

А.Е. Луньков, Ю.А. Гладиллин и Л.Н. Куликова

ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРИСТОСТИ ТРУБЧАТЫХ КОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА

Кафедра медицинской и биологической физики (зав. — доц. В.А. Дубровский), кафедра анатомии человека (зав. — проф. В.Н. Николенко), кафедра общей и биоорганической химии (зав. — проф. П.В. Решетов), Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского, e-mail: aelunkov@mail.ru

Исследовали диафизы трубчатых костей 7 мужчин в возрасте от 40 до 60 лет без патологии костей. Определяли характеристики пористости компактного вещества большой берцовой и плечевой костей методом центробежной порометрии. Метод, основанный на заполнении исследуемых объектов смачивающей жидкостью и последовательным удалением её центрифугированием при возрастающих значениях центробежного ускорения, даёт значения радиусов пор и распределение по ним объёма пористости. Выявлены индивидуальные особенности пористости костей разных людей при сходстве характеристик пористости разных костей, принадлежащих одному человеку. Индивидуальные особенности пористости проявляются в форме кривой распределения размеров пор и в количественном распределении объёма пористости по радиусам пор. Эти признаки позволяют устанавливать принадлежность костей одному человеку.

Ключевые слова: кость, компактное вещество, центробежная порометрия

Ранее была показана возможность применения метода центробежной порометрии (ЦП) [2] для измерения диаметров каналов остеонов и проведения сопоставления полученных данных с результатами измерений, выполненных на тех же образцах трубчатых костей методом сканирующей электронной микроскопии [4]. Такие исследования оказались возможными в силу неразрушающего характера измерений методом ЦП, позволяющим использовать образцы для дальнейшего изучения. Метод ЦП, благодаря применению центрифуг со скоростью до 6000 об/мин, позволяет построить кривые распределения объёма пор по их радиусам в диапазоне 100–0,1 мкм, что соответствует размерам всех внутренних полостей и каналов компактной кости [6]. Это даёт возможность получить более полную информацию о внутренней структуре костной ткани, включающую не только размеры всех её каналов и полостей, но и распределение общего внутреннего объёма костного матрикса. Принципиальным достоинством метода ЦП является статистический характер экспериментальных кривых, которые можно получать для любого объёма костной ткани. Приводимые ниже результаты получены благодаря отмеченным возможностям этого метода морфометрии костной ткани.

Материал и методы. Исследовали образцы компактного вещества диафизов плечевой и большой берцовой костей (ББК), взятые от трупов 7 мужчин в возрасте 40–60 лет без признаков костной патологии. У одного из них были исследованы также бедренная, локтевая и лучевая кости.

Образцы для ЦП получали путём выпиливания колец толщиной 7 мм, каждое из которых разрезали на 4 однотипных фрагмента — передний, задний и боковые. Во время измерений контролировали массу каждого из фрагментов раздельно, а при обработке данных анализировали результаты как раздельно по каждому из фрагментов, так и суммарно по кольцевому образцу в целом.

Образцы механически освобождали от мягких тканей и губчатого вещества, выдерживали 12 ч в эфире и затем центрифугировали для освобождения пор на максимальной частоте 6000 об/мин. В этом состоянии определяли исходную массу образца взвешиванием на аналитических весах с точностью $\pm 0,1$ мг. С той же точностью образцы взвешивали после заполнения рабочей жидкостью и после центрифугирования при каждом из 9 последовательно возрастающих значений центробежного ускорения. В каждой точке объём остающихся заполненных пор определяли как разность полученной и исходной массы образца, делённую на плотность рабочей жидкости.

Использовали отечественную лабораторную центрифугу ОС-6М, у которой штатный ротор был заменён плоским ротором специальной конструкции [3], позволяющим одновременно центрифугировать несколько десятков образцов. Экспериментальные данные ЦП представляли в виде интегральной кривой зависимости удельного объёма пор (см^3 на 1 г массы) от их радиусов в логарифмическом масштабе. Путём графического дифференцирования интегральной кривой получают дифференциальную кривую распределения радиусов пор. Для повышения точности дифференцирования экспериментальные точки интегральной кривой дополняли интерполяционными значениями, вычисленными методом сплайнов [1].

Результаты исследования. На рис. 1 приведены интегральная и дифференциальная кривые ЦП образца плечевой кости индивидуума № 4, а также представлен принцип получения

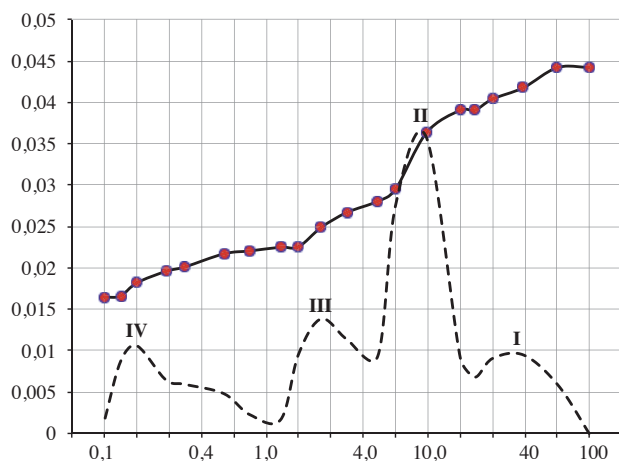


Рис. 1. Интегральная (сплошная) и дифференциальная (пунктирная) кривые порометрии плечевой кости индивидуума № 4.

По оси абсцисс — радиусы пор (мкм), по оси ординат — удельный объем пор ($\text{см}^3/\text{г}$).

числовых параметров пористой структуры исследованных образцов. Интегральная (сплошная) и дифференциальная (пунктирная) кривые указывают на 4 диапазона выявленных радиусов пор, отмеченных как I, II, III и IV максимумы (max) функции распределения.

Для данной кривой получается следующее распределение общего удельного объема пор $V_0 = 0,042 \text{ см}^3/\text{г}$ по интервалам:

I max (60–20 мкм) — 12%; II max (16–5 мкм) — 25%; III max (4–1 мкм) — 12%; IV max (0,6–0,1 мкм) — 16% и 35% приходится на $V_{\text{ост}}$ — остаточный (не вытесненный) объем жидкости в порах.

Данные, полученные для всех образцов, показали, что суммарный объем пор и его распределение случайным образом меняются по сегментам поперечного сечения кости. При этом в разных образцах не наблюдается корреляции этих изменений с номером сегмента, то есть, азимутальным положением участка поперечного среза. В этой связи приведенные в таблице данные каждого из индивидуумов получены суммированием измеряемых масс всех сегментов кольцевого образца исследуемой кости. Увеличение за счет этого обследуемого объема кости позволило выявить на фоне случайных вариаций индивидуальные особенности пористой структуры костей одного человека. Индивидуальные особенности пористости проявляются в различиях у разных людей формы дифференциальной кривой распределения размеров и числовых параметров распределения внутреннего объема по радиусам пор. Разные же кости одного человека имеют достаточно отчет-

ливое сходство как по форме кривой распределения, так и по числовым параметрам пористости (рис. 2).

Обсуждение полученных данных. С учетом известных данных [4–6], I и II интервалы (максимумы кривых распределения) всех образцов, приведенных в таблице, следует отнести к радиусам крупных и мелких каналов остеонов. Количество каналов больших и малых радиусов даже при их одинаковых суммарных объемах должно отличаться в $(r_{\text{max}}/r_{\text{min}})^2$ раз, так как объем канала пропорционален r^2 . Поэтому количественно преобладающими для всех исследованных образцов являются каналы остеонов с радиусами, относящимися к интервалу II max.

IV max (1–0,1 мкм) соответствует радиусам костных канальцев, однако приходящаяся на него часть объема пор и остаточный объем $V_{\text{ост}}$ представляют собой объем лакун остеонцов, размеры которых на порядок больше и должны относиться к интервалу II max [6]. Это несоответствие объясняется особенностями вытеснения жидкости из внутренних лакун, которое возможно лишь через последовательность костных канальцев, соединяющих их с открытыми центральными каналами. При этом центробежное ускорение, необходимое для вытеснения жидкости из внутренних полостей, определяется минимальным радиусом костных канальцев, входящих в эту цепочку [7]. Остаточный объем жидкости в образце — $V_{\text{ост}}$ также соответствует суммарному объему лакун, связанных с канальцами радиусом менее 0,1 мкм — минимального значения, достигаемого при максимальной частоте центрифуги 6000 об/мин.

III максимум, проявляющийся в некоторых из исследованных образцов (4–0,6 мкм), можно отнести и к каналам остеонов минимальных радиусов и к максимальным радиусам костных канальцев. Более определенно это можно установить на основе анализа данных по всем исследованным образцам, приводимого ниже.

Сходство вида кривых распределения пористости ББК и плечевой кости одного человека и явное различие этих кривых у костей разных людей иллюстрирует рис. 2. Приведенные кривые имеют существенно разную форму как у этих людей, так и у индивидуума № 4 (см. рис. 1, пунктирная кривая).

Количественные характеристики распределения объема пористости по диапазонам радиусов пор, приведенные в таблице, также демонстрируют сходство распределений пористости костей одного человека и различие их для разных субъектов. Именно распределение объема пор по радиусу-

Распределение объёма пор по диапазонам их радиусов для всех исследованных образцов

№ индивидуумов	Кости	V_0 (см ³ /г)	I max (мкм; % V_0)	II max (мкм; % V_0)	III max (мкм; % V_0)	IV max (мкм; % V_0)	$V_{ост}$ (%)
1	ББК	0,0387		40–2; 59	1,6–0,6; 9	0,3–0,1; 8	22
	Плечевая	0,0358		25–2; 47	1,6–0,6; 11	0,3–0,1; 11	30
2	ББК	0,0344		16–1,6; 61		1,0–0,1; 25	12
	Плечевая	0,0275		16,0–0,8; 56		0,5–0,1; 34	10
3	ББК	0,0569	100–25; 9	20–2; 33		1,0–0,1; 20	36
	Плечевая	0,0432	100–25; 7	16–2; 32		1,0–0,1; 24	34
4	ББК	0,0731	100–40; 4	16–3; 38	2,5–0,6; 16	0,25–0,1; 12	26
	Плечевая	0,0442	60–20; 12	16–5; 25	4,0–1,6; 12	0,6–0,1; 16	35
5	ББК	0,0353	100–25; 7	16–4; 27	2,5–0,4; 40	0,4–0,1; 17	8
	Плечевая	0,0617	100–30; 16	16–5; 26	4,0–0,6; 32	0,6–0,1; 16	2
6	ББК	0,0127	60–20; 20	8–1; 28		1,0–0,25; 53	0
	Плечевая	0,0169	60–20; 17	8–1; 34		1,0–0,16; 49	0
7	ББК	0,0552	100–16; 35	10,0–1,6; 23		1,0–0,1; 40	0
	Плечевая	0,0383	100–16; 35	10,0–1,6; 23		1,0–0,1; 37	0
	Бедренная	0,0265	40–10; 40	10,0–1,6; 19		1,6–0,1; 32	9
	Локтевая	0,0410	80–20; 29	10,0–1,6; 24		1,0–0,1; 39	5
	Лучевая	0,0390	100–10; 29	10,0–1,6; 31		1,0–0,1; 28	7

ББК — большая берцовая кость.

сам отражает индивидуальность людей, а не величина V_0 , которая меняется случайным образом как у разных людей, так и в разных костях одного человека.

Как видно из таблицы, ББК и плечевая кость одного человека имеют одинаковое число максимумов кривой распределения и близкие значения относительных объёмов пор по каждому из максимумов. Эти индивидуальные признаки сохраняются и в других костях, что подтверждается данными, приведёнными для индивидуума № 7, у которого были исследованы также фрагменты бедренной, локтевой и лучевой костей. Для всех костей индивидуума №7 характерен один («трёхгорбый») вид дифференциальной кривой распределения радиусов пор.

Усреднение данных по сечению кости позволило также установить закономерность распределения объёма пор между каналами остеонов и лакунами остеонитов. Её можно получить, сложив относительные объёмы I и II диапазона радиусов, приходящиеся на центральные каналы и объёмы IV диапазона с $V_{ост}$, относящиеся к лакунам. Отношение суммарных объёмов каналов остеонов и лакун меняется от 60/40 у 2-го и 7-го индивидуумов до 40/60 — у 3-го. Все они не имеют III переходного диапазона радиусов, что и позволяет чётко разделить объёмы каналов остеонов и лакун остеонов.

На рис. 3 приведена диаграмма распределения объёмов по всем индивидуумам. Отмеченные

выше пределы отношения объёма центральных каналов и лакун можно иметь в виду при определении принадлежности объёма III переходного диапазона радиусов, имеющегося у индивидуумов № 1, 4 и 5. Для индивидуума № 5 его можно отнести к объёму лакун, а для индивидуумов № 1 и 4 — в равной степени, как к объёму лакун, так и к объёму центральных каналов остеонов. В обоих

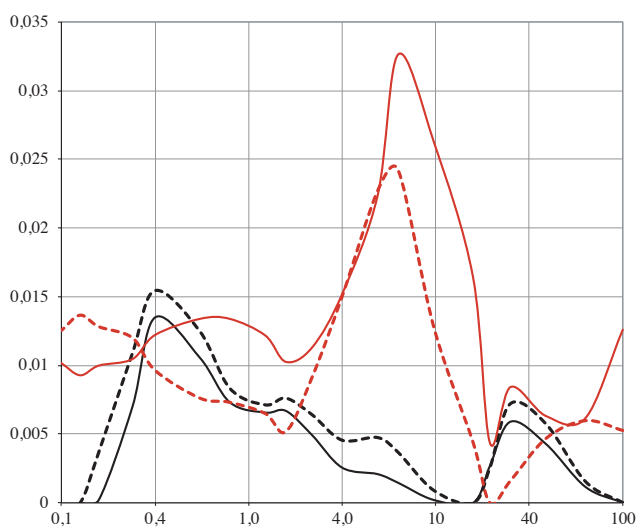


Рис. 2. Формы кривых распределения размеров пор индивидуума №3 (серые линии) и 6 (черные линии), большой берцовой кости (сплошная линия) и плечевой кости (пунктирная линия). По оси абсцисс — радиусы пор (мкм), по оси ординат — удельный объём пор см³/г.

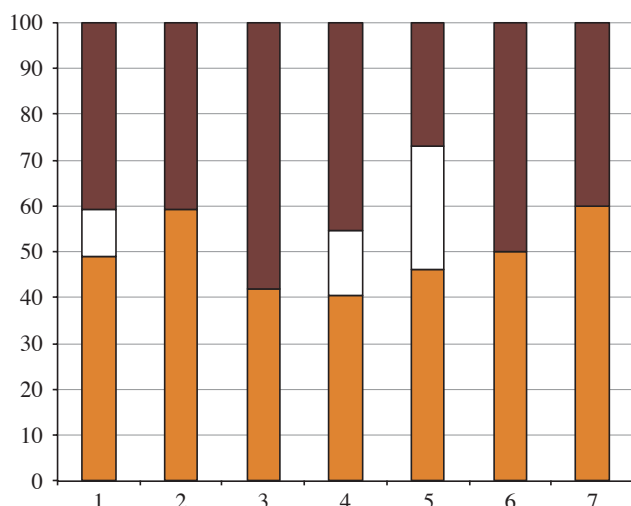


Рис. 3. Относительные объёмы центральных каналов (темные участки), лакун остеоцитов (серые участки) и переходных радиусов (белые участки).

По горизонтальной оси — номера индивидуумов; по оси ординат — относительный объем соответствующих структур (%).

случаях отношения объёмов каналов остеонов и лакун этих индивидуумов остаются в указанных выше пределах, которые, вероятно, оптимальны для функционального взаимодействия системы лакун и каналов остеонов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев Е.Р. и Чеснокова О.В. Решение задач вычислительной математики в пакетах Mathcad 12, MATLAB 7, Maple 9. М., NT Press, 2006.
2. Ксенжек О.С., Калиновский Е.А., Петрова С.А. и Литвинова В.И. Центробежный метод нахождения функции распределения пор по размерам в пористых средах. Журн. физич. химии, 1967, т. 41, № 7, с. 1602–1607.

3. Луньков А.Е. и Абросимов Г.Н. Ротор для выделения жидкости из пористого образца в процессе центробежного порометрирования. Патент РФ № 1729598 от 13.04.93 г.

4. Луньков А.Е., Абросимов Г.Н. и Омеляненко Н.П. Диаметры центральных каналов остеонов трубчатых костей. Морфология, 1992, т. 102, вып. 6, с. 76–80.

5. Модяев В.П., Утенькин А.А., Свешникова А.А. и Карпова Н.А. Количественные характеристики структуры компактного вещества кости. Арх. анат., 1973, т. 64, вып. 6, с. 69–72.

6. Омеляненко Н.П., Илизаров Г.А. и Стецула В.И. Регенерация костной ткани. В кн.: Травматология и ортопедия (руководство для врачей). М., Медицина, 1997, т. I, гл. 20, с. 393–481.

7. Хейфец Л.И. и Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористом теле. М., Химия, 1982.

Поступила в редакцию 30.04.2010

Получена после доработки 11.06.2011

INDIVIDUAL POROSITY CHARACTERISTICS OF HUMAN TUBULAR BONES

A.Ye. Lun'kov, Yu.A. Gladilin and L.N. Kulikova

The diaphyses of the tubular bones of seven men aged 40–60 years without the bone pathology were studied. Porosity characteristics of the compact substance were measured in the tibia and the humerus bones by the method of centrifugal porometry. This method is based on the filling of the objects studied with the wetting fluid and sequential removal of it by the centrifugation at increasing values of the centrifugal acceleration; as a result, the values of the radii of the pores and the respective distribution function of the pore volume could be obtained. The individual features of the bone porosity in different persons were detected, as well as the similarity of porosity characteristics of the bones belonging to one person. Porosity individual features are demonstrated in the form of the distribution curve of pore size and the quantitative distribution of porosity volume according to the pore radii. These features allow to confidently detect the belonging of bones to one person.

Key words: *bone, compact substance, centrifugal porometry*

Department of Medical and Biological Physics, Department of Human Anatomy, Department of General and Bioorganic Chemistry, V.I. Razumovskiy Saratov State Medical University