Лекция 3

Функции и строение легких, механика дыхания

Основная функция системы дыхания – газообмен.
+ регуляция кислотно-основного состояния организма + метаболизм

Перенос кислорода из окружающей среды к клеткам - четыре стадии:
- течение по каналам (трахея, бронхи) в альвеолы (вентиляция);
- диффузия из альвеол в кровь легочных капилляров;
- конвективный перенос кровью к тканевым капиллярам;
- диффузия из капилляров в окружающие ткани.

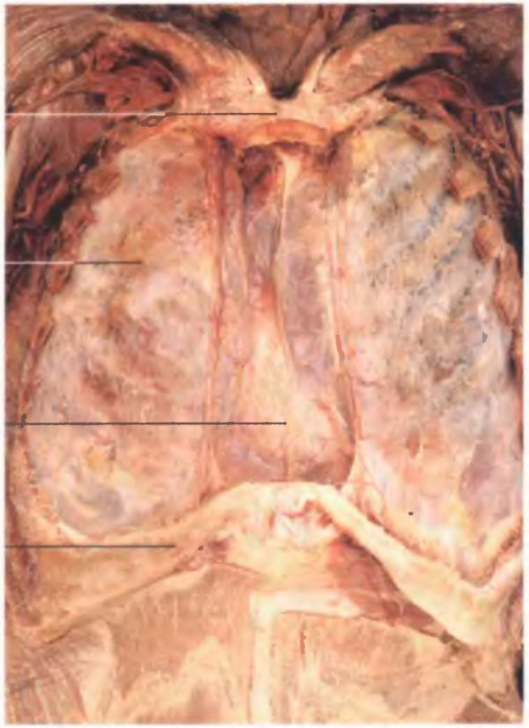
Удаление двуокиси углерода.

Первая и вторая стадии называются легочным (внешним) дыханием, третья стадия – это транспорт газов кровью, а четвертую стадию называют тканевым (внутренним) дыханием. Часто в процессы тканевого дыхания включают также биохимические реакции утилизации кислорода.

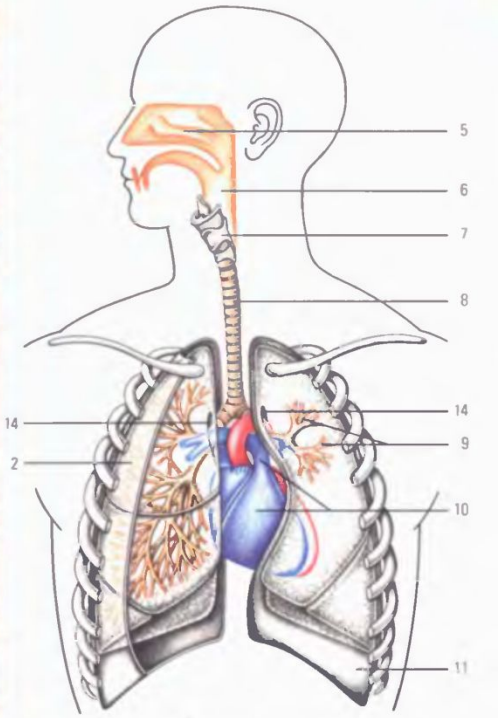
Объектом исследований биомеханики дыхания традиционно является «исполнительный аппарат» внешнего дыхания: дыхательные мышцы, трахеобронхиальное дерево и легкие.

- # Строение системы дыхания

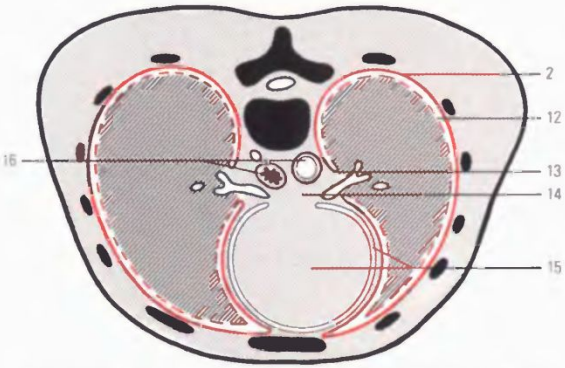
- В механике дыхания в течение длительного времени легкие рассматривали как упругий мешок, находящийся в емкости с изменяющимся отрицательным давлением.
- В действительности легкие являются негомогенным пространственно протяженным объектом. Они состоят из дерева ветвящихся податливых воздухоносных путей и дыхательной ткани - легочной паренхимы.



Легкие в плевральной полости (вид спереди). Между двумя легкими находится средостение (Mediastinum) с сердцем и его сосудами, а также трахеей, пищеводом и нервами.



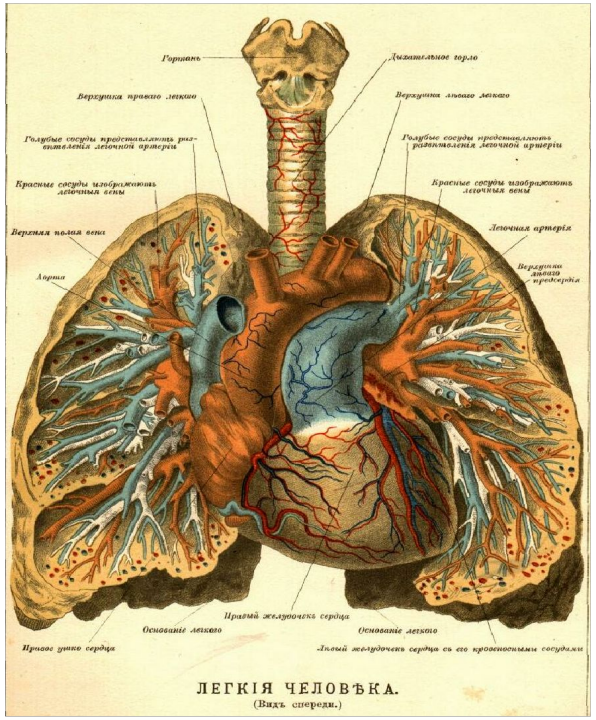
Устройство дыхательной системы. Плевра и правое легкое частично удалены; показано бронхиальное дерево.



Горизонтальный разрез грудной клетки. Показано расположение плевры. Между двумя легкими находится средостение (Mediastinum) (14).

1 Грудина (Sternum) (рассечена)
2 **Реберная плевра (Pleura costalis)**
3 Сердце с околосердечной сумкой (перикард)
4 Реберная дуга (Arcus costalis)
5 Носовая полость (Cavitas nasi)
6 Глотка (Pharynx)
7 Гортань (Larynx)
8 **Трахея (Trachea)**
9 Бронхиальное дерево
10 Правый желудочек сердца и ствол легочной артерии (Truncus pulmonalis)
11 Плевральная полость (Recessus costodiaphragmaticus)
12 **Легочная (висцеральная) плевра (Pleura pulmonalis)**
13 Ворота легкого (переход от легочной плевры к реберной плевре)
14 **Средостение (Mediastinum)**
15 Сердечная полость с сердечной сорочкой (перикардом) и внутренним листком перикарда (эпикардом)
16 Аорта и пищевод (Oesophagus) в средостении

Легкие



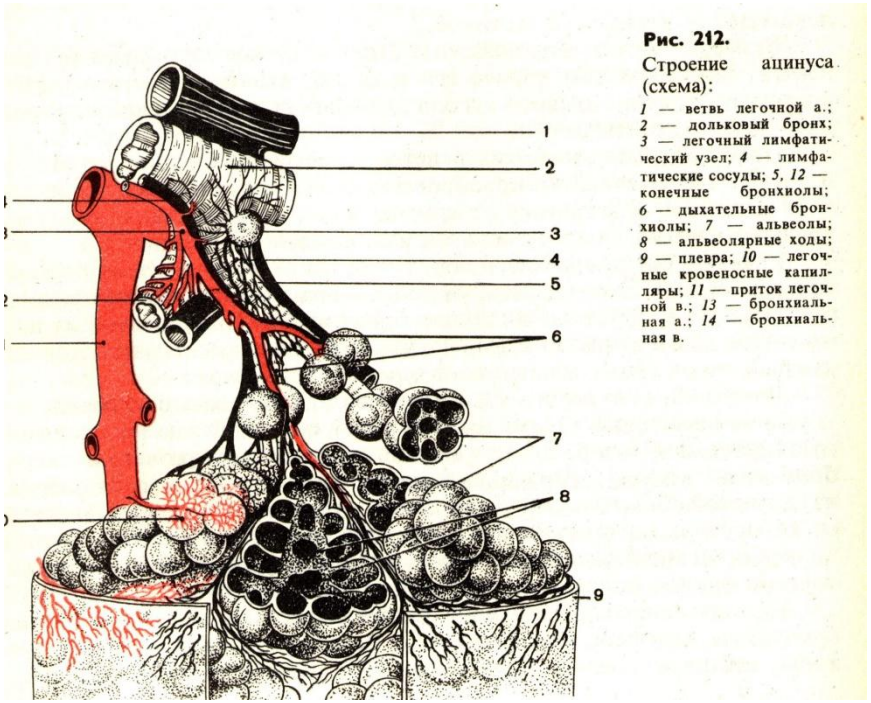


Рис. 212.
Строение ацинуса (схема):
1 — ветвь легочной а.; *2* — дольковый бронх; *3* — легочный лимфатический узел; *4* — лимфатические сосуды; *5, 12* — конечные бронхиолы; *6* — дыхательные бронхиолы; *7* — альвеолы; *8* — альвеолярные ходы; *9* — плевра; *10* — легочные кровеносные капилляры; *11* — приток легочной в.; *13* — бронхиальная а.; *14* — бронхиальная в.

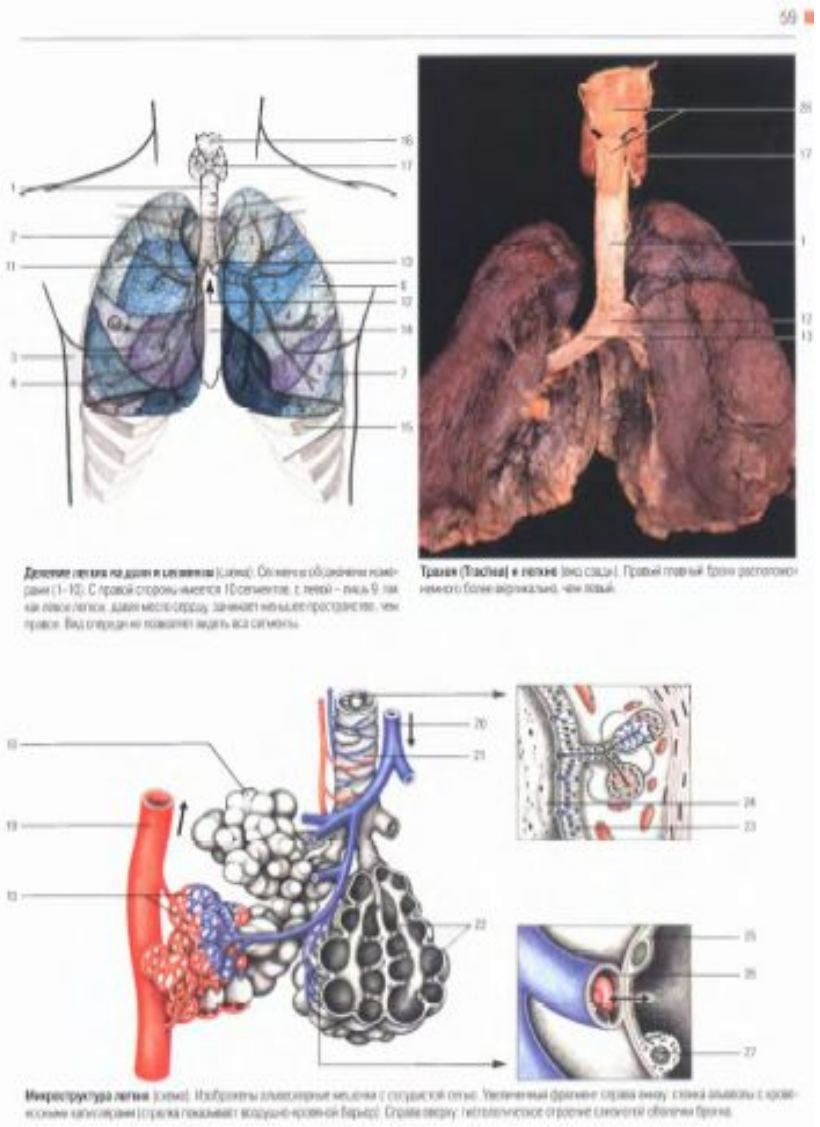
Слева – И. Ранке. Человек //С.Петербург, 1904: в общих чертах строение легких было хорошо известно более 100 лет назад.
Справа: микроструктура легких, изучена позже.
Функции и механика дыхания – со второй половины 20 века.

Легкие, функции легких, геометрия, морфометрия

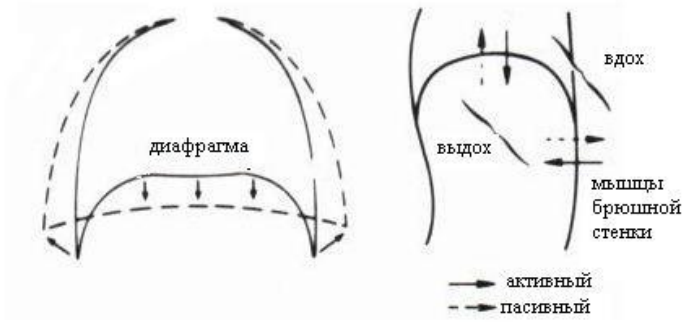
- Легкие – уникальная структура: самый большой по размеру внутренний орган, собственный вес всего 0,5 кг + 0,5 л крови. Поверхность раздела газ-ткань около 100 м^2. Функции – газообмен и др.

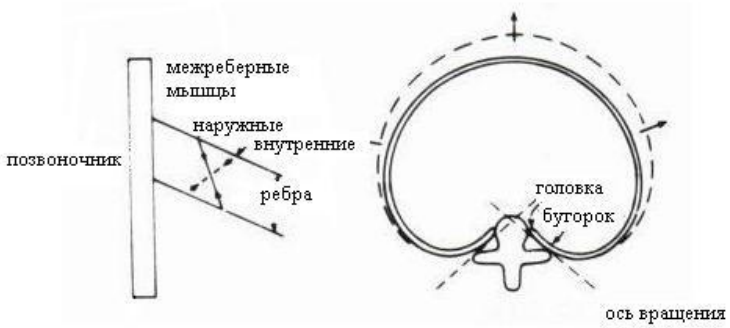
- Математические модели геометрии структуры легких очень важны для понимания связи между **Структурой и Функцией легких.**

- Количественные данные о строении, структуре легких дает морфометрия легких.



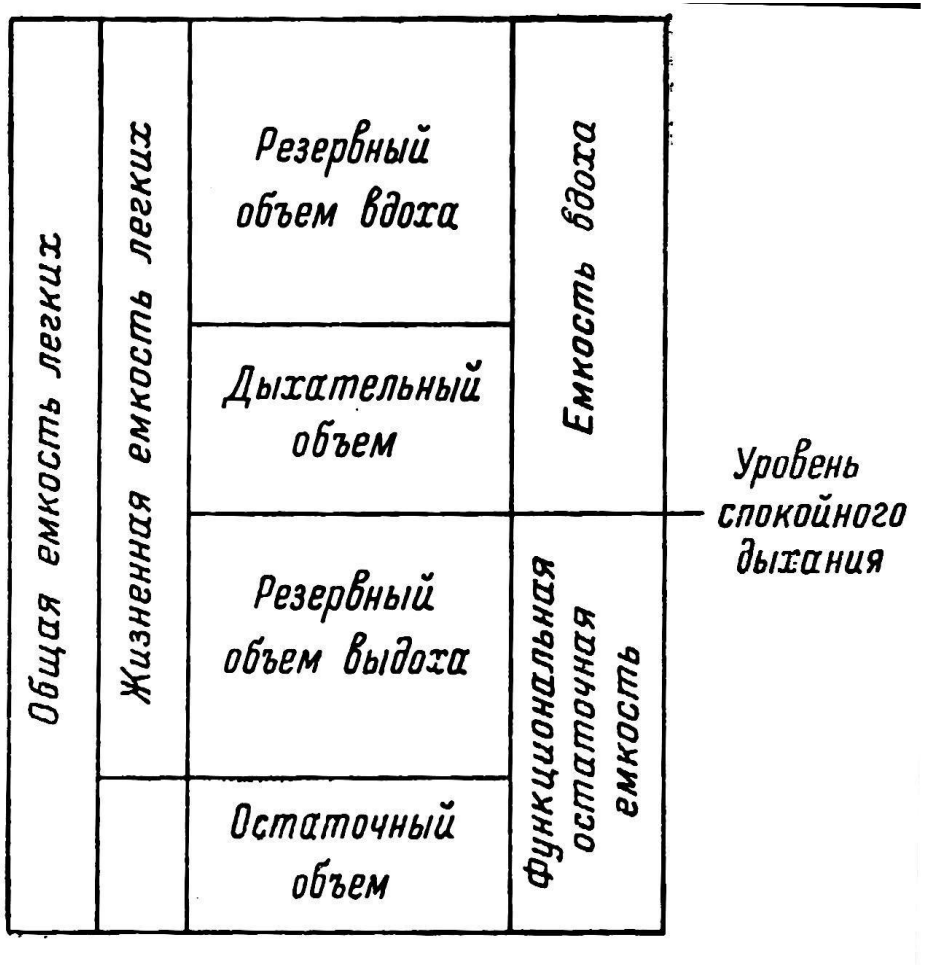
Дыхательные мышцы и дыхательные движения





- **Вдох**
- Существуют два механизма, вызывающие расширение грудной клетки: поднятие ребер и уплощение диафрагмы.
- **реберный (грудной)** и **брюшной типы** дыхания
- периметрические датчики в виде эластичного пояса (Гагарин)
- спокойном дыхании вдох почти на 90% обеспечивается за счет сокращения диафрагмы
- К **инспираторным мышцам** грудной клетки относятся наружные межреберные мышцы
- **Выдох**
- мышцы передней брюшной стенки + внутренние межреберные мышцы

Легочные объемы



- ЖЕЛ (л)= 5,2 * рост (м) – 0,028 * возраст (лет) – 3,2

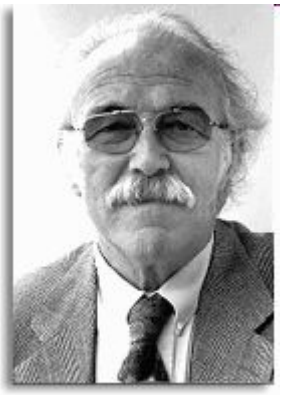
Морфометрия

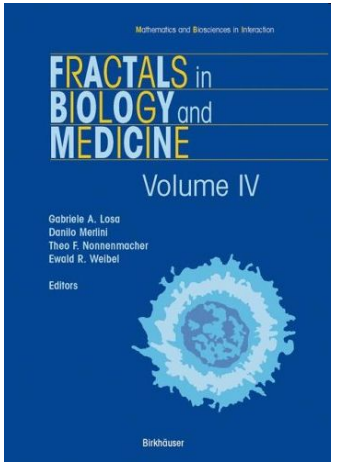
- André F. Cournand в 1959 г. пригласил Швейцарского анатома и морфолога Ewald R. Weibel в свою лабораторию в США.
- André F. Cournand и Dickinson W. Richards, получили в 1956 г. Нобелевскую премию по физиологии за фундаментальные работы по легочному кровообращению.
- +
- Кардиолог и математик Доминго М. Гомез, получил приют у André F. Cournand после бегства в США от кубинской революции Фиделя Кастро

- Они разработали методы анализа и по плоским срезам восстановили пространственную картину структуры легких.

- Первая крупная работа по геометрии с применением мат.методов –
- Weibel ER. Morphometry of the Human Lung. Springer Verlag and Academic Press, Heidelberg-New York 1963.
- Е. Вейбель - «Морфометрия легких человека» - М., 1970.
- Способствовало появлению новых применений математики в биологии.
- Стереология – наука о том, как по плоским срезам восстановить пространственную картину с учетом нерегулярностей структуры. .
- Применение фракталов в биологии и медицине.

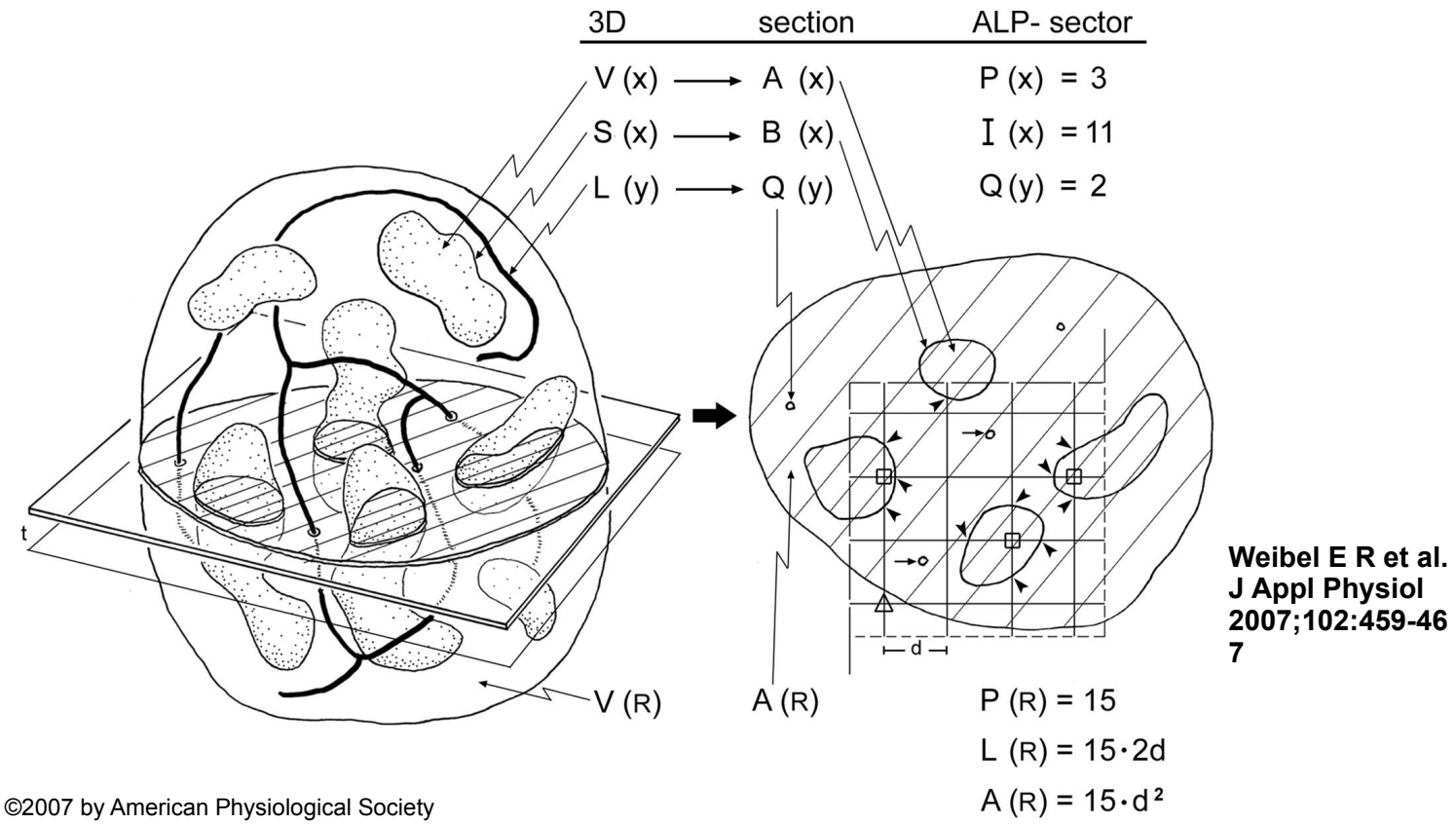
Ewald R. Weibel





2005

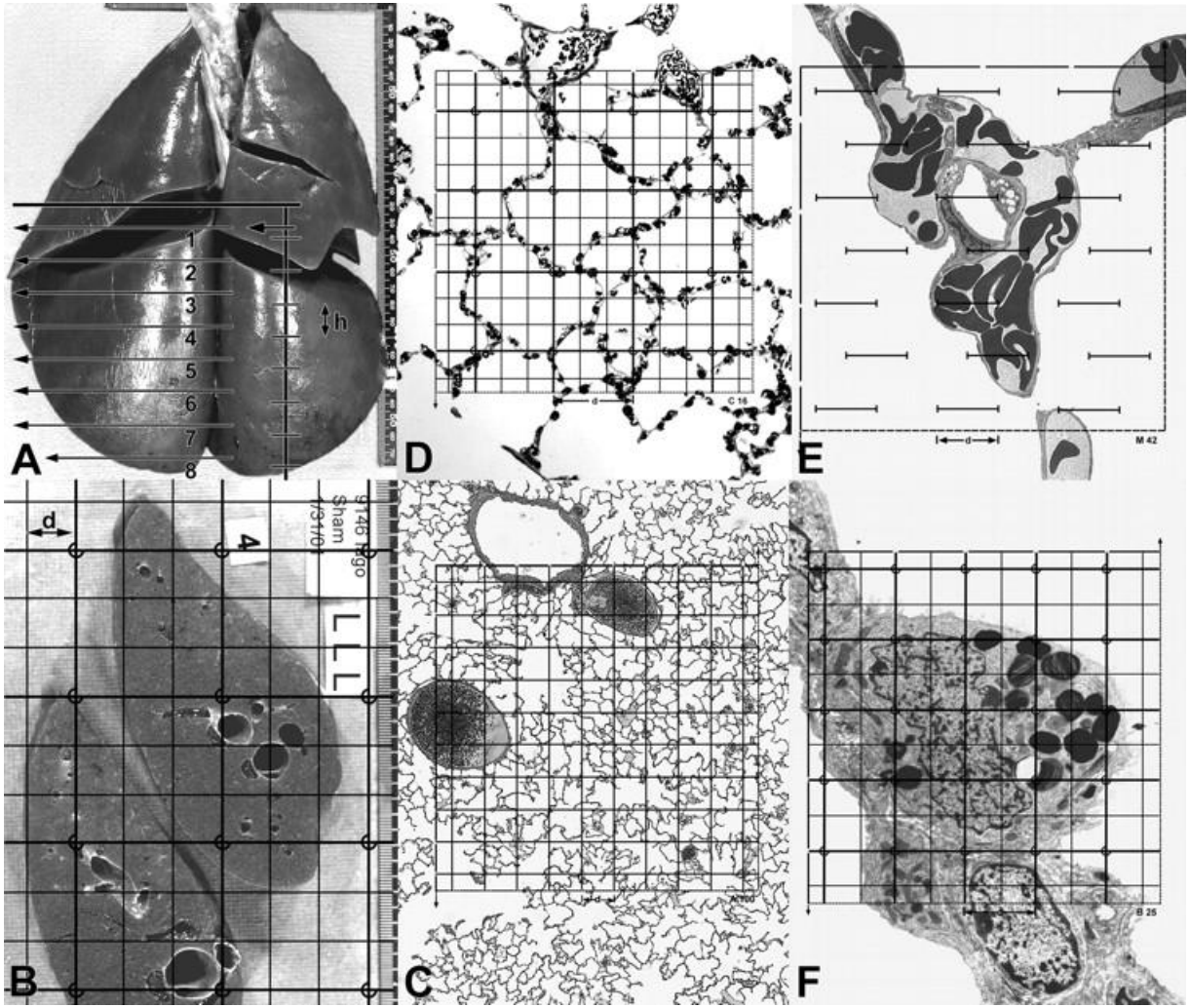
Слева – структура с общим объемом V(R) содержит частицы x, имеющие объем $V(x)$и поверхность $S(x)$, а также линейные элементы y с длиной $L(y)$. Объем разрезан случайным образом.
Справа – срез A(R)·. Профили x характеризуются площадью $A(x)$ и границей $B(x)$, элементы y проявляются малыми срезами $Q(y)$.
The reference space is represented by the section area A(R). Applying a coherent stereological test grid (ALP-sector) with test points PT = 16, test lines LT = PT·2d, and test area AT = PT·d^2 to the section allows one to assess volume, surface, and length densities per unit volume from point hits $P(x)$ (marked by squares), intersection counts $I(x)$ (arrowheads), and transect counts $Q(y)$ (short arrows), whereby the reference area is estimated by the number of test points included in the section profile P(R), i.e., excluding the points falling outside (marked by triangle). In this example P(R) = 15; the actual test area is A(R) = P(R)·d^2, and the length of test line included in the sample is L(R) = P(R)·2d. Using a second parallel section a distance t apart and the counting frame with area A(R) (disector), the numerical density of particles per unit volume can be assessed from counting particle tops Q–(x) in the disector volume A(R)·t.



Weibel E R et al. J Appl Physiol 2007;102:459-467

©2007 by American Physiological Society

Каскады срезов для стереологии



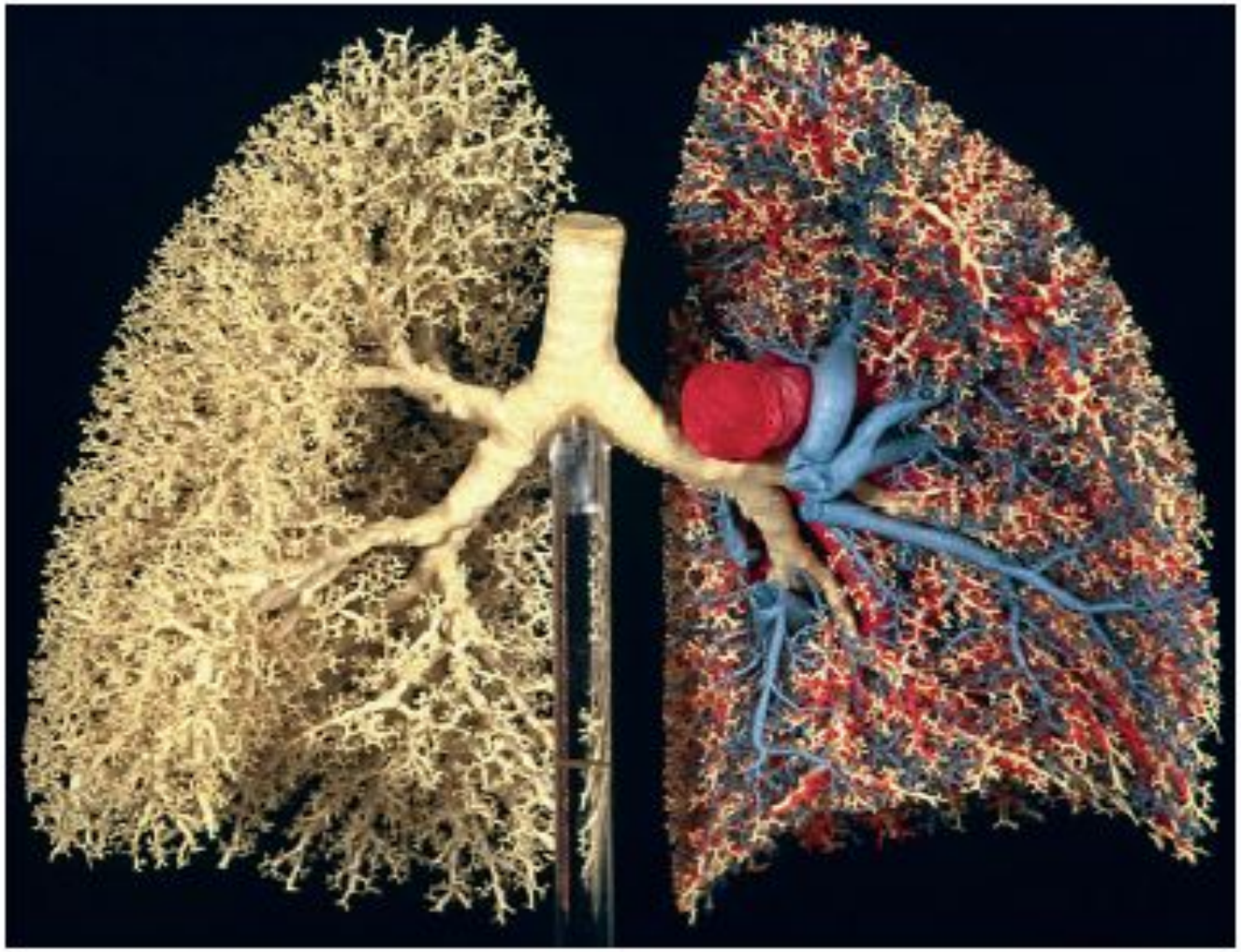
Weibel E R et al. J Appl Physiol 2007;102:459-467

©2007 by American Physiological Society

Слепок дерева воздухоносных путей человека

Figure 7

A resin cast of the human airway tree shows the dichotomous branching of the bronchi from the trachea and the systematic reduction of airway diameter and length with progressive branching. In the left lung the pulmonary arteries (*red*) and veins (*blue*) are also shown.

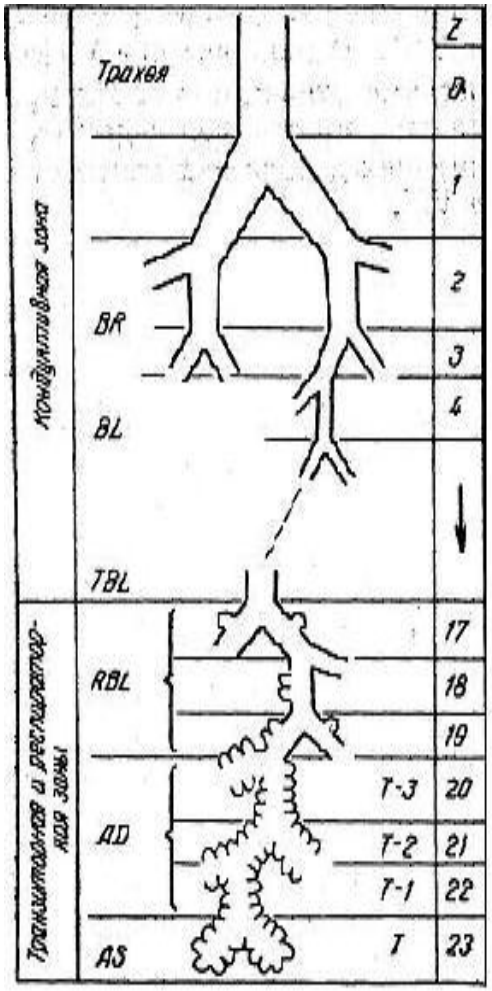


The morphometric basis of lung function

Ewald R. Weibel

SWISS MED WKLY 2009;139(27–28):375–386 · www.smw.ch

Модель правильного симметричного дихотомического ветвления дыхательных путей человека [Вейбель Р., 1970]



Верхние дыхательные пути: носоглотка, гортань, голосовая щель.

- Модель Вейбеля (симметричное дихотомическое ветвление)
- Модели несимметричного ветвления (Хорсфилд, Камминг)
- Проводящая зона – поколения 0-16 – без альвеол
- Переходная зона – поколения 17-19 - часть поверхности покрыта альвеолами
- Газообменная зона – поколения 20-23 – вся поверхность покрыта альвеолами
- 23-е поколение – альвеолярные ходы

Зависимость суммарного поперечного сечения воздухоносных путей от их порядка

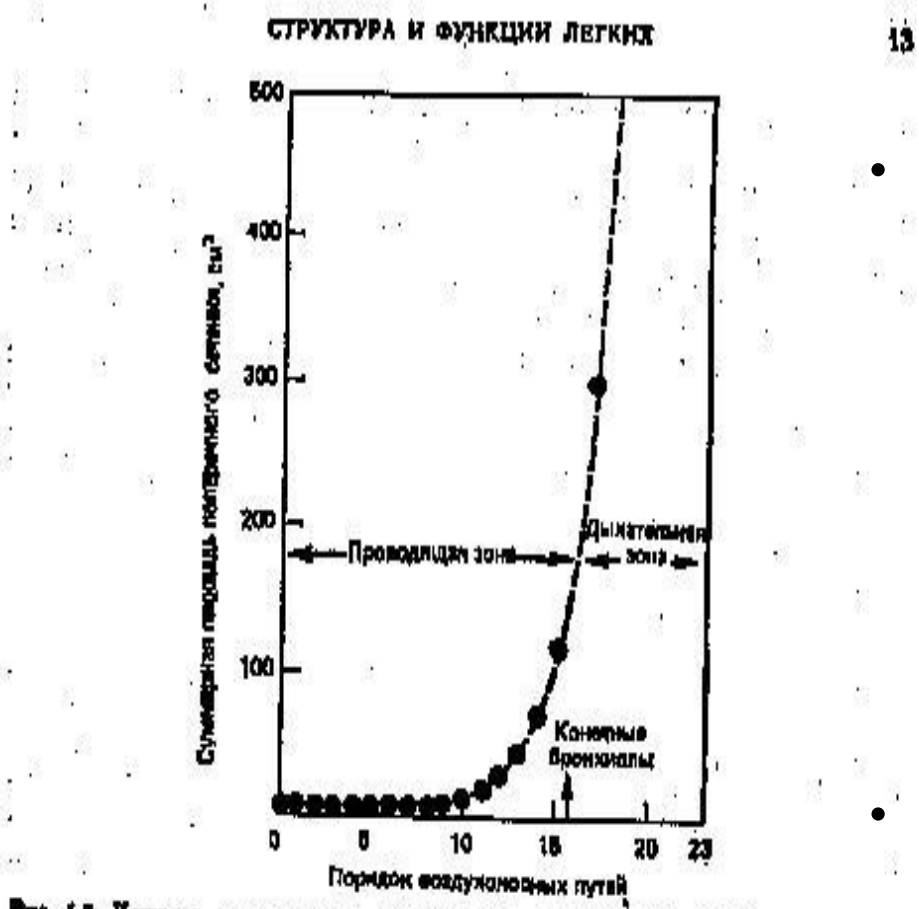
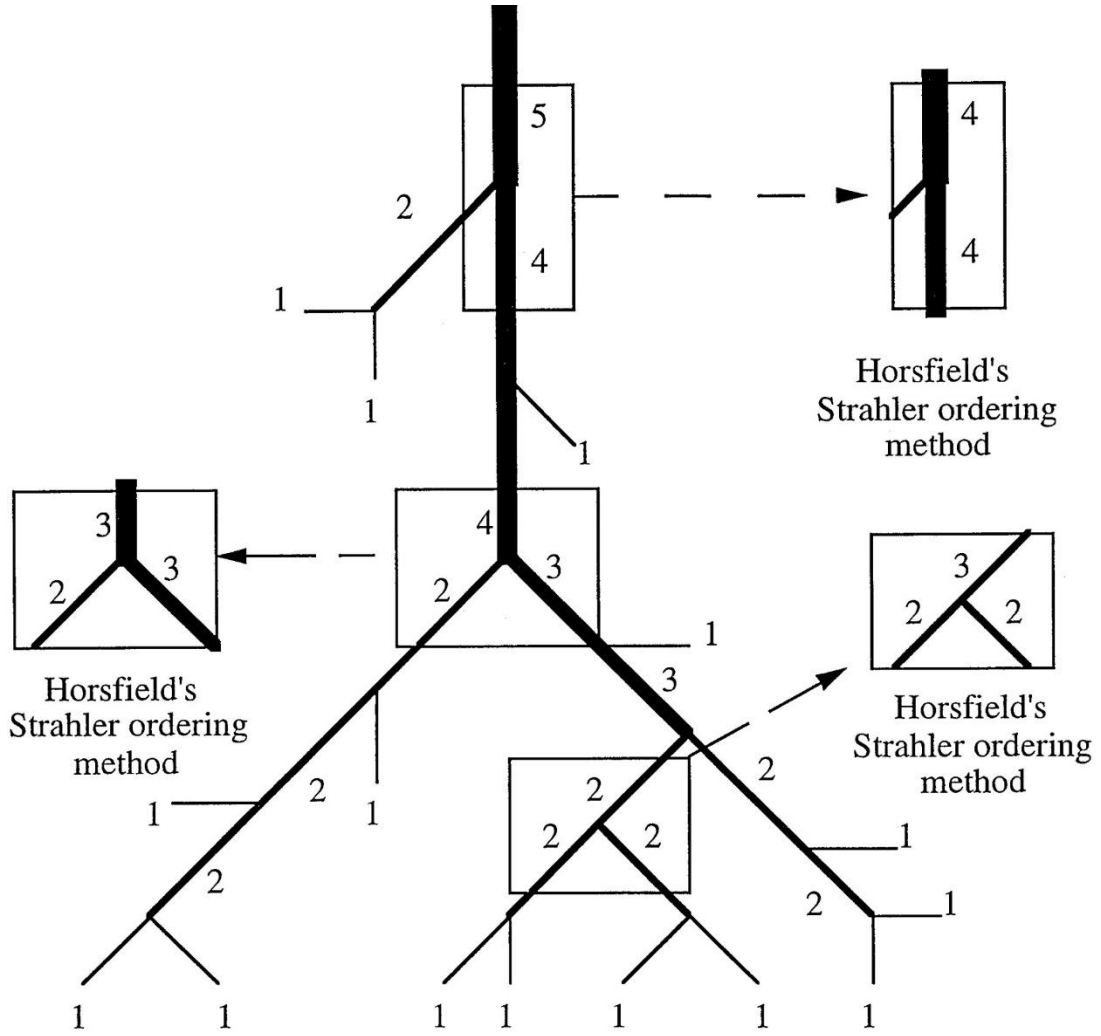


Рис. 1.5. Кривая зависимости суммарного поперечного сечения воздухоносных путей от их порядка. Видно, что в дыхательной зоне оно резко возрастает (см. для сравнения рис. 1.4). В результате в области дыхательных бронхиол продольное перемещение воздуха во время вдоха становится очень небольшим и роль главного механизма вентиляции начинает играть диффузия

- Длина и диаметр бронхов быстро уменьшаются с ростом номера поколения, $L \sim \exp(-k_l n)$, $D \sim \exp(-k_d n)$. Количество бронхов в поколении $N=2^n$. Суммарная площадь сечения дыхательных путей быстро увеличивается с ростом номера поколения
- $S_0 \sim 2{,}5$ см^2 , $S19 \sim 940$ см^2. Общая площадь поверхности всех альвеол $S_{alv} \sim 75$ м^2.

Illustration of diameter-defined Strahler ordering system.

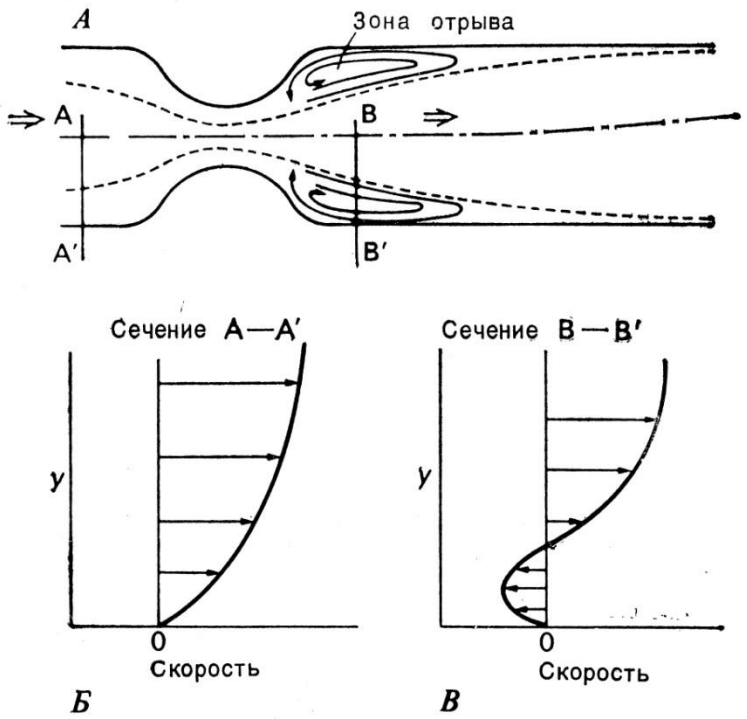


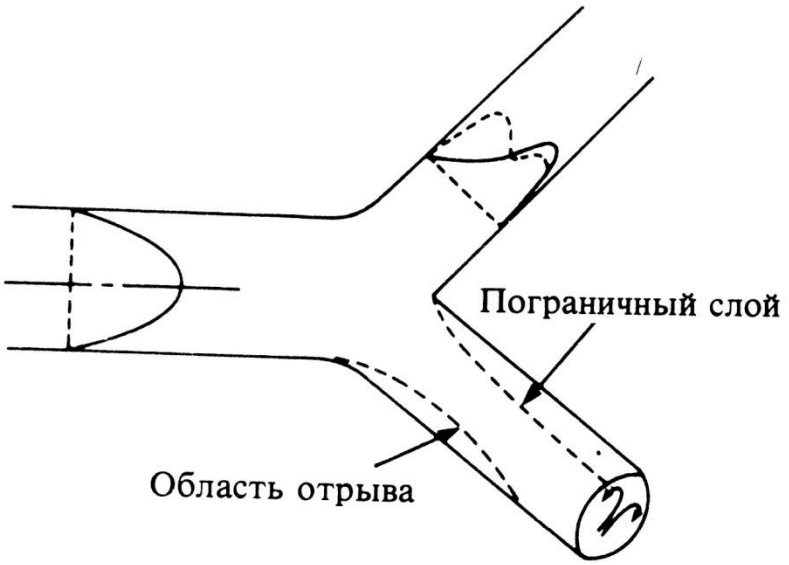
Huang W et al. J Appl Physiol 1996;81:2123-2133

Journal of Applied Physiology

©1996 by American Physiological Society

Картина потоков в сужении и в бифуркации на вдохе





$$\partial\rho / \partial t + div\rho\vec{v} = 0$$

$$div\vec{v} = 0$$

$$\partial\vec{v} / \partial t + (\vec{v}\nabla)\vec{v} = -(1/\rho)\cdot gradP + \eta/\rho\cdot\Delta\vec{v} + (\xi + \eta/3)/\rho\cdot graddiv\vec{v}$$

Некоторые параметры дыхательных путей, $Re=uD/\nu$; $\alpha = a(\omega/\nu)^{1/2}$

Поколе-ние	D,см	L, см	U, см/с (0.5 л/с)	Re (0.5 л/с)	Re (2.5 л/с)	α (3 Гц)
0	1.8	12	197	2325	9300	10
3	0.56	0.76	250	921	3684	3
10	0.13	0.46	38	32	127	0.7
20	0.045	0.083	0.3	0.09	0.37	0.25

Картина потоков в бифуркации на выдохе

- Картина в сечении бронха ниже бифуркации

Fig. 1. Expiratory flow pattern showing vortices.