

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Б.Н. КОТЕЛЬНИКОВ

## РЕКОНСТРУКЦИЯ ГЕНЕЗИСА ПЕСКОВ

Гранулометрический состав и анализ  
эмпирических полигонов распределения

Под редакцией доктора  
геолого-минералогических наук В.Н.ШВАНОВА



ЛЕНИНГРАД  
ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛЕНИНГРАДСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
1989

Рецензенты: канд. геол.-минер. наук Н.С.Ожнова (ВНИГРИ),  
д-р геол.-минер. наук В.Б.Татарский (ЛГУ)

Печатается по постановлению  
Редакционно-издательского совета  
Ленинградского университета

УДК 552.51:552.12

Котельников Б.Н. Реконструкция генезиса песков: Гранулометрический состав и анализ эмпирических полигонов распределения / Под ред. В.Н.Шванова. - Л.: Издательство Ленинградского университета. 1989. - 132 с. ISBN 5-288-00427-7

В основу работы легли данные 1300 дробных гранулометрических анализов практически всех генетических типов континентальных и прибрежных осадков. Результаты представлялись в виде эмпирических полигонов распределения (ЭПР), примеры которых даны в работе. Установлено, что ЭПР наиболее полно отражает структуру осадка, которая, в свою очередь, определяется ее генезисом. Даны рекомендации для диагностики осадков по конфигурации ЭПР.

Работа предназначена для геологов-осадочников и литологов, может использоваться специалистами по поискам полезных ископаемых, грунтоведами и гидрогеологами. Библиогр. 54 назв. Ил. 42. Табл. 3.

К 1804020300 - 079 75-90  
076(02) - 89

Научное издание

Котельников Борис Николаевич

РЕКОНСТРУКЦИЯ ГЕНЕЗИСА ПЕСКОВ.  
ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ И АНАЛИЗ  
ЭМПИРИЧЕСКИХ ПОЛИГОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Редактор М.С.Клювич  
Художественный редактор О.В. Угнич  
Обложка художника М.Г.Занько  
Технический редактор Е.И. Егорова  
Корректоры Л.С.Львова, М.Э.Макаренкова

ИБ № 3594

---

Подписано в печать 26.10.89. М-23336. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл.печ.л. 7,67.  
Усл. кр.-отг. 7,9. Уч.-изд.л. 7,06. Заказ 536.  
Тираж 552 экз. Цена 1 р. 40 к.  
Издательство ЛГУ, 199034, Ленинград, Университетская наб., 7/9  
участок оперативной полиграфии типографии Издательства ЛГУ  
199061, Ленинград, Средний пр., 41

ISBN 5-288-00427-7

© Б.Н.Котельников, 1990

## ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемая работа посвящена использованию результатов гранулометрических анализов для определения фациальной принадлежности песчаных осадков. Трудно переоценить значение этой актуальной проблемы. Механические анализы песчаных пород выполняются в огромном количестве для самых различных целей: классификации, для изучения минералогического состава, для определения механических и коллекторских свойств и т.д. Однако стремление все новых и новых исследователей использовать полученные результаты в целях фациально-генетического анализа является главным направлением развития гранулометрического метода.

В основу проведенного исследования легли материалы, полученные автором при изучении юрских пород Ферганской долины и современных прибрежно-морских осадков Нарвского и Евпаторийского заливов. Были использованы данные по гранулометрии песчанистых алевролитов из неомских отложений южной части Туаркшра (Западная Туркмения). Для уточнения особенностей гранулометрии песчаных осадков разного генезиса, выяснения процессов структурной перестройки обломочного вещества во время его транспортировки потребовалось также привлечение фактического материала по гранулометрии современных осадков из разных регионов. Для этого производились анализы, выполнявшиеся в большинстве случаев под руководством автора студентами кафедры литологии и морской геологии ЛГУ. Они включали: 1. Современные осадки пляжа и подводного берегового склона Нарвского залива; около 50 проб. 2. Современные осадки пляжа и подводного берегового склона Терского берега Белого моря; 30 проб. 3. Современные донные осадки Порьеи губы Белого моря; 55 проб. 4. Современные донные осадки Уссурийского залива Японского моря; 17 проб. 5. Современные донные осадки центральной части

Японского моря; 15 проб. 6. Современные пролювиальные осадки оврагов по среднему течению р. Бодрак (Крым); 9 проб. 7. Четвертичные аллювиальные осадки из террас р. Лени; 35 проб. 8. Четвертичные лессовидные суглинки Дунай-Днестровского массива; 5 проб. 9. Аллювиальные осадки из таврской свиты Крыма (континентальные неогеновые отложения); 10 проб. 10. Осадки опресненной лагуны из верхне-бастакской подсвиты Мома-Зырянской впадины (верхняя кра, титон); 12 проб. Все анализы (238 шт.) достаточно дробные и выполнены по одной методике.

Большую (около 100 проб) коллекцию гранулометрических анализов разнофациальных осадков из неогеновых песков Таджикской депрессии (аллювиальных и эоловых) предоставил в распоряжение автора В.Н. Шванов. В работе нашли отражение около 250 анализов оболовых песков Ленинградской области и Эстонии из диссертационной работы Л.Н. Кулямина. Наконец, были изучены и в значительной степени использованы в работе результаты гранулометрических анализов, опубликованные в печати. Это данные В.К. Климавичене, А.В. Сидоренко, Г.И. Шамова, П.Н. Конева и О.Н. Яковлевой (около 110 анализов) и около 200 анализов иностранных авторов - Фолка, Варда, Масона, Мюллера, Хьйма, Китлемана, Гарриса, Пассега, Вольфа, Рукстона, Рао и др.

Вышеперечисленные анализы (около 1300 шт.) не равноценны по точности выполнения. Конечно, в этот список не вошли шести-фракционные анализы, которые, к сожалению, преимущественно и публикуются в советской периодической печати, но и качество многих вошедших оставляет желать лучшего. Что касается фациальной представительности списка, то в него не попали пробы некоторых специфических, главным образом, глубоководных морских и турбидитовых песчаных осадков. Безусловно, и среди аллювиальных и даже среди прибрежно-морских песков, изученных наиболее полно, могут быть обнаружены со временем такие структурные разновидности, которые не нашли отражения в работе. Тем не менее, в списке нет ни одной серии анализов, которая бы противоречила основным выводам работы. То же самое касается теоретического и экспериментального материала по гидравлике и гидрологии, а также по статистическим методам обработки результатов гранулометрических анализов.

---

---

## Г л а в а I

### К ИСТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЙ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИХ СОВОКУПНОСТЕЙ

Начиная с пионерских работ Д. Уддена [43] гранулометрический метод исследования зернистых пород развивался как по линии совершенствования техники анализа, так и по линии использования результатов для различных целей. В работе мы останавливаемся на одном из приложений гранулометрии — использовании данных механического анализа для установления генезиса песчаных осадков. В кругу вопросов о происхождении зернистых пород, основанных на анализе их структуры, обособились два направления, одно из которых оперировало и оперирует статистическими параметрами, отражающими те или иные особенности распределений частиц по крупности, другое обращается к самим гранулометрическим совокупностям: исследует их разнообразие, законы распределения и стремится к генетическому истолкованию характера распределений и их частей как продуктов взаимодействия осадкообразующая среда — осадок.

В своей работе автор не использовал гранулометрические коэффициенты — статистические параметры распределений, что позволяет также не рассматривать историю этого вопроса. Причиной тому является определенное негативное отношение автора к методам, базирующимся на работе с гранулометрическими параметрами, основанное на следующих обстоятельствах:

1. Большинство статистических параметров — среднее арифметическое, стандартное отклонение, коэффициент вариации, эксцесс — пригодны для описания нормального (логнормального) или близких к нему распределений, преобладающих в природе, но не исчерпывающих их разнообразия. Использование указанных параметров для отражения сильно деформированных нормальных распре-

делений, распределений, подчиняющихся другим законам, а также бимодальных совокупностей, являющихся смешением простых субраспределений, некорректно или вовсе неправильно. Использование статистических параметров в качестве гранулометрических характеристик в попытках привлечь их для седиментологических построений в таких случаях заставляет идти на заведомо неверный шаг (что, кстати, широко практикуется, поскольку расчеты коэффициентов обычно не сопровождаются статистическими оценками распределений на нормальность), либо отказываться от некоторых аналитических данных и, следовательно, терять информацию, часто совершенно необходимую для сравнительного анализа.

2. Произведенный В.Н.Швановым критический обзор методов интерпретации гранулометрических характеристик с привлечением гранулометрических коэффициентов и динамических диаграмм, строящихся на их основе, поставил "под сомнение саму возможность выработки каких-то единых, пригодных для всех случаев критериев фациально-генетического истолкования гранулометрических данных"[23, с.100].

3. Оценивая значения статистических параметров в гранулометрии, полезно помнить также справедливое изречение В.Таннера (1964 г.) о том, что "гранулометрические коэффициенты маскируют столько же информации, сколько ее представляют"(цит. по [23, с.101]).

Поскольку предлагаемая работа посвящена анализу распределений с прямыми характеристиками, получаемыми в ходе гранулометрической обработки, остановимся на основных исследованиях этого направления.

Д.Удден [43] был, по-видимому, первым, кто предположил подчиненность распределения обломочных частиц в большинстве осадочных пород логнормальному закону. Позднее [33, 34] обоснование этого закона и введение на такой основе логарифмической шкалы  $\phi$  было сделано В.Крумбейном. Одновременно П.Росиным и В.Раммлером было установлено, что продукты искусственного дробления и некоторые обломочные породы на первых стадиях измельчения подчиняются иному распределению, получившему впоследствии название распределения Росина (Росина - Раммлера)\*. В

\* А.И.Романовским [8'] было показано, что распределение Росина соответствует ранее известному в теории вероятностей

1949 г. А.Н.Колмогоров дал математическое обоснование логнормальности распределения частиц, полученных от дробления.

Представление результатов анализа в виде гистограмм и кривых распределения производилось с самого появления гранулометрического анализа. После введения В.Крумбейном в 30-х годах гранулометрической шкалы  $\phi$ , позднее  $1/2\phi$  и  $1/4\phi$ , появилась возможность стандартизации методики анализа и изображения результатов. В 1947 г. В.П.Батуриин [2] предложил унифицировать метод гистограмм как чисто иллюстративный путем пересчета весовых содержаний на интервалы введенной им размерной шкалы  $\gamma$ . Этот пересчет позволяет использовать для построения гистограмм или кривых распределения механические анализы, выполненные на ситах с непостоянным модулем. К сожалению, до сих пор в литературе встречаются не пересчитанные на какую-либо единицу размерной шкалы гистограммы, которые, конечно же, не отражают истинную структуру осадка.

Применение гистограмм и кривых распределения для сравнительного анализа гранулометрических данных, представляющих объекты, различающиеся территориально, по размеру или условиям отложения, содержится во многих работах. Л.Б.Рухин [14,15] был не только создателем генетической диаграммы, построенной на основе гранулометрических коэффициентов, но и первым в отечественной литературе, кто произвел сравнительный анализ кривых распределения, отражающих различные динамические обстановки. Позднее гистограммы и кривые распределения начали широко использовать прежде всего как иллюстративный материал, но также для сравнения различных динамических и генетических типов осадков. Кривые распределения или ограниченные ими эмпирические полигоны распределения (ЭПР) применялись А.В.Сидоренко при анализе эоловой дифференциации вещества в пустыне [17], В.Г.Чистяковым при изучении эоловой дифференциации песка на пляже [21], Е.В.Рухиной для выделения и характеристики моренных отложений [16]. Примеры использования ЭПР для разработок, ограниченных каким-либо одним из регионов или какой-либо определенной группой генетических типов отложений, распределению Вейбулла. Поскольку, однако, литологи знают о нем в связи с именем Росина, его целесообразно называть распределением Росина - Вейбулла (прим. ред.).

можно привести много, однако автору не удалось видеть работу, где анализ ЭПР рассматривался бы как средство установления генетических и динамических типов в системе общих генетических построений, с охватом всех или хотя бы большего числа генетических обстановок.

Кумулятивные кривые как второй способ изображения гранулометрических совокупностей вошли в геологическую литературу благодаря работам П.Траска [42]. Позднее появилось три вида кумулятивных кривых, строящихся в зависимости от масштабов по осям абсцисс и ординат в системах соответственно логарифмически-линейных, лог-логарифмических или лог-вероятностных координат. В.Крумбойн и Ф.Петтиджон [35] предлагали использовать кумулятивные кривые для выделения различных, в идеале - генетических, групп пород. Пионерской в этой области явилась работа Г.Отто [38], который сравнивал прибрежно-морские и аллювиальные пески, проверяя их на логнормальность распределения.

Из последующих многочисленных работ с использованием кумулятивных кривых наибольший интерес вызывают исследования, выполненные в 1946 г. Д.Дугласом, в 1958 г. - К.Синдовски, а также работы Г.Вишера [44]. Суть предложений Д.Дугласа в том, что анализируются все части распределений, изображенных в лог-вероятностной системе координат, что существует прямая связь между способом отложения осадка и типом гранулометрической кривой и что фациальную обстановку осадконакопления можно реконструировать, основываясь на сочетаниях кумулятивных кривых, отражающих сложность строения каждого из фациальных комплексов. К.Синдовски на основе обширного фактического материала с помощью кумулятивных кривых в лог-вероятностной шкале эмпирически выделял семь типов гранулометрических распределений ископаемых и древних осадков, отвечающих прибрежным, шельфовым, флювиальным и другим обстановкам. Хотя К.Синдовски не связывал выделенные им типы распределений с механизмом образования осадка, важным результатом его работы явилось получение доказательств, что основные физико-географические обстановки осадконакопления могут быть идентифицированы анализом полных гранулометрических спектров слагающих их отложений

Г.Вишер, опробовав отложения из разнообразных физико-географических обстановок, получил серии кумулятивных гранулометрических кривых в лог-вероятностных координатах, характеризующих прибрежную, донную, волновую, дельтовую и другие обстановки накопления. Многочисленные изображения кривых распределения позволяют использовать работу Г.Вишера в качестве определителя, для чего необходимо изображать результаты в виде кумулятивной кривой в лог-вероятностной шкале. Одной из главных особенностей работ Г.Вишера является стремление выявить среду отложения через понимание способов транспортировки обломочного материала, зафиксированных после отложения последнего в гранулометрическом спектре. Представления Г.Вишера о способах транспортировки обломочного материала отражают одно из перспективных, на наш взгляд, направлений в седиментологии, открывающих возможность реконструкции процессов седиментогенеза путем расшифровки гранулометрических кривых распределения, получающихся как результат взаимодействия среда - осадок. Поскольку из всего разнообразия подходов в понимании механизма, формирующего гранулометрический спектр, этот подход представляется автору наиболее правильным, как это будет ясно из дальнейшего, рассмотрим основную линию его развития.

В 1949-1952 гг. Д.Инман [31] обратил внимание на существование трех основных типов транспортировки обломочного материала в потоке: качение, сальтация и перенос в суспензии, каждый из которых вносит свой вклад в общую структуру осадка при его отложении. Поскольку соотношение указанных трех фаз в разных потоках, также как и возможности для их отложения, различны, то это приводит к формированию индивидуальных и характерных черт в осадке, выпавшем из того или иного потока, и открывает возможности для диагностики режима потоков по типу гранулометрических кривых. Представления о связях между гранулометрическими совокупностями и способом переноса осадков для воздушных сред изучались Р.Бэгнольдом, которому принадлежит одна из интереснейших работ по исследованию золотых песков [26]. Развитием идей Д.Инмана и Р.Бэгнольда является работа А.Мосса (1962 г.), который использовал не толь-

ко размер, но и форму зерен для установления субраспределений, образованных тремя типами блоковых наносов: движущихся волочением, сальтацией и в суспензии. Им изучены отложения, образующиеся при каждом из типов переноса, установлены их размерные интервалы и показана роль субраспределений в формировании общих распределений при различных динамических условиях.

В известной степени итогом развития этого направления явилась статья Г.Вишера [44], представившего, как отмечалось, не только обширный эмпирический материал по различным физико-географическим средам, но и попытавшегося объяснить механизм формирования осадков на основе представлений о трех способах перемещения осадков: волочением, сальтацией и в суспензии. Методика выявления субраспределений, образованных каким-то одним способом транспортировки, заключалась в выделении прямых отрезков на кумулятивных кривых, построенных в лог-вероятностной сетке. Каждая прямая линия на диаграмме отвечает одному способу транспортировки, изломы кривых соответствуют переходам от осадков одного динамического типа к осадкам другого типа. Анализ многих сотен образцов из разных обстановок дал возможность Г.Вишеру оценить, каково соотношение объемов наносов, переносимых различными способами в тех или иных водотоках. Данные Г.Вишера о соотношении фаз (субраспределений) осадков в различных физико-географических условиях приведены с сокращениями в табл. I.

Т а б л и ц а I. Объем осадков, переносимых путем сальтации, в суспензии и волочением, в различных физико-географических обстановках, % (по [44])

Физико-географическая обстановка	Объем субраспределения, перемещенного одним способом		
	Сальтация	В суспензии	Волочение
Флювиальные	65-98	2-35	0-5
Подводные валы	0-30	6-100	0-5
Приливные каналы	20-80	0-20	0-70
Приливные бухты	30-65	2-5	30-70
Береговая зона	50-99	0-10	0-50
Подводный береговой склон	20-90	0-2	10-90
Бари, мели	30-95	0-2	5-70
Волновая зона	35-90	5-70	0-10
Дюны	97-99	1-3	0-2
Дельтовые потоки	0-70	30-100	0-40

Из многообразия методов получения, представления и интерпретации гранулометрических данных мы рассмотрели те, которые в методическом и познавательном смысле ближе всего к методическим и теоретическим воззрениям автора данной работы. Казалось бы, накопленных только в этом направлении материалов уже достаточно для выработки единой системы гранулометрических характеристик, отражающих общую картину гранулометрии различных динамических и физико-географических сред. Однако это не так. Разнообразие гранулометрических шкал, примененных различными авторами, наличие ошибок и разнообразие способов изображения результатов не позволяют свести накопленный фактический материал в единую систему и заставляют вновь обращаться к дополнительному фактическому материалу, применению новых способов обработки и иным, более наглядным способам представления результатов анализов. По мнению автора предлагаемой работы, прямым и в то же время наглядным способом изображения результатов являются кривые распределения, или эмпирические полигоны распределения, к которым в целях унификации методов гранулометрических исследований следует приводить материалы, получаемые из различных источников, если мы действительно хотим создать какой-то единый определитель динамических или фациальных обстановок по гранулометрическим данным. Автор рассматривает свою работу как первый шаг в этом направлении.

---

---

## Г л а в а П

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУР, ПРИМЕНЕННЫЕ В РАБОТЕ

Для изучения и сопоставления результатов гранулометрических анализов песков разного генезиса из различных регионов, даже если эти анализы выполнены с помощью разных ситовых наборов, по нашему мнению, следует использовать эмпирические полигоны распределения (ЭПР) в координатах: конечные размеры фракций в логарифмическом масштабе по оси абсцисс, соответствующие каждой фракции весовые проценты в арифметическом масштабе — по оси ординат. Этот метод изображения широко используется, тем не менее он нуждается в некоторых пояснениях. Эмпирические полигоны распределений позволяют оценить на глаз весь гранулометрический спектр осадка, который может быть достаточно сложным. Построение ЭПР является простым, наглядным и самым полным способом изображения гранулометрических анализов. Близкие к ЭПР кумулятивные кривые уступают по представительности и наглядности ЭПР, особенно при изучении и сопоставлении отдельных частей распределения.

ЭПР песчаных частиц, как современных, так и ископаемых разнофациальных осадков, часто полимодальны. Многочисленные анализы, опубликованные разными исследователями, показывают, что у аллювиальных, прибрежно-морских и эоловых осадков многовершинные распределения не являются исключением. Для грубозернистых осадков с медианой более 500 мкм одновершинные распределения вообще не характерны. Отмеченное обстоятельство крайне затрудняет и ограничивает применение общепринятых статистических параметров для генетического сопоставления песков из разных регионов, так как при этом параметры теряют свой физический смысл.

Конечные размеры фракций по оси абсцисс приведены в логарифмическом масштабе, ибо, как впервые предположил Удден и в

дальнейшем подтвердили многие исследователи, ЭПР песков чаще всего подчинены логарифмически-нормальному закону, а кривые дробления, по нашим данным, — простой логарифмической функции. Использование по оси абсцисс арифметического масштаба привело бы к резкой отрицательной асимметрии и обезличиванию ЭПР. По оси ординат мы наносили только весовые проценты, ибо количественные проценты приводят к обезличиванию кривых, их упрощению, но самое главное — лишают возможности исследовать наиболее интересную и информативную грубозернистую часть ЭПР, которая автоматически "срезается" при количественном пересчете. Этот пересчет в ряде случаев помогает избавиться от полимодальности и, таким образом, дает возможность применять статистические параметры для тех или иных построений, особенно при изучении отдельно взятых фациальных комплексов, но такая возможность достигается ценой слишком больших потерь.

Построение ЭПР не встречает каких-либо затруднений, если конечные размеры фракций в ситовом наборе связаны одним модулем, например,  $\sqrt{2}$ ,  $\sqrt[10]{10}$ ,  $\sqrt[4]{2}$ . Однако многие анализы, в том числе использованные в настоящей работе, выполнены на ситовых наборах, не связанных каким-либо модулем. В этом случае было необходимо привести процентное содержание каждой фракции в соответствии с шириной ее интервала в логарифмическом масштабе. В качестве размерной шкалы при экстраполяциях применялась шкала  $\gamma$  В.П. Батурина. Из опубликованных материалов были взяты анализы, выполненные в шкалах  $\phi$ ,  $1/2 \phi$ ,  $1/4 \phi$ ,  $\gamma$  и  $1/2 \gamma$ . При работе автор использовал сита с модулями  $\sqrt{2}$  и  $\sqrt[10]{10}$ , представляя результаты в линейной шкале  $\gamma$ .

Вопрос об абсолютной точности гранулометрических анализов в литературе не обсуждался, так как пока нет прямых методов получения непрерывного гранулометрического "спектра", нет таким образом эталонов для сравнения\*. Относительная точность гранулометрических анализов может быть установлена экспериментально. Большинство авторов принимают за минимальную погрешность модальных фракций вес 0,1%. При работе с набором сит Терекско-

\* Сейчас непрерывный гранулометрический спектр получают с помощью лазерных измерителей частиц, например, "Анализетте-22, Фрич-Лазер", установленного в "Механобре", или с помощью гидравлических седиментаторов, например, ИС-1, выпускаемых отечественной промышленностью (прим. ред.).

го завода (ГОСТ 3584-53) автор после тщательного квартования навески неоднократно измерял погрешность путем сравнения результатов параллельных анализов. Для модельных фракций она не превышала 0,05 вес.%, а чаще равнялась 0,01-0,03 вес.%, для грубозернистых "хвостов" распределения - не превышала 0,1 вес.%. Таким образом, относительная точность ситовых гранулометрических анализов, выполненных на одном и том же наборе в одинаковых условиях, позволяет считать их воспроизводимыми. Поэтому, строго говоря, мы имеем право сравнивать и сопоставлять ЗИР лишь в серии образцов, гранулометрический анализ которых унифицирован<sup>44</sup>.

При изучении обломков крупнее 3000 мкм (3 мм) нами применялся метод весового фракционирования. Потребность в нем возникла при анализе делювиально-пролювиальных осадков, сложенных обломками разной крупности и неправильной формы. Фракция 3162-31620 мкм (от 3,162 мм до 3,162 см) разбивалась на 20 равных частей модулем  $\sqrt[20]{10} = 1,122$  ( $1/2 \gamma$ ). В пробе определялось количество петрографических компонентов и для каждого из них грубо с помощью мензурки определялся удельный вес. После этого рассчитывался вес сферы для каждого компонента и для всех фракций. Вместо конечных размеров фракций на отдельных листах бумаги записывался вес сфер соответствующих размеров. Затем с помощью технических весов для галек и крупного гравия и аналитических весов для мелкого гравия производилось весовое фракционирование, сначала наиболее крупных обломков, а затем все более мелких. Обломки веса, соответствующего той или иной размерной фракции, складывались на один лист бумаги. После окончания весового фракционирования отдельных обломков каждая фракция взвешивалась на технических весах и затем пересчитывалась в соответствии с тем процентом, который приходится на всю фракцию > 3162 мкм. Вес исходной пробы определяется килограммами.

---

<sup>44</sup> Именно поэтому, наряду с ранее отмеченными причинами (полнотемпальность многих распределений, часто неясный физический смысл отдельных гранулометрических коэффициентов), нельзя пользоваться статистическими параметрами при сопоставлении песков из разных регионов и проанализированных разными авторами. Эти параметры могут резко варьировать для одной и той же пробы, если пользоваться разными ситовыми наборами.

Метод достаточно точный и быстрый (особенно при изучении галечного распределения), однако его целесообразно применить лишь для нецементированных псефитов с чрезвычайно угловатыми обломками.

В случае окатанного материала измерение поперечников галек производилось штангенциркулем. Этот метод широко использовал Б. С. Лунев [1] при изучении структуры аллювиальных галечников. Им определялись средние размеры (оси) галек, которые соответствуют круговому сечению заданного диаметра. Подобным образом нами изучались современные осадки пляжа Евпаторийского залива, сложенные песчано-гравийно-галечным материалом и байосские конгломерато-брекчии среднего течения р. Бодрак (Крым). Конечные размеры фракций  $> 5000$  мкм (5 мм) определялись постоянным модулем  $1/2\gamma (\sqrt[20]{10})$ .

В заключение уместно изложить основные принципы анализа ЭПР.

1. Прежде всего, сравнению подлежат только те ЭПР, которые получены в результате унифицированного гранулометрического анализа.

2. По формальным признакам выделяются однотипные или подобные ЭПР. Формально одинаковые ЭПР группируются в серии. Группировка одинаковых или подобных ЭПР в серии может осуществляться двумя способами – при слабой геологической привязке по формальным признакам, например, от многовершинных распределений к двувершинным и далее к одновершинным все более симметричным, близким к логнормальной кривой. Однако правильное является разложение ЭПР в серии соответственно их месту в элементарных ритмах ритмично-слоистых толщ; в соответствии с тектурными признаками осадков, например, в соответствии с динамическими типами слоичатости, отражающими падение энергии среды (неправильно-рытвинный – троговый – косвенный – мелкокосвенный – полого-перекрестный – типа знаков ряби); в соответствии с местом внутри косых серий, если они достаточно крупные, как в слоичатости волнового типа и т.д. При изучении современных осадков серии ЭПР могут составляться по признаку глубины, расстоянию от берега или положению относительно каких-либо элементов аккумулятивных форм.

3. Производится сопоставление ЭПР в сериях по мере увеличения (или уменьшения) среднего размера зерен. Изучается изменение объема соответствующих фракций (или субраспределений), оценивается изменение сортировки и асимметрии. Для многовершинных распределений, кроме того, производится корреляция соответствующих участков кривых. Таким образом, устанавливается направленность процесса структурной перестройки осадка и его характер по мере увеличения среднего размера зерен, по мере увеличения энергии потока.

Выявление "ассоциаций гранулометрических спектров" (или ассоциаций одностичных серий ЭПР) и направленности процесса структурной трансформации в пределах каждой ассоциации, по мнению автора, является важнейшим диагностическим признаком для установления фациальной принадлежности осадков.

### Глава III

#### ТРАНСПОРТИРОВКА ОБЛОМОЧНОГО МАТЕРИАЛА — ОСНОВНОЙ ФАКТОР В ФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУР ОСАДКОВ

В конце 30-х — начале 40-х гг. было установлено, что для многих обломочных пород аллювиального, прибрежно-морского и эолового происхождения кривые распределения зерен по размеру близки к логнормальному закону. С 30-х годов известно также, что распределения продуктов глубокого искусственного дробления и некоторых близких к ним по происхождению природных осадков (элювиально-делювиальные, пирокластические, моренные) подчинены закону Росина. Распределение Росина (или закон Росина) анализировалось или изучалось в интересующем нас плане Л. Китлеманом [32]. На рис. I распределение Росина построено по 25 точкам для ~97% объема в полулогарифмическом (заштриховано) и двойном логарифмическом (точки) масштабах. Закон Росина может быть выражен уравнением:

$$y = 100nbx^{n-1}e^{-bx^n}.$$

Здесь  $y$  — ордината кривой распределения;  $e$  — основание натуральных логарифмов;  $n$  — коэффициент сортировки, численно равный тангенсу угла наклона кумулятивной кривой в вероятностной системе координат;  $b = (1/k)^n$  — обратный параметр среднего

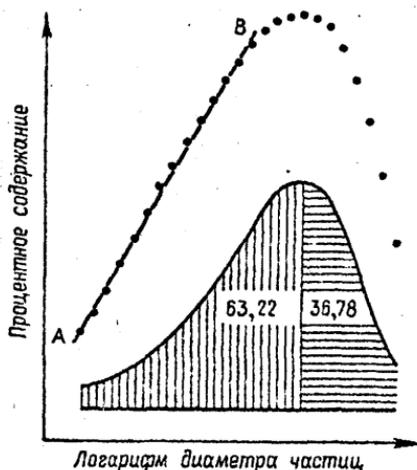


Рис. I. Распределение Росина (теоретическое) в полулогарифмическом (заштриховано) и двойном логарифмическом (точки) масштабах.

размера, где  $k$  - 63,22% квантиль, отсчитываемая от тонкозернистого конца распределения ( $k$  - мода - аналог медианного размера нормального распределения).

Таким образом, распределение Росина всегда асимметрично, причем максимум (мода) сдвинут в сторону более грубых частиц (положительная асимметрия).

Автор обратил внимание на то (см. рис.1), что левая тонкозернистая ветвь распределения Росина (линия  $AB$ ) в двойном логарифмическом масштабе чрезвычайно близка к прямой линии, т.е., по-видимому, отвечает логарифмической функции:  $\lg y = \alpha \lg x + \lg b$ , где  $\alpha$  и  $b$  - постоянные числа. Более того, изучение естественных и искусственных продуктов дробления наводит на мысль, что левая тонкозернистая ветвь распределения Росина представляет собой кривую дробления, а правая грубозернистая - кривую исходного неполностью раздробливаемого материала. Например, кристаллокластический туф, не претерпевший сколько-нибудь значительной транспортировки [30], на ~37% состоит из кристаллов и на ~63% - из обломков кристаллов, что отвечает соответственным объемам грубо- и тонкозернистой ветвей распределения Росина.

В ходе транспортировки любое распределение, в том числе подчиненное закону Росина, имеет тенденцию трансформироваться в логнормальное распределение. Причина этого, очевидно, состоит в том, что действие осадочного процесса представляет собой сумму независимых случайных событий, эффект которых формулируется центральной предельной теоремой Ляпунова.\*\* В чистом виде в природе непосредственный переход от распределения Росина к логнормальному наблюдается сравнительно редко. В качестве примера можно указать некоторые вулканиты. Те из них, которые

\*\* Тенденцию к формированию логнормального распределения при длительном переносе в водном или воздушном потоке можно считать эмпирически установленной. Объяснение этому можно найти в том, что транспортировка осадка сопровождается совместным воздействием двух факторов - многократного дробления, в результате чего, согласно известному выводу А.Н.Колмогорова, формируется логнормальное распределение, и сепарирующего воздействия мгновенных скоростей, действие которых аппроксимируется предельной теоремой Ляпунова (прим. ред.).

непосредственно отложены близ вулканов (осадки "жгучей вулканической туфы", например), характеризуются распределением Россина, а пеплы, перенесенные во взвешенном состоянии в воздухе и отложенные на значительном расстоянии от породившего их вулкана, характеризуются идеальным симметричным логнормальным распределением.

Однако в большинстве случаев эта трансформация структур в водной среде (и при дальнейшей золовой обработке) осложнена целым рядом побочных явлений. Изучение ~1300 эмпирических полигонов распределений основных генетических типов песков из различных регионов земного шара позволило автору сделать вывод о том, что каждому способу транспортировки соответствует свое логнормальное распределение частиц по размеру зерен. Данной формулировке способствовали следующие предпосылки:

1. Как впервые отметил Хальстрем [40], при постоянной скорости потока скорости движения частиц разного диаметра различны.

2. В экспериментальных работах по гидравлике [5, 22, 26, 39] убедительно показано, что транспортировка в потоке осуществляется различными способами: во взвешенном состоянии, по траекто-

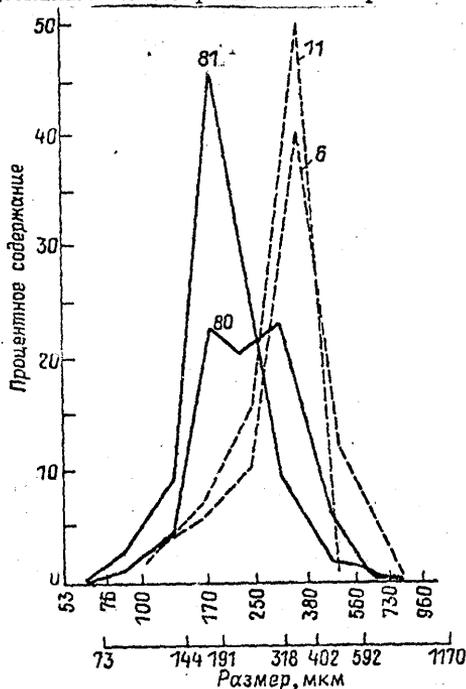


Рис. 2. ЭПР песков сейфовых дюн к югу от линии Тель эль Кефир - Исмаилия (по [29]).

Обр. 6 - с гребня дюны (нижняя шкала), обр. 71 - с подножия дюны (нижняя шкала), обр. 80 - с пологого склона дюны (верхняя шкала), обр. 81 - из мелкой борозды (верхняя шкала).

рии "пушечного ядра" (сальтацией) и скольжением или качением по дну.

3. Центральная предельная теорема Ляпунова гласит: "Если мы имеем достаточно большое число  $N$  независимых случайных величин, то сумма их будет подчиняться закону нормального распределения даже тогда, когда слагаемые случайные величины не подчиняются нормальному распределению". При этом предполагается, что ни одна из этих слагаемых случайных величин не доминирует над остальными, т.е. не играет преобладающей роли в образовании суммарной случайной величины [6].

Под "достаточно большим числом независимых случайных величин" автор понимает достаточно большое число  $N$  частиц разного диаметра, перемещающихся одним и тем же способом. Условие независимости определяется здесь единым способом транспортировки.

Кривые распределения зерен ряда природных образований могут служить прямым доказательством нашей модели транспортировки. Например, пробы взвесей в р. Миссисипи [40] и в р. Амур-

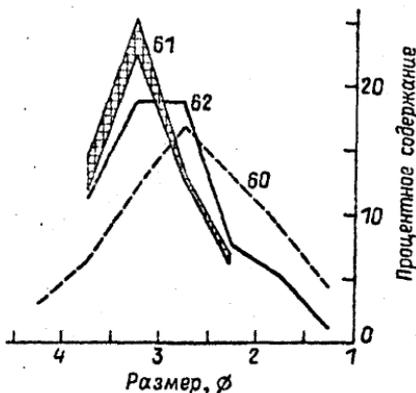


Рис. 3. ЭПР пендловых туфов: Орегон, США (по [32]). Для обр. 61 даны пределы колебаний 8 анализов.

Дарье [29] для верхней и средней частей сечения потока всегда одновершинны (перенос во взвешенном состоянии), а у дна почти всегда двувершинны (к взвешенным частицам добавляются сальтирующие). На примере прибрежно-морских и сейфовых дон Сахары Р. Бэгнольд [26] и многие другие авторы показали, что в суб-

аэральных условиях транспортировка частиц по пологому склону аккумулятивных форм (дюны, барханы, гряды) осуществляется путем сальтации и качения (им всегда соответствуют двувершинные кривые распределения), а на гребне и в подвалье скапливается наиболее грубый катящийся материал

(кривые распределения всегда одновершинны, причем мода сдвинута в сторону более грубых фракций). В свою очередь, кривые распределения частиц золотых взвесей, например, лессов, пепловых туфов, всегда имеют одновершинный, часто симметричный в логарифмическом масштабе характер (рис. 2, 3).

Итак, при гетерогенной транспортировке частиц перед их отложением формируется осадок с полимодальной структурой. Для фациального анализа чрезвычайно важно идентифицировать соответствующие моды с тем или иным способом транспортировки частиц. Поэтому остановимся сначала на трех условиях или ограничениях, которые помогут сформулировать правила идентификации вершин субаквальных песчаных распределений.

1. Если скорость потока достаточна для гетерогенной транспортировки обломочного вещества, то скорости частиц, перемещающихся соответствующим образом, можно выразить в виде следующего неравенства:  $V$  потока  $> V$  взвеси  $> V$  сальтации  $> V$  качения. Из этого неравенства следует, что более грубые части распределения отвечают качению или сальтации, а более тонкие — прежде всего взвеси или же сальтации.

2. По косвенным признакам устанавливается нижняя граница для сальтации зерен размером около 100 мкм. Зерна меньшего размера в водной среде совершенно не окатываются; очень часто вблизи этого интервала наблюдается дефицит частиц. Как будет показано далее, фракции  $< 100$  мкм чрезвычайно инертны и почти не трансформируются в пределах какого-либо песчаного комплекса. Нижняя граница качения зерен, вероятно, проходит в интервале 250–300 мкм. Частицы такого размера характеризуются минимальными срывающими скоростями [5], а как известно, теоретически движение частиц начинается с качения. Зерна более мелкие (100–250 мкм) начнут перемещаться сальтацией, а еще более мелкие ( $< 100$  мкм) — сразу перейдут во взвесь, так как несмотря на уменьшение диаметра, их срывающие скорости значительно больше, чем у зерен диаметром 250–300 мкм.

3. Верхняя размерная граница частиц, транспортирующихся различными способами (взвесь, сальтация, качение), не может быть установлена, так как зависит главным образом от скорости и турбулентности потока. Например, гальки могут переноситься во взвешенном состоянии грязевыми потоками, штормовыми волнами и т.д.

Также неопределенной остается нижняя граница взвесей - она уходит в область алевритов и глин.

Из условий гетерогенной транспортировки обломочного вещества следуют некоторые правила идентификации вершин субкавалных песчаных распределений.

В общем случае в интервале 50-2000 мкм может иметь место 3-вершинное распределение, отвечающее 3 видам транспортировки обломочного материала: взвеси, сальтации, качению. При этом, если осаждение материала (собственно седиментация) происходило мгновенно, например, осадки с градационной структурой, то объемы соответствующих распределений могут быть соизмеримы; они точно отражают распределение мобильного вещества в потоке. Однако при стационарном режиме отложения, который наблюдается в подавляющем большинстве случаев, резко преобладает объем только одного распределения: или взвешенных или сальтирующих частиц. В интервале 50-2000 мкм качение не может быть доминирующим способом транспортировки, а его распределение характеризуется высокой дисперсией и часто полимодально.

2. Распределение 2-вершинное может отвечать только сальтации и взвеси, ибо взвесь и качение не могут сосуществовать без сальтации, также как не может быть сальтации и качения без захвата взвешенных частиц. Однако известны случаи, когда влияние слабых донных течений на ранее отложенный из взвеси осадок приводит к возникновению аномальных двувершинных распределений: основное распределение может быть обязано взвеси, дополнительное, грубозернистое - качению.

3. Одновершинное распределение может соответствовать только взвеси, ибо при отложении сальтирующих или же катящихся частиц имеет место так называемый "гидравлический захват" более мелких частиц более крупными. Из приведенного правила есть исключение. На подводном береговом склоне, ограниченном береговыми аккумулятивными макроформами, транспортировка осуществляется попеременно то во взвеси, то путем сальтации. При этом формируется одновершинное распределение.

4. Многовершинные распределения, примерно с одинаковым объемом модальных фракций, чаще всего отвечают осадкам, отложенным из среды повышенной плотности за счет механического

смешения разных структурных типов осадков и изменения верхней размерной границы взвешенных частиц при крайне незначительных пульсационных изменениях скорости потока (грязевые потоки). Тот же эффект достигается в нормальных водных потоках с очень резкими колебаниями скоростей (пролювий). В грубозернистых аллювиальных осадках при гетерогенной транспортировке обломочного вещества многовершинные распределения возникают не только за счет быстрого изменения верхней размерной границы взвешенных частиц, но и за счет изменения соответствующих границ сальтирующих и катищихся частиц при нестационарном режиме отложения. Энергия (скорость и турбулентность) потока здесь меньше и поэтому возникающие многовершинные распределения чаще всего не имеют одинаковых объемов.

5. В водной среде все три распределения, для взвешенных, сальтирующих и катищихся частиц, сгруппированы в относительно узком размерном интервале, т.е. оптимальные размеры зерен для качения, сальтации и взвеси достаточно близки и распределения в значительной степени могут перекрывать друг друга. В воздушной среде (об этом подробнее будет сказано в разделе "Эоловый процесс") распределения, наоборот, растянуты по размерной шкале. В связи с этим очень просто различать аномальные водные распределения (взвесь + качение), упомянутые в пункте 2. Соответствующие распределения имеют моды, резко, почти на порядок, различающиеся по размеру. Сказанное следует расценивать не как абсолютное правило, а лишь как тенденцию, ибо полимодальность есть следствие не только гетерогенной транспортировки, но и является отражением некоторых общих условий отложения.

В заключение этой главы отметим, что распределения частиц мельче 50 и крупнее 2000 мкм практически не изучены и что данная работа также посвящена песчаному распределению, заключенному в пределах указанных границ. Следует предполагать, что для генетических целей лучше всего применять весь размерный спектр зернистых частиц осадка или породы. Однако ситовый анализ, данными которого мы чаще всего пользуемся, не позволяет исследовать алевритовую, а часто и гравийно-галечную части распределения. Поэтому возникает вопрос, насколько правомерно

использование распределения только песчаных частиц для решения проблемы фациальной принадлежности обломочной породы смешанного состава. Коротко рассмотрим возможные случаи.

1. Распределение открыто в тонкозернистой части (осадки ряда алеврит - песок). Гидродинамически и алевритовый и тонкозернистый песчаный материал ( $< 100$  мкм) достаточно инертен - он не дифференцируется или почти не дифференцируется в водном потоке. Обломочные зерна указанной размерности могут транспортироваться только во взвешенном состоянии [9], чем и объясняется их структурная однородность; возможно, именно потому их распределение отвечает закону Росина, по крайней мере у изученных нами образцов. Таким образом, распределение, открытое в тонкозернистой части, может быть интерпретировано в генетическом смысле по песчаной части осадка. В отношении пелито-алевритовых частиц нас интересует не столько характер распределения, сколько их суммарный объем. Для целей фациального анализа совершенно непригодны осадки (из-за полигенетичности) с модой распределения  $< 100$  мкм.

2. Распределение открыто и в тонко-, и в грубозернистой частях (осадки ряда алеврит - песок - гравий - галька). Чаще всего это типичные хлидолиты: делювиально-пролювиальные, моренные осадки, реже - наиболее плохо сортированные и грубозернистые аллювиальные. Как для тех, так и для других песчаная часть размерного спектра является наиболее типичной. Гравийно-галечная часть распределения носит тот же характер, что и песчаная. Поэтому для подобных осадков вполне достаточно знать характер только песчаного распределения и объемы алевритового и гравийно-галечного.

3. Распределение открыто в грубозернистой части (осадки ряда песок - гравий - галька). Это наиболее специфичные, перенесшие длительную транспортировку некоторые золотые и прибрежно-морские отложения. В отличие от ранее рассмотренных хлидолитов, для безалевритовых осадков совершенно необходимо знать не только объем, но и характер гравийно-галечной части распределения, который может резко отличаться от песчаного и служить однозначной диагностике. Анализ песчаной части таких пород, отделенной от грубых фракций, дает наименее достоверный в генетическом отношении результат.

Наиболее благоприятны для гранулометрического анализа песчаные осадки, образующие замкнутые распределения. Замкнутость распределения есть критерий однородности осадка и тот идеал, к которому стремится опробование. Теоретически в подавляющем большинстве случаев можно получить замкнутое распределение, однако практически это зависит от реальных возможностей отобрать и рассеять пробу нужного объема, что не всегда удается сделать. Замкнутость распределения в грубозернистой части является наиболее объективным критерием для определения объема пробы. Другими словами — проба будет представительной в том случае, если в результате механического анализа мы получим закрытое распределение. Это не всегда выполнимо. Так, для получения закрытых в грубозернистой части ЭПР некоторых хлоритов потребовались пробы весом в десятки и сотни килограммов (пролювиальные гравийно-галечные глины, ледниковые валунные глины и др.). Поэтому для подобных образований, как это отмечено выше, приходится довольствоваться изучением лишь части распределения.

С другой стороны, при изучении однотипных по крупности осадков целесообразно установить экспериментальным путем минимальный объем (вес) представительной пробы. Во многих руководствах чаще всего рекомендуют брать навеску песка в 100 г. Однако для получения закрытых ЭПР гравийных песков иногда недостаточно и 300 г., а тонкозернистых алевроитовых песков — оказывается достаточной навеска и в 20 г.

## Глава IX

### ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПЕСЧАНЫХ ОСАДКОВ РАЗНОГО ГЕНЕЗИСА В ПРОЦЕССЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ

От мобилизации до отложения в различных фациальных условиях структура обломочного вещества, в частности, его важнейшая составная часть — грацулометрический состав, претерпевает целый ряд необратимых изменений. Наиболее быстро, как отмечалось выше, процесс преобразования логарифмического распределения частиц в логарифмически-нормальное наблюдается у вулканитов. Однако в общем случае мобилизовано может быть любое обломочное вещество с уже сформированной в тех или иных условиях структурой. Поэтому начальная серия осадков, с которой мы здесь начинаем рассмотрение трансформации структур (моренные, элювиально-делювиальные и пролювиальные осадки) в значительной степени условна. Наиболее полно, естественно, разбираются субакуальные осадки (и транспортировка и отложение происходило в водной среде). Эоловый процесс рассматривается отдельно вследствие того, что обусловленные им конечные структуры осадков отличаются удивительным однообразием вне зависимости от того субстрата, по которому развивался данный процесс.

Автор категорически возражает против утверждения, что фактор унаследованности не только проявляется, но и определяет почти все особенности вновь возникшей структуры. Как будет показано ниже, процесс перестройки структур осуществляется очень быстро во всех динамических зонах. В пользу вышесказанного говорит прежде всего редкая встречаемость непрерывных переходных структур между разнофациальными осадками.

## 1. Принципиальная схема трансформации структуры обломочного вещества

На примере вулканогенных осадков разного генезиса можно, хотя и не без оговорок, проследить принципиальную схему трансформации структуры обломочного вещества. Л. Китлеман [32] приводит данные по гранулометрии вулканитов разного генезиса из Национального парка Орегона (США). На рис. 4 представлены ЭПР

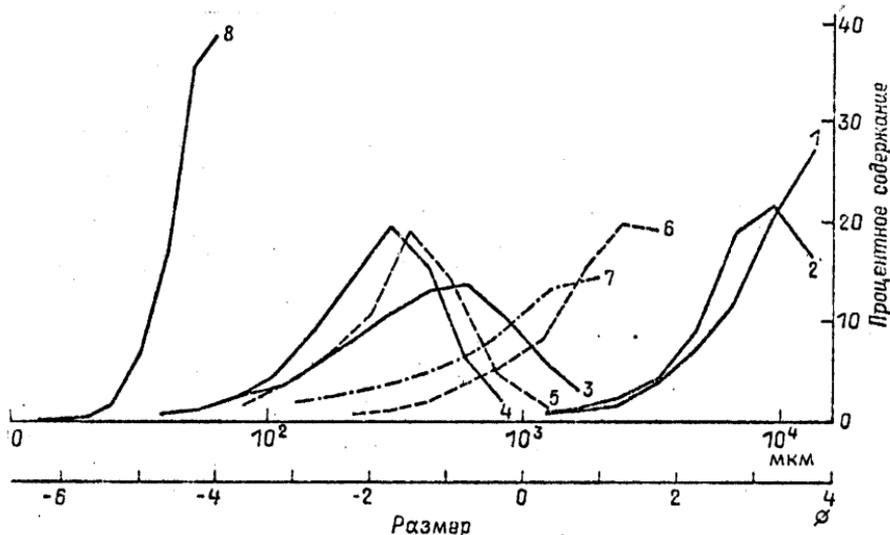


Рис. 4. ЭПР, отвечающие закону Росина.

1, 2 — пределы колебаний 8 анализов пемзовидных лапиллей; Орегон, США (по [32]); 3 — среднее по двум анализам кристаллокластического туфа (осадки "жгучей вулканической туши") (по [32]); 4 — среднее 28 анализов морены Вальпарайсо, близ Чикаго (по [45]); 5, 6 — эльвий по кристаллическим породам (5 — данные В.И. Иванова, 6 — Китлемана (по [32])); 7 — делювий, базальные слои красных отложений, Западная Фергана; 8 — среднее из 15 анализов алевритовой части распределения аллювиальных и озерных песков из красных отложений Ферганы (все 15 ЭПР подобны).

литокластического туфа (кривые 1 и 2). По генезису это лапиллиевый туф, отложенный непосредственно у подножия вулкана. Размерность частиц галечно-гравийная. Распределение в той или иной степени открыто в грубозернистой части и, по существу, отвечает логарифмической функции (левая тонкозернистая ветвь

распределения Росина). ЭПР кристаллокластического туфа (рис. 4, кривая 3) имеют размерность песчаного материала. По генезису это осадки "жгучей вулканической тучи", ареол осаждения которых значительно больше по сравнению с таковым для лапилливого туфа, хотя и здесь транспортировка ничтожна. Распределение закрыто и отвечает закону Росина. Первая крутая ветвь имеет размерность исходных кристаллов и суммарный объем около 36 вес.%. Левая тонкозернистая ветвь отвечает распределению раздробленных кристаллов и подчинена логарифмической функции. Ее размерность ограничена сверху величиной исходных, дробящихся кристаллов.

На рис. 3 даны ЭПР витрокластических туфов с мелкозернистой песчаной структурой. По генезису это пепловые туфы, которые во взвешенном состоянии в воздухе были перенесены достаточно далеко от материнского вулкана. Для них характерно симметричное логнормальное распределение. Конечно, трансформации структур в прямом смысле здесь нет. Пепловые туфы возникли не по кристаллокластическим и тем более не по литокластическим туфам. Однако у всех этих осадков происхождение если и не тождественное, то весьма близкое. Более того, и лито- и кристаллокластические туфы содержат частицы пепла, и поэтому автор не видит принципиальной разницы между генезисом кристаллокластического туфа, выпавшего из газовой среды повышенной плотности ("жгучая вулканическая туча"), и генезисом более тонкозернистого пеплового туфа, выпавшего здесь же из воздуха, например, при безветрии. Другими словами, вряд ли можно оспаривать, что распределения возникших при дроблении жидкой и полутвердой фаз пепловых частиц были в это время подчинены закону Росина, точно так же, как и более крупных по размеру частиц кристалло- и литокластического туфа.

Итак, логарифмически-нормальное распределение есть следствие транспортировки, причем транспортировки гомогенной.

## 2. Элювиально-делювиальные и моренные отложения

В 1964 г. Л. Китлеман убедительно показал, что многие природные продукты дробления имеют распределения, отвечающие закону Росина. Среди них, кроме вулкаников и брекчий, он отме-

тил элювиальные и моренные отложения. Что касается последних, то Китлеман делает ссылку на данные Крумбейна по морене Вальпарайсо близ Чикаго [33]. Опубликованные в этой работе гранулометрические анализы были выполнены в интервале  $1\phi$  и поэтому малоубедительны. Используя данные Вольфа [45] по отложениям той же морены (интервал сит  $0,5\phi$ ), можно однозначно показать, что гранулометрический состав этих осадков действительно весьма близок к распределению Росина (рис. 4, кривая 4). В целом же для морен такая структура вряд ли характерна. Вероятнее всего она наблюдается только у тех сравнительно редких осадков, которые были мало перемещены относительно эродированной ледником области.

Элювиальные отложения в тех случаях, когда они формируются преимущественно за счет процессов физического выветривания, всегда имеют распределение обломочного материала, отвечающее закону Росина (рис. 4, кривые 5, 6). Во многих случаях на тонкозернистой ветви наблюдаются некие дефициты, размерность которых почти всегда соответствует размеру зерен одного из дробящихся компонентов. Следовательно, в области размеров компонентов смеси, например, отдельных минералов какой-либо кристаллической породы, всегда будут наблюдаться остановки на суммарной кривой дробления. На рис. 5 в качестве примера дан ЭПР элювия по гранитам. На тонкозернистой ветви два дефицита, размерность которых совпадает с размером зерен кварца (более тонкозернистый дефицит) и ортоклаза (более грубозернистый дефицит). В данном случае суммарный ЭПР получается при наложении распределений: обломков гранита, ортоклаза и кварца.

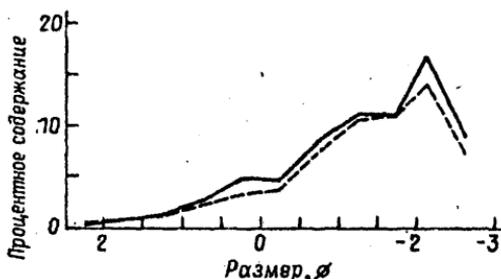


Рис. 5. Выборочные ЭПР из 8 анализов элювия вблизи Колорадо-Спрингс (по [32]).

Структурные особенности делювиальных осадков весьма похожи на рассмотренные выше структурные особенности моренных отложений. Для делювия в ряде случаев также характерно рас-

пределение частиц, близкое к распределению Росина (рис. 4, кривая  $\gamma$ ). Если же перемещение осадков по склону приводит к смешиванию разных компонентов, главным образом в нижней части склона, то возникает распределение, подобное таковому у пролювия.

Итак, мы вправе ожидать, что продукты любого дробления будут близки по структуре к распределению Росина. Одни и те же структуры характеризуют продукты взрыва (широкластические осадки) сравнительно быстрого механического дробления в подошве ледника (некоторые моренные осадки) и очень медленного дробления в результате физического выветривания (алювиальные и отчасти делювиальные осадки). Возможно, скорость дробления как-то влияет на сортировку. В этой связи можно отметить лишь, что размерный интервал тонкозернистой ветви распределения Росина не превышает 10  $\gamma$ , т. е. самые тонкие и самые грубые дробящиеся частицы отличаются по размеру не более чем в 10 раз.

### 3. Делювиально-пролювиальные и моренные отложения

В эту обширную группу близких по структуре хлоридитов попали осадки разного генезиса. Они являют собой один из наиболее ярких примеров конвергенции, т. е. образования сходных и тождественных структур в разных условиях. Действительно, только по данным гранулометрии часто практически невозможно отли-

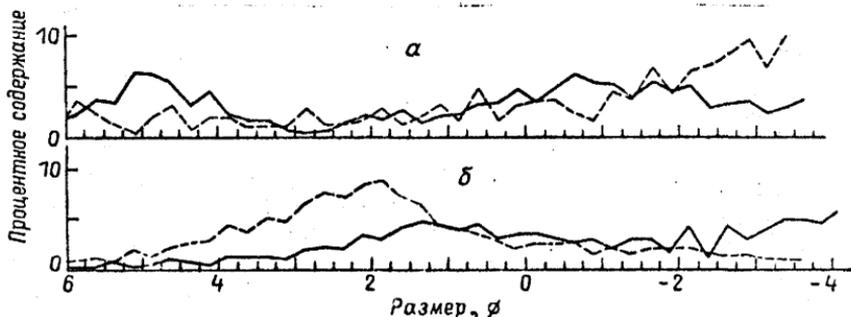


Рис. 6. Выборочные ЭПР современных осадков северо-восточной Папуа - Новая Гвинея (по [41]).

$\alpha$  - делювий с крутых склонов,  $\beta$  - пролювий из конусов выноса.

чить осадки морен и осадки грязевых потоков, осадки водно-каменного пролювия и делловия.

На рис.6 ЭПР делловиальных и пролювиальных современных осадков из Новой Гвинеи (гумидные тропики) очень мало отличаются друг от друга. Анализы весьма дробные - выполнены в шкале  $1/4 \phi$  для алеврито-песчано-гравийно-галечной размерности (от 0,032 до 32 мм), и тем не менее ЭПР открыты и на грубо- и на тонкозернистом конце. Все ЭПР многовершинны с примерно одинаковым объемом каждого субраспределения, хотя у осадков из конусов выноса (водно-каменный пролювий) они несколько

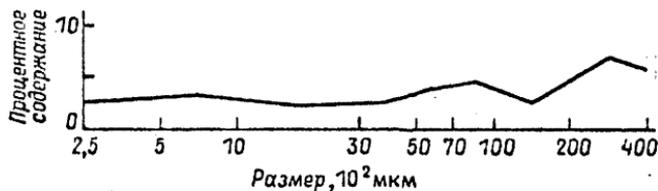


Рис.7. ЭПР водно-каменного селя р.Малая Алматинка (по [22]).

отглажены и в целом более грубозернисты. На рис.7 представлен ЭПР из конуса выноса р.Малой Алматинки (современный водно-каменный селя), который сходен с вышеприведенными, несмотря на малую дробность анализа. При этом содержание частиц  $< 100$  мкм составляет 12,4%, глыб  $> 100000$  мкм - 34,3%. Какая-либо зависимость между структурой и составом у хлидолитов, по-видимому, отсутствует. На рис.8 даны ЭПР водно-каменного пролювия (для частиц от  $\sim 3$  до 30 мм) из конусов выноса оврагов, водосборные площади которых сложены породами разного состава (район среднего течения р.Бодрак, Крым). Петрографический состав обломков различен, однако полигоны распределения почти идентичны не только для гравийно-галечной, но и для песчано-гравийной части распределения (на рисунке ее нет). Последняя характеризуется низким и почти одинаковым содержанием всех фракций.

Ископаемые осадки грязевых потоков достаточно широко распространены в мезозойских отложениях Ферганской депрессии.

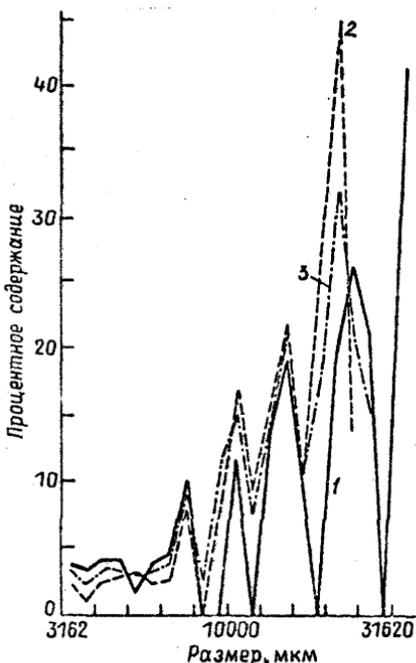


Рис. 8. ЭПР гравийно-галечных осадков из конусов выноса оврагов по среднему течению р. Бодрак.

1 — обломки песчаников таврической свиты; 2 — обломки песчаников и порфиритов; 3 — обломки карбонатных пород.

около 20 — 25%). Они слагают пласты с грубой однонаправленной косою слойчатостью. Пласты резко меняют мощность по простиранию и обычно с размывом ложатся на подстилающие породы. На рис. 10 даны типичные ЭПР этих полимодальных осадков. Распределения могут быть закрытыми в грубозернистой части и их легко можно принять за аллювиальные стрессневые осадки. Скорее всего

Чаще всего они тяготеют к базальным слоям трансгрессивных серий. На рис. 9 приведены ЭПР гравийных глин из урочища Мадыген ( $T_1$ ) и песчано-гравийных алевроглин из лейаса хр. Сюрень-Тюбе. В обоих случаях образцы отобраны из массивных плотных красноцветных (нижний триас) или сероцветных (нижняя юра) пластов, залегающих между пачками конгломератов, валунных конгломератов, реже — дресвяников. Отчетливо виден тот же многовершинный характер распределений, но максимум приходится на тонкозернистые фракции. Песчаный материал этих проб сильно разубожен алеврито-глинистым (содержание частиц  $< 50$  мкм колеблется от 75 до 95%). В мезозое Ферганы также широко развиты несколько иные осадки. Это глинистые алевро-пески (содержание частиц  $< 50$  мкм обычно колеблется

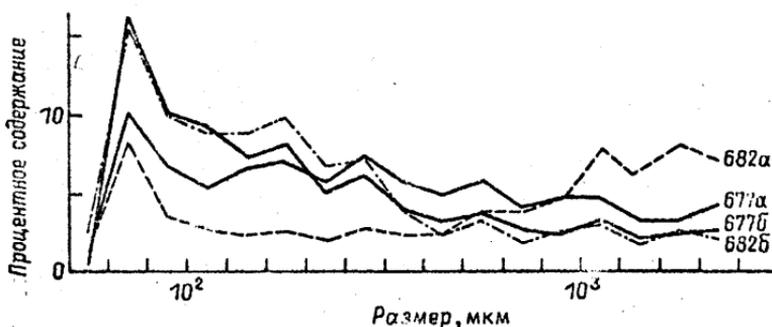


Рис. 9. ЭПР осадков грязевых потоков (для частиц >50 мкм).

Обр. 677 - песчано-гравийные глины нижнего триаса, Западная Фергана, ур. Мадиген; обр. 682 - песчано-гравийные алевро-глины нижней юры, Северная Фергана, хр. Сюрень-Тюбе.

ни таковыми и являются, но были перетолжены без существенного изменения структуры. Отличить песчаные осадки временных потоков, вероятно, несколько повышенной плотности, от аллювиальных можно только путем сравнения разных по крупности ЭПР. При этом у аллювиальных не обнаруживается сколько-нибудь заметного смещения субраспределений, меняются только их объемы.

Среди современных осадков такие структуры наблюдаются, в частности, у некоторых пойменных песков. Например, некоторые пески из террас р. Лены (рис. 11) характеризуются вышеуказанными особенностями и ассоциируют с обычными русловыми песками. По данным Е. В. Рухиной [16], многовершинные распределения с примерно одинаковым объемом субраспределений очень характерны для морен северо-запада Русской платформы. Более того, Е. В. Рухина отмечает, что у типичных моренных отложений наблюдается удивительно постоянное (около 40%) содержание фракций 10-100 мкм. Можно выделить следующие структурные особенности осадков этой обширной группы:

1. Из всех встречающихся в природе делювиально-пролювиальные и моренные осадки наиболее плохо сортированы.
2. Дробный гранулометрический анализ показывает многовершинность по всему интервалу шкалы размерности.

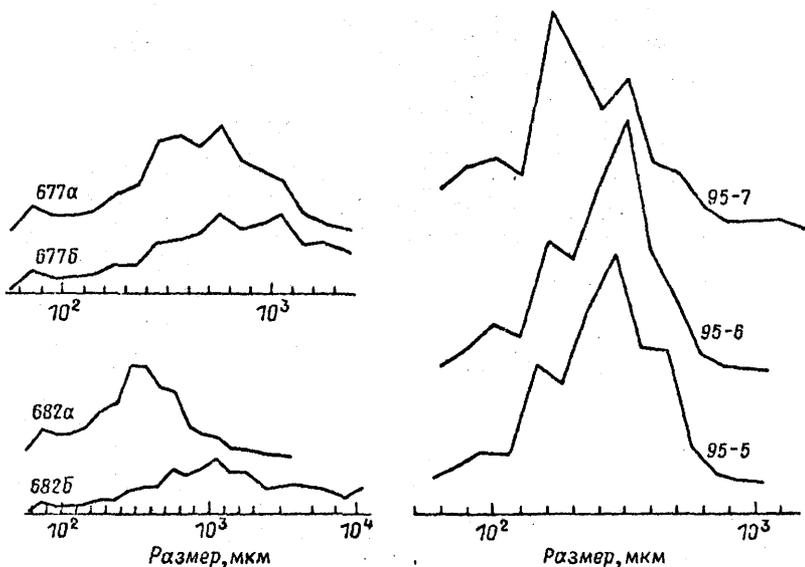


Рис. 10. ЭПР пролювиальных песков. Привязка образцов та же, что на рис. 9.

Рис. 11. ЭПР глинисто-алевритовых песков из террасы р. Лены (близ г. Олекминска).

3. Чаще всего распределение открыто не только в тонко-, но и в грубозернистой части.

4. У осадков грязевых потоков максимум процентного содержания смещен в область тонкозернистых частиц, а у осадков льдочно-каменных потоков — в область грубозернистых. У делювиальных и моренных осадков, а также у осадков грязекаменных потоков нет никакой зависимости между размерностью обломочных компонентов и их объемом.

5. У песчаных осадков временных потоков нормальной и повышенной плотности не обнаружено трансформации структур в процессе транспортировки. Большие скорости, а нередко и высокая плотность потока способствуют совместной транспортировке и отложению материала, мобилизованного со всей площади водосбора. Транспортировка осуществляется только во взвеси. Крат-

Иногда, эпизодичность и вместе с тем высокая интенсивность процесса приводит к тому, что на первых этапах транспортировки структура обломочного вещества обезличивается и почти не зависит от исходного субстрата — возникают так называемые "мусорные" породы.

#### 4. Фаши аллювия: стрелевые, русловые и пойменные осадки

Структуры аллювиальных осадков чрезвычайно разнообразны. Это объясняется тем, что динамика транспортировки и отложения материала могут резко меняться по профилю русла. В постоянных водотоках — реках транспортировка осуществляется всеми способами: во взвешенном состоянии, путем сальтации и качением. В зависимости от скорости течения и состава наносов могут обладать те или иные способы.

Формирование (отложение) собственно русловых осадков чаще всего носит стационарный характер. Отложение материала непрерывно по времени, а скорости потока варьируют в узких пределах для каждой точки дна. Пойменные осадки, в отличие от русловых, наиболее часто формируются в паводковые периоды. Отложение материала при этом кратковременное и носит пульсационный характер вследствие резких колебаний скоростей потока. Естественно, что при столь большом различии в динамике отложения русловых и пойменных осадков различен и характер транспортировки обломочного материала. При стационарном режиме отложения в русле накапливается главным образом сальтирующий материал, а в наиболее турбулентных участках (стреле, перекаты, межрядовые пространства) может резко преобладать катирующий. И в том и в другом случае из-за гидравлического захвата к осадку добавляется некоторая часть неустойчивого в данной обстановке взвешенного материала.

В паводковый период резко возрастает транспортировка частиц во взвешенном состоянии. В результате возросшей турбулентности во взвесь частично переходит и ранее отложенный в русло материал. Все мобилизованное, перешедшее во взвешенное состояние обломочное вещество, попадая в условия поймы, из-за

резких колебаний в скорости потока и его турбулентности отлагается пульсационно, скачками. В этих условиях качение и сальтация чаще всего исключаются из-за влияния неровностей рельефа, наличия растительности и т.д. Таким образом, пойменные наносы слагаются почти целиком материалом взвеси. При этом, чем грубее материал, тем хуже он должен быть сортирован.

На основании вышеизложенного среди аллювия можно выделить три основных типа осадков\* с соответствующими структурами: 1) стречневые русловые осадки, 2) русловые нестречневые осадки, 3) осадки поймы.

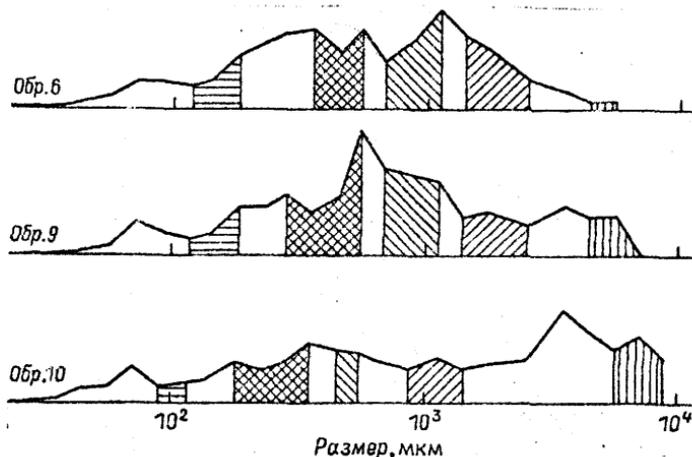


Рис. 12. Полимодальные ЭПР стречневых аллювиальных песков, таврская свита (Крым).

Стречневые русловые осадки. Это осадки наиболее турбулентных участков русла: разнозернистые, полимодальные, наиболее плохо сортированные среди всех аллювиальных. На рис. 12 показаны три скоррелированных (одинаковая штриховка) эмпирических полигона распределения стречневых русловых песков тавр-

\* Осадки прирусловых отмелей (речных пляжей) крупных равнинных рек часто формируются в условиях интенсивного волнения. Для них характерны структуры прибрежно-морских осадков (см. ниже), иногда с унаследованной (реликтовой) положительной асимметрией, свойственной всем русловым пескам.

ской свиты Крыма. Отчетливо видно, что по мере поглубления осадка соответствующие части распределения смещаются влево — в тонкозернистую область, при этом с распределением частиц < 100 мкм ничего не происходит — оно инертно, и трансформация структуры всего осадка лишь несколько изменяет его объем. Высокая турбулентность часто обуславливает появление распределения взвешенных частиц не только менее, но и более 100 мкм. Типичное распределение стрележневых русловых осадков поллюминальное и в области > 100 мкм наблюдается не менее 3-х мод, отвечающих качению, сальтации, а иногда и взвеси. Распределения в значительной степени перекрывают друг друга. С увеличением турбулентности при возрастании скорости потока, наряду с увеличением размерности происходит смещение распределений, отвечающих взвеси и сальтации, в сторону крупных фракций. Как следствие этого, осуществляется "выклинивание" размерности, прилежащей к 100 мкм, где образуется дефицит, очень характерный для осадков однонаправленных водных потоков. Вместе с тем, распределения частиц < 100 мкм не меняются — они инертны. Распределение же, соответствующее качению, не только увеличивается в объеме, но может и расщепляться.

Итак, направленность процесса здесь настолько специфична, что позволяет по серии скоррелированных ЭПР однозначно выделить соответствующие осадки. Узкая площадная приуроченность стрележневых русловых осадков, приуроченность к самым динамичным участкам водотоков, быстрая изменчивость осадков, соизмеримость объемов отдельных субраспределений — все это свидетельствует о их формировании в нестационарных условиях, в отличие от остальных русловых осадков. Очевидно, осадки с такой структурой не образуют сколько-нибудь крупных подводных аккумулятивных форм и, может быть, именно поэтому сравнительно редко встречаются в ископаемом аллювии.

На грядовых участках рек развиты осадки с несколько иной структурой. Режим отложения обломочного материала здесь квазистационарный. Другими словами, изменения турбулентности потока над какой-либо точкой дна связаны со скоростью перемещения подводных гряд. Относительно же гряды режим отложения

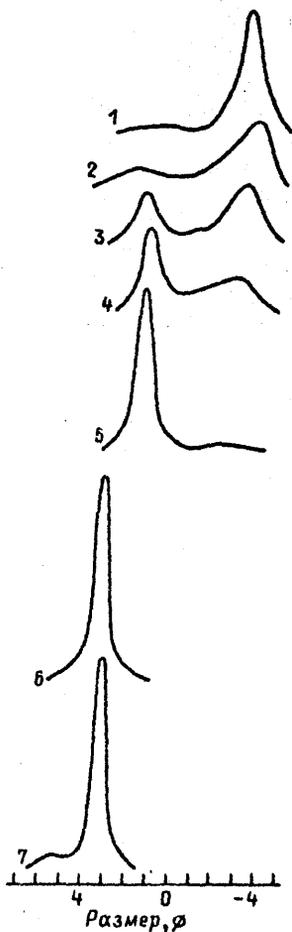


Рис. 13. Вариации кривых распределения 106 образцов с грядового участка р. Брасос, Техас (по [28]). Объяснение в тексте.

материала стационарный. На рис. 13 показаны вариации кривых распределения для 106 образцов с грядового участка р. Брасос (Техас). Анализ проводился на тилеровских ситах в интервале  $0,5 \phi$  [33]. Все кривые в значительной степени идеализированы, особенно в тонкозернистой части. Отчетливо видны субраспределения, соответствующие качению (мода от  $-3,5$  до  $-2,5 \phi$ ), сальтации (мода от  $+2,0$  до  $+1,0 \phi$ ) и взвеси (мода от  $+3,5$  до  $+3,0 \phi$ ). Грубый взвешенный материал, столь характерный для стречневых русловых осадков (точнее, это тот материал, который транспортируется то путем сальтации, то во взвеси в зависимости от турбулентности потока, меняющейся во времени), здесь отсутствует и поэтому соответствующие разным способам транспортировки субраспределения могут быть достаточно разобщенными по шкале размерности. Разобщенность мод зависит также от состава наносов и глубины потока. К сожалению, авторы не показали субраспределение взвешенных частиц на кривых 1-5 с модой 3 -  $3,5 \phi$ . Из приведенных схематичных рисунков видно также, что по профилю подводных гряд материал меняет свою крупность. Вероятно, осадок каждой точки подводных аккумулятивных форм характеризуется своей структурой.

Русловые нестрежневые осадки. Этот структурный тип включает в себя пески прирусловых отмелей и, вероятно, пески прирусловых валов. Русловые нестрежневые осадки - наиболее широко распространенный и хорошо сортированный структурный тип аллювиальных отложений. На рис.14 дана подборка ЭПР русловых песков разной крупности из юрских отложений Ферганы. Они встречаются в разных частях разреза, но наиболее типичны для угле-

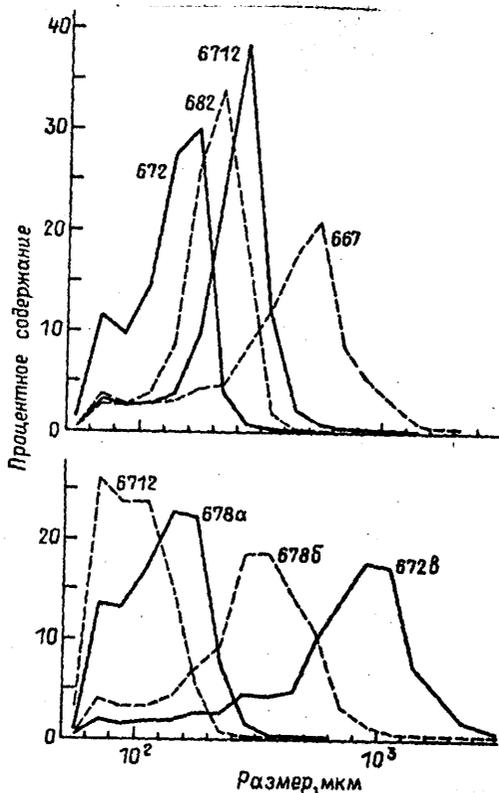


Рис.14. ЭПР бимодальных аллювиальных (русловых) песков из юрских отложений Ферганы.

носной толщи верхнего лейаса – нижнего доггера. Субраспределение взвешенных частиц (50 – 100 мкм) по мере увеличения крупозернистости уменьшаются в объеме, но, начиная с медианы ~ 250 мкм, оно практически не меняется. На рис.15 приведены

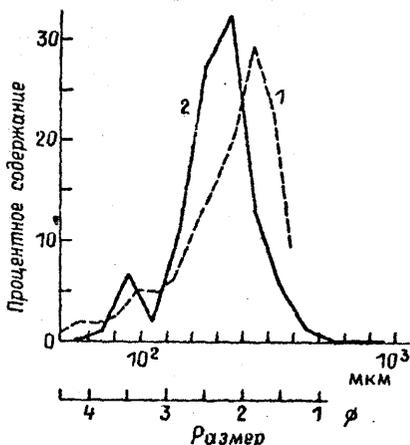


Рис.15. ЭПР современных русловых песков.

1 – бескварцевый лититовый песок нижнего течения р. Муса, о.Новая Гвинея (по [41]);  
2 – полевошпато-кварцевый песок из террасы р.Лейн (близ г.Олекминска).

ЭПР этого же типа для современных осадков. Они совершенно идентичны ЭПР ископаемых осадков. Однако структурные особенности русловых осадков в данном случае лучше рассматривать на примере юрских песков, так как для них все анализы выполнены по одной и той же методике и на одних ситах.

Прежде всего следует отметить удивительное подобие всех ЭПР, несмотря на разную крупность частиц. Все ЭПР бимодальны, причем размерность тонкозернистого субраспределения (фракция 50 – 100 мкм) не меняется по мере погрубения материала. Это субраспределение отвечающее взвешенным час-

тицам, отделено от основного крупозернистого субраспределения отвечающего сальтацям, дефицитом частиц размером ~ 100 мкм. Дефицит можно обнаружить только дробным ситовым анализом; уже на ситах с модулем  $\sqrt{2}$  дефицит обычно сглаживается и выражен в виде излома на ЭПР. Если применять разные наборы сит, положение дефицита несколько меняется на размерной шкале, но в целом оно всегда колеблется около 100 мкм. Бросается в глаза еще одна особенность, связанная уже с объемом тонкозернистого субраспределения взвешенных частиц. Последний жестко связан с размерностью крупозернистого субраспределения: по мере погрубения осадка объем взвеси закономерно падает, но начиная с оп

ределенного среднего размера частиц (при медиане 200 - 250 мкм) остается почти постоянным (см. ЭПР верхней части рис.14).

Изучение аллювия таврской свиты Крыма в рыхлых препаратах с модулем  $\sqrt[20]{10} = 1,422$  показало, что все особенности дополнительного субраспределения взвешенных частиц (<100 мкм) удивительно постоянны во всех типах аллювия. В строгом соответствии с размерностью основного распределения меняется лишь объем дополнительного (рис.16).

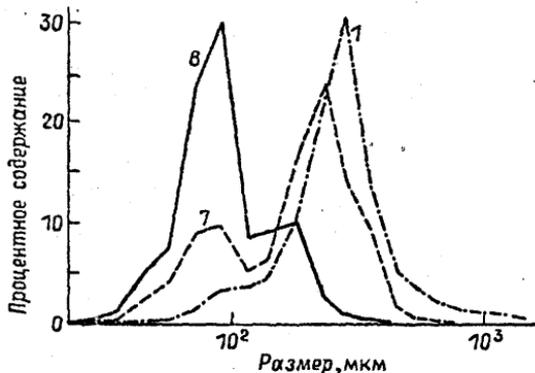


Рис.16. Бимодальные ЭПР русловых аллювиальных песков, таврская свита (Крым).

Осадки поймы, Кроме оцуболикованных Д.Догласом в 1946 г., у автора нет данных по структурам современных пойменных осадков. Имеющийся фактический материал по отложениям террас рек Енисея и Лены может быть использован для характеристики осадков поймы лишь условно, точно так же как и гранулометрические анализы ископаемых, по-видимому, пойменных осадков из юрских отложений Ферганы и неогена Крыма.

Самым обычным типом осадков поймы являются мелкоземы. Это глинистые и песчано-глинистые алевриты, реже - глинисто-алевритовые тонкозернистые пески. Пески иногда косослойчаты, причем мощность косых серий невелика, максимум 15-20 см. Большею частью и пески и алевриты массивные или волнисто-слоистые, тонкая горизонтальная слоистость менее характерна. Гранулометрический состав мелкоземов изучен пока очень плохо. Это объ-

является тем, что ситовый анализ разрешает только грубую часть распределения, а общепринятых методов изучения алевритов в настоящее время еще нет. Распределение песчаного, крупнее 50 мкм, материала как будто бы у большинства пойменных мелкоземов почти одинаково – одновершинное и резкое оборванное на грубозернистой стороне. Мода распределения чаще всего приходится на интервал 63 – 80 и 40 – 50 мкм (на ситах с модулем  $\sqrt[10]{10}$ ). Мелкоземы таврской свиты (неоген) Крыма из верхних частей аллювиальных ритмов вместе с горизонтами ископаемых почв имеют для частиц мельче 50 мкм логарифмическое распределение, иногда осложненное рядом дефицитов. Нередко среди мелкоземов залегают довольно грубые пески. В юрских отложениях Ферганы для них типична градационная слоистость. Вероятно, они принимают участие в строении речных террас наряду с мелкоземами и русловыми песками. По существу, как отмечалось выше (см. рис. 11), это структурный тип песков временных потоков. Значительно чаще встречаются пойменные пески, близкие по структуре к русловым бимодальным. С положительной асимметрией и дефицитом транзитной фракции около 100 мкм они, по существу, отличаются от последних только сравнительно плохой сортировкой и сравнительно высоким содержанием глинисто-алевритового материала (рис. 17).

Почти все отложения в поймах рек формировались в нестационарных условиях, а транспортировка материала осуществлялась во взвеси и часто в среде с повышенной плотностью. Гетерогенная транспортировка – сравнительно кратковременный этап перед отложением грубого обломочного вещества. Поэтому глинисто-алевритовый материал в условиях поймы является фоновым, к которому в зависимости от турбулентности потока добавляется то или иное количество песчаного материала. Можно ожидать, что такой песчаный материал будет сортирован тем хуже, чем он грубее. Более того, нестационарное отложение обломочного материала, которое обуславливает и плохую сортировку и градационную слоистость, по мнению В. Н. Шванова [24], должно проявиться также в прямой зависимости между мощностью песчаных слоев и средним размером зерен в их основании.

Как видно из этой краткой характеристики, структуры типичных пойменных осадков (мелкоземов и песков) достаточно без-

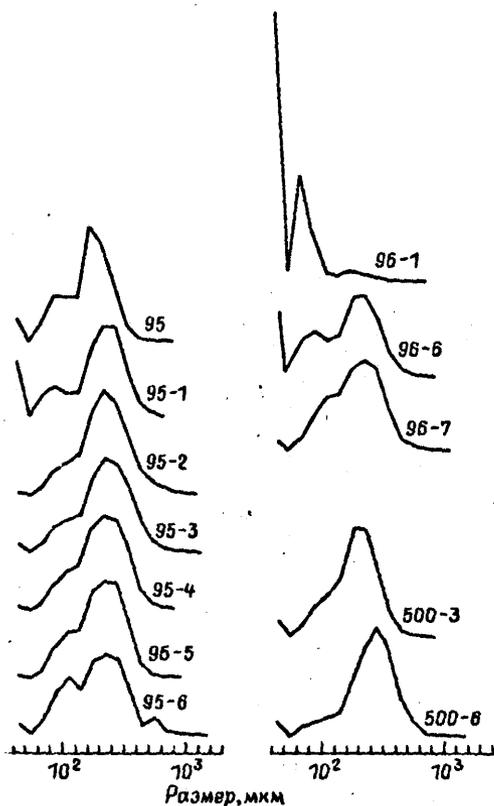


Рис. 17. ЭПР пойменных песков из разных террас р. Лены (близ г. Олекминска).

лизи. Подобные структуры можно найти и у осадков иных физико-географических зон, что подтверждает существующую конвергентную структуру. Однако тесная ассоциация пойменных осадков с русловыми и стрежневыми песками позволяет однозначно отличить их и от осадков временных потоков и от самых разнообразных донных внутрибассейновых (морских и озерных) песков.

## 5. Прибрежно-морские осадки

Прибрежно-морские осадки или осадки собственно волнового поля развиты повсеместно вдоль аккумулятивных берегов крупных водоемов. Нами под прибрежно-морскими осадками понимаются осадки между штормовым валом и урезом (пляж) и между урезом и последней волновой аккумулятивной макроформой (подводный береговой склон). Иными словами - это осадки узкой зоны активного взаимодействия элементов волн с наносами. Во время сильных штормов волны взмучивают осадки и на больших глубинах, но там отсутствуют аккумулятивные макроформы, свидетельствующие об активном взаимодействии. Это уже переходная зона от песчаных прибрежно-морских осадков волнового поля к илисто-алевритовым донным внутривассейновым отложениям, зона так называемой слабой волновой переработки.

Как известно, в зависимости от уклона дна размерность прибрежно-морских осадков колеблется в широких пределах, но минимальный размер преобладающей фракции не опускается ниже 100 мкм у наиболее пологих берегов и растет по мере увеличения угла наклона [25]. При этом крупность частиц от уреза падает не только в сторону моря на подводном береговом склоне, но и в сторону суши на пляже [11].

Подводный береговой склон. Тесная связь крупности материала с уклоном дна, а также с подводными аккумулятивными макроформами (подводными валами) определяется энергией волнения, которая вполне определена в каждой точке подводного берегового склона вследствие трансформации волн. Динамика этого процесса достаточно сложна. При подходе к берегу, как только волна начинает "чувствовать" дно, она постоянно трансформируется в зависимости от уклона, положения и профиля аккумулятивных форм. Сами валы, гася волнение, перемещаются. При этом перемещении непрерывно меняется структура наносов, находящаяся в строгом равновесии с энергией волнения. Непрерывное взмучивание приводит к выносу из наносов мелких фракций, которые отлагаются за пределами зон развития аккумулятивных форм. Транспортировка материала, в зависимости от силы волнения, различна. В периоды развития и перемещения (к берегу) подводных валов транспортировка осуществляется пре-

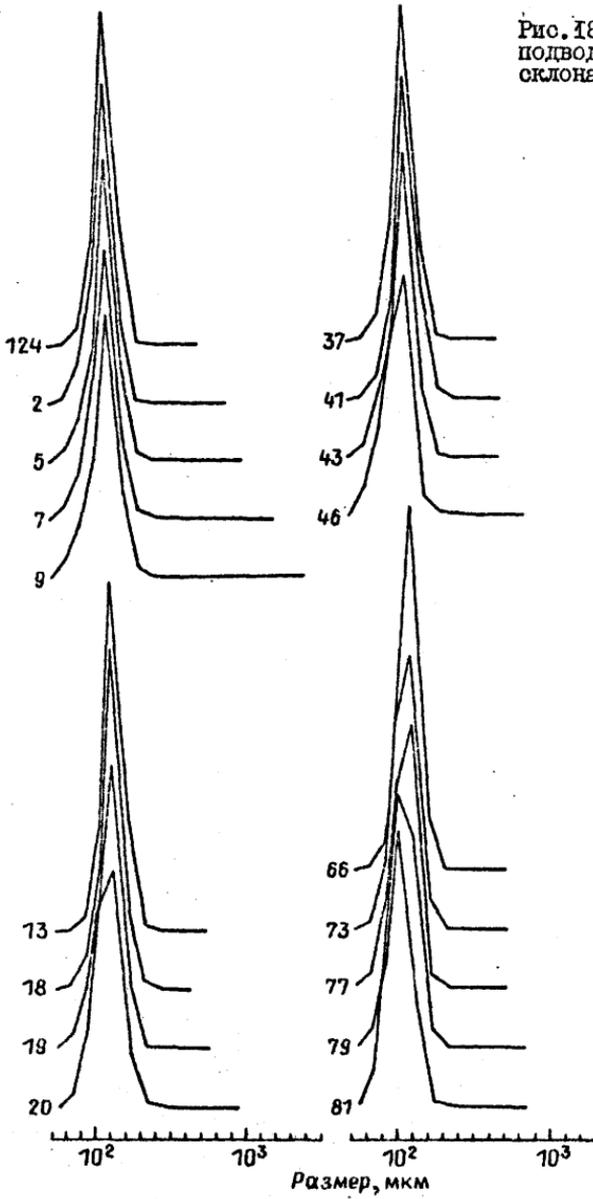
имущественно путем сальтации, иначе не было бы валов. Однако на вершине вала, где волны забуруниваются, осадок во время прохождения гребня волны переходит во взвесь. В штормовой период, когда валы размываются, весь осадок становится неустойчивым и значительная часть его выносится из зоны забурунивания в море. Вынос материала осуществляет донный противоток, а местами — разрывные течения. Зарождение донного противотока связано с сериями наиболее высоких волн [13]. Разрывные течения приурочены к бухтовым берегам и возникают вследствие рефракции волн от берега [25].

В процессе затухания шторма ранее вынесенный материал полностью или частично, в зависимости от длительности этой фазы волнения, снова попадает в прибрежную зону развития аккумулятивных форм. Чем длительнее период затухания шторма, тем совершеннее сортировка материала. Как показали наши исследования наносов подводного берегового склона Нарвского залива, на механическую дифференциацию при длительном и постоянном по силе волнении накладывается еще и минералогическая дифференциация, связанная с формой и, главное, — с характером поверхности зерен. На гребнях валов много кварца, а в межвальных желобах — ортоклаза и кварцитов.

Таким образом, транспортировка прибрежно-морских наносов носит двоякий характер. Во-первых, перенос материала осуществляется путем сальтации (в период развития и движения к берегу аккумулятивных форм) и, во-вторых, — во взвешенном состоянии (в период размыва подводных валов и во время прохождения гребня волны через вершину вала). Следует подчеркнуть, что эта гетерогенная транспортировка разобщена во времени, т.е. перенос материала осуществляется в любой промежуток времени преимущественно одним способом. Следовательно, один и тот же осадок должен характеризоваться структурой, свойственной и взвешенному и сальтирующему материалу. Это ограничение приводит к формированию своеобразных структур, совершенно тождественных для разных бассейнов.

В зоне развития подводных валов на подводном береговом склоне Нарвского залива структурные особенности осадков были изучены достаточно подробно. Прежде всего выяснилось, что в

Рис.18. ЭПР песков с  
подводного берегового  
склона Нарвского залива.



целом от уреза в сторону моря размер частиц уменьшается. Однако это уменьшение носит четко выраженный циклический характер. На рис. 18 даны ЭПР четырех серий образцов (четыре аккумулятивных форм), отобранных по мористым склонам валов от гребня до межвального желоба на разном расстоянии от берега. Во всех сериях наблюдаются следующие закономерности:

1. Средний размер зерен максимальный на гребнях валов и постепенно уменьшается к межвальным желобам.
2. Сортировка (стандарт) и эксцесс уменьшаются в сторону вершин валов и увеличиваются в межвальных желобах.

Ухудшение сортировки в межвальных желобах обусловлено не столько удлинением "хвостов" ЭПР, сколько резким увеличением объема мелких фракций песчаного распределения (поэтому ЭПР тем более "+" асимметричны, чем они ближе к желобам). Отмеченными закономерностями можно хорошо объяснить особенности гранулометрического состава некоторых ископаемых прибрежно-морских косослойчатых песков. Например, кажущиеся грубозернистыми пески из подошвы серий девонских красноцветов Эстонии по результатам ситового анализа оказались тоньше, чем пески кровли, из-за обилия в них тонких фракций [12].

Однако, если для конкретных подводных аккумулятивных форм (в частности - валов) наблюдается обратно пропорциональная зависимость между медианой и сортировкой, то

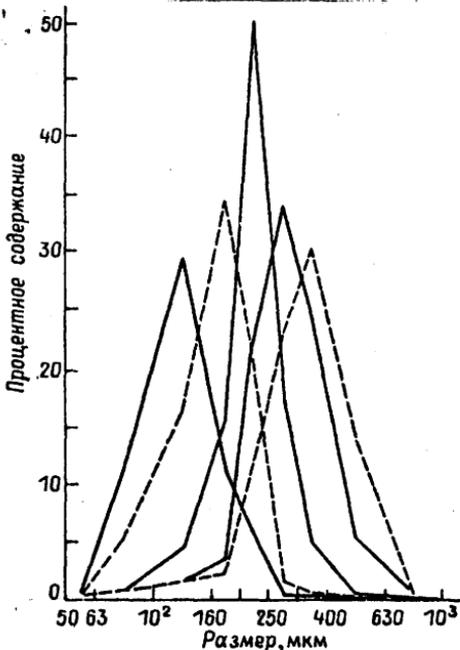


Рис. 19. Среднестатистические ЭПР прибрежно-морских песков в зависимости от их размерности (модальности) из оболочек толщи ордовика.



Рис. 20. Расщепление ЭПР за пределами литорали на подводном берегу Терского берега Белого моря.

11 - урез при приливе; 7 - гребень вала, осушающегося при отливе; 1 и 3 - пробы, взятые с глубины (при отливе) соответственно 1,6 и 1,0 м.

в целом для подводного берегового склона эта зависимость совершенно иная. Вероятно, она, как и вообще крупность наносов, определяется уклоном дна, который создает наиболее оптимальные условия, т.е. пропускает волны определенной высоты и длины для сортировки частиц определенной размерности. Поэтому частицы как более, так и менее крупные, будут сортированы хуже. Для подводного берегового склона Нарвского залива, который слагают довольно однообразные по крупности мелкозернистые пески, такой оптимальный для сортировки размер частиц соответствует моде 125-160 мкм. Пески с модой 100-125 мкм сортированы уже хуже. К сожалению, нет песков с модой 160-200 мкм.

На рис. 19 даны среднестатистические ЭПР из песчаной части оболовой толщи ордовика запада Ленинградской области и Эстонии (анализы из кандидатской диссертации Л.Н. Кулямина). ЭПР с модой 100-160 мкм представлены 13 анализами, с модой 160-200 мкм - 5 анализами, с модой 200-250 мкм - 21 анализом, 313-400 мкм - 22 анализами. На рисунке отчетливо видно последовательное ухудшение сортировки тех песков, у которых мода меньше или больше 200-250 мкм. В верхней части подводного берегового склона - в зоне валов грубозернистый (и вообще разнозернистый) материал концентрируется в межвальных желобах

(см., например, рис.18). В общем случае его концентрация должна быть небольшой.\* Однако, если по тем или иным причинам концентрация разнозернистого материала повысится, то вследствие одновременной гетерогенной транспортировки в межвальных желобах будут формироваться осадки с бимодальной структурой. Например, в районе Донузлав (Западный Крым) осадки из раковинного детрита на подводном береговом склоне отчетливо бимодальны в межвальных желобах [5]. Это объясняется непрерывным продуцированием и поступлением грубого раковинного детрита со стороны моря.

В ливных морях, где колебания уровня достаточно велики (больше 1 м), происходит расщепление ЭПР, т.е. структура песчаных наносов становится бимодальной. Действительно, при одном и том же волнении воздействие волн на дно будет различаться тем значительнее, чем больше амплитуда колебаний уровня. Более грубое распределение будет формироваться во время отлива, а более тонкое - во время прилива. Сказанное иллюстрирует рис.20, где ЭПР песков литорали (район устья р.Варзуги, Терский берег Белого моря) ничем не отличаются от ранее приведенных. Однако за пределами литорали ЭПР у всех песков становятся в той или иной степени бимодальными, причем размеры мод весьма близки (в отличие от рассмотренных выше разнозернистых бимодальных песков межвальных желобов).

Итак, для подавляющего большинства структур песков верхней части подводного берегового склона наиболее характерно следующее: 1) одновершинность, 2) весьма совершенная сортировка, 3) размерность моды, которая всегда больше 100 мкм, 4) резкий дефицит частиц меньше 100 мкм, 5) четкая зависимость между уклоном дна и оптимальным для сортировки размером частиц.

Пляж. Как береговую аккумулятивную форму, мы ограничиваем пляж полосой между урезом и зоной максимального заплеска волн (за штормовым валом или у клифа). Точнее, это полоса, в той или иной степени подверженная воздействию как субаэральных, так и

---

\* Это сравнительно малоподвижный и инертный материал. И в фазу аккумуляции, и в фазу размыва он, по сравнению с более тонкозернистым материалом, перемещается медленнее и поэтому концентрируется в прирезовой зоне.

субаквальных динамических факторов. Поэтому нижняя граница пляжа расположена несколько мористее уреза и совпадает с так называемой зоной свала. Зона свала образуется при значительном по времени периоде затухания шторма и состоит наиболее грубыми наносами. Структурные особенности этих осадков чрезвычайно специфичны. На рис. 21, 24, 25 показаны их ЭПР. Они бимодальны, причем, между двумя основными распределениями с примерно одинаковыми объемами нередко намечается еще одно субраспределение, которое резко подчинено двум первым. Так же как и на подводном береговом склоне, здесь очень мало или нет частиц меньше 100 мкм. Объяснение этому может быть следующее.

В зоне пляжа на осадки периодически действует прямой и обратный волновые потоки. Если на подводном береговом склоне

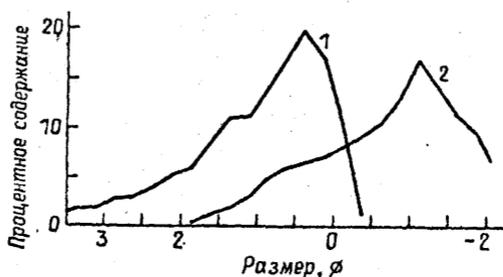


Рис. 21. ЭПР песков зоны "свала" (по [30]).  
 1 — северо-восточное побережье Бразилии; 2 — Аляска, мыс Барроу.

различие в их энергии компенсировалось перемещением и привлечением к берегу подводных валов, то в приурезовой зоне, где разница скорости волновых потоков особенно велика, она находит свое выражение не только в размыве и аккумуляции наносов, но и в формировании бимодальных структур. Особенно устойчивым в этих условиях должно быть грубозернистое субраспределение, а более тонкозернистое значительно мобильнее и связано с поступлением все новых и новых порций песка с подводного берегового склона. Поэтому размерность (мода) тонкозернистого распределения всегда совпадает с одновышинными осадками подводных валов. С учетом устойчивости обломочного материала тран-

спортировка его в этой зоне происходит по следующей идеализированной схеме.

При прямом волновом потоке частицы тонкозернистого субраспределения переходят во взвешенное состояние, а грубозернистый материал переносится путем сальтации или качения. При обратном, менее мощном волновом потоке материал грубозернистого субраспределения катится вниз, а более тонкий перемещается уже путем сальтации. Таким образом, имеет место транспортировка частиц обоих субраспределений двоякого рода: частицы тонкозернистого распределения перемещаются во взвеси и путем сальтации, а грубозернистого — качением и сальтацией. Естественно, что оптимальные для перемещения каждым из упомянутых способов размеры частиц могут не совпадать, особенно в случае сальтации, для прямого и обратного потоков и вследствие этого несовпадения, особенно для грубозернистых наносов у приглубых берегов, появится дополнительное распределение между двумя основными.

Казалось бы, и остальные осадки пляжа (выше уреза) должны характеризоваться бимодальностью, так как они формируются в тех же

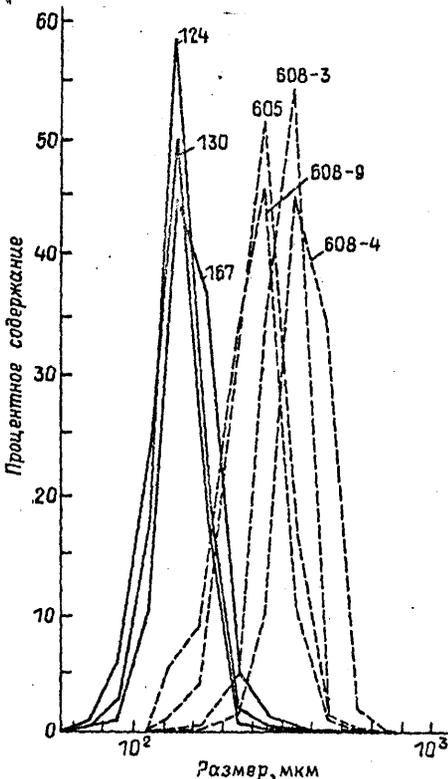


Рис. 22. ЭПР поверхностных песков пляжа Нарвского залива (сплошная линия) и Терского берега Белого моря (штриховая).

гидродинамических условиях. Однако это не так. На рис.22 даны пределы колебаний ЭПР для поверхностных проб пляжа Нарвского залива и Терского берега Белого моря. Это – одновершинные распределения, совершенно аналогичные ранее рассмотренным ЭПР подводного берегового склона. Более того, и здесь виден оптимальный для сортировки размер частиц. Те же по характеру структуры наблюдаются у поверхностных пляжевых песков многих других бассейнов (рис.23).

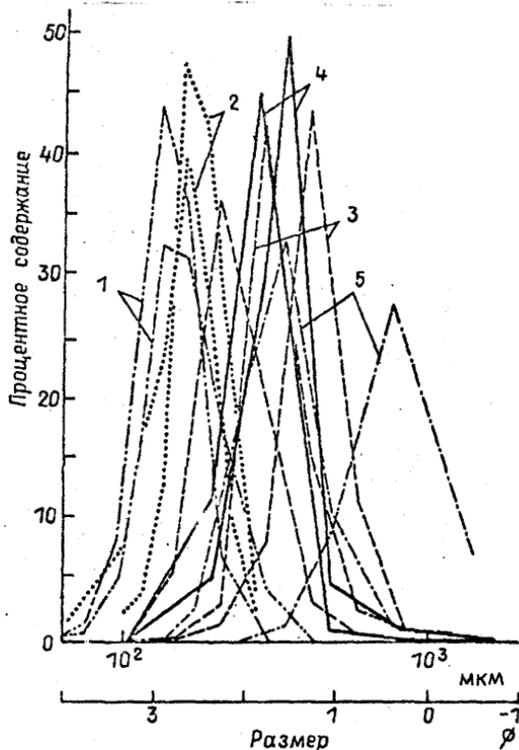


Рис.23. ЭПР береговых(пляжевых) песков.

1 - Мексиканский залив, о-в Мустанг (по [361]); 2 - северо-восточное побережье Папуа - Новая Гвинея, близ устья р. Муса (по [411]); 3 - оз. Турон (по [451]); 4 - Красное море, Бир-Тамада (по [291]); 5 - Средиземное море, зал. Поццуоли (по [371]).

Если же обратиться к захороненным пляжевым пескам, то картина изменится. На рис.24 даны ЭПР всех проб, отобранных из канавы на пляже Нарвского залива. Опробование производилось по разрезам в стенке канавы. Расстояние между разрезами составляло 10 м, а между пробами в каждом из разрезов - 10 см. Мощность слоя песка, из которого отбиралась проба, не превышала 1 см. Следовательно, опробование было достаточно представительным и по его результатам можно судить об осадках пляжа в целом. На рис.24 нет ЭПР пес-

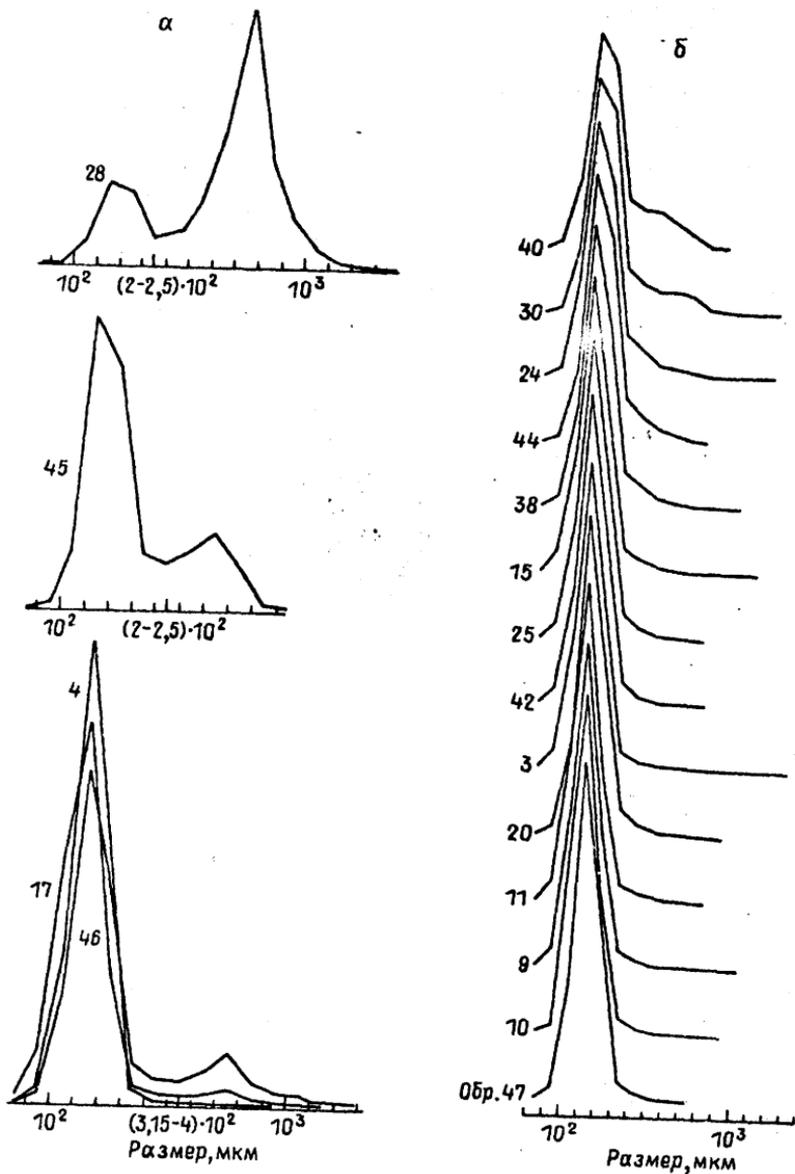


Рис. 24. ЭПР песков пляжа Нарвского залива.  
 $\alpha$  - бимодальные распределения, отличающиеся размерностью грубозернистой моды;  $\beta$  - одновершинные распределения песков, чередующихся в разрезе канавы с бимодальными.

ков, которые были в той или иной степени затронуты процессом перевевания. Это — самые верхние пробы разрезов из слоев песка, который характеризуется тончайшей горизонтальной слойчатостью и сечет нижележащие слои, где чередуются тонкие и грубые осадки и прослой растительного и раковинного детрита, порога падающие в сторону моря (углы падения  $3-6^{\circ}$ ). Мощность перевелного песка от уреза к авандоне постепенно возрастает. Из рис. 24, в частности, следует, что одна часть проб имеет бимодальные ЭПР, другая — одновершинные. Из рис. 24, а видно, что сверху по мере утоньшения материала происходит сдвиг дефицита между двумя субраспределениями в сторону грубых частиц, а из рис. 24, б следует, что сверху вниз уменьшается сортировка по мере уменьшения среднего размера зерен. Остается неясным следующее: во-первых, почему на поверхности пляжа формируются одновершинные пески и, во-вторых, почему бимодальные (и вообще более грубозернистые) пески встречаются главным образом в захороненном виде?

Н. В. Догвиненко (1973 г.) предложил следующий механизм формирования осадков пляжа. Как известно, пляж в штормовой период размывается, а в период затухания шторма восстанавливается в той или иной степени. Последнее зависит от соотношения по времени этих двух периодов волнения. В зависимости от уклона дна подводного берегового склона высота волн, при которых начинается размыв пляжа, варьирует, вероятно, в широких пределах. Для аккумулятивных берегов Нарвского залива предельными для накопления наносов являются волны высотой 1,0–1,25 м. Естественно, что не только в период затухания шторма, но и в начальный период усиления волнения также происходит аккумуляция наносов на пляже. В целом, вероятно, отложение пляжевых песков идет параллельно с перемещением к берегу подводных валов. Если последние размываются, то размывается и пляж.

Активное волновое воздействие на пляж приурочено к зоне заплеска\*, которая, подобно "смычку", последовательно переме-

---

\* Под зоной заплеска автор понимает не зону наката прямого волнового потока, а всю приурезовую полосу, которая периодически то осушается, то снова покрывается водой (в данный промежуток времени и при данном волнении).

шается по профилю пляжа сначала вверх, в сторону берега, а по мере уменьшения волнения — вниз, в сторону моря. С этой зоной и связаны как абразия, так и аккумуляция пляжных наносов. Итак, при любом волнении аккумуляция самых молодых наносов, переносимых во взвеси, начинается в самой верхней точке пляжа при наиболее высоком уровне заплеска волн и закончится при окончании волнения в пригрезовой зоне (наиболее низкий уровень заплеска волн). Эти наносы ложатся или согласно на ранее отложенные (при слабом волнении), или с размывом (при сильном волнении). Н.В. Логвиненко на основании вида кривых энергии прямого и обратного волновых потоков по профилю зоны заплеска считает, что описанный ранее механизм гетерогенной транспортировки обломочного материала характерен только для нижней (мористой) части зоны заплеска. В верхней же части этой зоны в связи с малой энергией прямого волнового потока (не говоря уже об обратном) происходит транспортировка лишь наиболее мелких частиц во взвеси к берегу и сальтацией к морю. Перемещение зоны заплеска в период затухания волнения в сторону моря приводит к тому, что грубые бимодальные осадки нижней части зоны заплеска "размываются" по профилю пляжа вплоть до зоны "свала" и перекрываются повсеместно сверху одновершинными более тонкозернистыми осадками верхней части зоны заплеска, отложенными из взвеси.

Таким образом, в связи с полной разгрузкой энергии волнения на пляже в зоне заплеска происходит пространственное разделение осадков с различной структурой и их захоронение. На подводном береговом склоне, наоборот, энергия прямого и обратного волновых потоков различается не столь резко и тратится главным образом на перемещение более грубых частиц к берегу и более мелких в сторону моря. Следовательно, там нет осадков с двувершинными ЭПР или они встречаются значительно реже.

Почти все бимодальные ЭПР с пляжа Нарвского залива характеризуются преобладанием тонкозернистого субраспределения. Это объясняется тем, что профиль пляжа вогнутый почти на всем протяжении от уреза до клифа на залесенной авандуне. На рис. 24 отчетливо видно, что размерность дефицита зависит только от соотношения объемов двух субраспределений. Как у всех

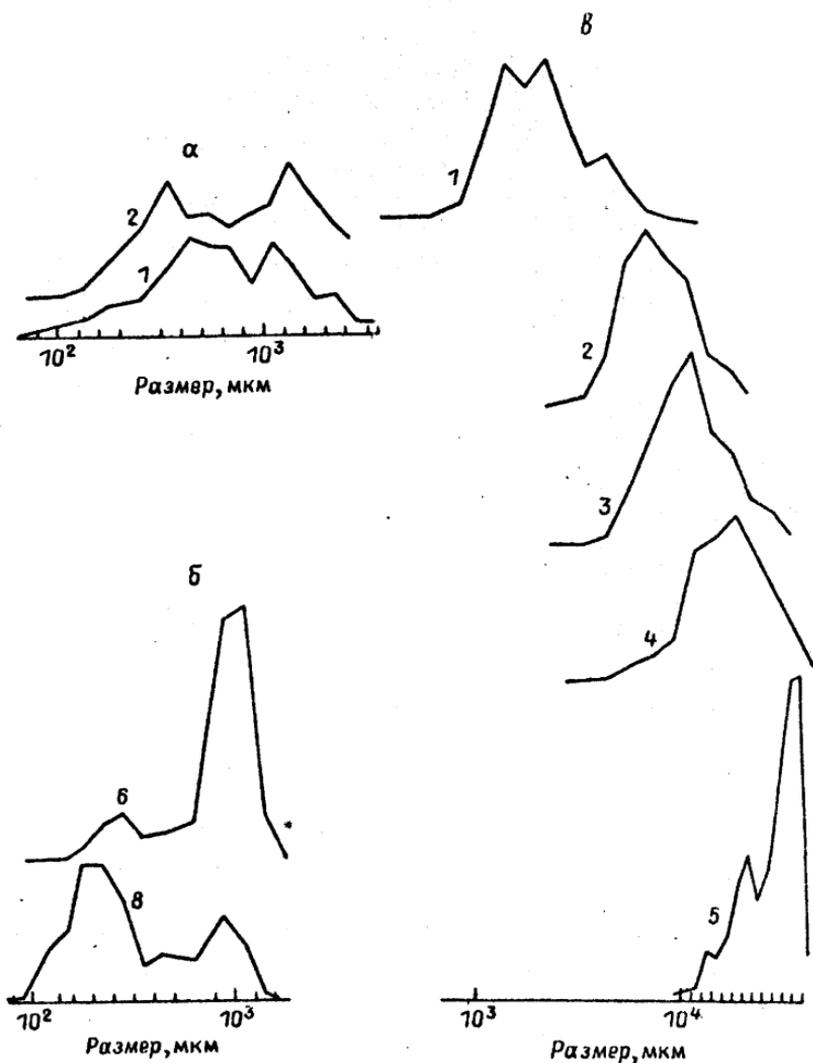


Рис. 25. ЭПР поверхностных осадков с пляжа Экваторийского залива (5 км к западу от г.Саки).

$\alpha$  - галечно-гравийные осадки зоны "свала": 1 - типичное распределение, 2 - трансформированное в начале шторма;  $\beta$  - песчаные осадки: 6 - пляж вогнутый (8 м от уреза), 8 - пляж выпуклый (18 м от уреза);  $\gamma$  - гравийные и гравийно-галечные осадки: 1 - от уреза 2,0 м, 2 - 3,0 м, 3 - 4,5 м (пляж выпуклый); 4 - от уреза 6,5 м, 5 - 15,3 м (пляж вогнутый).

прибрежно-морских осадков, наблюдается резкий дефицит частиц  $< 100$  мкм. Размерность моды тонкозернистого субраспределения совпадает с модами одновершинных ЭПР.

На рис. 25 даны ЭПР поверхностных осадков пляжа Евпаторийского залива. Это пляж полного профиля у приглубых берегов. В его строении принимает участие как песчаный, так и гравийно-галечный материал. Все ЭПР песчаных проб оказались бимодальными, точно так же, как и ЭПР гравийно-галечных осадков. Возможно, для приглубых берегов вообще не характерны одновершинные осадки на пляже. Можно отметить следующие особенности ЭПР осадков с пляжа Евпаторийского залива:

1. Гравийно-галечное распределение обломочного материала не зависит от песчано-гравийного и подобно ему.

2. Соотношение объемов двух субраспределений как для гравийно-галечных, так и для песчано-гравийных осадков зависит от профиля пляжа. На вогнутом пляже преобладает тонкозернистое субраспределение, а на выпуклом, где скорость обратного волнового потока значительно больше, чем на вогнутом, наоборот, преобладает грубозернистое субраспределение. В приурезовой зоне (зона "свала") их объемы примерно равны.

3. Чем дальше от уреза располагаются полосы гравийно-галечного материала, тем он становится более грубозернистым и тем больше перекрываются моды субраспределений. Эти полосы обусловлены положением уреза в предыдущие штормовые периоды, причем самая верхняя полоса обязана самому сильному шторму, во время которого в нижней части зоны заплеска отложился наиболее грубый материал.

Аналогичные закономерности можно вывести по опубликованным материалам структурных особенностей осадков одного из гравийно-галечных пляжей Южного Уэльса [27]. Для пляжей низких энергий (у отмелых берегов) закономерности могут быть иными. Во всяком случае, относительно любого положения уреза на профиле такого пляжа в данный момент и выше, и ниже (мористее) его всегда отлагаются осадки более тонкозернистые, чем на самом урезе.

## 6. Прибрежно-морские осадки зоны слабой волновой переработки

Изучение шельфа современных морей [7, 32] показало, что песчаный донный материал окаймляет прибрежную зону, сменяясь мористее зонами соответственно крупного и мелкого алеврита. Как отмечает Ф. Шепард, у внешнего края шельфа почти всегда намечается зона заметно более грубых осадков вплоть до песчано-гравийных. Он считает, что эта зона связана с той береговой линией, которая отвечала уровню Мирового океана в ледниковый период. Так или иначе песчаный донный материал тяготеет к берегам, и поэтому соответствующие осадки верхней части шельфа могут быть отнесены к прибрежно-морским.

Итак, мористее уреза на подводном береговом склоне могут быть выделены 2 принципиально разные зоны: зона подводных аккумулятивных макроформ и далее - зона слабой волновой переработки. Гидродинамически, казалось бы, обе зоны подобны. И в одной, и в другой на осадки воздействуют волнения и течения (вдольбереговые и нормальные к береговой линии). Однако, если в зоне валов и волнения, и течения (нормальные к берегу) достигают максимальных значений, то по мере увеличения глубины их воздействие на донные осадки постепенно ослабевает. В зоне слабой волновой переработки турбулентность среды, в целом, значительно ниже.

В зоне валов волнение как осадкоформирующий фактор, вероятно, почти полностью маскирует течения. Ведь как интенсивность, так и продолжительность воздействия волн на осадок в период развития подводных макроформ несравненно больше, чем течений, главным образом вдольбереговых. С другой стороны, возникающие в штормовые периоды нормальные к берегу течения являются основным фактором размыва, а не фактором аккумуляции наносов в этой зоне. Поэтому осадки пляжа и верхней части подводного берегового склона (зона подводных макроформ) были ранее отнесены нами к осадкам волнового поля. Напротив, в зоне слабой волновой переработки осадки формируют не только волнения, но и постоянные (вдольбереговые) и временные (главным образом, нормальные к берегу) течения. Это принципиальное отличие в гидродинамике двух зон определяет не только морфологи-

ческие (текстуриные), но и структурные особенности соответствующих осадков.

На подводном береговом склоне подобный количественный и качественный скачок скорее всего связан с узкой зоной забурунивания (максимальной трансформацией параметров волн), которая, как известно, зависит от силы волнения и уклона дна. Вдоль аккумулятивных берегов забурунивание происходит по гребням подводных валов и лишь на короткое время сильных штормов, когда все валы размыты, смещается мористее. Поэтому достаточно условно верхнюю границу зоны слабой волновой переработки можно провести по подножию последнего, мористого, подводного вала, а нижнюю, глубоководную — по переходным осадкам типа песок — алеврит.

Наибольшим площадным распространением среди прибрежно-морских песчаных осадков, безусловно, пользуются осадки рассматриваемого типа. Описанная выше гидродинамическая обстановка (умеренные и слабые волнения + умеренные и слабые течения) характерна для отложения подавляющего большинства как современных, так и, в особенности, ископаемых зернистых осадков конечных водоемов стока: морей и озер. Ширина зоны волновой переработки с песчаным донным материалом, естественно, зависит от весьма многих факторов и прежде всего — от характера транспортировки и перераспределения донных песков по площади. На вопросах физической географии конечных водоемов стока разных типов мы здесь останавливаться не будем, а лишь перечислим важнейшие способы переноса обломочного материала за пределы узкой прибрежной зоны.

1. Перенос материала из береговой зоны осуществляется во взвешенном состоянии во время штормов разрывными течениями и донным противопотоком. Чем тоньше материал, тем он дольше удерживается во взвешенном состоянии и, следовательно, дальше переносится. В целом, дальность переноса незначительна, так как указанные течения весьма кратковременны.

2. Вдольбереговые волновые течения способствуют выносу во взвеси тонкого песчаного и алевритового (<100 мкм) материала за пределы береговой зоны. Однако во время шторма, когда их

скорости обычно возрастают, они могут в значительной степени ослаблять действие донного противотока и разрывных течений, способствуя быстрой разгрузке взвешенного материала.

3. Мутьевые или суспензионные потоки, хотя и кратковременны, но могут во взвешенном состоянии перемещать огромные массы обломочного материала на большие расстояния — от береговой зоны до континентальных подножий.

4. Во взвешенном состоянии по воздуху в конечные водоемы стока поступает обломочный материал осадочного и вулканогенного происхождения. Его распределение по бассейну в зависимости от крупности выражено менее четко по сравнению с материалом разрывных течений, зато площади распространения практически не ограничены [25]. Естественно, районы повышенной концентрации донного эолового материала тяготеют к аридным зонам, реже — к нивальным.

5. При ледовом разносе, в отличие от вышеперечисленных способов транспортировки, разнозернистый обломочный материал не дифференцируется по площади бассейна (по крупности) и, следовательно, ухудшает сортировку ранее отложенного донного осадка [7,19]. В гумидных зонах к ледовому разносу добавляется также транспортировка обломочного материала в корнях наземных растений. В обоих случаях площади распространения подобного материала весьма велики, а его роль даже в высоких широтах незначительна. Совершенно ничтожно значение как материала, транспортирующегося флотацией [30] и водорослями, так и космогенного материала (метеоры и метеориты).

6. Перераспределение донного материала в пределах акватории бассейна осуществляют постоянные или временные течения. Скорости их чаще всего незначительны и достаточны для транспортировки во взвеси, а следовательно — и на большие расстояния, лишь алеврита и тонкого (реже — мелкого) песка. Сальтация и качение при этом также могут иметь место, о чем свидетельствуют глубоководные знаки ряби. Однако роль последних в перераспределении донного обломочного материала очень мала. Так как осадок не транспортируется как единое целое, то переформирование структуры затрагивает обычно только мелкозернистую часть распределения.

Сальтация и качение иногда являются доминирующими способами транспортировки, например, в проливах, между островами и т.д., где сильные постоянные течения могут формировать гряды со структурами осадков, тождественными аллювиальным. Впрочем, последние, по определению, к донным отложениям зоны слабой волновой переработки вообще не относятся.

Таким образом, обломочный материал рассматриваемых донных отложений может быть полигенным. Более того, в условиях сравнительно слаботурбулентной водной среды (поле слабых, реже — умеренных волнений и течений, обычно — спорадических) донный материал не трансформируется вообще или трансформируется его тонкозернистая часть. Значительные площади акватории бассейнов являются своего рода "консервными банками", в которых возникают и сохраняются чрезвычайно разнообразные, а нередко и весьма специфические структуры донных осадков.

Ниже мы попытаемся дать характеристику структур только простых и наиболее широко распространенных донных песков зоны слабой волновой переработки у сравнительно открытых берегов. Материалов по турбидитам у автора нет, а рассмотрение структур донных песков некоторых закрытых акваторий, например, Порьеи Губы Белого моря, вершины Уссурийского залива Японского моря и других, по которым материал имеется, вряд ли возможно, учитывая малую представительность образцов, не отражающих разнообразие факторов осадкообразования: гидродинамической обстановки, источников поступления обломочного материала, профиля дна, строения берегов каждого конкретного бассейна седиментации и др.

Мобилизация разноструктурного материала из прибрежной зоны (пляж, подводный береговой склон, дельтовый комплекс), а главное, кратковременный перенос во взвешенном состоянии приводит к формированию одновершинных распределений с резко меняющейся, в зависимости от крупности материала, сортировкой. В целом сортировка плохая, но для тонкого материала, который дольше находился во взвешенном состоянии, она может быть весьма хорошей. И все же сортировка донных осадков зоны волновой переработки в целом хуже сортировки исходного (прибрежно-морского или аллювиального) материала той же крупности. Известно,

что сортировка осадка (или стандартное отклонение) есть функция времени  $t$ , в течение которого материал переносился с постоянной в каких-то пределах скоростью  $\Delta v$ . Или другими словами: стандартное отклонение есть функция пути ( $L = \Delta v t$ ) при неизменных условиях транспортировки.

Среди юрских отложений Ферганы роль озерных донных осадков достаточно велика. Они составляют большую часть разреза доггера. Это табачного цвета тонкоослоистые породы (мощность отдельных слоев колеблется от нуля до первых десятков сантиметров), весьма выдержанные по простиранию, тонкопараллельно- или волнистослойчатые. Они образуют почти непрерывный ряд от алевролитов через песчаные алевролиты к алевроитовым тонко- и мелкозернистым (реже - среднезернистым) песчаникам. Количество глинистого материала, минимальное у песчаников ( $> 10\%$ ), возрастает у алевролитов. Последние также образуют непрерывный ряд с глинами, и поэтому встречаются алевролиты, в самой разной степени разубоженные глинистым материалом. У наиболее грубых песчаников нередко наблюдается слабо выраженная косая слоистость, реже - градиционная слоистость. Среди всех типов отложений юрского периода осадки доггера наиболее монотонные и выдержанные по простиранию. Палеонтологические остатки также свидетельствуют об озерном режиме осадконакопления в рассматриваемую эпоху. Это, прежде всего, пресноводные тонкостенные пелелиподы и гастроподы, чешуя и кости ганойдных рыб и, наконец, редкие зубы пресноводных акул.

Детальное изучение гранулометрии озерных отложений доггера Ферганы показало близкую к линейной зависимость между сортировкой материала и его медианой (рис. 26). В полном соответствии с ранее изложенным механизмом формирования донных отложений у них по мере погрубения материала и, следовательно, уменьшения времени транспортировки ухудшается сортировка. Та же зависимость у донных осадков залива Понцуоли между изобатами 10 и 25 м, по данным Г. Мюллера (рис. 27), и в открытой части Уссурийского залива Японского моря (рис. 28). Учитывая ранее (1960 г.) замеченную М. В. Кленовой зависимость механического состава осадков материковой отмели (шельфа) от расстояния до берега, которая не противоречит нашим наблюдениям,

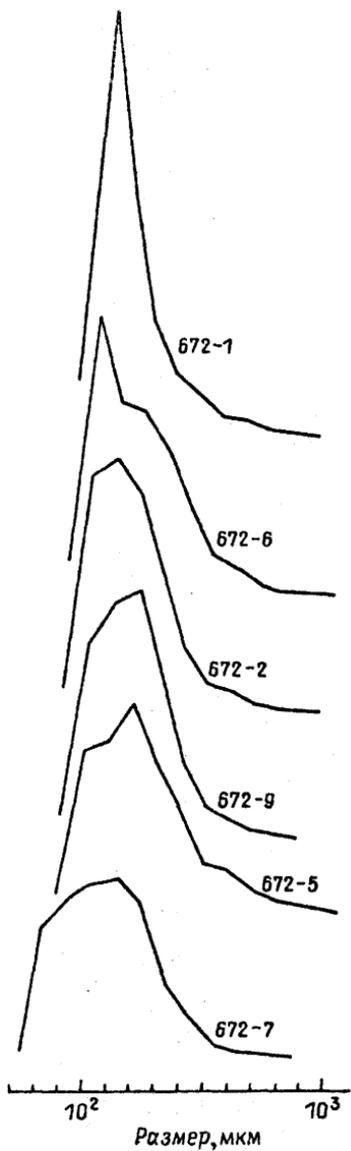


Рис.26. ЭПР озерных отложений доггера, Северная Фергана (пос. Ташкумыр).

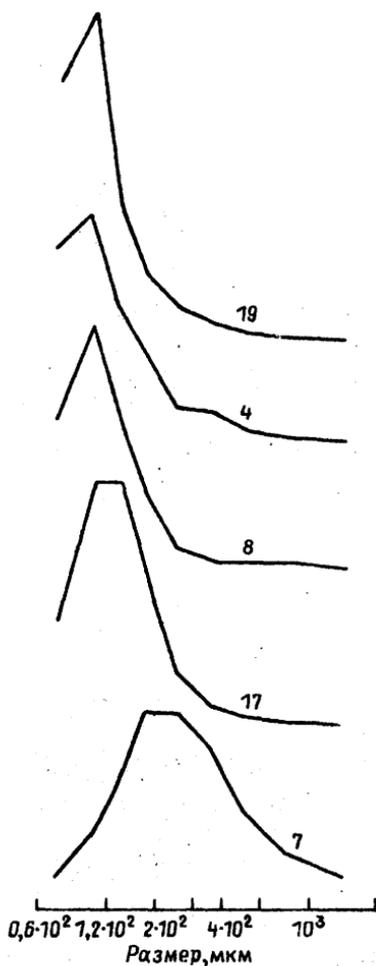
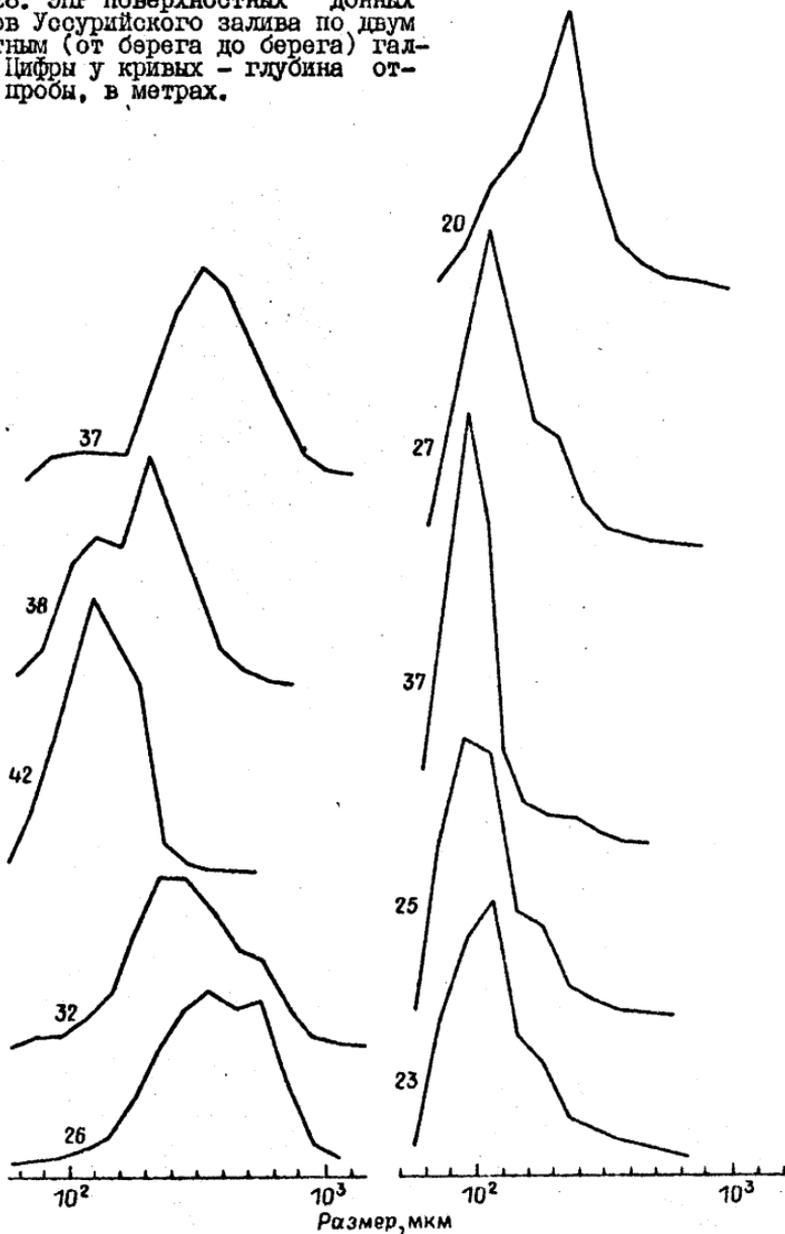


Рис.27. ЭПР современных донных осадков зал. Поşуоли (по [37]).

Рис. 28. ЭПР поверхностных донных песков Уссурийского залива по двум широтным (от берега до берега) галсам. Цифры у кривых - глубина отбора пробы, в метрах.



можно сделать вывод о главной особенности структур песчаных донных осадков зоны слабой волновой переработки: — для любого участка бассейна седиментации с нормальным ходом механической дифференциации (т.е. без дополнительных источников сноса) сортировка донных осадков прямо пропорциональна расстоянию от берега и обратно пропорциональна медиане. Это обстоятельство, на наш взгляд, позволяет однозначно судить о принадлежности ископаемых осадков к типичным донным (поле слабых волнений и течений) по серии из 4–5 анализов. Естественно, образцы при этом должны варьировать по крупности.

С учетом гомогенности транспортировки, выше отмечалось, что кривые распределения у донных осадков зоны слабой волновой переработки одновершинны. И все-таки около 100 мкм часто наблюдается дефицит транзитной фракции. Обычно, если дефицит есть, то сильно сглажен (см., например, ЭПР обр. 672–6–5 и 672–6–6 из доггера Ферганы).

Возможно, он связан с донными течениями, которые трансформировали тонкозернистую часть распределения, но, может быть, учитывая тонкую, а порой и тончайшую, параллельно-горизонтальную слойчатость, характерную для рассматриваемых осадков, этот дефицит получается в результате смешения двух структур. Последнее представляется маловероятным по следующей причине. При сравнении достаточно удаленных друг от друга бассейнов седиментации поражает сходство ЭПР их донных осадков, например,

у современных отложений оз. Мичиган и четвертичных озерно-ледниковых отложений Литвы (рис. 29). На обоих обобщенных ЭПР достаточно четко намечается дефицит фракции около 100 мкм.

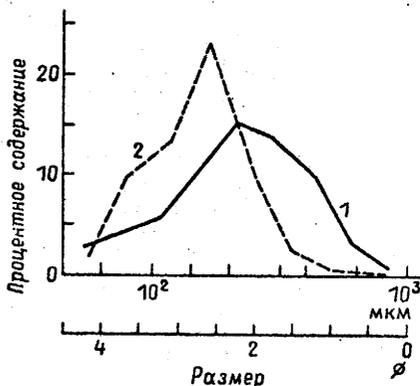


Рис. 29. Среднестатистические ЭПР донных осадков.

1 — четвертичные озерно-ледниковые пески Литвы, мода 140–200 мкм, 10 анализов (по [8]); 2 — современные донные пески оз. Мичиган, мода 177–250 мкм, 10 анализов (по [45]).

В ряде случаев, вероятно, нелегко идентифицировать рассматриваемые донные отложения конечных водосмоов стока. Близкие, если не тождественные, структуры могут возникать у пойменных осадков. Кроме того, донные пески, в принципе, из-за ограниченной по времени транспортировки, особенно более грубозернистые, могут наследовать обобщенные структуры исходных прибрежноморских и аллювиальных осадков. Это относится прежде всего к небольшим или же к обособленным участкам бассейнов седиментации (озера, заливы, лиманы и т.д.).

### 7. Золотой процесс

Выделение золотых песков было и пока остается настоящей "ахиллесовой пятой" гранулометрии. Подобное положение возникло по ряду причин: от разнообразия субстрата, по которому этот процесс развивается; от недостаточно высокой интенсивности процесса, особенно в гумидных зонах и вообще на побережье и, наконец, от применения статистических параметров для отображения результатов анализов. Последнее особенно отрицательно сказалось на интерпретации результатов, поскольку статистические коэффициенты даже "чистых" золотых дериватов близки и часто полностью совпадают со статистическими коэффициентами, рассчитанными для песков других генетических типов. Не останавливаясь на критике предложенных разными авторами в разное время методик диагностики золотых песков, попытаемся разобраться в сущности этого тонкого, сложного и чрезвычайно интересного процесса.

А.В.Сидоренко [28], обобщив большой фактический материал, предложил выделять 3 крупные физико-географические зоны накопления песчаных осадков:

- 1) области преобладающей ветровой эрозии,
- 2) области промежуточные (где имеет место и мобилизация, и транспортировка, и отложение),
- 3) области преобладающей золотой аккумуляции.

Если в первой из областей накапливаются псефиты, а в последней - алевроиты, то в промежуточной области основную роль играют интересующие нас псаммиты. А.В.Сидоренко делит далее золотые образования по генезису субстрата, например, золово-

флювиогляциальные и т.д., и по их связи с субстратом. На основании последнего признака он выделяет золотые неперемещенные пески, не потерявшие связь с субстратом, и золотые перемещенные, которые эту связь потеряли.

Р. Бегнольд [26] на основании изучения крупных золотых аккумулятивных форм (прибрежно-морские дюны, сейфовые дюны и барханы пустынь) пришел к выводу о двойной природе транспортировки обломочного материала ветром. Это, во-первых, качение более грубого материала, который скапливается на гребне и в подвале аккумулятивных форм, и, во-вторых, сальтация более тонкого материала, который вместе с катящимися частицами слагает пологие склоны дюн и барханов. Естественно, что в зависимости от скорости ветра материал той или иной крупности выносится из аккумулятивных форм во взвешенном состоянии.

Нетрудно при желании подобрать среди водных песков аналоги ко всем подразделениям в классификации А.В. Сидоренко. В самом деле, область преимущественной аккумуляции золотых песков - это донные осадки конечных водоемов стока; промежуточная область - аллювиальные и прибрежно-морские осадки; наконец, область преимущественной эрозии - это водораздельно-склоновые осадки (элювий, делювий, пролювий). Способы транспортировки обломочного материала, согласно Р. Бегнольду, у золотых образований такие же, как у водных. Таким образом, у нас пока нет никаких критериев отличия тех и других песков.

Из-за разной плотности воздушной и водной сред ( $\Delta\rho \approx 1 \text{ г/см}^3$ ) нетрудно найти отличия на соответствующих графиках срывающих скоростей для частиц разного диаметра (рис. 30). Перечислим их.

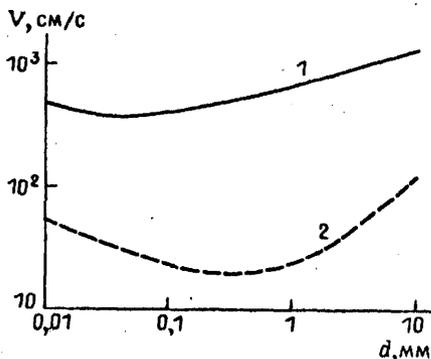


Рис. 30. Значения срывающих скоростей для частиц разного диаметра в разных средах (по [5]).

1 - в воздухе, по Бегнольду, 2 - в воде, по Хольстрему.

Перечислим их. Ссылаясь на соответствующие графики срывающих скоростей для частиц разного диаметра (рис. 30).

1. Для мобилизации соответствующих по размеру частиц скорости потоков отличаются на порядок и более (при глубине водного потока  $\sim 1$  м). С увеличением глубины водного потока отличие в скорости будет еще большим.

2. В воздушной среде минимальные срывающие скорости отвечают частицам меньшего диаметра ( $\sim 50$  мкм), чем в водной ( $\sim 300$  мкм).

3. Для водных песков изменение в скорости потока сказывается меньше, в меньшем диапазоне размеров транспортирующихся частиц (кривая достаточно крутая) по сравнению с эоловыми песками (кривая более пологая).

Первое отличие использовать в генетических целях нельзя, так как скорости ветра в природе также могут на порядок и более отличаться от скоростей водных потоков. Второе отличие сказывается весьма существенно на транспортировке частиц. Если для водных песков, как отмечалось выше, частицы  $< 100$  мкм транспортируются только во взвеси, то для эоловых осадков соответствующая граница (нижняя размерная граница частиц, перемещающихся путем сальтации) уходит в область алевритовой размерности —  $< 50$  мкм. На это косвенно указывает и тот факт, что нижняя граница окатывания зерен в субэральных условиях соответствует 50 мкм [23], а мода алевритового распределения у лессов и лессовидных суглинков чаще всего колеблется около 30 мкм. Следствием является исчезновение у эоловых песков дефицита частиц в области 100 мкм, ибо для песчаной размерности у них нет транзитной фракции\*\*.

По мнению автора, в наибольшей степени на транспортировке сказывается третье отличие. Так как незначительное изменение в скорости ветра резко увеличивает размерный диапазон мобилизованных частиц, то распределения, соответствующие сальтации и качению (и взвеси тоже), у эоловых песков будут существенно удалены друг от друга по шкале размерности по сравнению с водными песками той же структурной группы и крупности.

---

\* Вероятно, скорости движения частиц в субэральных условиях совершенно недостаточны для эффективного аэродинамического захвата более мелких частиц при отложении более крупных.

В итоге это может привести, и как будет показано дальше – приводит, к пространственному обособлению транспортирующихся различными способами частиц.

Наиболее полная золовая переработка материала осуществляется в аридных зонах (пустыни и полупустыни), менее полная – в нивальных и весьма слабая – в гумидных. Однако первые ее этапы одинаковы во всех зонах и сводятся к выносу во взвешенном состоянии тонкого материала и нередко – к ухудшению сортировки. Подобная картина наблюдалась нами на пляже Нарвского залива, Г.Мэсоном и Р.Фолком на пляже барьерного о-ва Мустанг в Мексиканском заливе [36]. Ухудшение сортировки здесь объясняется смешением достаточно хорошо дифференцированного по профилю пляжа материала. То же отмечал В.К.Климавичене при изучении поверхностных озерно-ледниковых и флювиогляциальных песков Литвы и их золовых аналогов – вынос тонкого материала, а иногда и ухудшение сортировки. Если донные (озерно-ледниковые) пески имели дефицит частиц около 100 мкм (например, шимонские пески), то у их золовых вариантов этот дефицит исчезает (рис. 31).

Сразу же оговоримся, что подобные результаты получаются при валовом опробовании, пусть даже весьма тонкого олоя (< 1 см). Доглас утверждал, что при изучении гранулометрического состава прибрежно-морских дон по его методике можно судить о их генезисе только в том случае, если опробуются тончайшие слои разного состава.

Интереснейший фактический материал, собранный Гаррисом [29] в зоне Суэцкого канала, позволяет подробно рассмотреть все особенности как начальной, так и зрелой стадии золового процесса, несмотря на низкое качество гранулометрических анализов

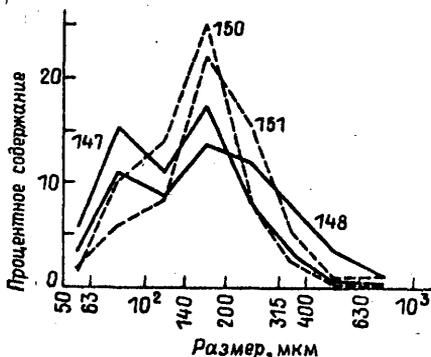


Рис. 31. ЭПР шимонских (северо-восточная Литва) озерно-ледниковых песков (сплошная линия) и их современных золовых аналогов (штриховые) (по [8]).

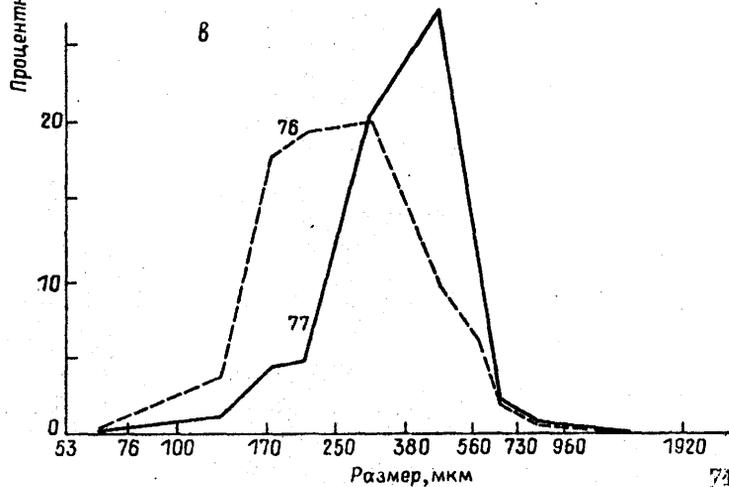
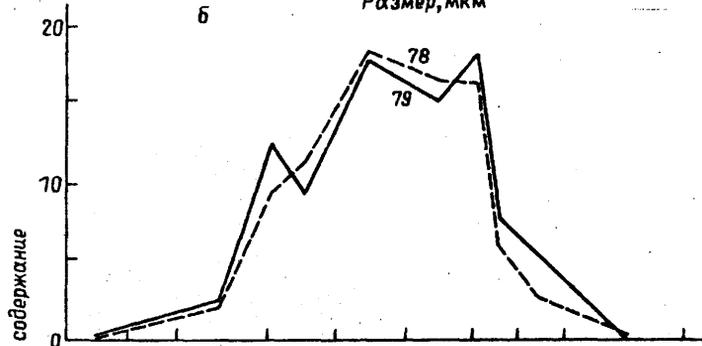
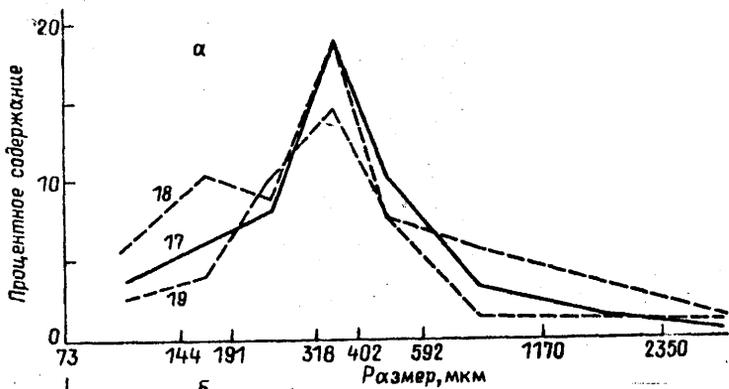
(использованы разные наборы сит с непостоянным модулем). В районе дельты Нила, которая представляет собой площадь активной эрозии плиоценовых дельтовых песков, есть все переходные разности (рис. 32) от чистых дельтовых песков (обр. 17 - 19) до чистых золowych (обр. 76, 77). Образец 17 взят из ненарушенного дельтового песка с глубины 50 см, обр. 19 - из типичного дельтового песка с глубины 30-45 см, а обр. 18 - со всего интервала 0-50 см. Исходные пески среднезернистые, без субраспределения взвешенных частиц (из-за весьма несовершенного набора сит), их ЭПР одновершинны. Двувершинность ЭПР обр. 18 скорее всего связана с бороздовым опробованием вкрест слоистости разноструктурных, в том числе, вероятно, и золowych песков.

Начальная стадия перевеивания (обр. 78 и 79 взяты соответственно из куч у основания кабельной катушки и вокруг растения) проявляется в "растаскивании" исходного распределения на 2 части: кроме унаследованной моды появляется мода, связанная с сальтацией (170-180 мкм), и мода, отвечающая качению (560-600 мкм). При этом резко уменьшилось количество тонкого материала (<100 мкм) и ухудшилась сортировка. Пески перемещенные или перевеивные (обр. 76 и 77 взяты соответственно из куч вокруг растения и у ключей проволоки), потерявшие пространственную связь с исходным субстратом, одновершинны. Транспортировка их осуществлялась, по-видимому, и сальтацией, и качением, однако у ключей проволоки отложился более крупный, менее подвижный катящийся материал. Сортировка золowego перемещенного материала на первых этапах (обр. 76) значительно хуже, чем у непереивенных (обр. 77). В области преимущественной ветровой эрозии, таким образом, только более

---

Рис. 32. ЭПР песков из района дельты Нила (по [29]).

$\alpha$  - исходные дельтовые,  $\beta$  - начальной стадии перевеивания,  $\delta$  - перевеивные.



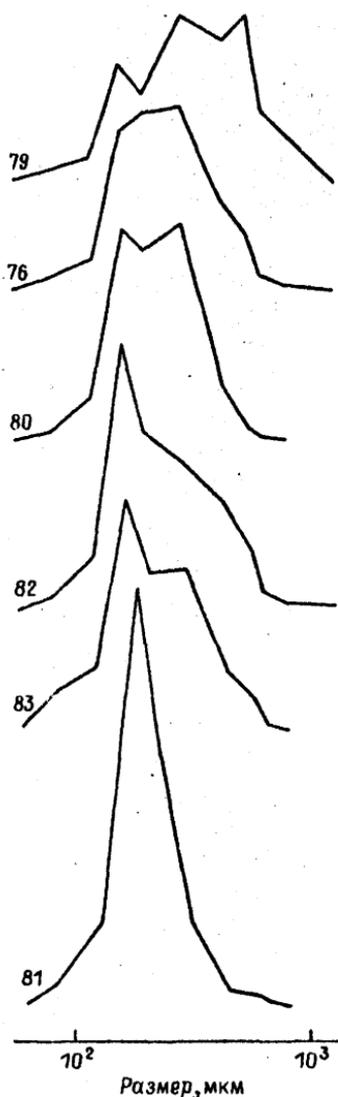


Рис. 33. Изменение структуры золотого перемещенного песка в процессе транспортировки.

грубый, наименее подвижный (остаточный) транспортирующийся качеством материал приобретает характерную и законченную структуру.

К югу от линии Тельль-эль-Кебир - Исмаилия Гаррис выделяет зону транзитной транспортировки. Здесь развиты сейфовые дюны. Эрозия и аккумуляция непрерывно сменяют друг друга. Золотая дифференциация вещества проявляется в полной мере. Образец 80, взятый с наветренной стороны сейфовой дюны, представляет собой двувершинное распределение (сальтации + качение), причем распределение очень близкое к этому имел и обр. 76 перемещенного песка. Однако если у последнего дефицита еще нет, то у обр. 80 он уже четко проявлен. На гребне дюны и в подвале (обр. 6 и 11) грубозернистая часть распределения обр. 80 в достаточной степени обособилась. Одновершинные, с положительной асимметрией распределения этих образцов обязаны качению - резко доминирующему, согласно Бегнольду, способу транспортировки для соответствующих участков профиля дюны.

Обособление тонкого материала, транспортирующегося главным образом путем сальтации, происходит на значительном удалении от области эрозии. Наглядное представление

об этом процессе дает подборка анализов песков, по-разному удаленных от эродлируемых отложений дельты Нила. Эти образцы (рис.33) выстраиваются по удаленности в такой ряд: 79 и 76 (район дельты Нила); 80, 82, 83 и 81 (район транзитной транспортировки). Обр. 82, 83 и 81 взяты из куч вокруг и около мелких препятствий, на расстоянии от гряды Нефши соответственно 7, 8 и 17 миль, а обр. 80 - на расстоянии 1 мили от этой гряды. Анализ данной серии образцов показывает, как в процессе транспортировки происходит "растаскивание" распределения на две части. Обособление грубого катящегося материала продолжается непрерывно на всех этапах (обр. 77), а более мелкого, более подвижного (сальтация) - весьма постепенно по мере "очищения" от более грубого, по мере удаления от исходного материнского субстрата.

Таким образом, можно выделить два типа золотых песков. Первый тип - это "остаточный" песок с одновершинным распределением и модой, резко сдвинутой в сторону грубых фракций - положительная асимметрия. В зависимости от размера моды "хвост" тонких фракций, которые есть всегда, имеет ту или иную длину. Чем ближе к материнскому субстрату, тем грубее песок и тем длиннее этот "хвост". Второй тип - это "перемещенный" песок. Распределение у зрелых дериватов симметричное или слегка асимметричное - отрицательная асимметрия, а мода чаще всего лежит в пределах 100-200 мкм. Сортировка может быть такой же хорошей, как и прибрежно-морских песков. Впервые на отмеченные выше закономерности структурной перестройки вещества в общих чертах указал А.В.Сидоренко [17] на примере золотых песков Кара-Кумов (рис.34). Следует еще раз подчеркнуть, что исчезновение у золотых дериватов дефицита частиц вблизи 100 мкм (на рис.34 это дефицит фракции 75-100 мкм), который есть у всех аллювиальных и многих донных песков, - явление закономерное, связанное с отсутствием у них транзитной фракции песчаной размерности.

В.Г.Чистяков, изучая золотую рябь на пляже Нарвского залива, отметил структурную дифференциацию обломочного вещества относительно профиля валика ряби [21]. Оказалось, что она несколько иная, чем у крупных золотых аккумулятивных форм. В

пределах золowych микроформ не происходит полного пространственного обособления материала, транспортирующегося разными способами. Имеет место лишь обогащение более грубым катящимся материалом гребней валиков, что приводит к возникновению бимодальных структур (сальтация + качение). В пространстве между гребнями валиков концентрируется тонкий материал, перемещавшийся путем сальтации – одновершинное распределение. Это исследование показывает, каким материалом слагаются тончайшие слои у многих прибрежно-морских дон. Конечно, на гребне дон и в подвале может происходить и происходит концентрация более грубого материала. Однако, учитывая незначительное, в общем случае, перемещение прибрежно-морских дон (особенно в гумидных зонах), микродифференциация в пределах золowych микроформ может стать основным фактором в формировании структур

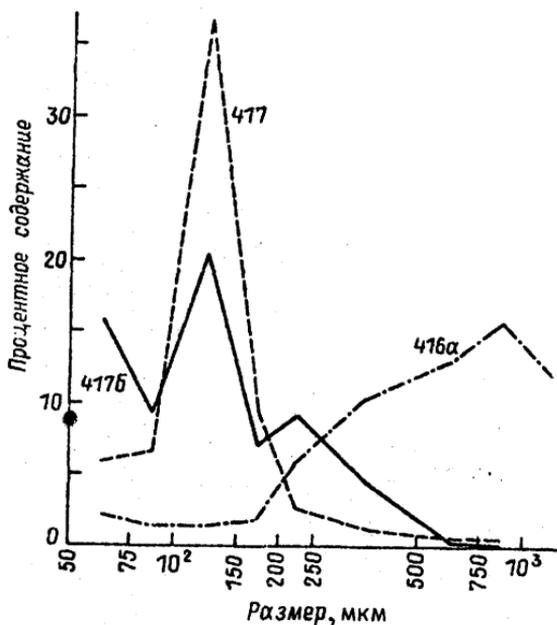


Рис. 34. ЭПР песков из Кара-Кумов (по [17]).  
4176 – исходный аллювиальный, 417 – золочый перемещенный, 416а – золочый непере-  
мещенный.

осадков дон. Учитывая особенности захоронения эоловых аккумулятивных форм, мы вправе ожидать, что эоловая дифференциация обломочного вещества проявится тем отчетливее, чем больше мощность ископаемых косых серий. Даже при валовом опробовании подошвы и кровли косослойчатых серий, как показывает коллекция гранулометрических анализов В.Н.Шванова (рис.35), можно обнаружить свойственные эоловому процессу закономерности.

Итак, пески "остаточные" и "перемещенные" на рис.35 отчетливо видны. Но самое главное то, что вся совокупность ЭПР обнаруживает "разбегание" по шкале размерности наиболее чистых эоловых дериватов. В данной серии наиболее симметричные и, вероятно, наиболее устойчивые ЭПР характерны для перемещенных одновершинных песков с модой 100-140 мкм. Все остаточные пески и наиболее хорошо сортированные перемещенные имеют тем большую асимметрию (положительную для первых и отрицательную для вторых), чем больше они различаются по крупности. Указанные закономерности не оставляют сомнений относительно фациальной принадлежности рассматриваемых песков.

В случае небольшой мощности ископаемых эоловых косослойчатых серий чаще всего по валовым пробам не удается от-

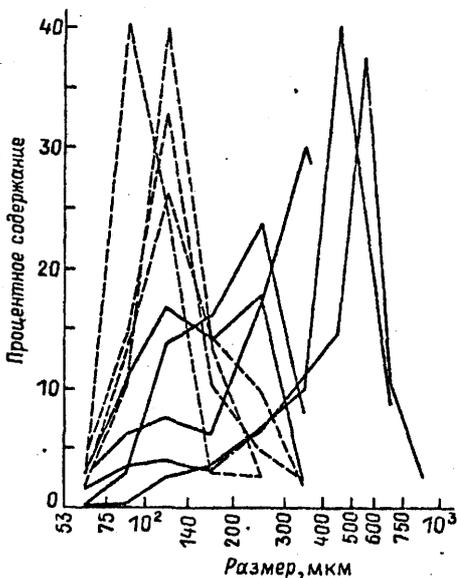


Рис.35. Выборочные ЭПР эоловых косослойчатых песков (штриховая линия — из кровли серий, сплошная — из подошвы серий) из неогеновых отложений Таджикской депрессии. По мере уменьшения крупности осуществляется переход от неперемещенных к перемещенным пескам.

лчить их от прибрежно-морских осадков. Например, С.Гаррис [29] приводит несколько гранулометрических анализов золотых песков из ископаемых (девонских?) косослойчатых серий около Бридж-норта (Англия). Эти хорошо сортированные мелко-среднезернистые пески (мода 250-300 мкм) почти без примеси тонкозернистого материала (<100 мкм), на наш взгляд, с одинаковым успехом идентифицируются и как золотые перемещенные, и как прибрежно-морские. Подобных примеров можно привести много. Учитывая разнообразие форм ЭПР золотых образований, вряд ли можно рассчитывать на их диагностику с помощью статистических параметров.

В заключение этого раздела кратко подведем итоги:

1. Золотая дифференциация вещества проявляется совершенно одинаково по любому субстрату и сводится к непрерывному обособлению (отставанию) более грубозернистого материала при его транспортировке. Это отставание проявляется в региональном плане - при переходе от области преимущественной ветровой эрозии к области преимущественной ветровой аккумуляции. Это же отставание или пространственное обособление грубозернистого материала можно проследить при изучении как золотых макроформ (дюны, гряды, барханы), так и микроформ (золотая рябь).

2. Для золотых дифференциатов зрелой стадии перевевания характерна одна специфическая структурная разновидность, которая не встречается более ни в каких других фациальных зонах. Это одновершинные, положительно асимметричные средне- и более грубозернистые пески, которые всегда тесно ассоциируют с одновершинными мелкозернистыми. Тем не менее, уверенная диагностика золотых образований часто весьма затруднительна. Ведь эту специфическую структурную разновидность не всегда просто обнаружить среди проб (и при этом - обязательно дробным гранулометрическим анализом). Если же для грубых дифференциатов (см., например, рис.35) свойственна бимодальная структура (а это, к сожалению, бывает часто), то ее уже можно идентифицировать и как золотую и как пляжевую.

3. Уверенная однозначная диагностика золотых образований может быть осуществлена только при сопоставлении серии неодинаковых по круности ЭПР, для получения которой необходимо тщательное опробование всех без исключения разновидностей. По этой серии устанавливается отмеченная ранее (п.1) направленность структурной трансформации обломочного вещества.

## Г л а в а I

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИНАМИЧЕСКИХ ТИПОВ ЭПР ПЕСКОВ И УКАЗАНИЯ ПО МЕТОДИКЕ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

I. Элювиально-делювиальные осадки, "неперемещенные" вулканогенные и моренные осадки. Все они представляют собой продукты механического дробления. Транспортировка отсутствует или крайне незначительна.

Диагностика. Распределение одновершинное, отвечающее закону Росина. Часто оно открыто в грубозернистой части, иногда осложнено дефицитами. Левая (тонкозернистая) ветвь в двойном логарифмическом масштабе - прямая линия.

II. Делювиально-пролювиальные осадки, "перемещенные" моренные осадки. Транспортировка незначительна, осуществляется опорадически водными или грязевыми потоками, льдом. Отложение материала нестационарное.

Диагностика. Распределение многовершинное с примерно одинаковым объемом каждого из субраспределений, почти всегда открытое и в тонко- и в грубозернистой части. Статистическое понятие сортировки для этого структурного типа теряет смысл. Осадки потоков повышенной плотности (грязевые потоки) характеризуются разубоженностью гравийно-песчаного материала глинисто-алевритовым, а тиллы - наличием окатанных валунов и глыб.

III. Стрежневые аллювиальные пески. Формируются в сильно турбулентном однонаправленном водном потоке. Транспортировка может быть значительной и осуществляется разными способами, отложение материала нестационарное.

Диагностика. Распределение сложное, как минимум трехвершинное, чаще многовершинное, почти всегда открытое в грубозернистой части. Осадки этого типа среди аллювиальных наиболее плохо сортированы. При сопоставлении серии однотипных ЭПР по мере увеличения их грубозернистости выясняется, что часть распределения меньше 100 мм остается неизменной, зато в рас-

пределении материала более 100 мкм наблюдается непрерывное смещение мод субраспределений, отвечающих сальтации и качению, в область мелких частиц и возникновение новых на месте переместившихся. Эмпирические полигоны распределения этого типа всегда тесно ассоциируют с нижеописанными.

IV. Аллювиальные русловые пески, в том числе - грядовые. Морские (оверные) пески постоянных и сильных придонных течений. Пески формируются в умеренно турбулентном однонаправленном водном потоке. Транспортировка чаще всего значительная и осуществляется разными способами (взвесь, сальтация, реж - качение), отложение материала стационарное или квазистационарное.

Диагностика. Распределение чрезвычайно специфичное, чаще всего двухвершинное, реже - трехвершинное. Имеется дефицит частиц около 100 мкм, отделяющий в бимодальных распределениях частицы, перемещавшиеся сальтацией, от гидравлически захваченных ими взвешенных частиц менее 100 мкм. Объем распределения взвешенных частиц жестко связан с медианой всего распределения. Основной объем приходится на распределение частиц, перемещавшихся сальтацией, оно всегда характеризуется положительной асимметрией, тем большей, чем грубее осадок, и размерностью моды от 100 до 600 мкм (чаще всего от 160 до 500 мкм). Распределение этого типа почти всегда имеет длинный "хвост" грубых фракций, который нередко трансформируется в самостоятельное распределение, отвечающее частицам, перемещавшимся качением.

V. Прибрежно-морские пески пляжа и подводных аккумулятивных форм. Пески формируются в пределах волнового поля. Транспортировка значительна, а ее способы периодически меняются. Режим отложения материала стационарный или квазистационарный. Могут быть четко выделены 2 подтипа:

**К-А:** пески на подводном береговом склоне - находится под одинаковым воздействием прямого и обратного волновых потоков.

**К-Б:** пески пляжа, связанные с зоной заплеска, - находятся под воздействием резко различных по скорости волновых потоков, прямого и обратного.

Диагностика. Общим и наиболее характерным признаком прибрежно-морских песков является резкий дефицит частиц <100 мкм,

выносимых в море. Частными признаками можно считать:

У-А: наиболее хорошо сортированные пески. Распределение одновершинное, в целом симметричное; в ливных морях может слегка расщепляться (мористее литорали). Мода всегда  $>100$  мкм и, вероятно, может уходить в область гравийной размерности у приглубых берегов. Отличаются от аллювиальных песков (IV тип) прежде всего отсутствием субраспределения взвешенных частиц, лучшей сортировкой и симметричностью распределения, от эоловых песков — отсутствием у грубозернистых разностей резкой положительной асимметрии.

У-Б: для песчаного распределения типична бимодальность образцов из нижней части зоны заплеска у отмелых берегов. Бимодальность свойственна также всем пескам пляжа приглубых берегов. Таким образом, у отмелых берегов, сложенных более тонкими наносами, чередуются пески одно- и двувершинные. Одновершинные пески практически идентичны подтипу У-А. По бимодальности и дефициту тонкозернистого песка пески пляжа легко отличимы от всех других. По соотношению объемов тонкого и более грубого распределений можно судить о профиле пляжа. На вогнутом пляже — больше объем первого, на выпуклом — второго.

VI. Пески речных пойм и морские (озерные) пески области слабой волновой переработки (поле волнения и течения). Пески формируются в слаботурбулентном однонаправленном потоке. Транспортировка осуществляется во взвешенном состоянии на небольшие расстояния. Отложение тонко- и мелкозернистого материала стационарное (подтип VI-A), спорадически нарушаемое сильными придонными течениями, которые могут во взвеси поставлять более грубый песок. Отложение последнего нестационарное. Подтип VI-A в чистом виде отвечает области слабых постоянных морских течений. В отложениях пойм рек и областей волновой переработки пески обоих подтипов тесно ассоциируют.

Диагностика. VI-A: одновершинные в пределах песчаной размерности распределения, мода всегда  $<100$  мкм, очень хорошо сортированные (сортировка как у подтипа У-А). Из-за большого количества алеврита распределение часто открыто в тонкозернистой части. Пески и песчаные алевриты этого подтипа мало информативны, так как встречаются почти во всех типах субак-

вальных отложений. Вероятно, близкое к ним распределение имеют зернистые части лессов и лессовидных суглинков.

УП-Б: распределение в целом одновершинное, однако около 100 мкм очень часто намечается дефицит частиц; мода всегда >100 мкм; асимметрия обычно положительная; "хвост" грубых фракций как правило отсутствует. Наиболее характерным признаком является почти линейная (прямая) зависимость между медианой и стандартным отклонением. В целом сортировка песков этого подтипа, обычно называемых в гранулометрии "донными песками", несравненно хуже, чем у прибрежно-морских песков, но может быть близкой к пескам аллювиальным (IY тип).

УП. Эоловые пески. Пески формируются в субаэральных условиях по субстрату любого генезиса. Транспортировка осуществляется главным образом сальтацией и качением. Режим отложения квазистационарный с непрерывным обособлением более грубого - катящегося материала. Тонкий и мелкий материал во взвешенном состоянии частично или полностью выносится за пределы "области ветровой эрозии, перевевания и аккумуляции", где собственно и образуются эоловые песчаные осадки. Для областей "преобладающей ветровой эрозии", так же как и "ветровой аккумуляции", песчаные осадки не характерны. Процесс сводится к дифференциации исходного распределения обломочного материала на две части: УП-А - песчаную мелкозернистую, с оптимальной модой 100-200 мкм и УП-Б - песчано-гравийную. Первая из них соответствует частицам, перемешавшимся сальтацией, реже - во взвеси (чаще всего этот дифференциат формирует так называемые "перемещенные" пески и скапливается у подножия пологих склонов дон и барханов), а вторая часть распределения, более грубозернистая (подтип УП-Б), отвечает транспортировке преимущественно путем качения (чаще всего ею обогащены так называемые "неперемещенные" пески, концентрирующиеся на гребнях и крутых склонах дон и барханов). Во время песчаных бурь во взвешенное состояние могут перейти пески обоих дифференциатов; кратко-временно будут формироваться структуры, вероятно, близкие к подтипу УП-Б, однако как только разрушение эоловых аккумулятивных форм прекращается, процесс смешения снова сменяется эоловой дифференциацией.

Диагностика. УП-А: кривые распределения золотых переменных песков зрелой стадии перевезания практически идентичны кривым подтипа У-А.

УП-Б: кривые распределения золотых неперемещенных, остаточных песков зрелой стадии перевезания, в отличие от аллювия, характеризуются одновершинностью, очень резко выраженной положительной асимметрией; мода обычно  $>500$  мкм, "хвост" грубых фракций отсутствует.

Так как пески подтипов УП-А и УП-Б всегда встречаются вместе, то золотые дифференциаты зрелой стадии перевезания легко отличимы от других генетических типов песков. Однако, если процесс перевезания ослаблен (например, в гумидных зонах), то его может выявить лишь кропотливое сопоставление серий кривых распределения, полученных по массовым пробам.

## ОПРЕДЕЛИТЕЛЬ ОСНОВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ТИПОВ ПЕСКОВ

Для диагностики основных динамических типов песков необходимо построение их ЭПР в логарифмически-линейном масштабе (по оси абсцисс - конечные размеры фракций в логарифмическом масштабе, по оси ординат - весовые проценты в арифметическом масштабе) по данным дробного гранулометрического анализа. Схема рассчитана прежде всего на анализы, выполненные на ситах с модулем  $\sqrt[10]{10}$  или же  $\sqrt[4]{2}$ . Если конечные размеры фракции связаны модулем  $\sqrt{2}$ , то использование таких анализов (или дробных анализов, не связанных каким-либо модулем) для выделения основных динамических типов песков по предлагаемой схеме требует ряда дополнительных процедур, о которых говорилось выше, для приведения их к шкале  $\gamma$ . Процедура определения динамических типов многоступенчатая, предусматривающая последовательное введение дополнительных признаков на каждой ступени. Минимальное количество ступеней для определения динамических типов - 2, максимальное - 5.

- |   |   |
|---|---|
| 1а. Пески одновершинные . . . . .                       | 2 |
| 1б. Пески двух- или многовершинные . . . . .            | 7 |
| 2а. Мода >100 мкм . . . . .                             | 3 |
| 2б. Мода <100 мкм. Подтип У1-А - фоновый материал поймы |   |

равнинных рек, приустьевых участков конечных водоемов стока (особенно в заливах и бухтах), верхней части шельфа (подводный береговой склон мористее зоны подводных макроформ).

- |   |   |
|---|---|
| 3а. Распределение симметричное или слегка ("+" или "-") асимметричное . . . . . | 4 |
|---|---|

- |   |   |
|---|---|
| 3б. Распределение резко "+"-асимметричное . . . . . | 5 |
|---|---|

4а. Алевритовых (<50 мкм) частиц нет или очень мало. Подтип У-А - пески пляжа и верхней части подводного берегового склона (зона подводных макроформ), ассоциируют с бимодальными безалевритовыми песками подтипа У-Б. Могут быть встречены также на прирусловой отмели (речном пляже) крупных равнинных рек.

В этом случае всегда ассоциируют с бимодальными русловыми песками (тип ДУ). Подтип УП-А - эоловые "перемещенные" пески зрелой стадии перевеивания. Мода, как правило, имеет размерность 100-200 мкм. Этот подтип отличается от предыдущего только по ассоциации с одновершинными положительно асимметричными песками подтипа УП-Б (эоловые "неперемещенные" или остаточные пески).

4б. Алевритовых частиц много (обычно >10%). Разновидность подтипа УП-Б, встречается чаще всего в пределах зоны слабой волновой переработки мористее подводных макроформ (конечные водоемы стока разных типов) и характеризуется симметричностью распределения и отсутствием изгиба или "площадки" в интервале около 100 мкм.

5а. Тонкозернистая ветвь распределения в общем случае не отвечает логарифмической функции . . . . . 6

5б. Тонкозернистая ветвь распределения отвечает логарифмической функции (в двойном логарифмическом масштабе - прямая линия). Тип I - делювиально-элювиальные, "неперемещенные" вулканогенные и некоторые моренные отложения. Часто ассоциируют с многовершинными осадками II типа.

6а. Алевритовых частиц нет или очень мало, мода всегда >250 мкм. Подтип УП-Б - эоловые "неперемещенные" или остаточные пески зрелой стадии перевеивания.

6б. Алевритовых частиц много, мода чаще всего <250 мкм. Разновидность подтипа УП-Б, сравнительно редко встречается среди отложений поймы и зоны слабой волновой переработки конечных водоемов стока. Формирование подобных структур происходит при мгновенной разгрузке взвешенных частиц.

7а. Пески бимодальные . . . . . 8

7б. Пески полимодальные . . . . . 11

8а. Алевритовых частиц много. Мода одного субраспределения >100 мкм, а другого - <100 мкм; разделяющий их дефицит колеблется около 100 мкм . . . . . 9

8б. Алевритовых частиц нет, обе моды имеют размерность >100 мкм и разобщены\* по шкале размерности. Подтип У-Б - пески

\* Если моды у мелко- и среднезернистых песков сильно обделены (интервал между модами - 2-3 γ), то они формировались мористее литорали (подтип У-А).

пляжа, редко — межвалных желобов верхней части подводного берегового склона. У отмельных берегов на пляже они всегда ассоциируют с песками подтипа У-А.

9а. Резко преобладает объем грубозернистого субраспределения, реже — объемы двух субраспределений соизмеримы . . . . . Ю

9б. Резко преобладает объем тонкозернистого субраспределения. Разновидность подтипа УІ-А с дополнительным грубозернистым субраспределением частиц, которые перемещались путем сальтации (о фациальной приуроченности см. п.2). Эта структурная разновидность, по-видимому, возникает при трансформации ранее отложенного материала слабыми донными течениями.

Юа. Дефицит, разделяющий 2 субраспределения, четкий. Объем тонкозернистого субраспределения жестко связан с крупностью частиц (медианой) всего распределения в целом, так как определяется плотнейшей упаковкой частиц <100 мкм. Сортировка наиболее хорошая у песков с медианой 200–250 мкм, ухудшается по мере погрубения или утоньшения материала. Положительная асимметрия тем больше, чем грубее осадок. Мода основного грубозернистого субраспределения колеблется в интервале 100–500 мкм (редко — до 800 мкм). Тип ІУ — аллювиальные русловые пески, морские и озерные пески, подверженные воздействию постоянных и сильных донных течений.

Юб. Дефицит, разделяющий 2 субраспределения, чаще всего едва намечается в виде изгиба или площадки на тонкозернистой ветви ЭПР. Сортировка тем хуже, чем грубее песок. Крайне редко мода грубозернистого субраспределения превышает 250 мкм. Характерно повышенное содержание не только алевритовых, но и глинистых частиц. Подтип УІ-Б — пески являются, по- существу, плохо сортированными аналогами русловых песков. Их отложение из односторонних потоков (в отличие от русловых песков) было нестационарным, а транспортировка — кратковременной. Они часто встречаются среди осадков поймы и зоны слабой волновой переработки конечных водоемов стока. По нашим данным, пески структурного подтипа УІ-Б наиболее широко распространены как среди современных, так и среди ископаемых осадков.

Юв. Резко преобладает объем какого-либо одного субраспределения . . . . . Ю

- 11б. Объемы всех субраспределений соизмеримы ..... 14
- 12а. Размерность моды основного субраспределения  
>100 мкм ..... 13
- 12б. Размерность моды основного субраспределения <100 мкм.  
Разновидность подтипа У1-А - грубозернистый полимодальный  
"хвост" распределения сингенетичен с фоновым тонкозерни-  
стым материалом (основное субраспределение) в том случае,  
если в серии образцов размерность мод грубозернистых субрас-  
пределений, объем которых обычно очень мал, остается постоян-  
ной. Если же размерность мод меняется, значит, отложение гру-  
бозернистого материала было разобщено во времени с тонкозер-  
нистым (эоловый или ледовый разнос) или же структура грубо-  
зернистых субраспределений обязана позднейшей переработке, на-  
пример, слабыми придонными течениями.
- 13а. Все особенности распределения соответствуют типу ЛУ  
за исключением того, что на грубозернистом конце появляется  
еще одно субраспределение\*, отвечающее качению частиц. Раз-  
новидность типа ЛУ - такие структуры характерны для тех рус-  
ловых песков, у которых мода основного субраспределения (от-  
вечающего сальтирующим частицам) >250 мкм.
- 13б. Все особенности распределения соответствуют подтипу  
У1-Б, но на грубозернистом конце появляется еще одно субрас-  
пределение, отвечающее качению частиц. Разновидность подтипа  
У1-Б - встречается сравнительно редко и чаще всего овязана,  
по-видимому, с трансформацией осадка слабыми придонными те-  
чениями после его отложения.
- 14а. Содержание глинисто-алевритовых частиц высокое 15
- 14б. Глинисто-алевритовых частиц нет. Разновидность под-  
типа У-Б - структура характерна для грубых гравийных и галеч-  
но-гравийных пляжевых песков. Распределение чаще всего трех-  
вершинное, причем моды сильно сближены по шкале размерности.

---

\* Если моды отвечающих сальтирам и качению субраспреде-  
лений достаточно разобщены по шкале размерности (интервал  
между ними  $\geq 7\tau$ ), то такие структуры были сформированы на  
рядовых участках рек. При этом объемы обоих субраспределений  
могут варьировать в широких пределах, а мода наиболее грубого  
субраспределения всегда имеет гравийную (или галечно-гравий-  
ную) размерность.

15а. При сравнении серии ЭПР по мере увеличения грубо-зернистости наблюдается закономерное смещение отдельных суб-распределений по шкале размерности в сторону тонкозернистых частиц. Характерна ассоциация с типами IV, реже - VI. Тип III - стрележовые аллювиальные пески.

15б. При сравнении серии ЭПР по мере увеличения грубо-зернистости не наблюдается каких-либо закономерностей в изменении их структуры. Иногда наблюдается ассоциация с типом I. Тип II - делювиально-пролювиальные и некоторые моренные отложения. Возможно, большая часть турбидитов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Своей основной задачей автор ставил выработку критериев для выделения и распознавания основных генетических типов песчаных отложений – современных и древних. В качестве опособа для достижения этой цели был выбран анализ эмпирических полигонов распределения (ЭПР) по весу зерен. ЭПР по весу полностью отображает структуру осадка, в отличие от данных косвенного счета или методов гранулометрических коэффициентов, при которых теряется часть информации; ЭПР также более наглядны по сравнению с любыми разновидностями кумулятивных кривых. Громоздкость построений большого количества индивидуальных ЭПР можно преодолеть, вычерчивая их один под другим, как это делают при изображении термических анализов или дифрактограмм. Можно также объединять серии одинаковых ЭПР, выбрать из них типовые и оперировать ими – изображать только последние с обозначением того, какое количество индивидуальных ЭПР они представляют.

Исследование гранулометрического состава пачки или толщи пород с целью выяснения ее генезиса должно вестись по серии образцов, представляющих все ее структурные (и текстурные) элементы. Полное гранулометрическое исследование включает: опробование, гранулометрический анализ, идентифицирование каждого образца для установления возможного динамического типа осадка и анализ серии образцов для определения генетической принадлежности отложений, которые они представляют. Отбор каждой пробы необходимо производить в максимально узком интервале, лучше всего по методике Ю.Паапа [12] – по бороздам в подошве, середине и кровле пласта параллельно напластованию или слоевому шву при минимально возможной ширине борозд. В циклически построенных толщах, очевидно, должны быть опробованы все члены элементарных циклитов, в ациклических толщах – все структурно или текстурно различающиеся разновидности пород и

осадков. При исследовании современных осадков опробование ведется в соответствии с поставленными задачами, по возможности с охватом всех основных микроформ рельефа.

Поскольку в генетических целях могут быть использованы только дробные гранулометрические анализы, следует стандартизировать методику гранулометрического анализа в самом широком масштабе, выбрав для этого шкалу  $I/4 \phi$  или шкалу  $\gamma$ . В соответствии со складывающимися в нашей стране традициями и техническими возможностями предпочтение следует отдать шкале  $\gamma$ . Поскольку всякого рода экстраполяции — приведение нестандартных ситовых анализов к шкале  $\gamma$  — сопровождаются допущениями и различной величины погрешностями, шкала  $\gamma$  должна явиться основой гранулометрического анализа с самого начала выполнения механического анализа, проводимого с помощью соответствующих сит или любыми другими способами.

Об идентификации индивидуальных ЭП достаточно много говорилось выше. Подчеркнем, что в силу конвергенции гранулометрических признаков анализ отдельных ЭП показывает лишь возможность отнесения осадка к тому иному динамическому, а тем более генетическому типу. Определение динамики среды, а в дальнейшем и генетической, физико-географической обстановки возможно после анализа серий ЭП. Так, при анализе циклически построенной толщи в пределах предполагаемого аллювиального цикла могут быть встречены ЭП типов III, IV, подтипов VI-A, VII-B и плохо диагностируемые мелкоземы, которые, будучи выстроены в один ряд, могут идентифицироваться как отложения соответственно стрежневой зоны, грядовой зоны, поймы, старицы и водораздельно-склоновые, действительно характерные для аллювиального цикла равнинных рек.

В толще однородных косослойчатых песков могут быть встречены пески, характеризующиеся принадлежностью их ЭП к подтипам VII-B, VII-A, V-A, которые, будучи расположены в порядке от подошвы к кровле косых серий, могут определяться соответственно как непеременные и переменные пески областей эоловой аккумуляции.

Материал по гранулометрии песков, содержащийся в литературе, поистине огромен. Однако в большинстве своем он не может быть эффективно использован ни при решении региональных

вопросов, ни для выработки общей теории терригенного осадко-накопления как естественного процесса взаимодействия среда — осадок. Эффективное использование гранулометрических данных станет возможным, когда будет достигнута какая-то договоренность в выборе и унификации гранулометрических шкал, способов изображения результатов анализа и их интерпретации. В идеале следует стремиться к созданию атласов-определителей динамических типов, фаций и фациальных рядов по наборам гранулометрических характеристик, подобно существующим справочникам-сборникам термограмм, дифрактограмм и др. Представляется, что атлас ЭПР зернистых пород явился бы самым лучшим справочником для генетической интерпретации гранулометрических данных будущих исследований.

## УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аллувий / Под ред. Б.С.Лунева. Пермь, 1967. Вып.1.
2. Батурин В.П. Палеогеографический анализ геологического прошлого по терригенным компонентам. М., 1947.
3. Гроссгейм В.А., Рожков Г.Ф. Основные вопросы гранулометрии в геологии // Литология и полезные ископаемые. 1971. № 5.
4. Долотов Ю.С., Шадрин И.Ф., Юркевич М.Г. О динамике рельефа подводного берегового склона, сложенного ракушечным материалом // Новые исследования береговых процессов. М., 1962.
5. Звонков В.В. Водная и ветровая эрозия Земли. М., 1962.
6. Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. М., 1970.
7. Кленова М.В. Геология Баренцева моря. М., 1960.
8. Климавичене В.К. Сравнительная литологическая характеристика основных генетических типов поверхностных четвертичных песков Литвы // Труды АН ЛитССР. Сер.Б. 1964. № 4(39).
9. Котельников Б.Н. О причинах полимодальности распределений по размеру зерен у песков и песчаных осадков разного генезиса // Тезисы докл. на II совещ. молодых ученых Ленинграда. Л., 1973.
10. Кулямин Л.Н. Литология оболочной толщи западной части Ленинградской области и Эстонии: Автореф. канд. дис. Л., 1970.
11. Логвиненко Н.В. О распределении обломочного материала по размеру и удельному весу в береговой зоне моря // Докл. АН СССР. 1969. Т. 189, № 4.
- 12-13. Паап Ю. Колебания литолого-минералогического состава песчанников левона Эстонии на фоне косослойчатой текстуры // Учен. зап. Тартуского ун-та. 1965. Вып. 168.
14. Рухин Л.Б. Гранулометрический метод анализа песков. Л., 1947.
15. Рухин Л.Б. Основы литологии. Л., 1969.
16. Рухина Е.В. Литология моренных отложений. Л., 1960.
17. Сидоренко А.В. Золовая дифференциация вещества в пустыне // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1956. № 3.
18. Сидоренко А.В. Литология и генетическая классификация золотых отложений // Матер. конф. по генезису и литологии четверт. отлож. Минск, 1961.
19. Страхов Н.М. Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли. М., 1963.
20. Хуан У.Т. Петрология. М., 1965.
21. Чистяков В.Г. Об золотой дифференциации обломочного материала в зоне пляжа // Докл. АН СССР. 1972. Т. 204, № 3.
22. Шамов Г.И. Речные наносы. М., 1954.
23. Шванов В.Н. Песчаные породы и методы их изучения. Л., 1969.

24. Шванов В.Н. О соотношении между мощностью и гранулометрическим составом песчаных слоев во флюиде и флюиоидных толщах // Вестн. Ленингр. ун-та. 1971. № 12.
25. Шепард Ф.П. Морская геология. М., 1969.
26. Bagnold R.A. The physics of blown sand and desert dunes. London, 1941.
27. Bluck B.I. Interpretation of the results of mechanical analysis // J. Sed. petrol. 1946. Vol.16, N 1.
28. Folk R.L., Ward W.S. Brazos River bars: a study in the significance of grain size parameters // Ibid. 1957. Vol.27, N 1.
29. Harris S.A. Mechanical constitution of certain present-day egyptian dune sands // Ibid. N 4.
30. Hume J.D. Floating sand and pebbles near Barrow, Alaska // Ibid. 1964. Vol.34, N 3.
31. Inman D.L. Measures for describing the size distribution of sediments // Ibid. 1952. Vol.22, N 3.
32. Kittleman L.R. Application of Rosin's distribution in size-frequency analysis of clastic rocks // Ibid. 1964. Vol. 34, N 3.
33. Krumbein W.C. Textural and litological variations in glacial till // J. Geol. 1933. Vol.XLI, N 4.
34. Krumbein W.C. Size frequency distribution of sediments and the normal phi-curve // J.Sed. Petrol. 1938. Vol.8, N 1.
35. Krumbein W.C., Pettijohn F.J. Manual of sedimentary petrology. New-York, 1938.
36. Mason C.C., Folk R.D. Differentiation of beach, dune and eolian flat environments by size analysis // J.Sedim.Petr. 1958. Vol.28, N 2.
37. Müller G. Die rezenten sediments im golf von Neapel // Geol. Rundschau. 1958. Bd. 47, Hf. 1.
38. Otto G.H. A modified logarithmic probability graph for the interpretation of mechanical analysis of sediments // J. Sed. Petrol. 1939. Vol.9, N 2.
39. Passega R. Texture as characteristic of clastic deposition // Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol. 1957. Vol.41, N 9.
40. Passega R. Grain size representation by CM patterns as a geological tool // J. Sed. Petrol. 1964. Vol.34, N 4.
41. Ruxton B.F. Labile quartz-poor sediments from young mountain ranges in Northeast Papua // Ibid. 1970. Vol.40, N 4.
42. Trask P.D. Origin and environments of source sediments of petroleum. Houston, 1932.
43. Udden J.A. Mechanical composition of clastic sediments // Geol. Soc. Amer. Bull. 1914. Vol.25, N 3.
44. Visher G.S. Grain size distributions and depositional processes // J. Sedim. Petrol. 1969. Vol.39, N 3.
45. Wolff R.G. The dearth of certain sizes of materials in sediments // J. Sedim. Petrol. 1964. Vol.34, N 2.

## Послесловие

### РАБОТА Б.Н.КОТЕЛЬНИКОВА В СВЕТЕ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА\*

Работа Б.Н.Котельникова, основное содержание которой отражено в этой небольшой книге, была написана и защищена им в качестве кандидатской диссертации в 1974 г. В 1981 г. Бориса Николаевича не стало. Крайняя, даже излишняя осторожность в обнародовании результатов своих исследований, целый ряд трагических обстоятельств в его судьбе и ранняя смерть на 41 году жизни привели к тому, что результаты его исследований практически остались неизвестными.

Приступая к публикации работы, написанной 15 лет назад, мы осознавали опасность ее морального старения, какой бы хорошей она ни была в период создания. Оценивая работу с позиций современного состояния гранулометрического анализа, мы сочли возможным исключить из первоначального ее варианта ряд положений, которые впоследствии либо более детально разрабатывались и освещались, либо не затрагивались вовсе и остались дискуссионными, требующими более серьезного обоснования. После сокращения в работе сохранилась ее главная часть — обширный эмпирический материал, как оригинальный, так и взятый из литературных источников, обработанный по единой системе и сведенный во многие десятки эмпирических полигонов распределения (ЭПР) обломочных частиц по размерам. ЭПР увязаны с динамическими факторами обстановок осадконакопления и рассматриваются по единой схеме в последовательном генетическом ряду осадкообразующих обстановок — от водораздельно-склоновой области до мелководно-прибрежных зон озерных и морских водоемов.

Несмотря на то, что после 1974 г. проделано и опубликовано много сотен анализов и сделано множество рекомендаций и по технике, и по генетической интерпретации, и по практическому приложению Гранулометрического метода, до сегодняшнего дня не

---

\* Написано В.Н.Швановым.

потеряли значения ни фактические материалы, ни научный подход Б.Н. Котельникова к интерпретации гранулометрических данных. Пытаемся это показать.

Главной проблемой гранулометрического метода является проблема интерпретации гранулометрических анализов для понимания динамических - ландшафтно-динамических - ландшафтных обстановок современной и прошлых геологических эпох. Трудно сомневаться, что когда будет доказана практическая важность гранулометрического анализа в фашиально-динамическом плане, в том числе в связи с поисковыми задачами, и установлено, какими способами этого можно будет достигнуть, тогда же будет достигнут прогресс и в других существующих сейчас технических проблемах - унификации гранулометрических шкал, в настоящее время различных в осадочной петрографии, морской геологии, грунтоведении и других науках, необходимой подробности гранулометрических анализов, технике их выполнения, выборе способов представления результатов и др. Унификация достижима, если будет доказано преимущество той или иной шкалы, того или иного метода для понимания природы и осадка-породы и осадкообразующих сред. Поэтому остановимся на главной проблеме гранулометрии - возможностях генетической интерпретации результатов косвенного или прямого измерения распределения обломков по классам крупности.

Одним из кажущихся возможных путей установления генезиса зернистых пород по гранулометрическому составу со времен исследования Л.Б. Рухина 1937-1947 гг. был метод генетических диаграмм, при котором выбирались те или иные статистические параметры, описывающие распределение частиц по крупности, и конкретным числовым значениям выбранных параметров придавался определенный генетический смысл - в отношении динамики, среды или общих ландшафтных условий осадконакопления. Почти пятидесятилетний накопленный опыт позволяет оценить этот метод вполне однозначно.

В табл. 2 сведены результаты ревизии существующих генетических диаграмм, осуществленные В.Т. Биккениным и Г.Ф. Рожковым [1], а также данные некоторых других авторов, которые, используя песчаные осадки известного генезиса, преимущественно современные, пытались установить, в какие генетические поля они попадают на тех или иных "генетических" или "динамических" диа-

**Т а б л и ц а 2. Результаты ревизии генетических диаграмм количественными оценками**

Авторы диаграмм и методы построения	Авторы ревизионных оценок	Качественные и количественные оценки (% попадания в генетическое поле)	Оценки по количеству совпадений >75% - "+"; 75-25% - "?"; <25% - "-"
Л. Г. Рухин, 1947. Гранулометрические коэффициенты	А. В. Смирнов, Г. М. Яриков, 1969	Алловиальные ..... 18 Морские ..... 0 Поле недостоверности ..... 57 Остальные ..... 15	Алловиальные - Морские -
То же	В. Т. Бискегин, Г. В. Рожков, 1982	Речные ..... 50 Пляжевые ..... 20 Глубоводные (донные) ..... 20 Золовые ..... 5	Речные ? Пляжевые - Донные - Золовые -
Б. Саху, 1964. Гранулометрические коэффициенты	То же	Разные типы отложений - перекрытие полей Мутьевые потоки - совпадения	Мутьевые потоки + Остальные -, -, -
Б. Саху, 1964. Дискриминантные уравнения	"	Золовые ..... 90 Пляжевые ..... 65 " ..... 55 Мелководные ..... 85 Речные ..... 25 Мутьевые потоки ..... 100 Речные ..... 0	Золовые + Пляжевые - Мелководные + Речные - Мутьевые потоки +
Р. Майола, Д. Вейзер, 1968. Графические корреляции гранулометрических коэффициентов	"	Речные ..... 75-80 Пляжевые ..... 80-90 Прибрежные донные ..... 85-100 Внутриконтинентальные донные 75-100	Речные + Пляжевые + Прибрежные донные + Внутриконтинентальные донные +
Г. Фридман, 1967. Гранулометрические коэффициенты	"	Речные, пляжевые получили отображение на одной из семи диаграмм	Речные + Пляжевые +

Окончание табл.2

Авторы диаграмм и методы построения	Авторы ревизионных оценок	Качественные и количественные оценки (% попадания в генетическое поле)	Оценки по количеству совпадений >75% - "+"; 75-25% - "?"; <25% - "-"
К. Месон, Р. Фолик, 1958. Гранулометрические коэффициенты	"	По всем полям получены перекрытия данных	Все генетические типы ? или -
Р. Пассега, 1957, 1964. Квантильные значения	"	Глубоководные отложения - непротиворечие Речные осадки - непротиворечие Морские пляжи - противоречие Мелководье - неопределенность Мутьевые потоки - противоречие	Глубоководные + Речные + Морские пляжи - Мелководные ? Мутьевые потоки -
Р. Пассега, 1957, 1964. Квантильные значения	Г. Райман, А. Гуар, 1985	Пляжевые донные пески - попадание на диаграмму 15-20, вне диаграммы - 80-85	Разные генетические типы -
К. Мейсон, Р. Фолк, 1958; Г. Фридман, 1967. Гранулометрические коэффициенты	С. Омар, В. Бишора, М. Насер, 1974	Нубийские песчаники разнофациальные - результат неопределенный или противоречивый	Разные генетические типы ? или -
		Итого:	"+" - 12, "?" - 4, "-" - 14

граммах. В первой графе таблицы указаны авторы диаграмм и статистические параметры, ими использованные, во второй - авторы ревизионных оценок. В третьей графе приведено количество попаданий точек в соответствующие им по генезису поля, в процентах. В четвертой графе делается заключение о соответствии генетических полей приписываемому им содержанию: предполагается, что поле намечено правильно, если при ревизии в него попало более 75% точек образцов соответствующего генезиса, при числе попаданий 75-

25% результат признается неопределенным, при попадании в соответствующее поле 25% и менее точек – реальность существования поля отрицается. Как следует из итоговых результатов по всем генетическим диаграммам, генетических полей, не подтвержденных повторными, проделанными другими авторами наблюдениями, оказалось больше по сравнению с полями, генетический смысл которых был подтвержден (число подтверждений – 12, неопределенных результатов – 4, отрицательных – 14), и это при выбранной, безусловно, низкой 75%-ной вероятности! Можно, конечно, подойти дифференцированно к каждой из рекомендаций в надежде, что кому-то из авторов удалось найти правильное решение. Из табл. 2 видно, что наиболее удачной оказалась попытка Р. Майолы и Д. Вейзера (1963 г.), генетическая диаграмма которых получила подтверждение для всех составляющих ее полей. По-видимому, в какой-то мере можно использовать рекомендации этих авторов, хотя нетрудно видеть, что они имели дело с весьма ограниченным спектром отложений, связанных с береговой зоной. Даже диаграмма Р. Пассеги, которая традиционно наиболее оптимистично оценивается седиментологами, получила подтверждение только для половины предусмотренных ею генетических единиц. Если оценивать результаты ревизии в целом, очевидно, нельзя не признать, что методика, дающая в 40% положительный результат при вероятности 0,75, не может быть рекомендована к практическому применению.

Самые последние рекомендации, связанные с генетическими диаграммами, сделанные Г. Ф. Рожковым, не подвергались ревизии. Однако, обращаясь к его собственным материалам [5', с. 67], видим число индивидуальных анализов, попадающих в соответствующие поля на диаграмме асимметрия – эксцесс, в %: речные пески – 70, пляжевые – 70, эоловые – 55, береговые дны – 60, бассейновые и дельтовые р. Волги – 87, глубоководные водные осадки – 95, мутьевые потоки – 21. В принятых нами уровнях вероятности результат оценивается как положительный в двух случаях, неопределенный – в четырех, отрицательный – в одном. Диаграмма Г. Ф. Рожкова, имеющая в основе тысячи drobных и, насколько известно, тщательно выполненных анализов, оказалась, к сожалению, ничуть не лучше предыдущих. Из сказанного очевиден вывод, что методика генетических диаграмм, универсальных,

пригодных для общих решений, не является перспективной в литологии<sup>22</sup>. Поэтому нельзя не признать правильным решение Б.Н. Котельникова отказаться от генетических диаграмм, о чем он пишет в начале своей работы.

Представляются более реальными общие оценки, основанные не на абсолютных значениях статистических параметров, а на их относительных значениях, на тенденциях, которые могут наблюдаться в сериях образцов, представляющих ландшафт или ландшафты определенного и, по возможности, узкого временного среза, будь то современные или ископаемые отложения. Динамический смысл статистических характеристик — среднего арифметического ( $\bar{x}$ ), максимального размера ( $M$ ), стандартного отклонения ( $\sigma$ ), коэффициента вариации ( $\nu$ ), абсолютной ( $H$ ) и относительной ( $Hr$ ) энтропии, асимметрии ( $\alpha$ ) и эксцесса ( $\epsilon$ ) — подробно и хорошо описаны Г.Ф. Рожковым [5']. Например, известно, что величина  $M$  отражает максимальную энергию осадкообразующего потока; для генетических целей могут быть использованы величины  $M$ , их распределения по площади, дающие представления об изменчивости потоков, выявлены аномальные значения  $\Delta M$ , которые по аналогии с геофизическими аномалиями могут быть геологически интерпретированы — в частности, положительные  $\Delta M$  как возникающие над конседиментационными поднятиями, над выходами древних более грубозернистых пород, отрицательные  $\Delta M$  как проявляющиеся во впадинах рельефа, в халистатических зонах и т.д. Коэффициент вариации  $\nu$  отражает отсортированность осадка относительно среднего динамического уровня потока, показывает степень его гетерогенности, турбулентности при одной и той же общей энергии. Так, осадки пляжа, образованные после шторма, дают более высокие значения  $\nu$  по сравнению со штилевыми осадками при одинаковых значениях  $\bar{x}$ .

Положительная асимметрия  $+\alpha$  появляется в гранулометрическом спектре речных осадков при избыточном приносе тонких фракций, например, в "мутных" реках, стекающих с гор, типа

---

<sup>22</sup> Необходимо отметить, что основоположник этого метода — Л.Б. Рухин — не говорил о его универсальности. В специальной статье (1945 г.) он обосновывает применимость генетических диаграмм преимущественно для закрытых и одновершинных распределений с модой 0,11–0,17 мм (по счету зерен).

Сырдарьи и Амударьи, или в реках вечномерзлотной зоны, дренирующих солифлюкционные поля и близкие к ним образования. Речные потоки, дренирующие умеренно-гумидные области с выходами зернистых осадочных или кристаллических пород, отлагают осадки с нулевой или слабо отрицательной асимметрией. Отрицательная асимметрия в осадках формируется в реках при спорадическом привносе грубых фракций боковыми притоками, а также на пляже вследствие выноса тонких фракций волнением и противотечениями.

Если статистические коэффициенты, рассмотренные в динамике, т.е. в сопоставлении значений, приобретенных в той или иной точке, практически все без исключения дают информацию о режимах потоков, привносе — выносе вещества, влиянии коренных пород ложа и т.д., то еще большей информативностью обладают те индивидуальные распределения, которые этими коэффициентами описываются. Общеизвестно, что статистические коэффициенты характеризуют только отдельные особенности распределения и даже вместе взятые не отображают его полностью. Отсюда мы приходим к основной мысли и данного очерка, и к главному содержательному аспекту работы Б.Н.Котельникова — информация о динамике, условиях и обстановках осадкообразующих сред содержится в индивидуальных распределениях, их наборах и закономерных сочетаниях. Поскольку наиболее полным отображением индивидуальных распределений являются эмпирически получаемые полигоны распределения (ЭПР), анализ ЭПР служит главным средством исследования динамики осадкообразующих сред, сочетаний динамических обстановок, а отсюда — и ландшафтных зон, где такие сочетания реализуются.

Идея эта не нова. Первые разработки по генетическому анализу серий эмпирических данных, выраженных в виде кумулятивных кривых, относящиеся к 50-м гг., принадлежат Д.Дугласу. Б.Н.Котельников пошел по этому же пути, сделав наиболее полную на начало 70-х годов сводку эмпирических данных, представленных в форме кривых распределения. Насколько мне известно, это и сейчас наиболее полная сводка фактических данных. Последние в виде серий кривых распределения, разворачивающиеся в последовательные ряды в соответствии с модуляциями при-

родного процесса, вряд ли потеряют ценность в ближайшем будущем, а методический подход к проблеме может служить стержневой опорой, вокруг которой будет концентрироваться накопленный опыт в виде новых серий ЭПР, отражающих существующие и существовавшие в прошлом физико-географические среды. В публикациях после 1974 г. исследования по тем или иным вопросам, базирующиеся на анализе ЭПР, встречаются во многих работах, свидетельствуя о дальнейшем развитии этого направления. Таковы, например, работы Б.С.Лунева, Б.М.Осовецкого, Н.Н.Верзилина, частично Г.Ф.Рожкова и Н.С.Окновой, Н.И.Казакова и др. Однако эти авторы либо рассматривают отдельные обстановки осадконакопления, либо оперируют некоторыми генерализованными данными, отражающими самые общие закономерности. И в первом, и во втором случае мне не встречались, за немногими исключениями, материалы, противоречащие фактическим данным Б.Н.Котельникова.

Например, в региональной работе по пескам Алжирской Сахары [9'] приводятся серии ЭПР, содержащие динамику эолового процесса (рис.36).

Сравнивая их с изложенными выше данными, можно видеть исключительное сходство ЭПР почв эоловой дефляции (типы В, С Г.Венцо

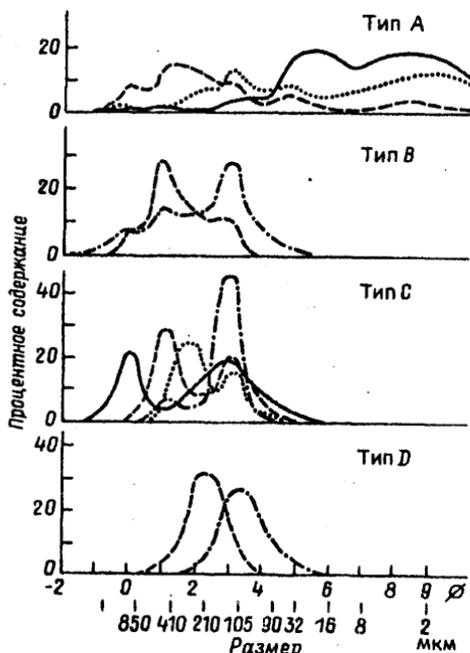


Рис.36. Некоторые типичные кривые распределения пустынных осадков Алжирской Сахары (по [9]).

*A* - песчано-пелитовые почвы, *B* - почвы с проявлением эоловой дефляции, *C* - пески площадей развития сильной эоловой дефляции, *D* - пески микрообстановок площадей донной аккумуляции.

и др.) с исходными непереверенными песками и песками начальной стадии перевевания (см. рис. 32, типы I, II Б.Н. Котельникова), а ЭПР песков дюнной аккумуляции (тип D Г. Венцо и др.) со зрелыми перемещенными песками (см. рис. 34, 35) Б.Н. Котельникова, левые ЭПР с модами в мелких фракциях.

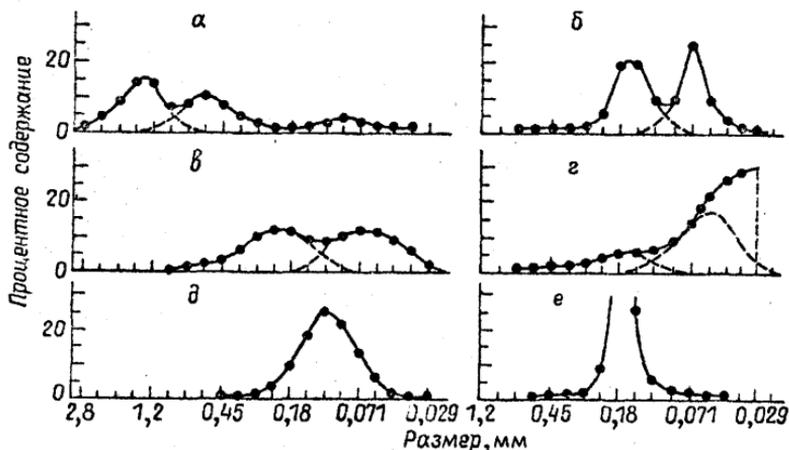


Рис. 37. Генерализованные кривые распределения гранулометрического состава около 5000 проб зернистых пород (по [5]).

$\alpha$  - трехмодальные,  $\delta$  - бимодальные,  $\beta$  - симметричные, с отрицательным эксцессом,  $\gamma$  - сильно асимметричные, гетерогенные,  $\delta$  - логнормальные,  $\epsilon$  - симметричные, с резко положительным эксцессом.

Г.Ф. Рожков [5] приводит шесть генерализованных распределений, характерных, по его мнению, для различных обстановок (рис. 37), в которых можно видеть подтверждение материалов Б.Н. Котельникова. Так, типы  $\alpha$ ,  $\delta$ ,  $\beta$ , представляющие, по Г.Ф. Рожкову, осадки горных и равнинных рек, встречаем среди ЭПР аллювиальных песков на рис. 12, 13, 16 и Б.Н. Котельникова, тип  $\delta$  - песков пустынь и других районов с дефицитом привноса, по Г.Ф. Рожкову, видим среди прибрежных песков на рис. 18, 19 и среди золотых песков на рис. 34 работы Б.Н. Котельникова, тип  $\epsilon$  - пески пляжа открытых акваторий (см. рис. 37) является аналогом песков пляжа Нарвского залива (см. рис. 25,  $\delta$ ). Отмечая совпадения результатов в этих двух работах, нетрудно видеть, что материалы

Г.Ф.Рожкова в данном случае грубее и беднее материалов Б.Н.Котельникова. Последние богаче по содержанию, многообразнее и сложнее по сравнению с генерализованной схемой\*. Трудно объяснить отсутствие типа 2, выделенного Г.Ф.Рожковым, т.е. распределения, открытого в сторону тонких фракций среди ЭПР Б.Н.Котельникова. Возможно, это связано с тем, что Б.Н.Котельников работал с песчаными осадками, не анализируя глинисто-песчаные и смешанные. Это — определенное ограничение работы и ее недостаток, который необходимо иметь в виду при чтении текста.

Чтобы показать значимость исследований Б.Н.Котельникова, мы помещаем в качестве приложения работу Н.Н.Верзилина по отложениям Южной Монголии, в которой продемонстрирована эффективность анализа эмпирических распределений обломочных зерен для генетических целей. Подчеркнем, что работа Н.Н.Верзилина написана в 1987 г., спустя 15 лет после разработок Б.Н.Котельникова и первоначально вне связи с публикацией этой книги.

Признавая метод анализа ЭПР важным, а может быть, и основным методом познания связей между осадкообразующей средой и осадком во всем комплексе гранулометрических исследований, нельзя не видеть определенной заслуги Б.Н.Котельникова в развитии этого метода. По фактическому содержанию, заключенному в многочисленных изображениях ЭПР, предлагаемая работа наиболее информативная, по крайней мере в нашей литературе, и в этом состоит ее главное значение и актуальность. Принципиально правильным является и методический подход — стремление проследить эволюцию структуры осадочного вещества от зарождения на водоразделах и склонах до захоронения в конечных водоемах стока. Это единая система, некая основа, которая в будущем может быть детализирована и расширена описанием многих разновидностей осадков, в том числе с применением различных методов обзора или свертывания информации.

Оценку места и значения метода анализа ЭПР в гранулометрии трудно сделать без рассмотрения других направлений в сфере гранулометрических исследований. Ведь ЭПР есть лишь какое-

\* Г.Ф.Рожков не занимался специально анализом ЭПР, считая более эффективной работу со статистическими характеристиками и разработанной на их основе генетической диаграммой.

то определенное количество эмпирических знаний, требующих и теоретического понимания, и теоретического обобщения. Теоретические разработки в гранулометрическом анализе велись в следующих основных направлениях.

Во-первых, в направлении изучения способов транспортировки обломочного материала и их влияния на структуру осадка. Б.Н.Котельников в гл. IY пытается связать модальность кривых распределения зерен со способами их транспортировки, предполагая, что каждая из мод формируется частицами, переносимыми одним способом, а полимодальность есть следствие одновременного отложения частиц, транспортируемых разными способами — волочением, сальтацией и во взвеси. Подобные представления интенсивно развивались в 40–60-х гг. Д.Имманом, Р.Бэгнольдом, А.Моссом, А.Фаллером и др. После интереснейшей работы Г.Вишера [44] казалось, что представления о трех способах движения частиц в потоке могут послужить основой для построения общей гидродинамической модели формирования структуры осадка. Представления о трех способах перемещения наносов были восприняты также Б.Н.Котельниковым и получили определенное развитие, как казалось, реальное воплощение для понимания эмпирически получаемых структурных характеристик. Однако впоследствии обращения к идее, заложенной Д.Имманом, звучали все реже. В начале 70-х годов Л.С.Смирнов, О.В.Колобзаров, Г.Ф.Рожков природу дефицитов (а следовательно, и модальных величин) внутри песчаных фракций также объясняли тремя возможными особенностями транспортировки осадков в потоке. Позже, в 1979, 1984 гг., Г.Ф.Рожков признает существование трех вариантов транспортировки, однако уже не связывает непосредственно признаки распределений со способами переноса частиц. Б.М.Осовецкий (1982 г.) появление мод и разделяющих их дефицитов в грубообломочном аллювии объясняет общим петрофондом и дроблением частиц в потоке, а не его гидро- и литодинамикой. В одной из последних работ [7'] приводятся доказательства того, что изломы на кумулятивных кривых, послужившие Р.Бэгнольду (1954 г.) основанием для выделения субраспределения частиц, отложенных из взвесей, доставленных сальтацией и волочением, в действительности проявляются очень часто, в том числе в гомогенном осадке, отложенном каким-либо одним способом. Попытки интерпрети-

102

ровать указанные распределения как результат одновременного осаждения различно перемешавшихся частиц считаются ошибочными. Таким образом, можно сделать вывод, что проблема связи конфигурации ЭПР с динамикой частиц в потоке сложнее схемы, изложенной Б.Н.Котельниковым, и что последняя требует определенного критического отношения.

Второй круг вопросов, широко обсуждаемых в литературе и затронутых Б.Н.Котельниковым, — это определение законов распределения частиц в природных зернистых осадках. Суть представлений Б.Н.Котельникова сводится к тому, что на начальном этапе дробления исходных горных пород формируется распределение Росина (Росина — Вейбула), а на конечном этапе гомогенной транспортировки (независимо от среды) — логнормальное распределение. На пути от первого ко второму — в результате смещения петрофонда и наложения разных способов транспортировки — возникают различные распределения, что и определяет разнообразие ЭПР природных осадков.

Принципиально близка позиция Г.Ф.Рожкова, основывающаяся на результатах массовых гранулометрических анализов [5]. В начале осадочного процесса стоит логнормальное распределение, получаемое от природного разрушения магматических пород (распределение Вейбула-Росина не упоминается). Также логнормальное или крутовершинное распределение характеризует осадки на другом полюсе — зрелых песков, количество которых у разных генетических типов (при расчетах по весовым процентам) составляет: у золотых песков 45–20, у песков морских побережий 40–20, морских течений и равнинных рек 40–20, горных рек 25–15, морских впадин и речных пойм 20–10. Общее число логнормальных ЭПР из всех изученных составляет 23%, неопределенный результат дают 77%. От исходных логнормальных осадков к логнормальным разных генетических типов существует переход через разнообразные распределения, образующие конкретный ряд созревания — "от понижения полимодальности через асимметрию к логнормальности и затем к крутовершинности" (с.55).

Новыми данными, приведенными в работах К.Кристиансена и К.Вирвольфа (1984–1985 гг.), подтверждается сделанное ранее заключение Р.Бэгнольда о том, что распределения частиц в дюнных песках пустынь лучше всего аппроксимируются лог-логтипер-

большим распределением (с обычной логарифмической шкалой размеров по оси абсцисс и логарифмической шкалой плотностей вероятностей по оси ординат).

Таким образом, эмпирические данные как будто позволяют построить некоторую общую схему формирования распределений, согласующуюся с представлениями Б.Н.Котельникова. На первых этапах дробления горных пород формируется распределение Росина - Вейбула, отвечающее схеме однократного дробления, или логнормальное распределение, отвечающее многократно повторяющимся актам дробления. Затем вследствие смешения продуктов дробления и смещения факторов седиментации образуются полимодальные распределения. Стационарность режимов в различных обстановках приводит к их переформированию в одномодальные распределения, часто близкие к логнормальным, а конечное проявление сепарации дает крутовершинные распределения в песках пляжей и логтиперболические распределения в дюнных песках пустынь.

Принципиально иная позиция занята С.И.Романовским [8'], который утверждает, что подход, основанный на сравнении эмпирически получаемых распределений, теоретически принципиально неверен и является неким всеобщим заблуждением. Доказательные основы проявления того или иного закона, по С.И.Романовскому, могут быть получены после создания аналитических моделей процессов седиментогенеза, сформировавших определенное распределение. Сам С.И.Романовский выводит одно из них - распределение Релея, описывающее якобы популяцию частиц на дне потока. Что же касается логнормального закона, к которому чаще всего прибегают седиментологи, то его "из седиментологических предпосылок вывести пока не удастся" (с. 94), и далее, "утверждения о соответствии состава осадков логарифмически-нормальной функции лишены каких-либо доказательных основ" (с. 139).

К сказанному близка третья проблема гранулометрических исследований, связанная с созданием седиментологических моделей, опирающихся на гранулометрический состав и интерпретируемых данные гранулометрического состава. Здесь так же, как в других разделах геологии, сложились автономные линии развития эмпирического знания и общей теории, основанной на эмпирическом материале с одной стороны, и формализованных понятий, предназначенных для поисков модели терригенного осадкообразования с по-

104

монью математического аппарата — с другой. Существует мнение [8<sup>с</sup>], что таким путем эмпирические данные о распределении частиц по размерам могут быть аналитически увязаны с конкретной математически строгой схемой седиментогенеза. Однако во многих разделах науки, и в гранулометрии в том числе, эти направления — эмпирических обобщений и теоретических моделей — пока практически не пересекаются. В седиментологии моделирование находится на стадии кабинетных разработок, отставая от эмпирических знаний и эмпирических обобщений в полноте охвата природных явлений, что не мешает, однако, некоторым сторонникам моделирования претендовать на роль научных лидеров. С.И. Романовским неоднократно выдвигались требования создания седиментологических моделей, объясняющих и связывающих единой теорией многообразие природных гранулометрических спектров. Однако подобные модели для определения сред не были созданы ни им, несмотря на обилие публикаций, бьющих мимо цели, ни кем-либо другим. Об этом можно было бы не говорить, если бы С.И. Романовский не выступал яростным гонителем идей Б.Н. Котельникова, и не только при жизни Бориса Николаевича, препятствуя публикациями его работы за ее эмпирическую направленность.

И еще одна проблема должна быть затронута — проблема счета зерен. В 40–50-х гг. существовали представления о том, что гранулометрический состав, выраженный в распределении количества зерен, лучше представляет седиментологические аспекты осадка и среды по сравнению с весовыми процентами. Затем наступило определенное недоверие к такой методике, а в последнее время (1982 г.) она опять была возрождена в работах Г.Ф. Рожкова и его сотрудников и в некоторых разработках по математической седиментологии (И.Д. Македон, С.И. Романовский). Против количественного счета, в особенности против так называемого косвенного очета, предусматривающего пересчет полученных при анализе весовых процентов в количественные, можно выдвинуть следующие возражения:

1. Общеизвестно, что живая сила потока определяется соотношением его общей энергии  $H$  к грузу влекомых наносов  $L$ , причем в работах по гидро- и литодинамике обычно учитываются объемы  $L$  (или их весовые выражения). Преимущества или, наоборот, недостатки счета зерен по сравнению с объемными (весовыми) со-

держаниями в работах по литодинамике никем серьезно не исследовались.

2. Переход на счет зерен приводит к отказу от анализа всего распределения и к исследованию его узкого спектра, чаще всего захватывающего наиболее тонкие фракции.

3. При современном состоянии гранулометрического анализа, основанного на рассеивании в ситовых наборах, допускаемые ошибки, затем многократно увеличенные при пересчетах весовых процентов на количественные, могут оказаться слишком большими, чтобы скомпенсировать природные дисперсии, связанные с генезисом осадков.

Проблема счета должна обсуждаться только в теоретическом плане. Внедрение в практику результатов количественной гранулометрии возможно только тогда, когда будет принципиально доказано ее преимущество и будут широко практиковаться точные экспрессные методы прямого измерения и подсчета зерен. Но даже в случае успешного внедрения этого метода объемная (весовая) гранулометрия, как представляющая распределение целиком, останется основным средством для отображения составов, а скорей всего и генезиса зернистых осадков.

В настоящее время существует настоятельная необходимость и в совершенствовании, и в пропаганде гранулометрического метода. Проявляется определенная диспропорция в результатах, достигнутых отдельными лицами и изложенных, например, в работах Г.Ф.Рожкова, Б.М.Осовецкого, С.И.Романовского, и общим низким состоянием гранулометрического анализа. Например, для "генетической интерпретации" гранулометрического состава А.В.Гольберт и В.П.Девятов в одной из последних работ, появившихся в 1983 г., рекомендуют использовать трехкомпонентную систему песок - алевроит - глина, а также традиционные медианный размер  $Md$  и коэффициент  $Sa$  Траска, малая информативность которых и для статистических и для динамических построений давно известна. В 1986 г. В.И.Гуревичем составлены "Методические рекомендации по гранулометрическому классифицированию осадков", принятые для использования в ПГО "Севморгеология". В этих указаниях нет даже речи о дробных гранулометрических анализах, о системах обработки данных или их генетической интерпретации. Основное содержание указаний - это изложение известной десяти-

тичной гранулометрической шкалы и способов отображения составляющих ее классов на треугольниках. Подобный подход типичен для отечественных исследований современных осадков, когда ценой больших затрат получается материал грубого отсева, не пригодный для какого-либо использования в генетических целях. Подобное же положение существует и в нефтяной геологии, как на это обращали внимание в конце 70-х гг. В.А.Гроссгейм, Г.А.Каледа и С.Г.Саркисян.

Проблемы дробности, унификации и генетической интерпретации гранулометрических анализов могут решаться только на фоне общих успехов в развитии теории гранулометрических исследований. Основой теории может являться комплекс эмпирических данных — достаточно дробных, достаточно многочисленных и достаточно увязанных с конкретными осадкообразующими условиями. Как бы ни были многообразны методы и точки приложения гранулометрии, в ней должна существовать определенная фактическая база. Такой базой могут являться только сами анализы — или их зримое отображение в виде ЭПР. Создание "банка" ЭПР должно лежать в основе всех аспектов гранулометрического метода. Именно этой цели и служит предлагаемая читателю работа Б.Н.Котельникова.

## П Р И Л О Ж Е Н И Е

### ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЕРХНЕМЕЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮЖНОЙ МОНГОЛИИ И НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЙ ДЕТАЛЬНЫХ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИХ АНАЛИЗОВ\*

Совершенно очевидно, что эмпирическое распределение зерен по величине, получаемое в результате детального гранулометрического анализа, содержит наиболее полную информацию о гранулометрическом составе образца. Отсюда напрашиваются два вывода: 1) генетическую интерпретацию данных детальных гранулометрических анализов целесообразно проводить непосредственно по эмпирическим распределениям, полученным для конкретных образцов; 2) в основу генетических интерпретаций должно быть положено сходство эмпирических распределений, выявленных для образцов, генезис которых неясен, с кривыми распределения эталонных образцов (генезис которых ясен по другим данным). Попытки использования эмпирических распределений (эмпирических полигонов распределения) для выделения динамических типов песков делались Б.Н.Котельниковым [3', 4'] и результаты их были обнадеживающие.

Остановимся на особенностях гранулометрического состава алевроито-песчаных пород позднемелового возраста Южной Монголии и возможной их генетической интерпретации, основанной на применении предложенных принципов. Для большей надежности генетических выводов нами будут использоваться не только эмпирические распределения по размеру зерен легких минералов, но одновременно и тяжелых, для тех же самых образцов.

В основе работы лежат результаты 92 анализов алевроито-песчаных пород, выполненных в литологической лаборатории ВСЕГЕИ на 19-фракционном наборе сит "Анализете" фирмы Фрич (ФРТ). Образцы отобраны из резервов барунгойотской и нэмегэтинской свит, возраст которых, по Г.Г.Мартинсону, оценивается кампанским и маастрихтским.

---

\* Написано Н.Н.Верзилиным.

## 1. Гранулометрические особенности барунгойотских отложений

В районе хр. Нэмэгэту (рис.38, разрез I) барунгойотские отложения представлены толщей в основном светло-коричневых мелкозернистых песчаников. В кровле присутствует венчающая свиту пачка красноцветных, а иногда коричневых и зеленых глин, изредка достигающих мощности 6,5 м. Мощность обнаженной части свиты в месте описания разреза 46 м. Характерным является присутствие выдержанных пластов и прослоев от 2 до 0,1 м мощности песчаников, обладающих текстурами подводного оползания осадков. Цвет их светло-коричневый, иногда светло-серый. Наличие таких горизонтов оползневых песчаников позволило разделить толщу на 6 пачек. Изредка в разрезе встречаются линзы оползневых песчаников.

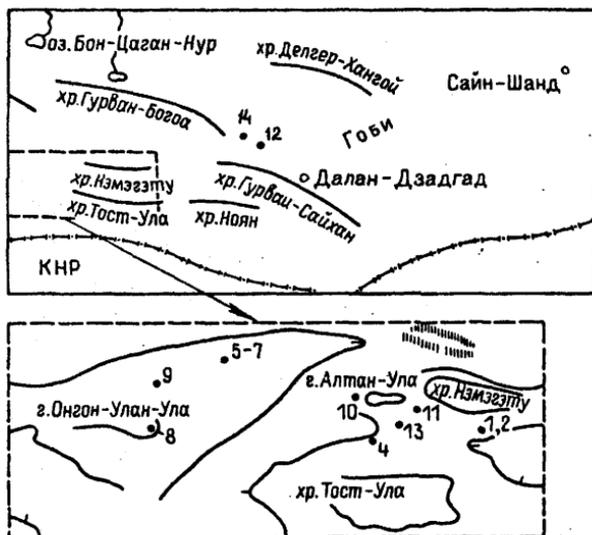
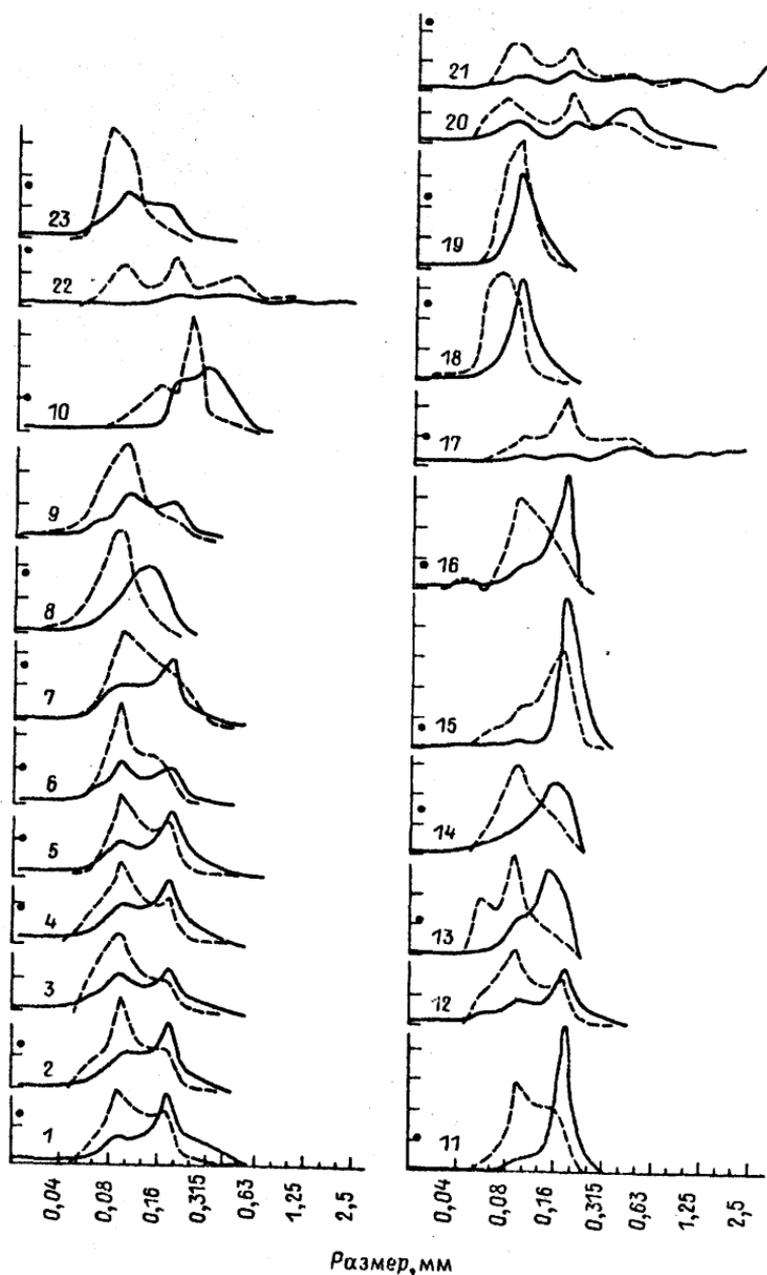


Рис. 38. Схема местонахождения изученных разрезов. Цифрами указаны местонахождение и номер разреза.

Из барунгойотской свиты нэмэгэтинского разреза было проанализировано 10 образцов наиболее типичных разновидностей песчаников. Оказалось, что из 8 образцов, отобранных из основного раз-

Процентное содержание



реза, 7 обладают очень близкими гракулометрическими особенностями как породообразующих, так и акцессорных тяжелых минералов. Для этих образцов кривые распределения легких минералов характеризуются расположением основной части их в пределах 0,05–0,63 мм, в общем симметричным основанием и наличием двух мод во фракциях 0,16–0,2 мм и 0,08–0,1 мм или реже, моды в первой указанной фракции и резкого перегиба кривой распределения от примерно горизонтальной направленности вниз в интервале 0,08–0,1 мм (рис. 39, 1-*А*). Кривые распределения тяжелых минералов в общем обладают особенностями, аналогичными особенностям, характерным для легких. Отличием является лишь то, что у них лучше выражена мода во фракции 0,08–0,1 мм, а не в 0,16–0,2 мм, а для одного из образцов (рис. 39, *Б*) кривая даже без признаков перегиба в интервале размеров второй фракции.

Выявленная общность кривых распределения обломочного материала по гракулометрическим фракциям для образцов, взятых с разных уровней песчаной толщи, очевидно, свидетельствует об исключительном однообразии гидродинамических обстановок при формировании толщи. Очень показательным и то, что гракулометрические особенности материала из оползневых песчаников (рис. 39, 2, 3) оказались аналогичными образцам из обычных песчаников. Более того, гракулометрический состав цемента псевдогравелита<sup>22</sup> (рис. 39, 4) тождествен составу вмещающих песчаников (рис. 39, 5). Следовательно, песчаный материал, вовлекающийся в подводные оползания и мутьевые потоки, отлагающие псевдогравийные осадки, заимствовался из песчаных осадков, обладавших однообразным гракулометрическим составом. Очевидно, что существовало однообразие гидродинамических условий осадконакопления во вре-

<sup>22</sup> Псевдогравелиты – песчаные породы с обилием ступков или обломков карбонатного или глинистого материала преимущественного гравийного размера.

Рис. 39. Кривые гракулометрического состава образцов из барунгойотской свиты.

1–10 – разрез I, 11–16 – разрез II, 17–21 – разрез 5, 5, 22, 23 – разрез 8; сплошная линия – распределение легких минералов, штриховая – распределение тяжелых минералов, точки – содержание фракции < 0,01 мм.

мени и пространстве, которое легче всего объяснить отложением материала в обстановке устойчиво существовавшего обширного озерного водоема, в его относительно мелководной части.

Только в верхах толщи песчаников барунгойотской свиты, в последнем пласте мощностью около 1 м, кривая распределения гранулометрического состава одновершинная, почти симметричная, с модой во фракции 0,1-0,125 мм. Также одновершинна и почти симметрична кривая распределения тяжелых минералов (рис.39, 8). Эти песчаники обладают слоистостью типа знаков ряби и, вероятно, материал, их слагающий, был отложен в зоне развития слабых придонных волнений, которыми он достаточно длительное время перетлагался.

Существенно, что также из кровли песчаной толщи, с того же стратиграфического уровня, но на расстоянии немного более 2-х км к югу от основного разреза, песчаники имеют двухвершинную кривую распределения (рис.39, 9). Это указывает, вероятно, на то, что в южном направлении подвижность вод в соответствующее время несколько уменьшалась, возможно, из-за некоторого увеличения глубин. С этим хорошо согласуется и повышенное содержание (почти 30%) пелитовой фракции в образце из южного обнажения.

На расположение на севере, в относительной близости от места накопления рассматриваемых отложений области сноса указывает и более крупный состав легких и тяжелых минералов в образце (рис.39, 10), взятom из того же пласта 7-метровой мощности песчаников, что и обр. 7, но примерно на 3 км севернее. Хорошая отсортированность материала в совокупности с обилием в нем позвонков и тонких косточек рыб, а также присутствие железных обломков древесины позволяют предполагать прибрежно-мелководный генезис этих песчаников.

Следующие выходы барунгойотских отложений были описаны примерно в 35 км к западу-северо-западу по южному склону г. Алтан-Ула в районе местонахождения динозавров Алтан-Ула I (рис.38, разрез II). Здесь вскрыта лишь верхняя часть свиты мощностью около 29 м. Для отложений характерна четкая ритмичность. Нижнюю часть ритмов, а их в месте описания неполных 5, слагают песчаники розовые и желтые, местами обладающие наклонной слоистостью, в подошве иногда со светло-серыми псевдогравелитами, 112

часто с обломками костей и остатками крупнораковинных пелеципод. Верхняя, меньшая по мощности часть ритмов, обычно сложена коричневыми или пестрыми глинами. Иногда песчаники пронизаны ходами ползания. Песчаники, залегающие совместно с псевдогравелитами или непосредственно сменяющие их вверх по разрезу, нередко обладают мульдовидно-перекрестной косо́й слоистостью.

Анализируя кривые распределения гранулометрического состава песчаных пород из этого разреза (рис.39, 11 - 16), можно видеть, что кривые распределения легких и тяжелых минералов цемента псевдогравелита (рис.39, 12) очень близки к кривым распределения, характерным для отложений предыдущего разреза в целом. Более того, они почти тождественны выявленным для цемента псевдогравелита из того же разреза (рис.39, 4). Существенно, что в пласте, из которого взят был образец, присутствовали обломки крупных костей динозавров, обломки костей черепов, скорлупа яиц динозавров и отпечатки пелеципод, указывающие, наряду с другими данными, на отложение материалов из мутьевых потоков и на отсутствие его последующей переработки. Следовательно, можно предполагать, что преобладающая часть обломочного материала, приносившегося в зону накопления осадков в районе немагэтинского и алтан-улинского разрезов, обладала близкими гранулометрическими особенностями.

Материал песчаников с мульдовидно-перекрестной слоистостью из пласта с псевдогравелитами очень хорошо отсортирован, а мода легких и тяжелых минералов располагается в одной (0,46 - 0,61 мм) фракции (рис.39, 15). Это, вероятно, указывает на то, что осадок отлагался из зернистого потока высокой плотности, в котором не происходило гидравлическое разделение легких и тяжелых минералов, переносимый же материал был уже хорошо отсортирован. Песчаники, залегающие непосредственно выше (рис.39, 16) даже хуже отсортированы, а мода тяжелых минералов, как обычно, расположена во фракции 0,08 - 0,1 мм.

В 80 км к западу-северо-западу выходы барунгойотских отложений были описаны в районе Бамбу-Худуна (рис.38, разрез 5). Разрез в общем похож на алтан-улинский, в нем также выделяются ритмы (8 неполных), правда, роль песчаников в них несколь-

ко меньше, как и мощность ритмов; наряду с этим в базальных частях нередко присутствует примесь гравийных зерен и гальки.

Гранулометрический анализ, проведенный для цементов раз-  
нозернистой, вплоть до мелкогалечной размерности, породы (рис. 39, 17), псевдогравелита (рис. 39, 20) с галькой до 2 см и взя-  
тых из базальных частей ритмов, показал крайнюю неотсортиро-  
ванность материала, многовершинный до волнообразного характер  
кривых распределения. Из того же ритма, что и обр. 17, про-  
анализированы светло-желтый (рис. 39, 18) и голубовато-светло-  
серый (рис. 39, 19) песчаники. Прекрасная сортировка их матери-  
ала, вероятно, указывает на формирование осадков в очень сла-  
бо подвижной и достаточно стабильной волновой среде, скорее  
всего в зоне колебательных волновых движений природных вод, и  
на принос материала во взвеси.

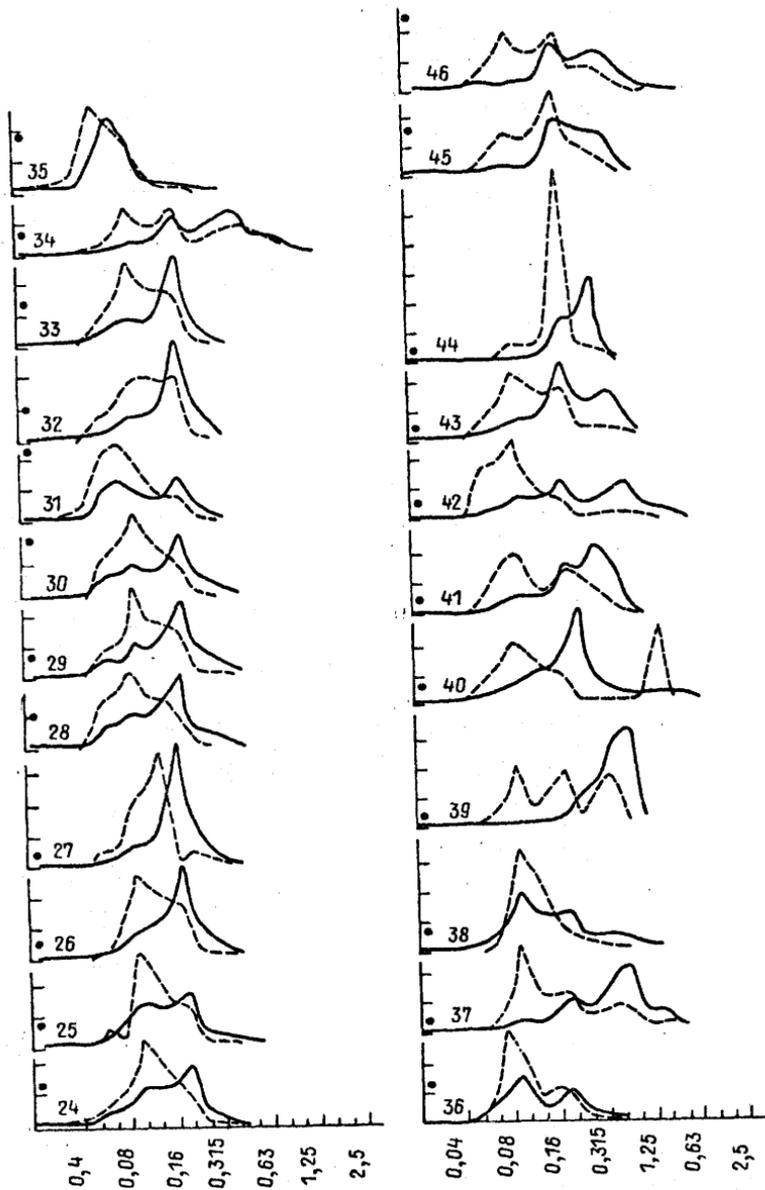
В районе северо-восточной оконечности г. Онгон-Улан-Ула  
(рис. 38, разрез 8) на круто залегающие апт-альбские отложения  
почти горизонтально ложатся, видимо, барунгойотские. В осно-  
вании их залегают коричнево-красный разномзернистый песчаник с  
гравийными зернами (рис. 39, 22) мощностью 0,4 м. Кривая грану-  
лометрического состава его, особенно для тяжелых минералов,  
почти тождественна кривой, полученной для смешанной породы из  
верхов вскрытого разреза района Бамбу-Худук (рис. 39, 21). Та-  
кое сходство, несмотря на то, что материал должен был прино-  
ситься из разных областей сноса, возможно, указывает на опре-  
деленную общность процессов дезинтеграции материала на суше.  
Преобладающие в разрезе розовые песчаники (рис. 39, 23) харак-  
теризуются наличием моды во фракции 0,08 - 0,1 мм и резким  
перегибом кривой распределения в интервале 0,16 - 0,2 мм, что  
типично для ранее рассмотренных отложений.

Особенности гранулометрии барунгойотских отложений были  
изучены в разрезе Байн-Дзак (рис. 38, разрез 12), расположен-  
ном примерно в 230 км к востоку-северо-востоку от нэмэгэ-  
тинского разреза. Развитие здесь отложения мощностью 77 м  
очень похожи на барунгойотские нэмэгэтинского разреза.

Рис. 40. Кривые гранулометрического состава образцов из барун-  
гойотской свиты.

24-33 - разрез 12, 34-44 - разрез 14, 45, 46 - разрез  
10. Условные обозначения те же, что на рис. 39.

Процентное содержание



Размер, мм

Проведенные для этих отложений 10 анализов (рис. 40, 24-33) показали, что и по гранулометрическим особенностям слагающие толщу песчаники очень похожи на песчаники той же свиты нэмэгэтинского разреза. Однако в этом разрезе несколько чаще встречаются хорошо отсортированные песчаники (рис. 40, 26, 27, 32). Лучшая отсортированность отмечена в образцах (рис. 40, 26, 27) из отложений с четкой наклонной слоистостью (что наблюдалось и в алтан-улиноком разрезе - рис. 39, 11).

К западу-северо-западу от баин-дзакского разреза примерно в 35 км в районе Тутрик-Булака (рис. 38, разрез 14) обнаружены отложения, относимые к барунгойотской свите на основании сходства палеонтологических остатков, описанных А. В. Сочавой в 1975 г. Облик же большей части их существенно отличается от обычных для барунгойотских.

Низы вскрытой части разреза мощностью около 13 м представлены чередованием разноцветных, в основном красных, коричневых и светло-серых мелкозернистых песчаников и алевроитов с единичными пластинами и прослоями глин. В низах разреза встречаются нептунические дайки. Песчаный материал из нептунической дайки толщиной около 15 см не отсортирован, с различными модами во фракции 0,16 - 0,2 и 0,4 - 0,5 мм, у тяжелых же минералов мода еще и во фракции 0,08 - 0,1 мм (рис. 40, 34). Кривые распределения очень похожи на характерные для некоторых псевдогравелитов и смешанных пород, материал которых был отложен из мутевых потоков (рис. 39, 20, 21).

Красноцветный алевролит (медиана 0,077 мм) из пласта 0,8 м с крупными костями, следами ползания и оползневыми колокками, хорошо отсортирован с модой в легкой фракции 0,063-0,08 мм, и в тяжелой фракции 0,05-0,063 мм (рис. 40, 35). Алевролит голубовато-светло-серый (рис. 40, 36) из выдержанного прослоя 0,3 м со следами втекания, оползневой перемятостью и иногда с гравийными зернами и включениями красной глины обладает бимодальным распределением легких минералов, типичным для барунгойотских отложений, но смещенными на одну фракцию в сторону мелкозернистости модами тяжелых минералов.

Выше лежащая основная часть разреза имеет мощность 44 м и сложена в основном средне- и мелкозернистыми песчаниками светло-серого и реже желтого цвета, часто с крупной наклонной

слоистостью, подчеркиваемой прослоями, линзами и ступками карбонатных или ожелезненных песчаников с обилием кодов ползания. В этих отложениях часто присутствуют кости и скелеты протоцератопсов. Кривые распределения гранулометрического состава, полученные для песчаников из этой толщи (рис. 40, 37-44), отличаются некоторой специфичностью. Обычно, помимо мод или перегибов (на кривых для легких и тяжелых минералов) во фракциях 0,08 - 0,1 и 0,16 - 0,2 мм, для легких минералов отмечается наличие моды в более крупных фракциях, причем обычно наиболее хорошо выраженной. Чаще всего она приурочивается к фракциям 0,4 - 0,5 или 0,25 - 0,315 мм. Такая особенность находит отражение и в общем более крупнозернистом, чем обычно, составе песчаников, что проявляется и в наличии моды >0,2 мм в большинстве анализировавшихся образцов. Характерно и необычно низкое содержание пелитового материала и, как правило, большая разоб-шенность главных мод легких и тяжелых минералов.

Выявленные особенности гранулометрии толщи светло-серых песчаников, очевидно, указывают на то, что ее формирование происходило в более подвижной водной среде, чем формирование всех ранее рассмотренных отложений. При этом подвижность, вероятно, была существенно изменчивой, нестабильной как во времени, так и в пространстве. Такая изменчивость, возможно, связана с наличием крупных и крутых неровностей дна водоема, что нашло отражение в образовавшейся часто мощной наклонной слоистости.

Вывод о формировании рассматриваемых отложений в обстановке высокой подвижности вод находит косвенное подтверждение в том, что некоторые кривые распределения их гранулометрического состава принципиально тождественны кривым, полученным для песчаников барунгойотской свиты западной оконечности г. Алтан-Улы (рис. 38, разрез 10, рис. 40, 45 и 43, 46 и 41). Один из последних образцов (45) взят из пачки чередования гравелитов, конгломератов и песчаников, а другой (46) из пачки песчаников с прослоями и линзами гравелитов, содержащей обломки крупных костей, т.е. из отложений, образовавшихся, несомненно, в обстановке высокой гидродинамической среды. В пользу такого вывода говорит и то, что эти отложения формировались в непосредственной близости от относительно расчлененной области сноса, о чем свидетельствует наличие хорошо выраженного погребного рельефа,

на элементы которого барунгойотские отложения ложатся четко трансгрессивно.

Приведенные данные об особенностях гранулометрического состава песчаных отложений барунгойотской свиты обширной территории Южной Монголии показывают, что указанные особенности весьма изменчивы. Но наряду с этим иногда намечается несомненная гранулометрическая общность не только между образцами из одного и того же района, но даже из весьма удаленных. Более того, подчас гранулометрический состав отложений удаленных друг от друга районов оказывается более сходным, чем близлежащих районов. Это указывает на то, что главным фактором, определявшим основные особенности гранулометрического состава, была подвижность вод в месте формирования осадка и особенно в зоне их слабой подвижности, способ приноса и отложения осадочного материала.

В целом, особенности гранулометрического состава рассмотренных отложений указывают на формирование их в обстановке устойчиво существовавших крупных озерных водоемов. При этом материал базальных частей ритмов, представленных сейчас псевдогравелитами или оползевыми песчаниками, обычно отлагался на глубинах, на которых осадок не перерабатывался волнениями воды. Напротив, песчаные и алевритовые отложения вышележащих частей ритмов формировались, а обычно и отлагались, благодаря движениям придонной воды. Соответственно, гранулометрия базальных частей ритмов, как правило, отражает лишь гранулометрический состав материала, вовлеченного в движение оползневых или мутьевых масс, а более высоких частей — особенности гидродинамики вод, отлагавших и воздействовавших на осадок.

## 2. Гранулометрические особенности намагэтинских отложений

В районе Намагэту (рис. 38, разрез 2) эта свита имеет мощность около 45 м и обладает четким ритмичным строением. В основании ритмов обычно залегают разнозернистые песчаники и псевдогравелиты светло-серые или пестрые, в подошве нередко с примесью галек. Они часто содержат остатки крупнораковинных озерных пелеципод и костей позвоночных. Мощность этой части ритма от 0,2 до 1,5 м. Выше залегают в основном песчаники свет-

ло-серые и желтовато-светло-серые, иногда переслаивающиеся с алевритами и реже с глинами. В песчаниках и алевролитах нередко видна косая слоистость типа знаков яри, реже более крупная, изредка обилие ходов ползания. Мощность этого второго элемента ритма 3,7-6,6 м. Наконец, третий элемент ритма, присутствующий не всегда, сложен глинами, как правило красными, мощность их до 2,7 м.

Результаты анализов показали, что песчаники и псевдогравелиты первого, базального элемента ритмов характеризуются очень изменчивым гранулометрическим составом как из одного пласта (рис. 41, 47 и 48, 51 и 52), так и из разных, что отмечается даже для одних и тех же петрографических разностей (см. рис. 41, 47, 51, 54 - псевдогравелиты; 48, 52 - песчаники). Это хорошо согласуется с представлением об отложении слагающего их материала из мутьевых или селемутьевых потоков. Естественно, каждый из таких потоков мог захватывать и отлагать различный по гранулометрическому особенностям материал. Кроме того, отлагавшийся из подобных спазматических неоднородных потоков осадок мог иметь существенно неодинаковый гранулометрический состав в разные моменты существования потока и в разных местах его распространения. Для этих пород, как и для песчаника с примесью гравийных зерен из кровли свиты (рис. 41, 55), характерна двух- и даже трехмодальность кривых распределения, частое расположение мод меньшей размерности легких и тяжелых фракций одного и того же образца в разных интервалах. Проанализированные породы из средней части ритмов, как песчаные, так и алевритовые и даже алеврито-песчаные, характеризуются одномодальными распределениями легких и тяжелых минералов и хорошей сортировкой алеврито-песчаного материала (см. рис. 41, 49, 50, 53).

Нэмэгэтинские отложения в разрезе Алтан-Ула I (рис. 38, разрез II) по своему строению в общем сходны со строением этой свиты в нэмэгэтинском разрезе, значительно больше лишь их мощность (127 м). Сходны и основные особенности гранулометрического состава тех и других отложений. Так, материал базальных частей ритмов, содержащий остатки пеллеципод и костей, в алтан-улинском разрезе также характеризуется очень плохой отсортированностью (см. рис. 41, 56, 62). Отложения же более

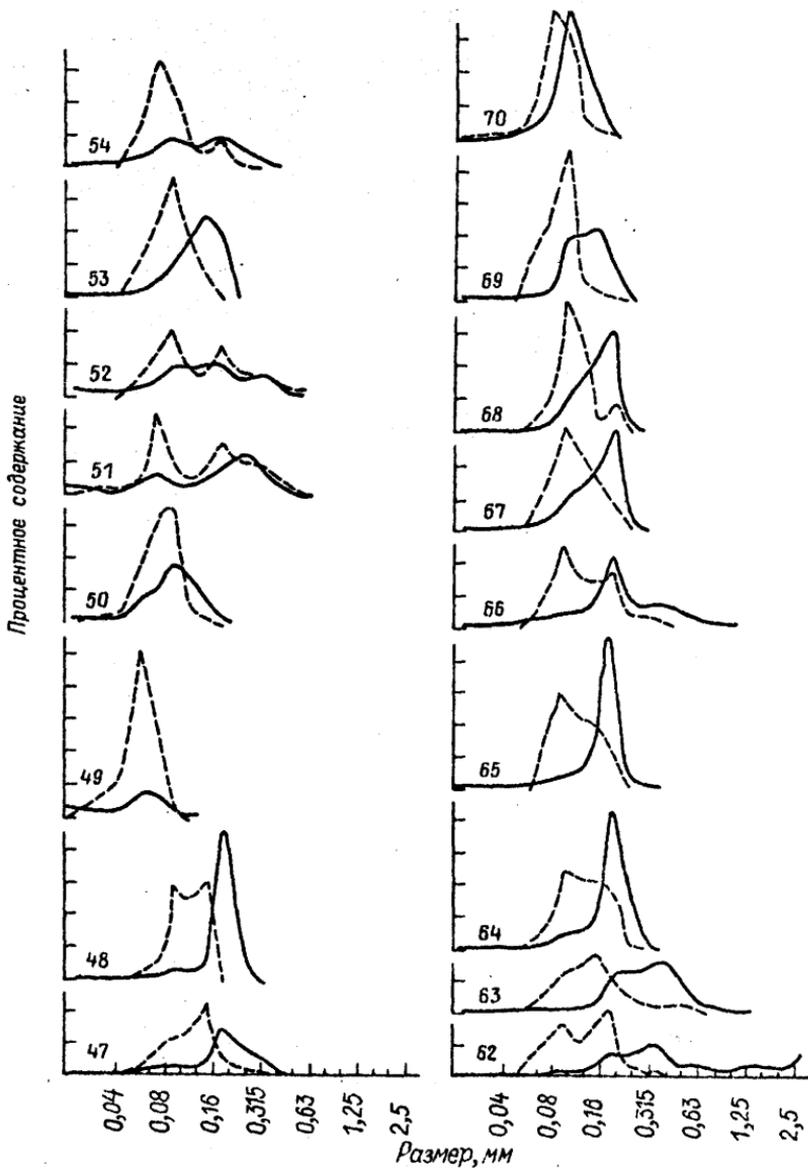
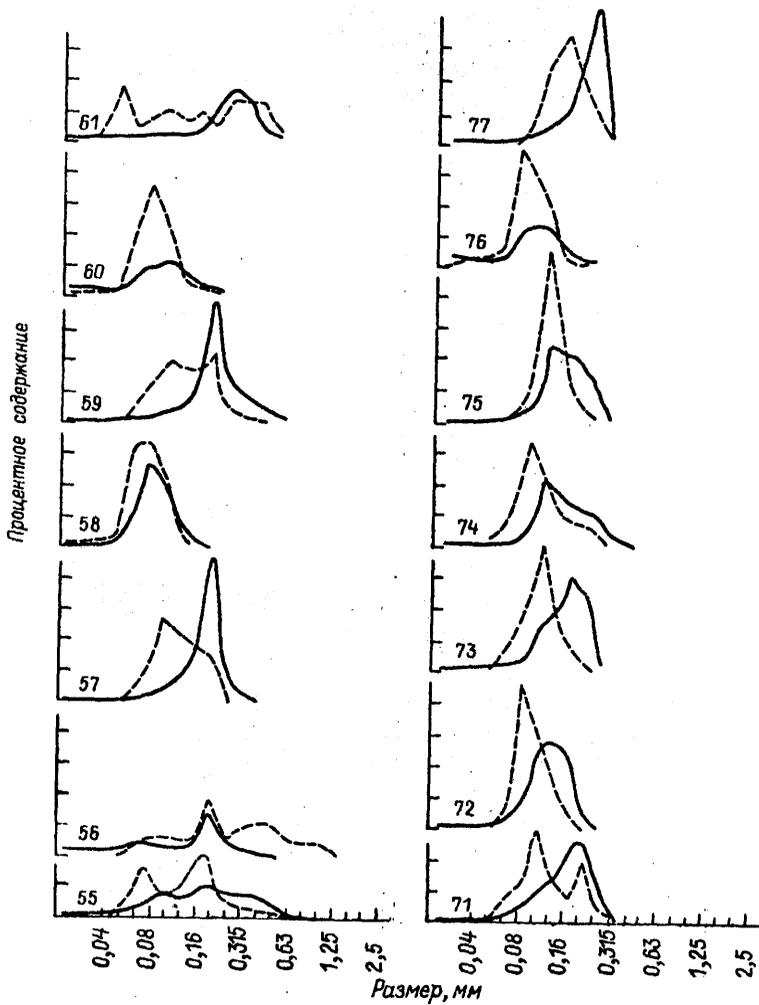


Рис. 41. Кривые гранулометрического  
 47-55 - разрез 2, 56-66 - разрез 11, 67-77 - разрез



состава образцов из нэмегэтинской свиты.  
 6 и 7. Условные обозначения те же, что на рис. 39.

высоких частей ритмов характеризуются, как правило, несравненно лучшей отсортированностью материала (см. рис. 42, 57-61, 63-66). При этом кривые распределения из сравниваемых разрезов иногда имеют сходный характер (см., например, рис. 41, распределения 60, 64, 66 и, соответственно, распределения 50, 48, 55). Однако обломочный материал в алтан-улинском разрезе часто значительно лучше отсортирован.

В районе Бамбу-Худука (рис. 38, разрезы 6, 7) отложения нэмэгэтинской свиты имеют изолированные выходы мощностью около 40 м, не граничат ни с барунгойотскими, ни с палеогеновыми отложениями, в связи с чем неясно, какая часть свиты обнажена. По общему облику они очень похожи на развитые в нэмэгэтинском разрезе, так как также обладают четкой ритмичностью.

Проанализированный материал песчаников базальных частей ритмов (см. рис. 41, 70, 73, 77) оказался хорошо отсортированным, четко одномодальным и для легких, и для тяжелых минералов, несмотря на то, что зернистость в образцах существенно различалась. Поскольку указанные песчаники либо переслаивались с линзочками псевдогравелитов, либо содержали остатки панцирей черепах, причем иногда расположенные примерно перпендикулярно напластованию, можно полагать, что материал, их слагающий, был отложен потоками повышенной плотности, т.е. мутьевыми. Такое предположение подтверждается тем, что гранулометрический состав алеврито-песчаного материала внутри панцирей черепах оказался существенно иным, чем состав вмещающей массы (см. рис. 42, 71, 70). При этом внутри панциря размер как легких, так и тяжелых минералов оказался более крупным. Поэтому возможен лишь один вариант: панцири черепах переносились уже заполненные алеврито-песчаным материалом, а это могли осуществить лишь достаточно плотные мутьевые или зерновые потоки. Эти потоки должны были быть достаточно мощными, а потому могли существовать лишь в обширных водоемах, так как только в этом случае они были способны захватить и отложить значительное количество остатков черепах и образовать по площади пласты.

Все образцы, отобранные из других частей ритмов (см. рис. 41, 67, 68, 72, 74-76), характеризуются в общем хорошей сортировкой, одномодальностью как легких, так и тяжелых минералов, однако

сортировка легких минералов в них обычно несколько хуже, чем в проанализированных образцах их базальных частей ритмов.

Образцы из нэмэгэтинской свиты бамбу-хулдукского района по медианному размеру относятся к мелкозернистым песчаникам, а изредка даже к алевролитам, и в общем указывают на более тонкий гранулометрический состав алеврито-песчаных пород по сравнению с наблюдаемым в той же свите нэмэгэтинского и алтан-улиноского разрезов. Это указывает на то, что здесь динамика водоема была более слабой и стабильной, а сам район, вероятно, располагался на большем удалении от области сноса по сравнению с двумя другими. Улучшение сортировки при удалении от области сноса четко проявилось в образце из разреза 13 (рис. 42, 78). Такая закономерность имеет место и в других случаях. Например, образцы, отобранные из самых верхов нэмэгэтинской свиты трех разрезов: 2, II и 4, имеют различную отсортированность при одинаковой медиане: в образцах из разрезов 2 и II (см. рис. 42, 55 и 56), располагающихся ближе к области сноса, она хуже, чем в образце из разреза 4 (см. рис. 42, 79). Такая же особенность, но значительно резче, проявилась в подошве палеогеновых отложений II и 4 разрезов (см. рис. 42, 80 и 81).

Для сравнения были сделаны гранулометрические анализы образцов из душигулинской и сайшандинской свит района Онгон-Улан-Улы (разрез 8) и сайшандинской свиты Олгой-Улан-Цаб (см. рис. 42, 82-86), т.е. из отложений альб-сеноманского возраста. Первый образец был взят из песчаника с обилием мелких и крупных (до 6 см) неориентированных раковин и включениями обломков и ступтков глин и алевролитов, второй - из пестрого псевдогравелита с крупными пеллециподами и окремненными обломками древесины. Это образцы отложений, возникших явно в крупных озерах. Третий, четвертый и пятый образцы взяты из грубообломочных красноцветных толщ. Причем предпоследний (85) отобран из породы, вмещающей кладку крупных яиц динозавров, а последний (86) - из материала внутри одного яйца. Показательно, что кривые гранулометрического распределения этих образцов оказались принципиально сходными с отмеченными для аналогичных фациальных разновидностей образцов ранее рассмотренных отложений, например, для красноцветных гравелитов (см. рис. 42, 85, 86 и 80), для псевдогравелитов с крупными пеллециподами (см. рис. 42, 83 и рис. 41,

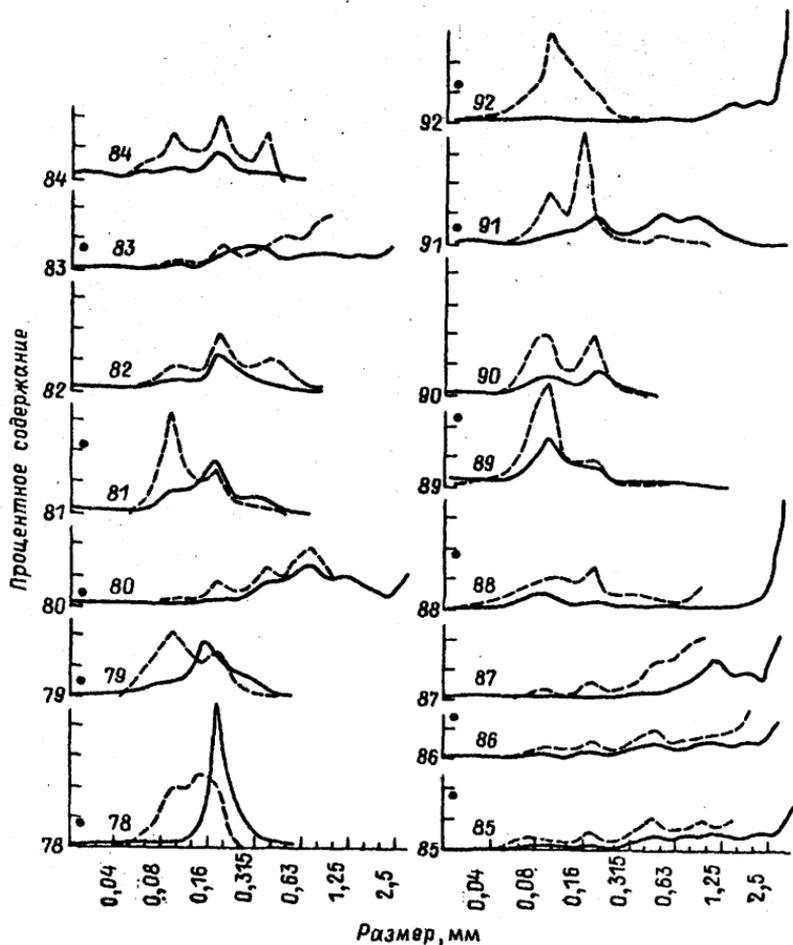


Рис. 42. Кривые гранулометрического состава образцов из нэмегэ-тинской свиты.

79 - разрез, 4, 78 - разрез 13, из низов палеогеновых отложений, 80 - разрез 11, 81 - разрез 4; 87-90 - разрез 12, 92 - район разреза 14, из альб-сеноманских отложений, 82-86 - разрез 8, из барунгойотской свиты, 91 - разрез 9. Условные обозначения те же, что на рис. 39.

62), для песчаников с примесью гравия (см. рис. 42, 84 и рис. 39, 22), песчаников с обломками глин и алевролитов с обилием раковин моллюсков (см. рис. 42, 82) и псевдогравелитов с целлюлодами, обломками костей и древесины (см. рис. 42, 56).

### 3. Особенности гранулометрических кривых распределения, имеющие генетическое значение

В районе Баин-Дзака (разрез 12), по-видимому, в самых низах палеогеновых отложений, залегает пласт 3,2 м мощности красноцветных гравие-дресвянников и конгломерато-брекчий. Для материала из его низов и верхов были выполнены гранулометрические анализы (см. рис. 42, 87, 88). Выше располагается пласт ~1 м мощности гравие-песчано-известняковой и песчаной известняковой породы с гравийными зернами и участками мощностью до 10 см красноцветного песчаника. Из последнего также был проанализирован материал (см. рис. 42, 89). Еще выше, около 3,5 м из пласта коричневых песчаников, сверху переходящих в тонкослойные алевролиты и глины, также был взят образец (см. рис. 42, 90).

Первые два образца могут быть эталонами отложений, образовавшихся за счет материала, не испытывшего длительного переноса и не подвергавшегося перестроению в зоне осадконакопления. О последнем свидетельствует, в частности, присутствие сильно выветрелых обломков. Осадок скорее всего был отложен временными, и возможно, селевыми потоками. В связи с отмеченным можно полагать, что гранулометрический состав этих пород и характер сочетания в них распределений легких и тяжелых минералов практически полностью отражают особенности гранулометрии материала, формировавшегося в соответствующей области сноса. Значит, для него была характерна неотсортированность, многомодальность материала и сходное распределение (в пределах алеврито-песчаной части) легких и тяжелых минералов с обычным совпадением их мод. Близкими особенностями обладает и третий образец, хотя он значительно мелкозернистый. Это и понятно, так как слагающий его материал скорее всего был принесен из области сноса также временным потоком, только захоронен он был не самостоятельно, а в зоне накопления карбонатного осадка.

Характерно, что сходными чертами обладают гранулометрические особенности алеврито-песчаного материала и из грубообломоч-

ных, грубообломочно-песчаных и смешанных пород других разрезов (см. рис. 39, 17, 21 и рис. 42, 85, 86, 80) или материала из нептунической дайки (см. рис. 40, 34), т.е. в тех случаях, когда осадочный материал выносился с суши временными потоками, а в зоне осадконакопления не испытывал перемыва и переотложения.

Показательно, что в байн-дзакском разрезе 4-й из рассмотренных образцов (см. рис. 42, 90), материал которого был отложен из обычных, не суспензионных водных потоков, обладает несовпадением одной из мод тяжелых и легких минералов. При этом, поскольку в породе содержится почти 50% фракций  $< 0,01$  мм, материал вряд ли подвергался перемыву в зоне осадконакопления. Следовательно, несовпадение соответствующих мод могло быть вызвано лишь особенностями переноса и отложения материала, а именно тем, что размер зерен тяжелых минералов, переносившихся путем сальтации, был несколько меньше, чем размер легких. Несовпадение основных мод распределения легких и тяжелых минералов отмечается и в породах, сходных с выше рассмотренными грубозернистыми, материал которых был отложен из обычных водных потоков, обладавших большими скоростями и могущими переносить грубый материал. Примером может служить материал из косослойчатой породы с чередованием прослоев песчаного и гравийного материала (см. рис. 42, 91) и цемент конгломератов из пласта палеогенового возраста (см. рис. 42, 92)!

Для материала, слагающего псевдогравелиты или разнозернистые песчанки с псевдогравийными включениями, как и для грубозернистого, отложенного временными потоками, также характерна многомодальность в распределении легких и тяжелых минералов и общая плохая отсортированность. Однако для него типично значительно большее разнообразие кривых распределения и обычное несовпадение размеров главных мод легких и тяжелых минералов (см. рис. 39, 20; рис. 41, 47, 51, 62 и рис. 42, 83). Отмеченные особенности гранулометрии материала из пластов псевдогравелитов объясняются тем, что он, как правило, имел существенно разнородное происхождение: часть его выносилась с суши, а часть захватывалась со дна водоема. Кроме того, во время движения потока, сопровождаемого его частичной разгрузкой, гранулометрический состав переносимого материала и соотношение между легкими и тяжелыми минералами могли изменяться и, наконец, при

быстром отложении материала из спазматического, неоднородного по структуре потока, отдельные участки образующегося осадка могли иметь значительно различный гранулометрический состав. Наряду с этим, как указывалось ранее, для отложений нэмегетинского и алтан-улинокого разрезов иногда отмечается в псевдогравелитах и относительно хорошая отсортированность материала, и совпадение мод легких и тяжелых минералов (см. рис. 39, 4, 12; рис. 41, 56), и общее сходство кривых распределения с типичными для вмещающих отложений. Это проявление унаследованности состава осадков еще более увеличивает разнообразие кривых гранулометрического распределения алеврито-песчаного материала рассматриваемой генетической разновидности осадков.

Как следует из приведенных ранее данных, наиболее часто встречающимися в изученных отложениях кривыми распределения гранулометрического состава являются кривые с модами или перегибами, отвечающими размерам 0,08–0,1 мм и 0,16–0,2 мм, причем это отмечается одновременно и для легких и для тяжелых минералов. При этом главная, обычно резко выраженная мода тяжелых минералов располагается почти исключительно в более мелкой фракции, а мода легких минералов – в крупной, причем в образцах очень редко присутствует материал, достигающий размера 0,63 мм. Можно полагать, что указанные эмпирические кривые распределения представляют собой результат сложения двух нормальных кривых распределения, соответствующих отложению материала из взвеси (распределение с модой 0,08–0,1 мм) и путем сальтации. Ведь обычно размер частиц взвеси не превышает 0,1 мм, а транспортируемых сальтацией – 1 мм [7']. Поскольку максимальный размер частиц в рассматриваемых отложениях почти никогда не превышает 0,63 мм, можно полагать, что материал переносился во взвеси и сальтацией, отлагался относительно слабыми донными течениями и не испытывал после отложения переработки более сильными движениями воды. Такое заключение подтверждается обычно отсутствием в соответствующих породах коослойчатых текстур, нередко до 25–30%, содержанием пелитового материала, присутствием иногда следов подводно-оползневых деформаций или следов ползания роющих организмов. Можно предполагать, что рассматриваемые осадки являются типичными представителями донных, относительно удаленных от берега образований крупных озерных водоемов.

Большая часть остальных образцов (они составляют несколько более 1/4 изученных) обладает одномодальной кривой распределения как легких, так обычно и тяжелых минералов алеврито-песчаной размерности и, как правило, отсутствием обломков крупнее 0,63 мм. Часто сортировка материала очень хорошая. Моды располагаются в различных размерных фракциях, причем для легких и тяжелых минералов они в одном и том же образце часто не совпадают.

Хорошая отсортированность материала рассматриваемой группы образцов, притом и легких и тяжелых минералов, смещение, как правило, моды тяжелых минералов в более тонкие фракции по сравнению с модой легких, нередко присутствие в породах признаков косо́й слоистости, общая мелкозернистость материала указывают на отложение осадка обычно в обстановке слабой и достаточно стабильной подвижности воды, причем либо преимущественно в результате сальтации материала (с модой легких минералов в интервалах крупнее 0,1 мм), либо путем выпадения из взвеси (при моде легких минералов во фракции 0,08–0,1 мм и мельче). Для образцов же, в которых моды легких и тяжелых минералов находятся в одной и той же фракции – отложение материала происходило практически лишь из взвеси, так как в них моды располагаются во фракциях размером <0,1 мм. Для этих образцов, как и вообще для пород с модой легких минералов во фракциях <0,1 мм, часто отмечаются высокие содержания пелитового материала, превышающие 25%, а иногда и более, что может рассматриваться как показатель отсутствия перемыва осадка после его отложения.

Приведенный анализ общих особенностей кривых распределения гранулометрического состава с попыткой их гидравлического объяснения показывает, что нет никаких оснований предполагать присутствие среди рассматриваемых отложений пород речного происхождения. Такой вывод хорошо согласуется с данными, полученными Б.Н. Котельниковым на основании специального изучения особенностей кривых распределения гранулометрического состава разных генетических типов песков. Эти исследования показали, что для аллювиальных стречневых песков типично полимодальное распределение причем только в области размеров >0,1 мм наблюдаются не менее трех мод, отвечающих качению, сальтации, а иногда и взвеси. Для аллювиальных русловых песков, по данным этого исследователя, ха-

рактерна бимодальность распределения гранулометрического состава, причем тонкозернистое субраспределение (фракция 0,05-0,1 мм) отделено от основного, грубозернистого, дефицитом частиц около 0,1 мм. Основное субраспределение, отвечающее оальтирующим частицам, обычно заключено в интервале 0,1-0,5 мм и нередко имеет "хвост" грубых фракций. Последний может модифицироваться в самостоятельное субраспределение с модой >2,5 мм, отвечающее качению. Как видно из всего приведенного нами материала, такие распределения не характерны для рассматриваемых нами отложений, а если сходные иногда и наблюдаются (среди более крупнозернистых пород), то речной генезис их исключается на основании нередкого присутствия среди остатков раковин озерных моллюсков и некоторых других данных, указанных ранее.

Помимо отмеченного, надо иметь в виду, что по данным Г.Э.Рейнека и И.В.Сингха [7] русловые осадки, как правило, имеют размер зерен от песчаного до гравийного и характеризуются низким содержанием глинистых частиц. Для рассматриваемых же отложений типично большое содержание алевритовых и глинистых частиц и обычное отсутствие крупнозернистых зерен, и тем более гравийных.

Часто полагают, что распределение частиц в песчано-глинистых и песчано-глинисто-алевритовых породах нередко носит двухвершинный характер с минимумом во фракции 0,1-0,05 мм. По Б.Н.Котельникову [2], для песков характерен дефицит во фракции 0,08-0,1 мм. Как следует из приводимых нами данных, для алевритопесчаных меловых пород Монголии, напротив, часто овойственно наличие не дефицита, а моды во фракции 0,08-0,1 мм. Такая специфика, возможно, представляет собой черту, характерную для определенных разновидностей донных осадков крупных озер аридного климата, но ранее она не была вскрыта, так как гранулометрия алевритопесчаных озерных отложений на основе детальных анализов, по-существу, еще не изучалась. Можно полагать, что в дальнейшем наличие алевритопесчаных пород с модой во фракции 0,08-0,1 мм будет выявлено и среди определенных разновидностей донных осадков морских водоемов. Ведь поскольку для обломочного материала, выносимого из областей сноса временными потоками, наличие дефицита во фракции 0,08-0,1 мм не характерно, такой дефицит не может быть типичен для всех алевритопесчаных осадков, отложенных в водных условиях. Ясно, что для каких-то ге-

нетических разновидностей алеврито-песчаных отложений в любой единой седиментационной области эта фракция должна быть модальной. Действительно, недавно Б.М.Осовецким [6'] в результате дробных гракулометрических анализов было выявлено широкое распространение алевритовых осадков, нередко с модой во фракции 0,08-0,1 мм, в отложениях пойм современных рек.

Основной целью настоящей работы было на конкретном представительном материале показать возможности генетической интерпретации детальных гракулометрических анализов алеврито-песчаных пород на основе анализа кривых распределения обломочных зерен по их размеру. Представляется, что такой подход является наиболее перспективным при использовании гракулометрических данных для познания генезиса отложений.

## УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ

### К ПОСЛЕСЛОВИЮ И ПРИЛОЖЕНИЮ

1. Биккенин В.Т., Рожков Г.Ф. Критический обзор генетических диаграмм в гранулометрии // Литология и полезные ископаемые. 1982. № 6.
2. Котельников Б.Н. Транзитная фракция водных песков // Литология и палеогеография. Л., 1973. Вып.1.
3. Котельников Б.Н. Транспортировка обломочного материала и формирование структур песчаных осадков: Автореф. канд. дис. Л., 1975.
4. Котельников Б.Н. Гранулометрия и определение основных динамических типов песков // Литология и палеогеография. Л., 1976. Вып.2.
5. Методы палеогеографических реконструкций (при поисках нефти и газа). Л., 1984.
6. Осовецкий Б.М. Особенности микроструктуры и тяжелой фракции алевритовых аллювиальных осадков по данным дробного гранулометрического анализа // Аллювий. Пермь, 1983.
7. Рейнек Г.Э., Сингх И.Б. Обстановки терригенного осадконакопления. М., 1981.
8. Романовский С.И. Седиментологические основы литологии. Л., 1977.
9. Venzo G.A., Maracco R., Lenardon G., Princivalle F. Grain-size, roundness, surface texture and mineralogical composition of recent desert sediments in the Algerian Sahara // J. di Geologia. 1985. Vol.47, N 1-2.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
<u>Глава I.</u> К истории исследований гранулометрических освокупностей .....	5
<u>Глава II.</u> Методы исследования структур, примененные в работе .....	12
<u>Глава III.</u> Транспортировка обломочного материала - основной фактор в формировании структур осадков ...	17
<u>Глава IV.</u> Формирование структуры песчаных осадков разного генезиса в процессе транспортировки .....	26
1. Принципиальная схема трансформации структуры обломочного вещества .....	27
2. Элювиально-делювиальные и моренные отложения ...	28
3. Делювиально-пролювиальные и моренные отложения...	30
4. Фаши аллювия: стрежневые, русловые и пойменные осадки .....	35
5. Прибрежно-морские осадки.....	44
6. Прибрежно-морские осадки зоны слабой волновой переработки .....	58
7. Эоловый процесс .....	66
<u>Глава V.</u> Общая характеристика динамических типов ЭПР песков и указания по методике их определения	77
Определитель основных динамических типов песков .....	82
Заключение .....	87
Указатель литературы .....	90
<u>Послесловие.</u> Работа Б.Н.Котельникова в свете современного состояния гранулометрического анализа...	92
<u>Приложение.</u> Гранулометрические особенности верхнемеловых отложений Южной Монголии и некоторые общие вопросы генетических интерпретаций детальных гранулометрических анализов .....	108
1. Гранулометрические особенности барунгойотских отложений .....	109
2. Гранулометрические особенности немэгетинских отложений .....	118
3. Особенности гранулометрических кривых распределения, имеющие генетическое значение .....	125
Указатель литературы к послесловию и приложению .....	131