

© К.П. Иванов, Н.Н. Мельникова, 2011
УДК 611.24:612.235:599.323.4

К.П. Иванов и Н.Н. Мельникова

МОРФОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМЫ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ В ЛЕГКИХ (ПРИЖИЗНЕННЫЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ)

Лаборатория биоэнергетики и терморегуляции (зав. — проф. К.П. Иванов), Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург

С помощью системы контактной оптики проведено исследование кровообращения (микроциркуляции) в легких 15 взрослых крыс Вистар при нормальном физиологическом положении органов внутри грудной полости. У наркотизированной крысы в тканях грудной полости делали «окошко» размером 4×4 мм, через которое проводили надрез плевры, в результате чего легкое спадалось. Через трахеотомическую канюлю легкое наполняли кислородом или гипоксической смесью газов под давлением 10–15 см вод. ст. Далее апертуру (1,7 мм диаметром) контактного объектива приводили в соприкосновение с поверхностью легкого. Ранее предполагалось, что каждая альвеола питается кровью через тончайшую (диаметром 5–10 мкм) легочную артериолу. В настоящей работе показано, что существует система широких (диаметром 20–30 мкм и более) микрососудов, которые проходят между альвеолами. Эти микрососуды окружают каждую альвеолу практически со всех сторон. Таким образом, каждая альвеола получает максимальное количество крови. Такое строение системы кровообращения в легких объясняет очень большой кровоток через легкие (у человека до 6 л в 1 мин) и быстрое насыщение крови кислородом.

Ключевые слова: легкие, капилляры, артериолы, микроциркуляция

Изучение системы микроциркуляции в легких является наиболее сложной задачей в области экспериментальной морфологии и физиологии. Первый, чисто умозрительный рисунок структуры легочной микроциркуляции и структуры альвеолы был опубликован W.S. Miller в 1947 г. [6]. Рисунок изображал тончайшую легочную артериолу, которая подходит к каждой альвеоле и разветвляется на большое количество капилляров вокруг альвеолы (рис. 1). Аналогичную точку зрения на конструкцию сосудов микроциркуляции в легких высказал в 1954 г. крупнейший исследователь строения легких E.R. Weibel [9] (рис. 2). В 2004 г. аналогичный рисунок был опубликован в учебнике физиологии [3]. Все эти рисунки и подобные им, имеющиеся в различных анатомических атласах и морфологических работах, отражают лишь общие представления о расположении и ветвлении различных микрососудов и капилляров. Практически определить общую схему расположения микрососудов в легких очень трудно, потому что легкие, без их деформации, невозможно микроскопировать обычным методом в проходящем свете. Препараты срезов легкого демонстрируют огромное количество альвеол. Однако сосудов в срезах не видно и, кроме того, срезы не могут дать представления о конструкции системы микроциркуляции. Инъекция в легочные сосуды пластмассы позволяет увидеть отдельные сосуды. Но их соединения настолько беспорядочны, что по этим картинам основные направления потоков крови определить не удастся. Совершенно

очевидно, что изучение строения легких требует прижизненных морфологических, а также физиологических наблюдений и экспериментов.

Более 12 лет мы разрабатывали способы прижизненного наблюдения за легочной микроциркуляцией. С помощью системы контактной оптики [5] стало возможным наблюдение прижизненного расположения микрососудов в легких, а также движения и направления кровотока в них, зафиксированных на видеокамеру. При этом легкие находились в грудной полости в физиологических условиях и в физиологическом положении. Целью настоящего исследования было выяснить диаметры микрососудов легких, общие закономерности их конструкции и направления движения кровяных потоков в микрососудах.

Материал и методы. Работу производили на самцах белых крыс линии Вистар массой 250–280 г. Животных наркотизировали нембуталом 35–40 мг/кг массы тела внутривенно. Животным проводили трахеотомию. Затем в тканях грудной полости над легкими делали «окошко» величиной 4×4 мм, надрезали плевру, и легкое спадалось. После этого легкое наполняли кислородом под давлением 10–15 см вод. ст. Затем в «окошко» вставляли контактный объектив микроскопа с апертурой примерно 1,7 мм. Объектив приводили в соприкосновение (без давления!) с поверхностью легкого, лишённого плевры. Контактный объектив имеет самоосвещение и поэтому специального источника света для работы с ним не требовалось. Установка была смонтирована на базе контактного микроскопа «Люмам-1» (Россия), компьютера Intel Pentium 4, телевизионной видеокамеры TS-6020 PSc (Япония).

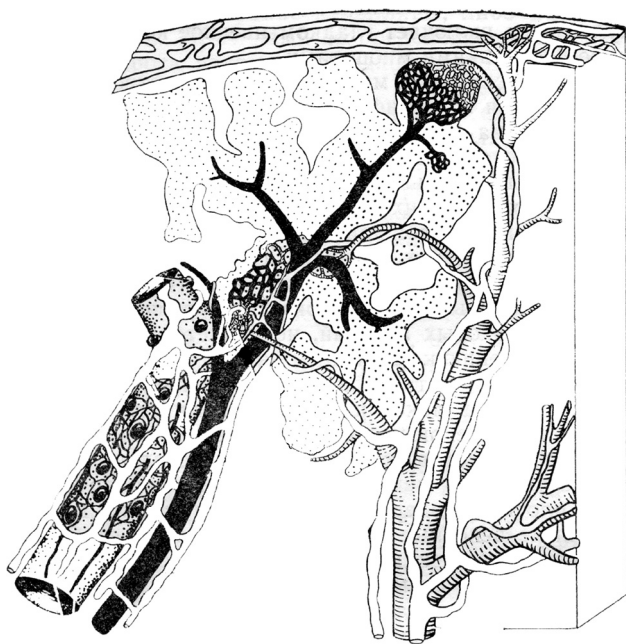


Рис. 1. Система воздухоносных ходов и макрососудов легких человека (произвольное представление).

В верхней правой части изображено строение единичной альвеолы [6].

Фотографирование проводили с помощью специальной платы видеозахвата Pinnacle Studio DC 10 plus, в результате были получены панорамные (т.е. с точки, лежащей выше плоского объекта наблюдения) прижизненные снимки альвеол и микрососудов легких. Проводили наблюдения за строением сосудистой сети микроциркуляции в легких, за скоростью и направлением кровотока в широких (диаметром от 20 до 30 мкм) микрососудах, которые пролегали между отдельными альвеолами на всем протяжении наблюдаемой поверхности легкого. Всего на 15 животных было проведено 15 наблюдений микроциркуляции в легких. Сделано около 50 снимков микрососудов. Отснято несколько коротких видеофильмов. В отдельных случаях мы смогли сделать панорамные снимки микроциркуляции, когда животным подавали для дыхания гипоксическую смесь газов (13–14% кислорода в азоте). С помощью видеофильмов определяли направление потоков крови и приблизительно оценивали скорость кровотока.

Результаты исследования. Главное наблюдение в проведенных исследованиях состоит в том, что основной общий поток крови в легких проходит через крупные микрососуды диаметром от 20 до 30 мкм, которые располагаются между альвеолами, окружая их практически со всех сторон (рис. 3). Вследствие относительно большой ширины этих потоков они условно названы «реками крови». Кровоток в них отличается значительной скоростью, которую можно наблюдать в отснятых видеофильмах. Направление движения крови в них довольно единообразное. Оно всегда направлено от одной границы поля зрения к противоположной границе. Эти широкие микрососуды видны только тогда, когда по ним течет кровь.

После прекращения кровообращения в легких описанные сосуды исчезают из поля зрения, так как их стенки очень тонки и абсолютно прозрачны. Как уже было отмечено выше, каждая альвеола в физиологических условиях практически со всех сторон окружена этими относительно мощными потоками крови. При их ширине 20–30 мкм они занимают значительную часть площади панорамного снимка, примерно 20–30%. Размер альвеол в среднем равен примерно 100×50 мкм. При наполнении легких кислородом кровь в указанных потоках имеет красный цвет. Если легкие наполняются гипоксической смесью газов (13–14% кислорода в азоте), то цвет крови в потоках сменяется на сине-лиловый, свойственный венозной крови (рис. 4).

Особый интерес представляют панорамные снимки отдельных альвеол, на которых хорошо видны широкие «потоки крови», окружающие альвеолы со всех сторон. Цвет крови в потоках, непосредственно окружающих альвеолу, неодинаков. В ряде случаев видно, что на одном полюсе альвеолы кровь в потоках имеет более лиловый (венозный) цвет, а на другой стороне — более красноватый (артериальный) цвет (рис. 5, 6). На других снимках отдельных альвеол при дыхании кислородом кровь имеет достаточно яркий красный цвет.

Обсуждение полученных данных. Имеется много методов исследования микроциркуляции легких. Например, с помощью кварцевого стержня [4], при инсuffляции легких кислородом [8] при использовании отраженного света [1], при извлечении легких из грудной полости подопытных животных и наблюдении слегка растянутых легких в проходящем свете. F.U. Zuang и соавт. проанализировали множество таких работ, вплоть до 1983 г. [10]. Все эти работы не дали каких-либо новых сведений о принципах строения сети микрососудов в легких. Позже Д.П. Дворецкий и Б.И. Ткаченко в своей монографии [2] также тщательно проанализировали соответствующие работы до 1986 г. Относительно строения сосудистой сети в легких, судя по рисункам, они приняли позицию W.S. Miller [6] и E.R. Weibel [9], полагая, что питание каждой альвеолы производится от отдельной тончайшей легочной артериолы. Просмотр литературы за 90-е годы показал, что никаких новых предположений по этому поводу не имелось. За этот период времени мы не нашли каких-либо изменений в принятой схеме кровообращения в легких.

Таким образом, результаты данного исследования полностью опровергают ранее принятую точку зрения на конструкцию микрососудов в легких. Вместо индивидуального питания каждой



Рис. 2. Широкие потоки крови между альвеолами («реки крови»).

Стрелки — направление движения крови от верхней границы поля зрения к нижней его границе. Альвеолы наполнены кислородом. Кровь артериализована и имеет красный цвет.

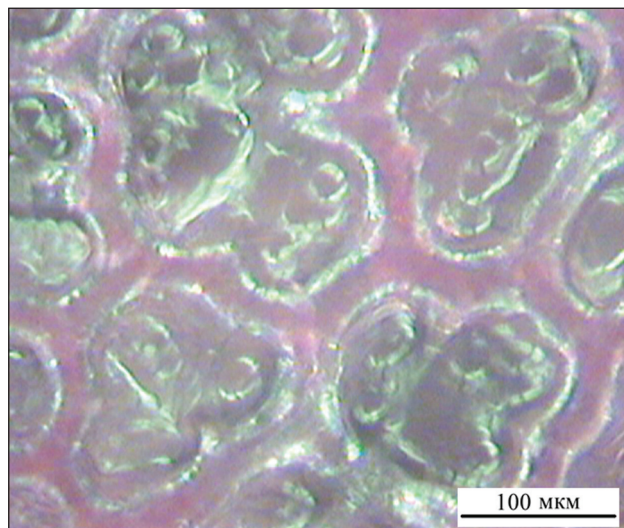


Рис. 3. Легкие наполнены гипоксической смесью газов.

Кровь в «реках крови» имеет венозный характер. Ее цвет — сине-фиолетовый.

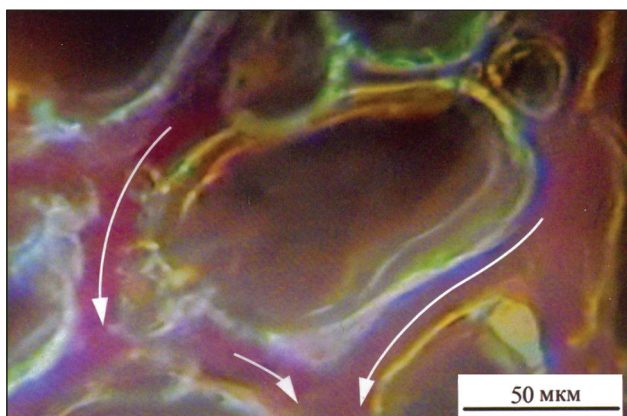


Рис. 4. Отдельная альвеола, которая окружена мощными потоками крови практически со всех сторон.

Стрелки — направление движения крови.

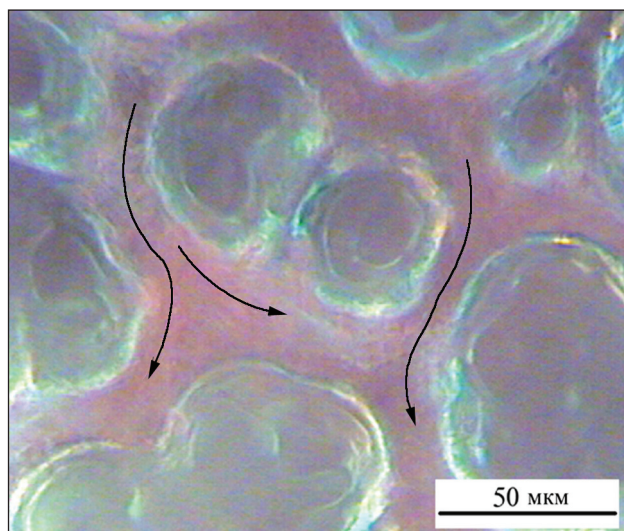


Рис. 5. Большая альвеола, окруженная широкими потоками крови.

В верхней части поля зрения (слева) кровь имеет синеватый «венозный» оттенок. Ниже цвет этого потока меняется и становится красноватым, более артериализованным. Стрелки — направление движения крови.

альвеолы в отдельности мы наблюдали единую общую сеть сосудов с диаметром 20–30 мкм, окружающих все альвеолы практически со всех сторон. Такая сеть позволяет контролировать насыщение кислородом крови всего легкого, так как все альвеолы в процессе насыщения кислородом тесно связаны друг с другом. Это значительно упрощает строение сосудистой сети и, возможно, повышает эффективность процесса насыщения крови кислородом. Ранее в 2008 г. была опубликована статья, посвященная строению сосудистой сети в легком, в которой описаны широкие прямые микрососуды, пролегающие между массой альвеол, обнаруженные в ходе прижизненных морфофизиологических исследований [7]. Это

весьма напоминает полученные в данной работе снимки крупных микрососудов, пролегающих между альвеолами. Таким образом, материалы настоящего исследования находят подтверждение в указанной работе, выполненной несколько ранее наших исследований.

Большой диаметр обнаруженных нами сосудов (порядка 20–30 мкм) намного превышает диаметр капилляров крысы, составляющих не более 3–4 мкм. Это позволяет разгадать основную загадку легочного кровообращения: каким образом орган (легкие) с массой у крысы приблизительно

всего 2 г может пропускать через себя в 1 мин весь минутный объем крови с массой 250–280 г. У человека легкие имеют массу 600 г, а пропускают в 1 мин 5,5–6 л крови.

Другие факты, также полученные в результате нашей работы, позволяют сделать некоторые предположения. Так как кровь в крупных микрососудах, окружающих альвеолу, с одной стороны альвеолы по цвету напоминает венозную кровь, а с другой стороны альвеолы — артериальную кровь, можно выдвинуть следующее предположение. Венозная кровь поступает к альвеоле из общей сети микрососудов. После полной или неполной артериализации кровь снова поступает в общую сеть микрососудов, но уже с другой стороны альвеолы. Если это так, можно полагать, что в легких нет специальных венозных коллекторов для отведения артериализированной крови от альвеол. Общая сеть крупных микрососудов непосредственно переходит в стволы легочных вен, которые впадают в левое предсердие.

Вокруг альвеол мы не обнаружили капилляров, здесь имеется так называемое лакунарное кровообращение. Оно увеличивает площадь взаимодействия крови с воздушным пространством альвеолы (через аэрогематический барьер) поверхности и, возможно, делает слой циркулирующей крови более тонким. Соответствующие предположения выдвигает и E.R. Weibel в своем обзоре проблемы [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Дворецкий Д.П. Физиологическая оценка кровообращения в малом круге. Физиол. журн. СССР, 1973, т. 59, № 2, с. 299–306.
2. Дворецкий Д.П. и Ткаченко Б.И. Гемодинамика в легких. М., Медицина, 1984.
3. Учебник фундаментальной клинической физиологии. Под ред. А.В. Комкова. М., Академия, 2004.
4. Irwin J.W., Vineyard P.A. and Marr E.M. The contribution of microscopes to the study of living circulation. J. Roy. Microscop. Soc., 1964, v. 83, № 1–2, p. 37–44.
5. Ivanov K.P., Kalinina M.K. and Levkovich Yu.I. Microcirculation velocity changes under hypoxia in brain, muscles, liver and their physiological significance. Microcirc. Res., 1985, v. 30, № 1, p. 10–28.
6. Miller W.S. The Lung. Baltimore, Thomas, 1947.
7. Tabuchi A., Mertens M. and Kuppe H. Intravital microscopy of the murine pulmonary microcirculation. J. Appl. Physiol., 2008, v. 104, p. 338–346.
8. Wagner W.W. Pulmonary microcirculatory observation in vivo. J. Appl. Physiol., 1969, v. 26, № 3, p. 375–377.
9. Weibel E.R. The Pathway for Oxygen. Cambridge, MA, Harvard Univ. Press, 1984.
10. Zuang F.U., Yen M.R.T. and Fung Y.C. How many pulmonary alveoli are supplied by a single arteriole and drained by a single venule? Microvasc. Res., 1983, v. 29, p. 18–31.

Поступила в редакцию 18.06.2010

Получена после доработки 21.04.2011

MORPHODYNAMIC ANALYSIS OF LUNG MICROCIRCULATION (A SUPRAVITAL MORPHOLOGICAL STUDY)

K.P. Ivanov and N.N. Mel'nikova

Using the system of contact optics, the circulation (microcirculation) was studied in the lungs of 15 adult Wistar rats during the normal physiological location of the organs inside the thorax.

A 4×4 mm “window” was made in the tissues of the thorax of an anaesthetized rat, through which the pleura was incised, resulting in the lung collapse. The lung was filled with oxygen or hypoxic gas mixture under the pressure of 10–15 cm of water column through a tracheotomic cannula. Then the lung was brought in contact with the contact objective aperture (1.7 mm in diameter). Each alveolus was supposed earlier to be supplied with blood via a thinnest (5–10 µm in diameter) lung arteriole. The present study has shown that there exists a system of wide (20–30 µm in diameter and larger) microvessels, which run between the alveoli. These microvessels surround each alveolus, practically, from all the sides. In such a manner each alveolus is supplied by a maximal amount of blood. Such a structure of the lung circulation system accounts for a great blood flow through the lungs (up to 6 l per minute in humans) and a rapid saturation of the blood with oxygen.

Key words: lungs, capillaries, arterioles, microcirculation

Laboratory of Bioenergetics and Thermoregulation, RAS
I.P. Pavlov Institute of Physiology, St. Petersburg