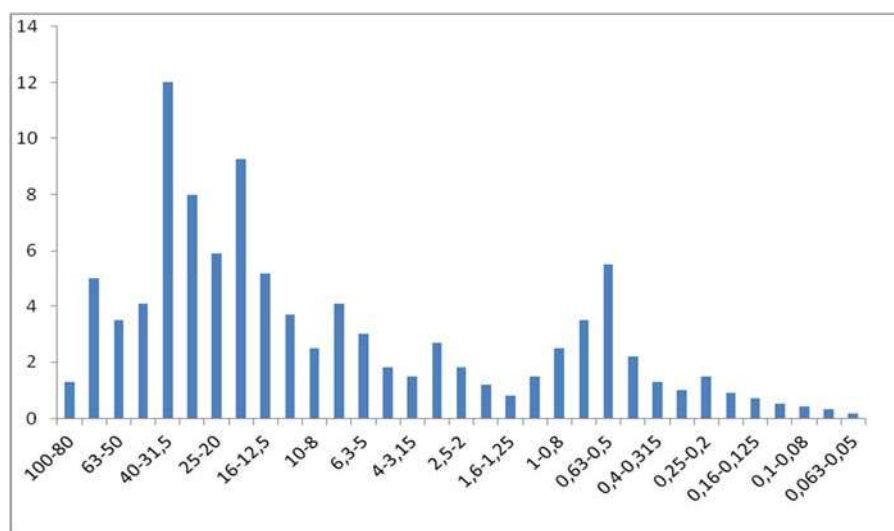


Рис. 2. Гистограмма гранулометрического состава типичного предгорного аллювия

Таким образом, основными результатами преобразования структуры аллювия на предгорном участке долины реки являются.

1. Уменьшение ширины гранулометрического спектра обломков за счет удаления ва-

лунных субраспределений. Причина – снижение средней скорости водного потока.

2. Повышение суммарной доли обломков галечных субраспределений в осадке (до 60% и более). Причина – отсутствие валунов как основных составляющих обломочного

каркаса, которыми здесь являются крупногалечные обломки.

3. Заметное выделение в галечной части спектра одной из мод, доля обломков которой достигает 13% и более (для сравнения: в горном аллювии значения галечных мод не превышали 10%). Причиной послужило проявление процессов сортировки крупнообломочного материала в руслах предгорных рек.

4. Появление отчетливо выраженной моды в песчаном классе (до 5% и более), которая становится выше любой моды в гравийной части спектра. Причина – активное проявление в предгорьях процесса дробления мелкогравийных частиц, представленных сростками минеральных зерен с разной абразивной прочностью (например, кварца и полевого шпата, кальцита и кварца и т.д.) и другими несовпадающими свойствами (например, минералов с разной спайностью: слюды и кварц). Результатом этого процесса является сортировка (пока еще в слабой форме) обломочного материала по абразивной прочности.

5. Существенное снижение доли частиц в узкоразмерных классах в интервале от 2 до 1 мм, что также является следствием процесса дробления сростков. Характерно, что это

уменьшение становится наиболее заметным в осадках с особенно высоким процентным содержанием частиц песчаной моды.

Описанные особенности структуры предгорного аллювия следует рассматривать как наиболее типичные, от которых в конкретных условиях могут наблюдаться заметные отклонения. Особенно большую роль при этом играют неотектоническая и климатическая обстановка осадконакопления, влияние притоков, характер источников питания обломочного материала и др.

В качестве примера приведем данные по дробной гранулометрии 10 образцов аллювия предгорного участка р. Белой (табл. 4). На этом участке отмечены значительные вариации гранулометрического состава: изменение положения мод, доли обломков преобладающего модального класса галечного и песчаного субраспределений и др. Наиболее высокая мода (до 13% и выше) здесь приурочена к одному из галечных классов в широком интервале (от 50–40 до 20–16 мм). Появляется высокая мода в песчаном узкоразмерном классе (например, 0,63–0,5 мм), которая иногда превышает 6%, но она присутствует не всегда.

Таблица 4. Доля частиц модальных классов в русловом крупнообломочном аллювии предгорного участка р. Белой, %

Мода, мм	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
80–63	8,02	–	–	–	–	–	–	–	–	–
50–40	–	–	–	–	8,76	–	11,71	–	–	–
40–31,5	12,80	11,55	10,47	–	–	–	–	–	–	–
31,5–25	–	–	–	7,76	–	–	–	10,74	–	–
20–16	7,78	6,22	7,80	10,54	–	11,15	8,04	13,26	13,19	10,54
16–12,5	–	–	–	–	6,66	–	–	–	–	–
8–6,3	3,77	3,47	8,00	4,71	5,29	4,68	4,66	4,42	7,23	4,71
4–3,15	–	1,57	–	2,59	2,69	–	–	–	–	–
2–1,6	–	–	1,84	–	–	3,79	–	3,09	0,96	–
1,25–1	–	0,67	1,83	–	–	–	–	2,79	–	3,31
0,63–0,5	–	–	1,59	5,48	6,27	3,02	2,43	–	–	5,48
0,4–0,315	–	1,81	–	–	4,53	–	–	–	–	–
0,315–0,25	3,44	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Равнинный аллювий

Гранулометрический состав руслового равнинного аллювия характеризуется более

или менее отчетливо выраженной бимодальной кривой распределения обломков по крупности с примерно равной высотой обеих мод. Крупнообломочная мода приурочена к одному из галечных классов (в интервале от 31,5–25 до 16–12,5 мм), мелкообломочная

мода – к одному из классов среднеспесчаной размерности (в интервале от 0,4 до 0,25 мм). Смещение галечной моды к более крупному классу происходит на участках с более высокой скоростью водного потока.

Формирование структуры равнинного крупнообломочного аллювия происходит в результате разновременного проявления двух процессов. На первом этапе в половодье формируется галечное субраспределение. Перемещение галечного материала в русле равнинной реки происходит способом волочения обломков в активном слое донных наносов мощностью до нескольких метров. При смене половодного режима меженистым происходит закрепление в русле галечного материала, который становится каркасообразующей частью будущего осадка. Песчаный материал переносится в придонном слое, а его отложение в осадок происходит в основном в меженистый период. В результате песчаные частицы заполняют промежутки между галечными обломками.

Галечное субраспределение довольно хорошо отсортировано по размеру обломков, что проявляется в закономерном уменьшении доли размерных классов по обе стороны от моды. Отметим, что повышение степени сортировки галечных обломков по крупности наблюдалось и на предгорном участке реки, но достигло наиболее высокого уровня в равнинном аллювии.

Наиболее характерной особенностью равнинного руслового аллювия является также высокая степень сортировки песчаного материала. Это достигается под влиянием эффекта сортировки по гидравлической крупности, который реализуется в процессе осадения частиц, переносимых сальтацией. Как известно, гидравлическая крупность частиц одинаковой плотности (кварц, полевые шпаты) определяется, прежде всего, их крупностью, в меньшей мере влияет форма.

Другими особенностями равнинного аллювия являются повышенная степень окатанности и однообразие петрографического состава как галечных обломков (породы кварцит, яшмы, кремни), так и песчаных зерен (кварц), т.е. наиболее прочных и устойчивых к механическому истиранию. Это результат длительного процесса перемещения обломков от гор к равнинам в долинах рек,

сопровождающегося их высокой сортировкой не только по размеру, но и по абразивной прочности (минерально-петрографическому составу).

Между субраспределениями галечных обломков и песчаных зерен в равнинном аллювии отмечается заметный «провал» в гранулометрическом спектре, который получил название «дефицит». Дефицитными обычно являются фракции в диапазоне от 2,0 до 0,63 мм, а наибольшая «глубина» дефицита приурочена к одной из узкоразмерных фракций в средней части этого диапазона (обычно 1,25–1,0 или 1,0–0,8 мм). Ширина дефицита часто охватывает до 5 узкоразмерных классов шкалы γ -Батурина. В наиболее глубокой части дефицитной области спектра содержание частиц соответствующей узкоразмерной фракции нередко уменьшается до 0,1% (сравните с галечной и песчаной модами, доля частиц которых достигает 15% и более).

Одной из причин формирования дефицита является также различие способов транспортировки галечных и песчаных частиц в водном потоке и соответственно их накопление в аллювии. Главный фактор при этом – существенное различие средней скорости водного потока, при которой в осадок отлагается основная масса галечных обломков и песчаных частиц.

Наши данные по гранулометрии равнинного аллювия обширной территории бывшего СССР (Осовецкий, 1993), а также данные зарубежных ученых (Spencer, 1963; Russell, 1968; Wolcott, 1988 и др.) показывают, что дефицит между галечным и песчаным субраспределениями – всеобщее явление, хотя причины его указываются разные. С целью количественной оценки дефицита, которая может иметь важное значение для сравнительного анализа гранулометрии разных водотоков, нами предложено понятие о дефицитном модуле. Значение модуля рассчитывается как результат деления суммы модальных классов (в процентах) на соответствующую долю частиц наиболее дефицитного узкоразмерного класса.

В связи с этим следует напомнить о том, что ранее для песчаных осадков (Spencer, 1963) было предложено понятие о структурной зрелости, которое получило широкое развитие в литологии. Именно использова-

ние дробного гранулометрического анализа песков позволило ввести представление о гранулометрической зрелости песчаного аллювия (Рожков, 1979). Позднее оно было дополнено понятием о гранулометрической зрелости крупнообломочного аллювия (Осовецкий, 1993). Решающую роль в этом отношении сыграли сравнительные данные о величине дефицитного модуля как количественной меры глубины дефицита и одновременно степени структурной зрелости крупнообломочного аллювия. Соответственно для зрелого равнинного аллювия предложена как наиболее приемлемая бимодальная гистограмма распределения обломочных частиц по крупности (рис. 3).

Проведенные нами сравнения величины дефицитного модуля для десятков равнинных рек России показали, что степень зрелости крупнообломочного равнинного аллювия прежде всего зависит от длительности существования данной речной системы, а также от состава пород источников питания и климатических факторов. На другом уровне его величина меняется в зависимости от микрофациальных условий формирования руслового аллювия, влияния притоков, сезона опробования и других факторов. По нашим данным, для русловых осадков рек умерен-

ного пояса древнего заложения (Волга, Дон, Днепр), удаленных от горных сооружений, величина дефицитного модуля, как правило, превышает 30. Это значение мы предлагаем считать пороговым для зрелого аллювия. Так, для руслового аллювия р. Дон значения модуля обычно заключаются в пределах 34–50. Значения дефицитного модуля в пределах от 30 до 10 характерны для относительно молодых речных долин (Вилуй, Онега, Северная Двина, Печора и др.). Для аллювия верхнего течения р. Вятки, сформированного под влиянием размыва ледниковых отложений, значение модуля составляет 16. Для детально изученного руслового аллювия равнинного участка р. Белой (приток Камы), в питании которого значительную роль играли продукты размыва уральского горного сооружения, установлено последовательное повышение значений модуля вниз по течению в пределах от 9 до 36.

Моделирование структуры равнинного аллювия. Статистическая обработка результатов дробного гранулометрического анализа крупнообломочного аллювия равнинных рек показала хорошее соответствие галечного распределения закону Розина, а песчаного – логнормальному закону, обоснованному теоретически А.Н. Колмогоровым (1941).

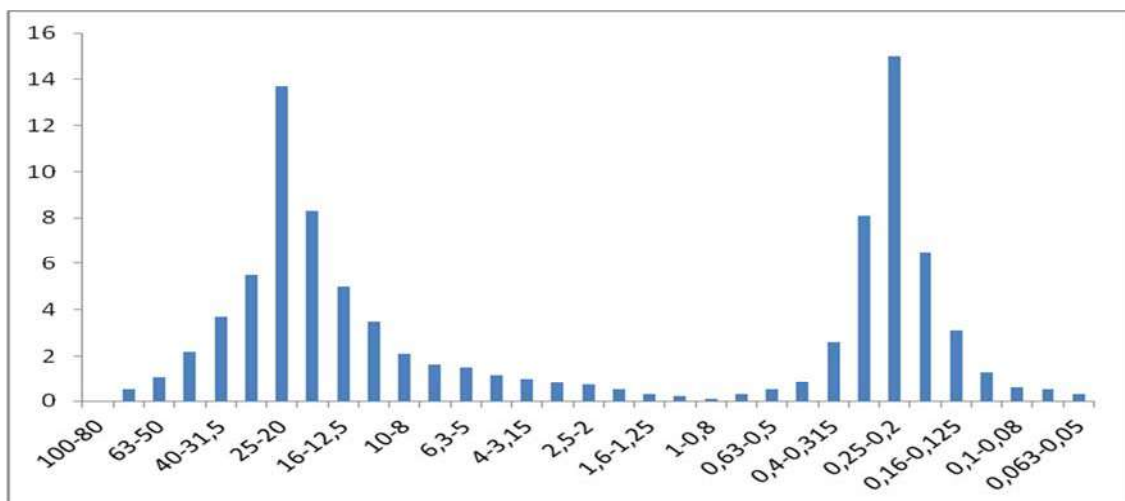


Рис. 3. Гранулометрический состав зрелого крупнообломочного равнинного аллювия

Интересно, что распределение обломочных продуктов механического выветривания коренных пород, изученное по дробной гранулометрической шкале в Южной Италии, также соответствует закону Розина (Ibbeken, 1983). Отсюда сделан вывод о том, что круп-

ность галечного материала в аллювии в значительной степени наследуется от пород источников питания, а сортировка его в водном потоке, в отличие от песчаных зерен, имеет подчиненное значение.

Использование статистических характеристик распределения частиц по крупности прежде всего позволяет установить характерные особенности аллювиальных отложений как генетического типа. В частности, можно обратить внимание на большое сходство значений среднего размера обломков галечного распределения для аллювия разных рек: для Дона – 14,5 мм, Вятки – 11,2 мм, Вилюя – 11,1 мм. Соответственно аналогичные значения для частиц песчаного распределения укладываются в узкий интервал от 0,32 до 0,35 мм. Обломки галечного распределения несколько хуже отсортированы по крупности (коэффициент сортировки σ_{ϕ} 0,85–1,31), чем песчаного (0,36–0,89). При этом для галечного распределения обычно характерна положительная асимметрия (S_k от +0,04 до +0,43), для песчаного – отрицательная (от –0,06 до –0,35). Значения эксцесса для субраспределений близки с некоторым смещением песчаного к более крутой вершинной кривой распределения.

Бимодальная модель гранулометрического состава равнинного аллювия, в котором галечные обломки и песчаные частицы подчиняются определенному закону распределения, может быть применена для установления многих закономерностей аллювиального процесса.

Заключение

Дробный гранулометрический анализ песков получил широкое распространение в практике детальных литологических исследований осадочных толщ. Эти исследования позволили существенно расширить наши представления о формировании аллювиальных песчаных отложений. Были разработаны принципиально новые теоретические подходы к интерпретации результатов исследований (понятия о гранулометрической зрелости песков, популяциях частиц, законах распределения частиц по крупности и др.).

Впервые дробный гранулометрический анализ с целью изучения структуры грубообломочных аллювиальных отложений был применен в 70-х гг. прошлого века. Вскоре после пионерской работы немецкого литолога Г. Иббекена (1974) по изучению аллювия

рек Южной Италии вышли в свет и наши статьи (Осовецкий, 1982 и др.).

Высокая трудоемкость дробного гранулометрического анализа из-за необходимости отбора и обработки в полевых условиях значительной массы обломочного материала препятствовала его широкому распространению в практике литологических исследований. Так, за прошедшие сорок с лишним лет было опубликовано лишь несколько новых работ по данной тематике.

Детальное изучение структуры аллювия показало, что в реках от гор к равнинам происходит естественный отбор обломков по крупности, абразивной прочности за счет интенсивного истирания и дробления при транспортировке, минерально-петрографическому составу, морфологии и т.д.

Методика дробного гранулометрического анализа крупнообломочных речных отложений может быть рекомендована для определенных видов геологических исследований в связи с особой важностью проводимых работ и ценностью получаемых результатов. В частности, это относится к прогнозно-поисковым исследованиям на россыпи в древних речных долинах, которые сопровождаются буровыми работами. В этом случае дробный гранулометрический анализ погребенного аллювия может быть выполнен попутно с опробованием на алмазы или благородные металлы. Подчеркнем, что в полевых условиях необходимо выполнить рассев только галечной части отложений, а из песчано-гравийной отобрать небольшую представительную пробу для изучения в лабораторных условиях.

Некоторые гранулометрические характеристики аллювия могут быть использованы как важные индикаторы россыпенности (степень полимодальности, размер и содержание обломков преобладающей моды, наличие и глубина дефицита и др.). По мере накопления данных полученные результаты могут быть использованы при восстановлении древней речной сети, оценке относительного возраста и порядка водотоков, при геоморфологических и других исследованиях.

Автор выражает благодарность Н.А. Бусыгиной и К.П. Калининну за помощь в оформлении статьи.

Библиографический список

- Верзилин Н.Н.* Изменения петрографического состава и количества галечного материала вниз по течению современных рек Ферганской долины // *Аллювий / Перм. гос. ун-т. Пермь, 1976. С. 3–12.*
- Карташов И.П.* Основные закономерности геологической деятельности рек горных стран (на примере Северо-Востока СССР). М.: Наука, 1972. 180 с.
- Колмогоров А.Н.* О логарифмически-нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении // *Докл. АН СССР. 1941. Т. 31, № 2. С. 99–101.*
- Костенко Н.П.* Формирование и строение горного аллювия рек Средней Азии // *Четвертичный период Сибири. М., 1966. С. 400–417.*
- Котельников Б.Н.* Реконструкция генезиса песков. Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. 132 с.
- Лазаренко А.А.* Литология аллювия равнинных рек гумидной зоны (на примере Днепра, Десны и Оки). М.: Наука, 1964. 236 с.
- Лебедева Н.В.* Изменение гранулометрического состава современного руслового аллювия вниз по течению равнинной реки (на примере р. Вычегды) // *Литол. и полезн. ископ. 1966. № 5. С. 37–44.*
- Лунёв Б.С.* Дифференциация осадков в современном аллювии / Перм. гос. ун-т. Пермь, 1967. 333 с.
- Осовецкий Б.М.* Структура крупнообломочного аллювия по данным дробного гранулометрического анализа // *Литол. и полезн. ископ. 1982. № 1. С. 67–77.*
- Осовецкий Б.М.* Дробная гранулометрия аллювия. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1993. 343 с.
- Осовецкий Б.М., Копылов И.С.* О влиянии структуры аллювиальных крупнообломочных грунтов на их инженерно-геологические свойства // *Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 934–941.*
- Осовецкий Б.М., Трушин А.М.* Структура грубообломочного аллювия р. Белой // *Литол. и полезн. ископ. 1993. № 4. С. 63–78.*
- Рожков Г.Ф.* Гранулометрическая зрелость песков // *Литол. и полезн. ископ. 1979. № 5. С. 106–124.*
- Чистяков А.А.* Горный аллювий. М.: Недра, 1978. 287 с.
- Dyer K.R.* Grain size parameters for sand-gravel // *J. Sediment. Petrology. 1970. Vol. 1, No 1. P. 616–620.*
- Ibbeken H.* A simple sieving and splitting device for field analysis of a coarse grained sediments // *J. Sediment. Petrology. 1974. Vol. 44, No 3. P. 939–946.*
- Ibbeken H.* Jointed source rock and fluvial gravels controlled by Rosin's law: a grain size study in Calabria, South Italy // *J. Sediment. Petrology. 1983. Vol. 53, No 4. P. 1213–1231.*
- Knighton A.D.* Longitudinal changes in the size and shape of stream bed material: evidence of variable transport conditions // *Catena. 1982. Vol. 9, No 1–2. P. 25–34.*
- Komar P.D., Carling P.A.* Grain-sorting in gravel-bed streams and the choice of particle sizes for flow-competence evaluations // *Sedimentology. 1991. Vol. 38, No 3. P. 489–502.*
- McLaren P., Bowles D.* The effects of sediment transport on grain-size distributions // *J. Sediment. Petrology. 1985. Vol. 55, No 4. P. 457–470.*
- Moss A.J.* Bed-load sediments // *Sedimentology. 1972. Vol. 18, No 34. P. 159–219.*
- Shea J.H.* Deficiencies of clastic particles of certain sizes // *J. Sediment. Petrology. 1974. Vol. 44, No 4. P. 985–1003.*
- Spencer D.W.* The interpretation of grain size distribution curves of clastic sediments // *J. Sediment. Petrology. 1963. Vol. 33, No 1. P. 180–190.*

Evolution of Grain Size Composition of the Pebbly River-Bed Alluvium from Mountains to Plains

B.M. Osovetskiy

Perm State University

15 Bukirev Str., Perm 614990, Russia. E-mail: opal@psu.ru

The main signs of grain size transformation for pebbly river sediments from mountains to plains are examined with application of the detailed analysis. Under the description of grain size curves, such characteristics as sub-distributions and modes are used. The sampling of sediments in many rivers of the former USSR was conducted in field expeditions. The data on grain size evolution are presented as transformation of polymodal curves into bimodal.

Key words: *bed alluvium; mountain and plain rivers; detailed analysis; evolution.*

References

- Chistyakov A.A.* 1978. Gornyy alluviy [The mountain alluvium]. Moskva, Nedra, p. 287. (in Russian)
- Dyer K.R.* 1970. Grain size parameters for sand-gravel. *J. Sediment. Petrology*. 1(1):616–620.
- Ibbeken H.* 1974. A simple sieving and splitting device for field analysis of a coarse-grained sediments. *J. Sediment. Petrology*. 44(3):939–946.
- Ibbeken H.* 1983. Jointed source rock and fluvial gravels controlled by Rosin's law: a grain size study in Calabria, South Italy. *J. Sediment. Petrology*. 53(4):1213–1231.
- Kartashov I.P.* 1972. Osnovnye zakonomernosti geologicheskoy deyatelnosti rek gornyykh stran (na primere Severo-Vostoka USSR) [The main laws of geological activity of the rivers in the mountain territories (on the example of the North-Eastern part of the USSR)]. Moskva, Nauka, p. 180. (in Russian)
- Knighton A.D.* 1982. Longitudinal changes in the size and shape of stream bed material: evidence of variable transport conditions. *Catena*. 9(1–2):25–34.
- Kolmogorov A.N.* 1941. O logarifmicheskii-normalnom zakone raspredeleniya razmerov chastits pri droblenii [On logarithm-normal law of particle size distribution under crashing]. *Doklady AN USSR*. 31(2):99–101. (in Russian)
- Komar P.D., Carling P.A.* 1991. Grain-sorting in gravel-bed streams and the choice of particle sizes for flow-competence evaluations. *Sedimentology*. 38(3):489–502.
- Kostenko N.P.* 1966. Formirovanie i stroenie gornogo alluviya rek Sredney Azii [Forming and construction of mountain alluvium of the Middle Asia rivers]. In: *Chetvertichnyy period Sibiri*. Moskva, p. 400–417. (in Russian)
- Kotelnikov B.N.* 1989. Rekonstruktsiya genezisa peskov [Sand genesis reconstruction]. Leningrad, Leningrad Univ., p. 132. (in Russian)
- Lazarenko A.A.* 1964. Litologiya alluviya ravninykh rek gumidnoy zony (na primere Dnepra, Desny i Oki) [Alluvium lithology of plain rivers of humid zone]. Moskva, Nauka, p. 236. (in Russian)
- Lebedeva N.V.* 1966. Izmeneniye granulometricheskogo sostava sovremennogo ruslovogo alluviya vniz po techeniyu ravninnoy reki (na primere r. Vychehdy) [Changes of grain size composition of modern bed alluvium along the plain river (on the example of the Vychehda River)]. *Lithology and Mineral Resources*, 5:37–44. (in Russian)
- Lunyov B.S.* 1967. Differentsiatsiya osadkov v sovremennom alluvii [Differentiation of sediments in modern alluvium]. Perm, Perm Univ., p. 333. (in Russian)
- McLaren P., Bowles D.* 1985. The effects of sediment transport on grain-size distributions. *J. Sediment. Petrology*. 55(4):457–470.
- Moss A.J.* 1972. Bed-load sediments. *Sedimentology*. 18(34):159–219.
- Osovetskiy B.M.* 1982. Struktura krupno-oblomochnogo alluviya po dannym drobnogo granulometricheskogo analiza [Texture of pebbly alluvium on the data of detailed grain size analysis]. *Lithology and Mineral Resources*, 1:67–77. (in Russian)
- Osovetskiy B.M.* 1993. Drobnaya granulometriya alluviya [Detailed grain size of alluvium]. Perm, Perm Univ., p. 343. (in Russian)
- Osovetskiy B.M., Kopylov I.S.* 2013. O vliyaniy struktury alluvialnykh krupnooblomochnykh gruntov na ikh inzhenerno-geologicheskie svoystva [On the influence of texture of alluvial pebbly soils on their engineering-geological properties]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 6:934–941. (in Russian)
- Osovetskiy B.M., Trushin A.M.* 1993. Struktura krupnooblomochnogo alluviya r. Beloy [The texture of pebbly alluvium of the Belaya River]. *Lithology and Mineral Resources*, 4:63–78. (in Russian)
- Rozhkov G.F.* 1979. Granulometricheskaya zrelost peskov [Grain size maturity of sands]. *Lithology and Mineral Resources*, 5:106–124. (in Russian)
- Shea J.H.* 1974. Deficiencies of elastic particles of certain sizes. *J. Sediment. Petrology*. 44(4):985–1003.
- Spencer D.W.* 1963. The interpretation of grain size distribution curves of elastic sediments. *J. Sediment. Petrology*. 33(1): 180–190.
- Verzilin N.N.* 1976. Izmeneniya petrograficheskogo sostava i kolichestva galechnogo materiala vniz po techeniyu sovremennykh rek Ferganskoy doliny [The changes of petrographic composition and pebbly material quantity along the modern rivers of Fergana Valley]. *Alluvium*. Perm, Perm Univ., p. 3–12. (in Russian)