

Экспериментальные исследования

ИВАНОВ К. П., ПОТЕХИНА И. Л.,  
АЛЮХИН Ю. С., МЕЛЬНИКОВА Н. Н.

## Микроциркуляция в легких: некоторые особенности конструкции и динамики

*Институт физиологии им. акад. И. П. Павлова, Санкт-Петербург*  
*e-mail: kpivanov@nc2490.spb.edu*

### Реферат

Представлены снимки микрососудов и альвеол легочной ткани, сделанные на легких в грудной клетке крысы в физиологических условиях с помощью специального объектива контактного микроскопа. На основании этих снимков объяснены некоторые важные особенности микроциркуляции легких.

*Ключевые слова:* альвеолы, капилляры, скорость кровотока, оксигенация и дезоксигенация.

Ivanov K. P., Potechina I. L., Aliukhin Y. S., Mel'nikova N. N.

## Microcirculation in lungs:

*I. P. Pavlov Institute of Physiology of RAS, Saint-Petersburg, Russia*  
*e-mail: kpivanov@nc2490.spb.edu*

### Abstract

The work presents the photographs of microvessels and alveoli of the lung tissue made on the lungs in physiological condition in the rat thorax with the help of special objective of a contact microscope. On the basis of these photographs some important special features of the lung microcirculation are accounted for.

*Keywords:* alveoli, capillaries, blood flow rate, oxygenation, and deoxygenation.

### Введение

Микроциркуляция — важнейшее звено кровообращения. Изучение микроциркуляции затрудняет значительная вариабельность ее физиологических параметров. Так, например, по нашим данным, скорость капиллярного кровотока в различных капиллярах мозга и мышц может различаться почти в 20 раз — от 0,1 до 1,8–2,0 мм в с. Чтобы определить среднюю скорость микроциркуляции при разных физиологических состояниях, необходимо построить гистограмму скоростей в определенном довольно большом количестве капилляров. Интересно, что кровотоки даже в одном и том же капилляре происходят своеобразными толчками, т. е. с мгновенными изменениями скорости. Это, как оказалось, связано с прохождением через капилляры лейкоцитов, которые имеют объем больший, чем у эритроцита, в 2–2,5 раза. Поэтому лейкоцит, проходя по капилляру, на какое-то время тормозит капиллярный кровоток [1, 11, 12]. Поскольку вхождение лейкоцитов в капилляры — процесс непредсказуемый, то изменения скорости кровотока в капиллярах по времени тоже непредсказуемо. Благодаря тщательному изучению процессов микроциркуляции нам удалось показать,

что, вопреки почти 100-летней парадигме А. Крога, согласно которой газообмен между кровью и тканями происходит только в капиллярах, фактически мозг около 30 % кислорода получает через стенки мозговых артериол диаметром 25–15 мкм [1]. Особенности физиологии микроциркуляции в мозге, в мышцах и в печени отражены в литературе и в многочисленных наших исследованиях [3–6, 9–12, 14, 17].

Микроциркуляция в легких очень трудна для изучения и в то же время имеет огромный интерес, поскольку касается самого важного процесса для жизни — насыщения крови кислородом. Строение легких [6, 10, 15, 16] и гемодинамика в них [2, 6, 7] описаны в ряде монографий и обзоров. Тем не менее до сих пор мы не располагаем общепризнанной схемой строения системы микроциркуляции в легких. Существуют лишь старые представления о кровоснабжении альвеол. Согласно этим представлениям, альвеолы висят как ягоды винограда на тонких пульмональных артериолах. Эти представления, выдвинутые еще в 1947 г. Миллером [13], сохранились до наших дней. Такая же конструкция микроциркуляции в легких представлена в новейшем учебнике

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

по фундаментальной физиологии [6]. Имеется ряд вопросов, которые еще ждут своего решения. Во-первых, получают ли все альвеолы кровь только через индивидуальные легочные артериолы, или несколько альвеол или множество альвеол снабжаются из одного и того же источника, и насыщение крови кислородом происходит последовательно по нарастающей. Этот вопрос был выдвинут Вейбелем [15, 16], Д. П. Дворецким и Б. И. Ткаченко [2] и др. Он имеет принципиальное значение, так как касается особенностей общей конструкции микроциркуляции в легких. Второй вопрос имеет более сложный характер. Дело в том, что легкие — сравнительно маленькие по массе органы. Они весят у человека всего 600 г. Однако через них в физиологических условиях в одну минуту может проходить до 6000 мл крови, т. е. минутный объем сердца. Это очень большой объем крови. Сравним кровообращение в мозге, через который проходит 15 % кровяного дебита, т. е. 900 мл крови, хотя мозг в среднем весит 1500 г, т. е. в два с половиной раза больше, чем легкие. Иначе говоря, через легкие в минуту проходит количество крови, почти в 7 раз больше, чем через мозг [7]. Возникает вопрос: какова должна быть конструкция микроциркуляции легких, если она способна пропускать через себя такое большое количество крови в минуту. Третий вопрос касается оксигенации крови. Каким образом такое большое количество крови может быть полностью оксигенировано за одну минуту? Это еще более сложный вопрос, ибо он затрагивает много важных проблем диффузии кислорода, физиологии крови и кровообращения в легких.

В настоящей экспериментальной работе мы попытались частично осветить на эти вопросы.

### Материал и методы исследования

Работа производилась на наркотизированных крысах (40 мг нембутала на 1 кг веса тела). Всего было использовано 10 крыс весом от 200 до 230 г. Животным в грудной области делалось «окошко» размером 4×4 мм с резекцией одного ребра. Часть плевры над «окошком» удалялась. Легкое наполнялось кислородом через катетер, вставленный в трахеотомическую канюлю до бифуркации трахеи. Через окошко в грудную полость вводился специальный тубус контактного микроскопа, который соприкасался с поверхностью легкого, остававшегося в грудной полости в физиологическом положении. Снимки делались при малом увеличении, когда фотографировались сразу 10–15 альвеол. Снимки одной или двух альвеол делались при большом увеличении.

### Результаты исследования

Нам удалось сделать ряд панорамных снимков поверхности легких (панорамными снимками называются снимки, которые делаются сверху от объекта фотографирования). На них мы смогли запечатлеть сразу несколько (от 10 до 15) альвеол и широкие потоки крови между ними. Протоки крови между альвеолами имели ширину около 20–40 микрон. При хорошем снабжении легких кислородом по этим протокам двигалась ярко-красная кровь. В отдельных

частях этих протоков между альвеолами имелись редкие участки с кровью более темного венозного цвета. Верхушки альвеол имели темно-красный или бурый цвет. Кроме того, на большом увеличении мы делали отдельные снимки одной или двух альвеол. Эти снимки показали, что каждая альвеола окружена мощными потоками крови. Каждый поток имел ширину 20–40 мкм. На Ил. 1 и Ил. 2 (см. стр. 3 обложки) представлены соответствующие картины. На видеofilmах мы смогли наблюдать направление движения крови по протокам между альвеолами. По всем протокам кровь двигалась в одном направлении — от одного угла поля зрения к противоположному углу. Это движение очень быстрое, поэтому визуально оценить его скорость в отдельных опытах не представлялось возможным.

### Обсуждение результатов

Снимки поверхности легких в физиологических условиях (внутри грудной полости) показывают, что альвеолы на поверхности легких расположены параллельными рядами. Отдельные альвеолы не имеют, очевидно, индивидуального кровоснабжения. Можно полагать, что широкие протоки крови (которые мы называем «реками» крови), пролегающие между альвеолами, представляют собой микрососуды, которые берут начало от легочных артериол, заполненных венозной кровью. По ходу тока крови между альвеолами часть крови от этих широких микрососудов отливает к альвеолам, там кровь насыщается кислородом и снова, как мы предполагаем, поступает в проток (в «реку» крови). В последующих альвеолах происходит донасыщение крови кислородом. Площадь потоков крови между альвеолами составляет примерно 30 % от общей площади альвеол. Это позволяет предполагать, что примерно в таком же отношении находятся и объемы этих крупных микрососудов и альвеол. Способность легких пропускать через себя очень большой объем крови (до 6 л в минуту) объясняется большим количеством очень широких и емких микрососудов, пролегающих между альвеолами. В капиллярах мозга средняя скорость кровотока в капиллярах составляет около 1 мм в секунду [3, 11, 12]. Поскольку в легких скорость общего кровотока больше, чем в мозге в 7 раз, то можно с достаточным основанием предположить, что объемная скорость крови в широких протоках между альвеолами в легких имеет скорость, также примерно в 7 раз больше, чем в капиллярах мозга. Все эти численные отношения сугубо приблизительны. Однако они позволяют понять, почему легкие, имея очень маленькую массу, способны пропустить через себя такое большое количество крови.

Относительно высокой скорости насыщения кислородом очень большого объема крови в легких можно сказать следующее. Во-первых, хорошо известно, что скорость оксигенации крови превосходит скорость дезоксигенации крови в 2–3 раза. Это первое объяснение высокой скорости оксигенации крови в легких. Но дело не только в этом. Вторая причина состоит в том, что оксигенация крови в альвеолах идет очень интенсивно потому, что стенка альвеол на 60 %

ее поверхности имеет толщину порядка 0,2 десятых микрона [15]. Это во много раз ускоряет диффузию кислорода из воздуха альвеол в кровь.

Интересно, что в стенке альвеол мы никогда не видели отдельных капилляров, хотя наши средства увеличения вполне достаточны, чтобы увидеть капилляры толщиной всего 4–5 мкм. Следовательно, кровь на стенках альвеол, возможно, образует лакуны в виде сплошного тончайшего слоя крови без перегородок, что облегчает газообмен. Имеется еще одна причина. В 1980 г. Д. П. Дворецкий и Р. Л. Конгейм [1, 8] открыли способность легких насыщать венозную кровь в пульмональных артериолах, т. е. еще до альвеол. Возможно, это свойство легких вносит свой вклад в ускорение процесса насыщения крови кислородом.

Конечно, на вопросы, поставленные в этой работе, мы ответили лишь частично, высказав ряд предположений на основании полученных фактов. Панорамные снимки сразу многих и отдельных альвеол несут много информации, которая еще нуждается в расшифровке. Много интересного материала дают и видеофильмы, отражающие особенности движения крови в широких капиллярах и на стенках альвеол. Это совершенно особый демонстрационный материал. К сожалению, видеофильмы невозможно приложить к статье в журнале. Мы надеемся, что в ближайшем будущем появится возможность снабжать каждую статью гибкими дисками с записью движения крови, с помощью которых можно будет определять направление и скорость кровотока.

## Литература

1. Дворецкий, Д. П. Внекапиллярная оксигенация крови / Д. П. Дворецкий // Физиол. журн. СССР. — 1980. — Т. 66. — С. 1522–1529.
2. Дворецкий, Д. П. Гемодинамика в легких / Д. П. Дворецкий, Б. И. Ткаченко. — М.: Медицина, 1987.
3. Иванов, К. П. Основы энергетики организма. Т. 2 / К. П. Иванов. — СПб.: Наука, 1993.
4. Иванов, К. П. Основы энергетики организма. Т. 3 / К. П. Иванов. — СПб.: Наука, 2001.
5. Иванов, К. П. Диффузия кислорода из артериол / К. П. Иванов, А. Н. Дерий, М. О. Самойлов // ДАН СССР. — 1979. — № 244. — С. 1509–1513.
6. Фундаментальная клиническая физиология: учебник / под ред. А. В. Комкова. — М.: Академия, 2004. — 1200 с.
7. Уэст, Дж. Физиология дыхания / Дж. Уэст. — М.: Мир, 1988.
8. Conhaim, R. L. Reflection spectrophotometric measurement of O<sub>2</sub> uptake in pulmonary arterioles of cats / R. L. Conhaim // J. Appl. Physiology. — 1980. — Vol. 48. — № 5. — P. 848–856.
9. Duling, B. R. Measurements of the perivascular Po<sub>2</sub> in the vicinity of pial vessels / B. R. Duling, W. Kushinsky, M. Wahl // Pflug. Arch. — 1979. — Bd. 383. — S. 29–34.
10. Hornsfeld, K. Functional morphology of the pulmonary vasculature / K. Hornsfeld // Respir. Physiol. — 1989. — Vol. 40. — P. 499–532.
11. Ivanov, K. P. Blood flow velocity in capillaries / K. P. Ivanov, M. K. Kalinina, Yu. I. Levkovich // Mikrovas. Research. — 1981. — Vol. 22. — P. 143–155.
12. Ivanov, K. P. Microcirculation velocity / K. P. Ivanov, M. K. Kalinina, Yu. I. Levkovich // Microvascul. Research. — 1985. — Vol. 30. — P. 10–18.
13. Miller, W. S. The lung / W. S. Miller. — Springfield-Baltimore: Thomas, 1947. — 210 p.
14. Renkin, E. M. Control of microcirculation / E. M. Renkin // Handbook of Physiology. — Bethesda, 1984. — Sec. 2. — Vol. 4. — Part. 2. — P. 627–688.
15. Weibel, E. R. The pathway for oxygen / E. R. Weibel. — London: Cambridge, 1984.
16. Weibel, E. R. Lung morphometry / E. R. Weibel // Respir. Physiol. — 1989. — Vol. 40. — P. 1–56.
17. Zweifach, B. W. Pressure-flow relation in blood and lymph microcirculation / B. W. Zweifach, H. H. Lipowsky // Handbook of Physiology. — 1984. — Sec. 2. — Vol. 4. — Part 1. — P. 217–250.