

Ю. ПААП

О СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЭСТОНИИ

Методы геологической интерпретации данных гранулометрии используются более 70 лет (Friedman, 1967). Но только в последнее десятилетие они стали приобретать определенность и достоверность. В своей заключительной статье о генетическом значении статистических параметров гранулометрического спектра песков Фридман отмечает, что разница в составе песков, отложенных в разных условиях, реальная и отчетливая. «После многих лет изучения гранулометрического состава мы можем сказать, что распределение зерен песков по гранулометрическому спектру имеет генетическое значение и может быть объяснено с помощью физической модели». (Friedman, 1967, с. 352; см. также Friedman, 1961, 1962, 1965, 1966).

Введение

В ходе детальных геолого-съёмочных работ возник вопрос, в какой степени различные способы геологической интерпретации данных гранулометрических анализов эффективны при изучении разных типов четвертичных отложений. Существующие методы разработаны в основном для изучения песков. Универсальные способы, предназначенные для исследования всех терригенных отложений, начиная от глин и кончая грубообломочными моренами, мало разработаны. Но применение разных методов интерпретации для генетически тесно связанных отложений со многими переходными поликомпонентными разновидностями нежелательно.

В настоящей работе поставлена цель изучить геологическое значение статистических параметров гранулометрического спектра на конкретном материале. Другие возможности генетической интерпретации данных гранулометрии, как диаграмма Л. Рухина (1947, 1961), СМ диаграмма Пассега (Passega, 1957), методы, основанные на изучении формы кривой распределения (Otto, 1939; Doeglas, 1946; Sindovski, 1957; Spencer, 1963 и др.) или на сопоставлении параметров спектра с другими измерениями, например с окатанностью (Mabesoone, 1962), не рассматриваются.

Разными авторами предложено множество параметров или коэффициентов, характеризующих гранулометрический спектр, и разработаны способы их геологической интерпретации. Детальный и хороший критический обзор применяемых до 1964 года параметров приводит Фолк (Folk, 1966).

Выделены две основные группы параметров:

1) графические параметры, вычисляемые по данным измерения графически изображенного гранулометрического спектра или получаемые

путем геометрических построений (Батурин, 1947; Рухин, 1947; Trask, 1930, 1932; Inman, 1952; Folk, Ward, 1957; McCammon, 1962a и др.);

2) статистические параметры, вычисляемые непосредственно по данным анализа методом моментов без использования графических построений (Рухин, 1947, 1961; Wentworth, 1929; Krumbein, Pettijohn, 1938; Griffiths, 1961; McCammon, 1962b; Friedman, 1967 и др.).

Характеристика материала и краткое изложение методики

Экспериментальный материал собран в ходе детальных геолого-съемочных работ в Эстонском сланцевом бассейне, расположенном в Северо-Восточной Эстонии. Площадь изученной нами территории составляет около 1300 км². Пробы на гранулометрический анализ взяты из 1200 обнажений, шурфов и скважин.

Северо-Восточная Эстония характеризуется сравнительно монотонным геологическим строением. Залегающие на карбонатных породах ордовика и среднего девона четвертичные отложения представлены в основном ледниковыми и водно-ледниковыми отложениями последнего оледенения. Рельеф слабо расчлененный, с малой разницей относительных высот. Мощность четвертичных отложений незначительная, обычно в пределах 2—6 м. Встречаются альвары. Больше половины территории в разной степени заболочено.

Гранулометрический состав четвертичных отложений, как известно, сложный и изменчивый. На исследованной территории встречаются ленточные глины, алевриты, пески, гравии, галечники, валунники, разные морены и многие промежуточные поликомпонентные отложения. Водно-ледниковые отложения залегают преимущественно на основной морене верхнеплейстоценового возраста, состав которой изменяется за счет местных пород. Отложения разных по морфологии и строению озоз, камов и флювиогляциальных дельт чередуются с отложениями местных ледниковых озер, находящихся на разных абсолютных высотах.

Опробование. Пробы отбирались бороздовым и точечным методами. Большинство проб взято вертикальной бороздой шириной 20 см из одного слоя, соответствующего определенному энергетическому уровню среды осадконакопления. Из линз, выветрелых слоев, контактных зон, участков с резким изменением состава и т. п. при необходимости отбирались дополнительные, часто точечные пробы. Вес проб колебался от 2 (глины и пески) до 40 кг (грубообломочные морены). Точки опробования почти равномерно распределяются по изученной территории, исключая болота и альвары. Распределение проб по типам отложений примерно соответствует частоте их распространения.

Методика анализа. Анализы выполнены по стандартной методике, установленной для геолого-съемочных работ. Фракции диаметром >0,1 мм выделялись на ситах 0,1; 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 5; 7; 10; 20; 40 и 70 мм. Если содержание фракции <0,1 мм превышало 5%, то пипеточным методом выделялись фракции <0,001; 0,001—0,005; 0,005—0,01; 0,01—0,05 и >0,05 мм. Качество анализов оценивалось с помощью критерия Пирсона (χ^2). 44 контрольных анализа соответствовали уровню значимости более 95%. Для трех анализов уровень значимости не превышал 90%. Расхождения получались за счет фракции 0,05—0,1 мм.

Обработка данных и методика интерпретации. На каждый анализ заполнялась двухрядная краевая перфокарта формата К-5. Дополнительно на карте отмечались: местоположение точки опробования, отношение к элементам рельефа, предполагаемый генезис,

макроскопическое описание слоя, минералогический состав и другие сведения. С перфокарт данные анализа вводились в электронную вычислительную машину (ЭВМ) «Урал-4» для вычисления статистических параметров по методу моментов. Параметры гранулометрического спектра наносились снова на перфокарты и кодировались вместе с другими сведениями. Одновременно с вычислением моментов на ЭВМ отложения классифицировались по однотипным спектрам (Паап, 1968). Для выделения однотипных спектров применялась формула

$$Q = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - m_i)^2}{n_i + m_i},$$

где n_i — содержание фракции i -го порядка первого анализа;
 m_i — содержание фракции i -го порядка сравниваемого анализа;
 k — количество фракций;
 Q — расстояние между анализами в k -мерном пространстве.

Для 400 анализов конструировались кумулятивные кривые и вычислялись коэффициенты по методу квартилей. Полученные коэффициенты сопоставлялись со статистическими параметрами тех же спектров.

Генезис отложений определялся по всему комплексу имеющейся информации, включая данные анализов (гранулометрического, минералогического, литологического).

При геологической интерпретации (генетическая и фаціальная привязка, составление литофаціальной карты, проверка рабочих гипотез, сопоставление с данными дешифрирования аэрофотографии, составление диаграмм и т. д.) постоянно использовалась перфокартотека. Ее применение облегчило и значительно ускорило работу.

Вычисление параметров гранулометрического спектра по методу моментов

Математически более строгим, чем графические способы, является вычисление параметров по методу моментов, введенному в математическую статистику П. Чебышевым (Вентцель, 1964).

Центральные моменты, вычисленные относительно математического ожидания, соответствуют моментам относительно центра тяжести в механике. Для дискретных случайных величин центральный момент s -го порядка выражается формулой (Вентцель, 1964)

$$\mu_s = \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^s p_i, \quad (1)$$

где μ_s — момент s -го порядка;
 x_i — случайная величина i -го порядка;
 M_x — математическое ожидание случайной величины;
 p_i — вероятность случайной величины.

Для характеристики гранулометрического спектра применяются первые четыре центральных момента. На их основе вычисляются следующие параметры:

1. Взвешенное среднее арифметическое (средний диаметр) \bar{M} :

$$\bar{M} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n n_i}, \quad (2)$$

где n_i — частота нахождения i -го порядка (весовые проценты);
 x_i — среднее значение логарифмов конечных размеров фракций
 i -го порядка.

2. Стандартное отклонение (коэффициент сортировки, сортированность):

$$\sigma = +\sqrt{\sigma^2}; \quad \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1} n_i (x_i - \bar{M})^2}{\sum_{i=1} n_i} . \quad (3)$$

Дисперсия σ^2 является характеристикой рассеивания, разбросанности значений случайной величины около ее среднего значения и имеет размерность квадрата случайной величины. Поэтому для характеристики отсортированности отложений удобнее пользоваться стандартным отклонением σ , размерность которого выражается в единицах шкалы диаметров (см. рис. 1).

Средний размер и сортированность (стандартное отклонение) характеризуют наиболее важные черты распределения: его положение относительно шкалы размерностей и степень разбросанности. Для подробного описания распределения, иногда нужного в целях генетической интерпретации, применяются моменты высших порядков.

3. Асимметрия (коэффициент косости, асимметрии) распределения S_k :

$$S_k = \frac{\mu_3}{\sigma^3}; \quad \mu_3 = \frac{\sum_{i=1} n_i (x_i - \bar{M})^3}{\sum_{i=1} n_i} . \quad (4)$$

При положительной асимметрии ($S_k > 0$) мода расположена в стороне меньших значений от среднего диаметра, при отрицательной асимметрии ($S_k < 0$) — наоборот.

4. Эксцесс E , выраженный через четвертый момент:

$$E = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3; \quad \mu_4 = \frac{\sum_{i=1} n_i (x_i - \bar{M})^4}{\sum_{i=1} n_i} , \quad (5)$$

который характеризует крутость кривой распределения, т. е. ее остроты или плосковершинность. Для широко распространенного в природе нормального распределения $E=0$, для более островершинных кривых $E > 0$, для более плосковершинных $E < 0$.

5. Коэффициент изменчивости:

$$V = 100 \frac{\sigma}{M} \% . \quad (6)$$

В гранулометрических исследованиях коэффициент изменчивости оказался маловыразительным, так как он является слишком обобщенным параметром спектра.

Вычисление величины $\sum_{i=1} n_i$ вводится для проверки данных анализа и для выявления ошибок при переводе данных на машинные перфокарты. Если принять, что при отсутствии ошибок $\sum_{i=1} n_i = 100\%$, и провести соответствующие преобразования, то основные формулы примут следующий вид:

1) средний диаметр

$$\bar{M} = 0,01 \sum_{i=1} n_i x_i; \quad (7)$$

2) сортированность

$$\sigma = [0,01 \sum_{i=1} n_i (x_i - \bar{M})^2]^{1/2}; \quad (8)$$

3) асимметрия

$$S_k = 0,01 \sigma^{-3} \sum_{i=1} n_i (x_i - \bar{M})^3; \quad (9)$$

4) эксцесс

$$E = [0,01 \sigma^{-4} \sum_{i=1} n_i (x_i - \bar{M})^4] - 3. \quad (10)$$

Приведенные формулы отличаются от применяемых американскими и английскими литологами (Гриффитс, Фридман и др.) формул своими обозначениями и по сравнению с ними несколько упрощены. Для эксцесса иностранные авторы применяют другую формулу (Friedman, 1967 и др.). Вычисленные на основе приведенных формул параметры являются конкретным приложением классического метода моментов к обработке данных гранулометрического анализа.

Сравнение графического и статистического способов вычисления параметров гранулометрического спектра

Большинство систем графических параметров разработано на основе фи-шкалы (рис. 1) Крамбейна (Krumbein, 1934). Перевод фи-единиц на десятичную шкалу, применяемую в Советском Союзе, требует дополнительных вычислений или специальных номограмм. Исключения составляют коэффициенты Траска (Trask, 1932; см. также Рухин, 1961; Чистяков, 1957; Петелин, 1956). В отечественной литературе система коэффициентов Траска известна как метод квартилей.

Десятичная шкала	$\lg x$ (мм)	20	10	5	2,5	1,25	0,625	0,3125	0,15625	0,078125	0,0390625	0,01953125	0,009765625	0,0048828125	0,00244140625	0,001220703125
фи-шкала	мм	128	64	32	16	8	4	2	1	1/2	1/4	1/8	1/16	1/32	1/64	1/128
	$-\lg_2 x$	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7

Рис. 1. Сравнение фи-шкалы Крамбейна и десятичной шкалы, принятой в Советском Союзе.

x — диаметр зерен в миллиметрах.

Л. Рухин (1961, с. 522) отмечает, что «Способ квартилей особенно удобен для характеристики гранулометрического состава плохо отсортированных отложений и для анализов, выраженных во фракциях с непостоянным отношением конечных размеров. Поэтому способ... следует считать универсальным способом (обработки данных. — Ю. П.) гранулометрического анализа.» О методе моментов он говорит, что при использовании логарифмов он может применяться лишь при наличии фракций с постоянным отношением конечных размеров.

Сравнение полученных по обоим методам параметров этого не подтвердило. Отмеченные многими исследователями (Inman, 1952; McCampton, 1962a, b и др.) недостатки метода Траска не вызывают сомнений. Так как коэффициенты Траска учитывают форму кривой только

в пределах 25—75%, результаты оказались мало характерными даже для плохо отсортированных отложений. На рис. 2 изображены пары существенно различных гранулометрических спектров, которые имеют совпадающие коэффициенты Траска. Именно ближе к концам кривая распределения имеет большее генетическое значение (Doeglas, 1946 и др.). Поэтому и получилось, что часть исследованных нами морен попала в класс хорошо отсортированных отложений и в значительной степени перекрылась с водно-ледниковыми отложениями. На диаграмме $Md-S_0$ поля с разными литологическими типами морен выделялись хуже, чем на диаграмме средний диаметр—сортированность ($\bar{M}-\sigma$). Для водно-ледниковых отложений характерные и достоверные генетические поля не определялись.

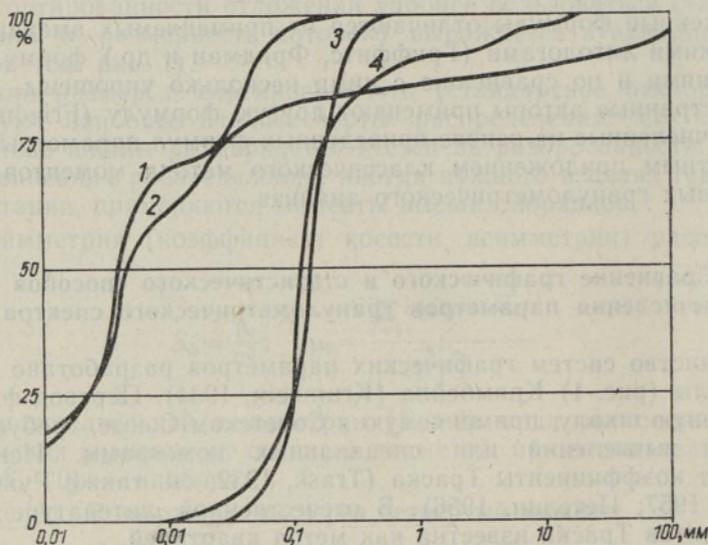


Рис. 2. Отложения с разным генезисом и составом, но с одними и теми же параметрами спектра, вычисленными по квартилям.

1 — ленточная глина; 2 — глинистая морена с неокатанными обломками девонских карбонатных пород; 3 — хорошо отсортированный песок из берегового вала; 4 — гравистый песок из флювиогляциальных камов.

Исследовалось также влияние субъективного фактора на конструирование кумулятивных кривых и на измерение квартилей. Шесть человек составляли по заданным идентичным точкам, соответствовавшим разнотипным спектрам, кумулятивные кривые и измеряли квартили. Вычисленные коэффициенты приводятся в табл. 1. Значительные расхождения получаются при коротких спектрах, когда весь анализ выражен 4—5 фракциями. Но именно для характеристики хорошо отсортированных отложений требуется наибольшая точность. Несомненно, что одной из причин малой точности полученных коэффициентов Траска является недостаточная детальность стандартного анализа. При увеличении детальности точность коэффициентов возрастает и влияние субъективного фактора уменьшается.

Немаловажное значение имеет и экономичность применяемого метода обработки данных. Для полной обработки данных одного анализа по методу квартилей требуется 30—40 минут. Примерно столько же

Таблица 1

Субъективные ошибки определения коэффициентов Траска по кумулятивным кривым (крайние значения шести определений, произведенных разными исполнителями)

Тип отложений	Коэффициенты		
	Md	S_0	S_h
Алеврит	0,075—0,087	1,25—1,44	1,17—1,43
Гравистый песок	0,59—0,65	1,76—1,81	1,08—1,39
Ленточная глина	0,0061—0,0068	2,70—3,30	0,09—0,21
Грубообломочная морена	11,5—12,0	9,93—10,4	1,53—1,74
Глинистая морена	0,090—0,096	6,03—6,33	0,38—0,44

занимает вычисление параметров по методу моментов при пользовании логарифмической линейкой или настольной электрической вычислительной машиной. Ошибки вычисления составляют при этом 0,2—0,5%. Для обработки данных 1000 гранулометрических анализов требуется около 500 часов.

Для данной работы вычисления по методу моментов выполнялись на ЭВМ «Урал-4». Расчет показал, что стоимость обработки одного анализа на ЭВМ была примерно в три раза меньше, чем по методу квартилей.

О применимости статистических параметров гранулометрического спектра для генетической интерпретации

Рассмотрим основные параметры гранулометрического спектра — средний диаметр (\bar{M}) и сортированность (σ). На рис. 3 приводятся параметры $\bar{M}-\sigma$ 1081 спектра. На диаграмме выделяются зона неотсортированных отложений, зона неопределенности и зона отсортированных отложений. Вертикальные линии являются условными границами крупных гранулометрических типов отложений. Выделенные поля отражают действительный облик отложений. Более 95% полевых определений не противоречат устанавливаемым границам и хорошо согласуются с данными лабораторных анализов.

Зона неотсортированных отложений образует гляциальное генетическое поле.

Зона неопределенности отделяет морены (неотсортированные отложения) от водно-ледниковых (отсортированных) отложений. Она распадается на две части, расположение которых отражает взаимосвязь и постепенность процессов осадкообразования, так как в природе все три типа отложений тесно связаны. Исследуем подробнее структуру и геологическое значение зоны неопределенности.

Левая часть зоны неопределенности образуется лимногляциальными отложениями, которые возникают при размыве и переотложении морен, унаследова некоторую часть их гранулометрического спектра. Процесс перебива морены и выноса мелких частиц в глубокие части бассейна постепенный. Иногда нельзя точно определить, где кончается морена и где начинаются отложения приледникового озера. Характерно, что в

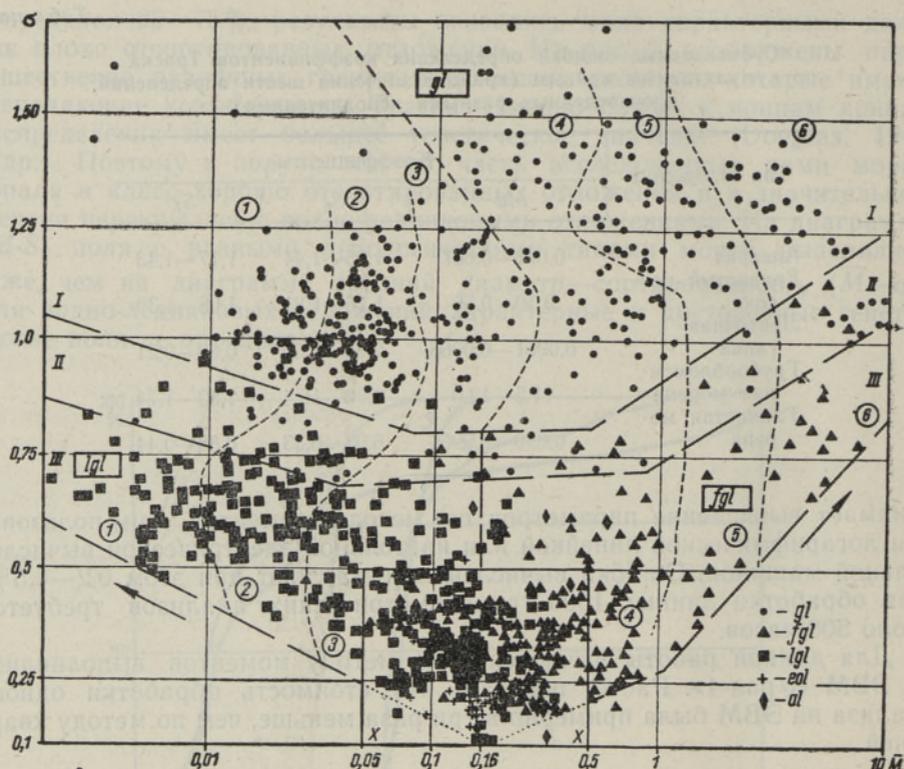


Рис. 3. Общая диаграмма основных параметров гранулометрических спектров: средний диаметр — сортированность (\bar{M} — σ) четвертичных отложений Северо-Восточной Эстонии:

I — зона неотсортированных отложений; II — зона неопределенности; III — зона отсортированных отложений. Гранулометрические типы: 1 — пелитовый; 2 — алевритовый; 3 — алеврито-песчаный; 4 — гравийно-песчаный; 5 — гравийный; 6 — галечный. X — поле песчаных отложений, генетическое разделение которых на основе двух основных параметров недостаточно. Латинскими буквами обозначена генетическая принадлежность отложений: *gl* — гляциальные; *lgl* — флювиогляциальные; *lgl* — лимногляциальные; *eol* — эоловые и *al* — аллювиальные отложения. Стрелки указывают тенденцию уменьшения сортированности в зависимости от среднего диаметра.

зону неопределенности попадают лимногляциальные отложения, связанные с береговой линией приледниковых озер и залегающие относительно маломощным слоем на глинистых моренах. Эти причины наряду с ошибочными определениями генезиса обуславливают перекрытие гляциального и лимногляциального полей.

В зону неопределенности между моренами и флювиогляциальными отложениями попадают отложения, которые не всегда легко определяются и по другим признакам.

Флювиогляциальное генетическое поле включает гравийно-песчаный (4), гравийный (5) и галечный (6) гранулометрические типы, лимногляциальное генетическое поле — пелитовый (1), алевритовый (2) и алеврито-песчаный (3) гранулометрические типы отложений. X-поле образовано только хорошо отсортированными песчаными отложениями разного генезиса, определение которого на основе среднего диаметра и сортированности недостаточно. Поле выделяется координатами: $\bar{M}_1=0,05$; $\bar{M}_2=0,5$ и $\sigma_1=0,1$; $\sigma_2=0,5$.

Гранулометрические спектры отсортированных отложений обнаруживают зависимость сортированности от среднего диаметра (рис. 3).

Очевидно, при определенных геологических процессах наилучшей сортированности отложений соответствует некоторый критический средний диаметр (критический диаметр) M_k . Для изученных отложений M_k имеет следующие значения: для аллювиальных русловых песков 0,28—0,30 мм, для лимногляциальных береговых песков 0,15—0,16 мм. Такую же закономерность можно обнаружить в работах других исследователей (Hails, 1967, с. 1065; Mason, Folk, 1958, с. 222 и др.). Следовательно, наблюдаемое явление присуще не только изученным отложениям. Значения критического диаметра M_k , полученные на основе разных работ, приблизительно сравнимы (береговые пески — 0,15—0,18 мм, аллювиальные пески — ~ 0,30 мм), хотя методика обработки данных у американских авторов и отличается от применяемой нами.

Критический средний диаметр M_k определяется как усредненное значение средних диаметров, которому соответствует наилучшая сортированность отложений при определенном гидродинамическом режиме среды отложения в данных геологических условиях. Однако значение M_k , как статистического индикатора определенных условий осадконакопления, требует дальнейшего исследования на более обширном материале.

Далее возникает вопрос о достоверности выделенных на рис. 3 генетических полей. Ее оценка приводится в табл. 2. Как видно, только 1% отложений попадает в нетипичное для данного генетического типа

Таблица 2

Оценка достоверности генетического разделения четвертичных отложений Северо-Восточной Эстонии на основе среднего диаметра и сортированности

Генетический тип	Количество анализ по типам	Распределение анализов					Достоверность полей, %						
		Поля					общая				вне X-поля		
		типичное	нетипичное	неопределенности	X	Σ вне типичного	gt	fgl	lgl	X	gt	fgl	lgl
gl	364	332	—	32	—	32	91	—	—	—	91	—	—
fgl	229	87	1	15	126	142	—	38	1	55	—	85	1
lgl	411	192	9	21	189	219	1	1	47	46	2	2	86
col	62	?	1	—	61	(62)	—	—	2	98	—	—	2
al	15	?	3	—	12	(15)	—	13	7	80	—	13	7
Σ	1081	611	14	68	388	470	56		36		89		

поле (X-поле при этом не учитывается). Отсюда делается заключение, что для всех типов четвертичных отложений, исключая хорошо отсортированные песчаные отложения, средний диаметр и сортированность являются характерными параметрами. Ими можно пользоваться как достоверными и достаточными критериями для генетической интерпретации данных гранулометрического анализа. При изучении гранулометрических спектров песчаных отложений они не являются эффективными.

На рис. 4 приводится диаграмма асимметрия—средний диаметр—эксцесс и на рис. 5 — асимметрия—сортированность—эксцесс для хорошо отсортированных песчаных отложений (X-поле на рис. 3). На первый взгляд поля для отложений разного генезиса выделяются, но

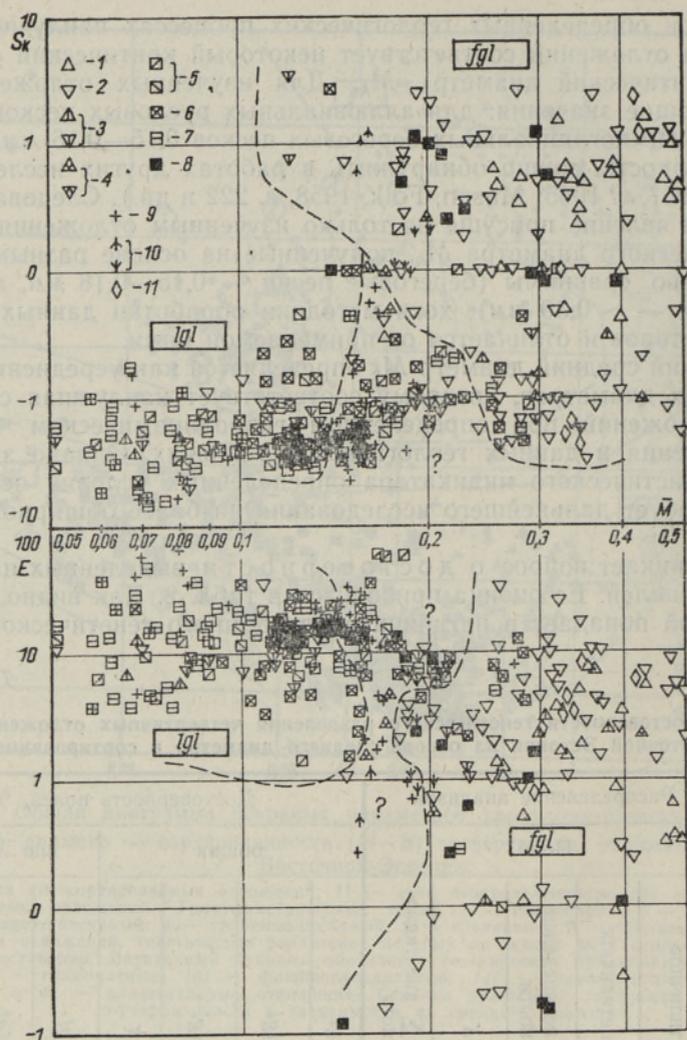


Рис. 4. Диаграмма параметров асимметрия—средний диаметр—эксцесс (S_k — \bar{M} — E) гранулометрических спектров хорошо отсортированных песчаных отложений (X -поле на рис. 3):

1 — отложения радиальных озёр; 2 — отложения флювиогляциальных камов; 3 — отложения флювиогляциальных дельт; 4 — маломощные флювиогляциальные отложения неопределённого генезиса; 5 — отложения лимногляциальных камов; 6 и 7 — лимногляциальные отложения больших ледниковых озёр на возвышенностях и береговые отложения на низменностях; 8 — береговые отложения малых приледниковых озёр незначительной мощности на Ахтмеской возвышенности; 9 — эоловые отложения; 10 — наложенные дюны на флювиогляциальных камах Куртна и пески в подошве береговых валов Кадасоо и Пунасоо; 11 — аллювиальные отложения.

не очень четко. Ниже рассмотрим подробнее вопрос об однородности нескольких выделенных полей и попытаемся определить их геологическое содержание.

В поле лимногляциальных отложений на рис. 4 попадают и некоторые эоловые и флювиогляциальные алевритовые пески. Эоловые пески средним диаметром менее 0,1 мм встречаются редко и на изученной

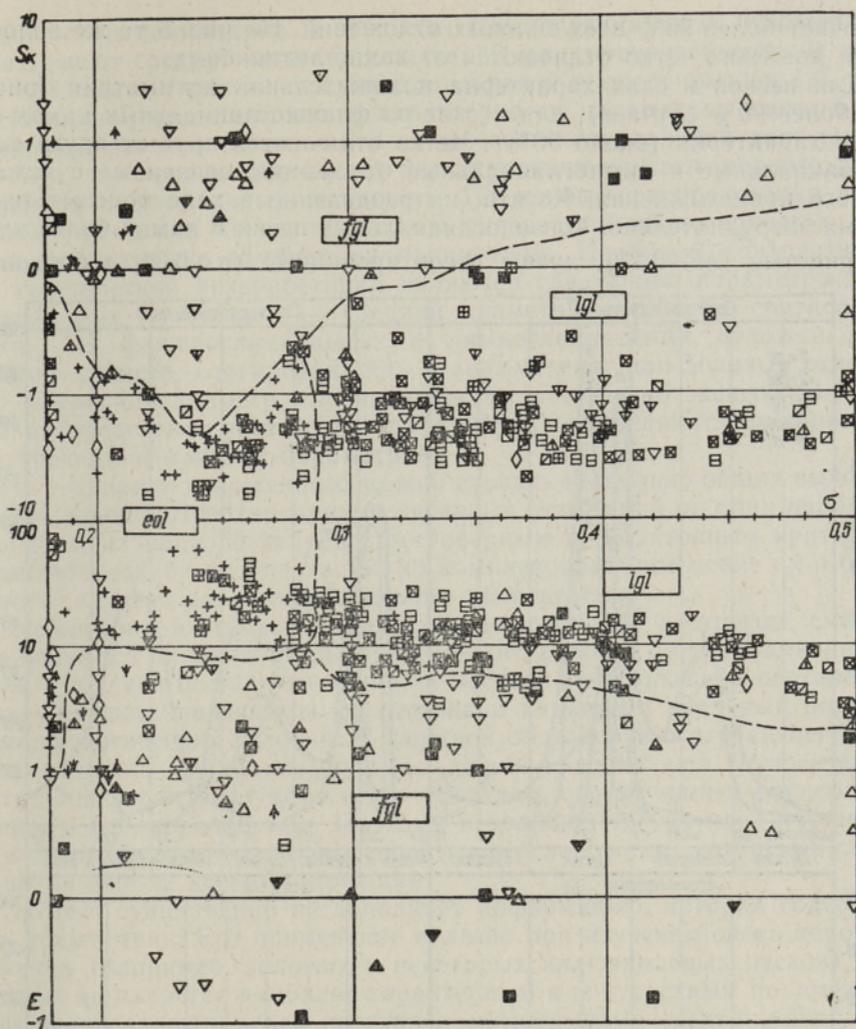


Рис. 5. Диаграмма параметров асимметрия—сортированность—эксцесс ($S_k - \sigma - E$) гранулометрических спектров хорошо отсортированных песчаных отложений (X-поле на рис. 3).

Условные обозначения см. на рис. 4.

территории связаны только с береговыми образованиями древнего Чудского озера на Нарвской низменности. Подстилающими отложениями являются пелитистые алевриты обширного озерно-ледникового бассейна, которые находятся вне координат X-поля. На рис. 5 эти же отложения четко разделяются благодаря значительно лучшей сортированности песков. Флювиогляциальные алевритовые пески связаны с флювиогляциальными дельтами на восточном склоне Пандивереской возвышенности. От лимногляциальных песков, вместе с которыми они встречаются в природе, они отличаются худшей сортированностью ($\sigma > 0,35$) и меньшей отрицательной асимметрией ($S_k > -1,5$).

Среднее поле на рис. 4 образуется отложениями разного генезиса, из которых эоловые пески составляют около 70%. Без учета нетипичных песков на береговых валах древнего Чудского озера, это поле

включает более 95% всех эоловых отложений. На рис. 5 те же эоловые пески довольно четко отличаются от водно-ледниковых.

Для песков в озях характерна положительная асимметрия (рис. 4 и 5, более 90% случаев), для песков во флювиогляциальных камах она менее характерна (около 50%). Четко отличаются друг от друга флювиогляциальные и лимногляциальные отложения, связанные с камами разного происхождения. Кстати, их разделение в ходе полевых работ весьма затруднительно. Флювиогляциальные пески в камах более крупнозернистые ($M > 0,25$), лучше отсортированные ($\sigma < 0,3$), с большими

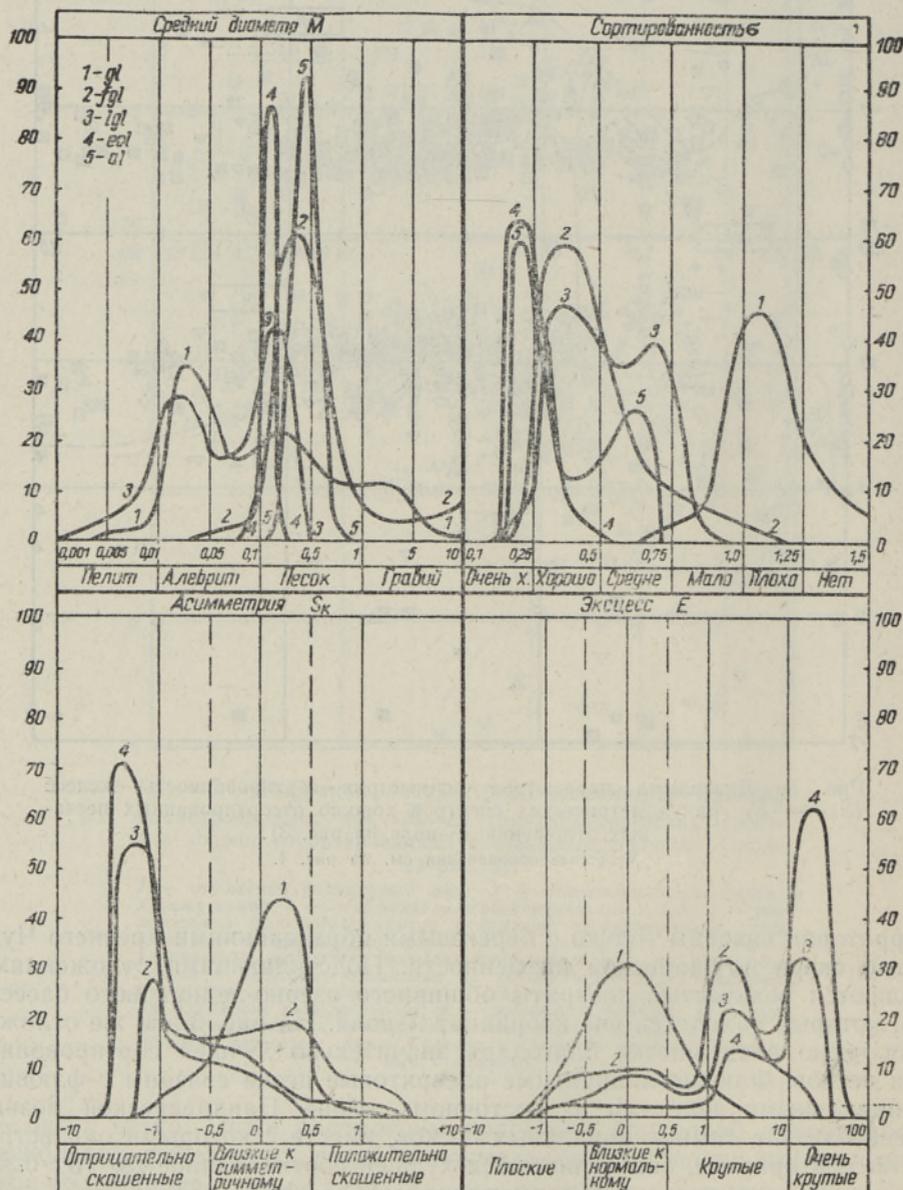


Рис. 6. Плотности распределения параметров гранулометрического спектра по генетическим типам отложений.

Приведена также предлагаемая классификация гранулометрических спектров по отдельным параметрам.

колебаниями асимметрии и эксцесса. Лимногляциальные отложения в камах имеют средний диаметр меньше 0,2 мм, сортированность их хуже ($\sigma > 0,3$), асимметрия всегда отрицательная и эксцесс больше 1,0.

Наглядное представление о характерности параметров спектра для отложений разного генезиса и о существенности различий дает рис. 6. Заметим, что кривые плотностей распределения не дают полного представления о фациальных различиях. По кривым распределения плотностей параметров можно определить с известной достоверностью наиболее эффективные комбинации параметров. Наиболее контрастными для генетической интерпретации являются следующие параметры: для гляциальных отложений — средний диаметр и особенно сортированность; для флювиогляциальных и лимногляциальных отложений — средний диаметр, сортированность и асимметрия; для золотых отложений — средний диаметр, сортированность и особенно эксцесс. По кривым распределения плотностей параметров определяются и характерные пределы изменения параметров.

На основании изложенного можно сделать несколько общих выводов.

Для хорошо отсортированных песчаных отложений ни один параметр и ни одна их пара не является достоверным и достаточным критерием для генетической интерпретации, но комплексное применение их в большинстве случаев дает положительные результаты.

Асимметрия и эксцесс — не критерии генезиса в строгом смысле. Они являются индикаторами определенного режима среды осадконакопления и, будучи подчинены влиянию местной геологической обстановки, обнаруживают зависимость от состава и характера исходных пород и геоморфологических условий. В сложной обстановке отступающего ледника похожие гидродинамические условия возникают относительно часто. Они характеризуются непостоянством, ограниченным распространением и неоднородностью. Поэтому в большинстве случаев изученные гранулометрические спектры относятся к отложениям, которые в своем развитии еще не достигли зрелости.

Эксцесс существенно не дополняет информацию, которая содержится в асимметрии. Его применение полезно при изучении очень коротких спектров (например, золотых и некоторых аллювиальных песков), для которых он является наиболее характерным и контрастным параметром.

В распределении зерен по гранулометрическому спектру закон нормального распределения встречается скорее как исключение. Отсортированные водно-ледниковые отложения имеют кривые распределения с отрицательной асимметрией ($> 90\%$) и более крутые ($> 95\%$), чем нормальная кривая распределения. Только в гранулометрических спектрах морен близкое к нормальному распределение встречается часто (рис. 6, плотности распределения S_k и E).

Заключение

1. Для большинства литофаций и генетических типов четвертичных отложений Северо-Восточной Эстонии существуют типичные, наиболее распространенные гранулометрические спектры с характерными статистическими параметрами.

2. Метод моментов применим для изучения не только гранулометрических спектров песков, но и всех типов терригенных отложений, включая морены. Метод этот дает положительные результаты также при непостоянстве отношения конечных размеров фракций.

3. Данные комплексной обработки гранулометрических анализов

использовались при составлении литофациальной карты четвертичных отложений Северо-Восточной Эстонии. Принятая методика позволила более обоснованно выделить в природе литофации с однородным составом, составить достоверные палеогеографические реконструкции, иногда отделить друг от друга отложения разного генезиса, но со сходным составом.

4. Выводы, основанные на статистическом изучении гранулометрических спектров, являются вероятностными. Поэтому критерием применимости результатов гранулометрических исследований и для проверки выводов остаются геологические сведения.

5. Пока гранулометрический метод не имеет самостоятельного значения при изучении четвертичных отложений. В данной работе он оказался результативным благодаря применению в комплексе с другими видами исследования. Применяемая методика трудоемка и при ее использовании возник ряд решенных неоднозначно или вообще не решенных вопросов: выбор метода опробования; проведение анализа; характер, величина и причины ошибок, их влияние на параметры спектра; оптимальная методика интерпретации в зависимости от типа отложений и поставленных задач; пределы применения разных методов, объективная оценка достоверности выводов и многие другие.

6. При применении ЭВМ более целесообразна комплексная обработка данных гранулометрии, так как подготовка и ввод данных в машину занимают относительно много времени. Программа может включать несколько самостоятельных частей: а) вычисление параметров спектра, б) классификацию отложений по типам спектра с определением среднего состава и характеристик каждого класса с заданной вероятностью. Представляется возможным создать ряд стандартных программ для ЭВМ, из которых исследователь может выбирать наиболее соответствующие характеру и требованиям выполняемой работы.

При наличии готовых программ обработка данных гранулометрии на ЭВМ отличается от графических методов значительной быстротой и экономичностью.

ЛИТЕРАТУРА

- Батурич В. П. 1947. Петрографический анализ геологического прошлого по терригенным компонентам. М.—Л.
- Вентцель Е. С. 1964. Теория вероятностей. М.
- Паап Ю. А. 1968. Опыт классификации терригенных рыхлых отложений по их гранулометрическому составу на ЭВМ. В кн.: Применение математических методов в геологии. Алма-Ата.
- Петелин В. П. 1956. Ускоренный способ определения меднан и квартилей. Бюлл. Моск. о-ва испыт. природы, 31, № 1.
- Рухин Л. Б. 1947. Гранулометрический метод изучения песков. Л.
- Рухин Л. Б. 1961. Основы литологии. Л.
- Чистяков П. А. 1957. Способ построения кумулятивных кривых при вычислении гранулометрических коэффициентов. Изв. АН УзбССР, Сер. геол., № 3.
- Doeglas D. L. 1946. Interpretation of the results of mechanical analyses. J. Sediment. Petrol., 16, No. 1.
- Folk R. L. 1966. A review of grain-size parameters. Sedimentology, 6, No. 2.
- Folk R. L., Ward W. C. 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. J. Sediment. Petrol., 27, No. 1.
- Friedman G. M. 1961. Distinction between dune, beach, and river sands from their textural characteristics. J. Sediment. Petrol., 31.
- Friedman G. M. 1962. On sorting, sorting coefficients and the lognormality of the grain-size distribution of sandstones. J. Geol., 70, No. 6.
- Friedman G. M. 1965. Relationship between statistical parameters derived from size frequency distribution of sands and environment of deposition. Am. Geophys. Union, Transactions, 46.

- Friedman G. M. 1966. Diagnostic textural parameters of beach and river sands. *Geol. Soc. Am. Spec. Paper*, 87.
- Friedman G. M. 1967. Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distribution of beach and river sands. *J. Sediment. Petrol.*, 37, No. 2.
- Griffiths J. C. 1961. Measurements of the properties of sediments. *J. geol.*, 69.
- Hails J. R. 1967. Significance of statistical parameters for distinguishing sedimentary environments in New South Wales, Australia. *J. Sediment. Petrol.*, 37, No. 4.
- Inman D. L. 1952. Measures for describing the size distribution of sediments. *J. Sediment. Petrol.*, 22, No. 1.
- Krumbein W. C. 1934. Size frequency distribution of sediments. *J. Sediment. Petrol.*, 4.
- Krumbein W. C., Pettijohn F. J. 1938. *Manual of sedimentary petrography* Appleton-Century Co., Inc., New York.
- Mabesoone J. M. 1962. Some application of Faber's method for grain-size analyses by counting. *Geol. Mijnbouw*, 41.
- Mason C. C., Folk R. L. 1958. Differentiation of beach, dune and aeolian flat environment by size analysis, Mustang Island, Texas. *J. Sediment. Petrol.*, 28.
- McCammion R. B. 1962a. Efficiency of percentile measures for describing the mean size and sorting of sedimentary particles. *J. Geol.*, 70, No. 4.
- McCammion R. B. 1962b. Moment measures and the shape of size frequency distributions. *J. Geol.*, 70, No. 1.
- Otto G. H. 1939. A modified logarithmic probability graph for the interpretation of mechanical analyses of sediments. *J. Sediment. Petrol.*, 9.
- Passega R. 1957. Texture as characteristic of clastic deposition. *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.*, 41, No. 9.
- Sindovski K. H. 1957. Die synoptische Methode des Kornkurven-Vergleiches zur Ausdeutung fossiler Sedimentationsräume. *Geol. Jahrbuch*, 73.
- Spencer D. W. 1963. The interpretation on grain size distribution curves of clastic sediments. *J. Sediment. Petrol.*, 33, No. 1.
- Trask P. D. 1930. Mechanical analyses of sediments by centrifuge. *Econ. Geol.*, 25.
- Trask P. D. 1932. Origin and environment of source sediments of petroleum. Houston, Gulf Publishing Co.
- Wentworth C. K. 1929. Method of computing mechanical composition types in sediments. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 40.

*Институт геологии
Академии наук Эстонской ССР*

Поступила в редакцию
22/XI 1968

U. PAAP

KIRDE-EESTI KVATERNAARSETE SETETE GRANULOMEETRILISTE SPEKTRITE STATISTILISTEST PARAMEETRITEST

Detiiselt geoloogilisel kaardistamisel koguti 1300 km² pindalalt granulomeetrisest analüüsiks üle 1200 proovi. Uuritud ala kvaternaarsed setted koosnevad mitmekesistest muutliku koostisega liustiku- ja liustiku sulavete setetest (savid, aleuriidid, liivad, kruusad, mitmesugused moreenid), millele geneetiline eristamine on sageli raske.

Käesolevas uurimistöös püüti selgitada, millisel määral on momentide meetodil arvatud granulomeetrisest spektri parameetrid kasutatavad geoloogiliseks interpretatsiooniks. Jõutakse järeldusele, et Kirde-Eestis vastavad enamikule settetüüpidele iseloomulikud granulomeetrisest spektrid kindlates piirides muutuvate statistiliste parameetritega (keskmine terasuurus, sorteeritus, asümmeetria ja ekstsess). Mitmel juhul võimaldas ainult statistiliste parameetrite kasutamine eristada samailmelisi, kuid erineva geneesiga setteid (ranna- ja luiteliivad jm.). Hästi sorteeritud liivade geneetiliseks eristamiseks tuli kasutada kõrgemat järku momente.

Esitatakse valemid momentide arvutamiseks raalil ja tuuakse näiteid statistiliste parameetrite kasutamisest granulomeetrisest andmete geoloogilisel interpreteerimisel.

Momentide meetodit on seni kasutatud peamiselt liivade uurimisel (Ruhhin, Friedman, Griffiths, Hails jt.). Selgus, et see meetod annab rahuldavaid tulemusi kõigi kvaternaari vanusega terrigeensete setete uurimisel, kaasa arvatud moreenid.

U. PAAP

ON THE STATISTICAL PARAMETERS OF THE SIZE-FREQUENCY DISTRIBUTIONS OF THE QUATERNARY DEPOSITS, NORTHEAST ESTONIA

At detailed geological mapping, over 1,200 samples were collected for grain size analysis on an area of 1,300 square kilometres. The Quaternary deposits of the area studied consist of different glacial and glacier meltwater deposits of variable composition (clays, aleurites, sands, gravel, various tills), whose genetic differentiation is frequently complicated.

In the present research work it was tried to find out, to what extent the statistical parameters of the size-frequency distribution, which have been computed by the method of moments, can be used for geological interpretation. It has been stated that the majority of the Quaternary deposit types of Northeast Estonia may be defined by corresponding typical grain-size distributions whose statistical parameters (mean, standard deviation, skewness and kurtosis) fluctuate within certain limits. In numerous cases it was possible to differentiate various deposits with a different genesis (shore- and dune sands, etc.), by using statistical parameters, only. For a genetic differentiation of well-sorted sands, higher moments had to be used.

The author presents formulae for a computation of the moments by an electronic computer and gives examples of the application of statistical parameters for geological interpretation of grain-size data.

The method of moments has hitherto been mainly used for a study of sands (Rukhin, Friedman, Griffiths, Hails, and others). It has been stated that this method yields satisfactory results for the study of all terrigenous deposits of Quaternary age, tills included.