

2. Analysis of complex brain disorders with gene expression microarrays: schizophrenia as a disease of the synapse / K. Mirnics [et al.] // Trends Neurosci. – 2001. – Vol. 24. – P. 479-486.
3. Относительная важность предсмертного ацидоза и посмертного интервала для исследований экспрессии генов в мозге человека: избирательная уязвимость мРНК и сравнение с кодируемыми ими белками / П. Дж. Харрисон [и др.] // Neurosci. Lett. – 1995. – Т. 00. – P. 151-154.
4. Glausier, J. R. Factors Affecting Ultrastructural Quality in the Prefrontal Cortex of the Postmortem Human Brain // J. R. Glausier, A. Konanur, D. A. Lewis // J. Histochem. Cytochem. – 2019. – Vol. 67. – P. 185-202.
5. Inhibition of Na⁺/Ca²⁺ exchange enhances delayed neuronal death elicited by glutamate in cerebellar granule cell cultures / N. Andreeva [et al.] // Brain Research. – 1991. – Vol. 548. – P. 322-325.
6. Фрумкина, Л. Е. Ультраструктурные корреляты деструктивных и репаративных процессов в культуре клеток-зерен мозжечка при глутаматной нейротоксичности / Л. Е. Фрумкина, А. А. Лыжин, Л. Г. Хаспеков // Нервные болезни. – 2019. – №3.
7. Hajós, F. Reversible and irreversible neuronal damage caused by excitatory amino acid analogues in rat cerebellar slices / F. Hajós, G. Garthwaite, J. Garthwaite // Neuroscience. – 1986. – Vol. 18. – P. 417-436.

ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕГКИХ. АЛЬВЕОЛЫ – МНОГОГРАННИКИ

Кислухин В. В., Кислухина Е. В.

Московский городской научно-исследовательский институт скорой помощи
имени Н. В. Склифосовского, Российская Федерация

Актуальность. Соответствие меду вентиляцией и перфузией – жизненно важная характеристика работы легких. Обеспечивается соответствие тем, что изменить свой объем альвеолы могут, если одновременно меняется объем (и размеры) их перегородок. Другими словами, альвеола вентилируется, тогда и только тогда, когда перфузируются её перегородки. Структурно альвеолы многогранники, в их гранях расположены капилляры, в ребрах проходят артериолы и венулы. Грани и ребра содержат также соединительную ткань (паренхиму). Объем альвеол следует перемещению воздуха, Объем (размеры) ребер и граней меняется, в дыхательном цикле, благодаря перемещению воды ткань-кровь. Помимо перемещения воды, в гранях меняется объем крови. Важность формы альвеол была осознана давно. Поиск формы начался в 18 веке. Первые наблюдения сводились к тому, что это додекаэдры, см. Рис 1.1. Но уже в 20 веке было найдено, что большинство это неправильные многогранники, при преобладании додекаэдров [3]. Альвеолы, числом $\sim 3 \cdot 10^8$, составляют легкие. Отсюда вытекает важность построения модели легких из многогранников, если мы хотим количественно описывать структуру. Полагая единичную альвеолу многогранником, мы получаем следующую проблему: выложить легочное пространство многогранниками, соблюдая два условия:

(а) соседние альвеолы имеют общую грань; (в) реализуется минимальный объем соединительной ткани

Цель. Рассмотреть различные укладки пространства, позволяющие построить структурную модель легкого, необходимую для количественной обработки срезов легочной ткани.

Материалы и методы исследования. На рис 1 приведены примеры многогранников. Первым дан додекаэдр, но им осуществить плотную укладку невозможно, см. рис 4, а также монографию [2], где вопросы укладки пространства рассматриваются. Следующие три это многогранники, которыми можно плотно заполнить пространство [2].

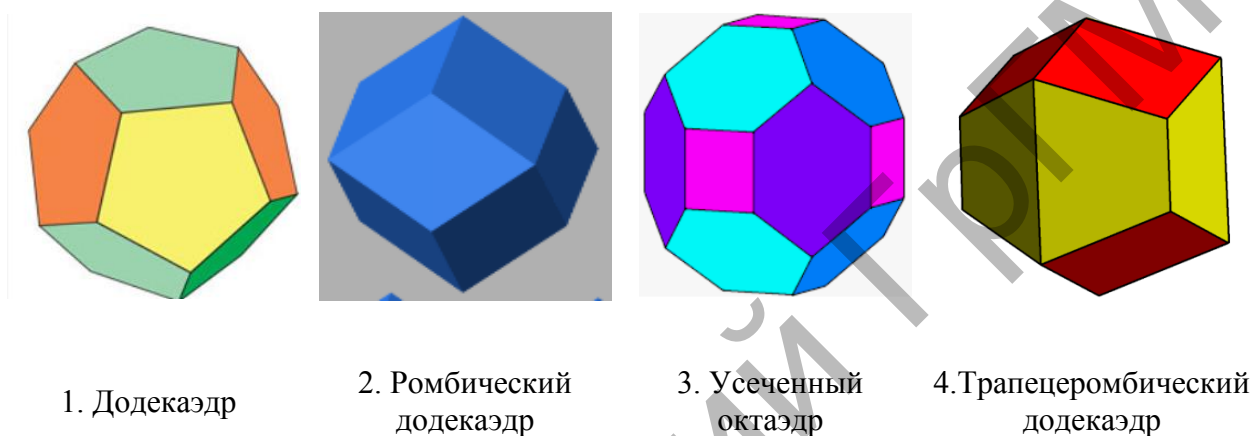


Рисунок 1. – Многогранники, обеспечивающие плотное заполнение пространства

При этом ромбический додекаэдр обладает тем свойством, что любое совмещение граней ведет к плотной укладке. Для следующих двух, 3 и 4, это не так, в чем легко убедиться, используя конструктор многогранников «Волшебные грани» [6], т.е. не любое соединение однотипных граней многогранников 3 и 4 ведет к плотной укладке пространства.

На срезах ткани легкого, представленных на Рис 2, взятых из [1,4], видны многоугольники, от треугольников до шестиугольников. Можно также отметить, идеализируя границы альвеол, что на срезах преобладают пятиугольники. Следовательно многогранники, использующиеся при построении структуры легких также должны давать на срезах названные многоугольники.

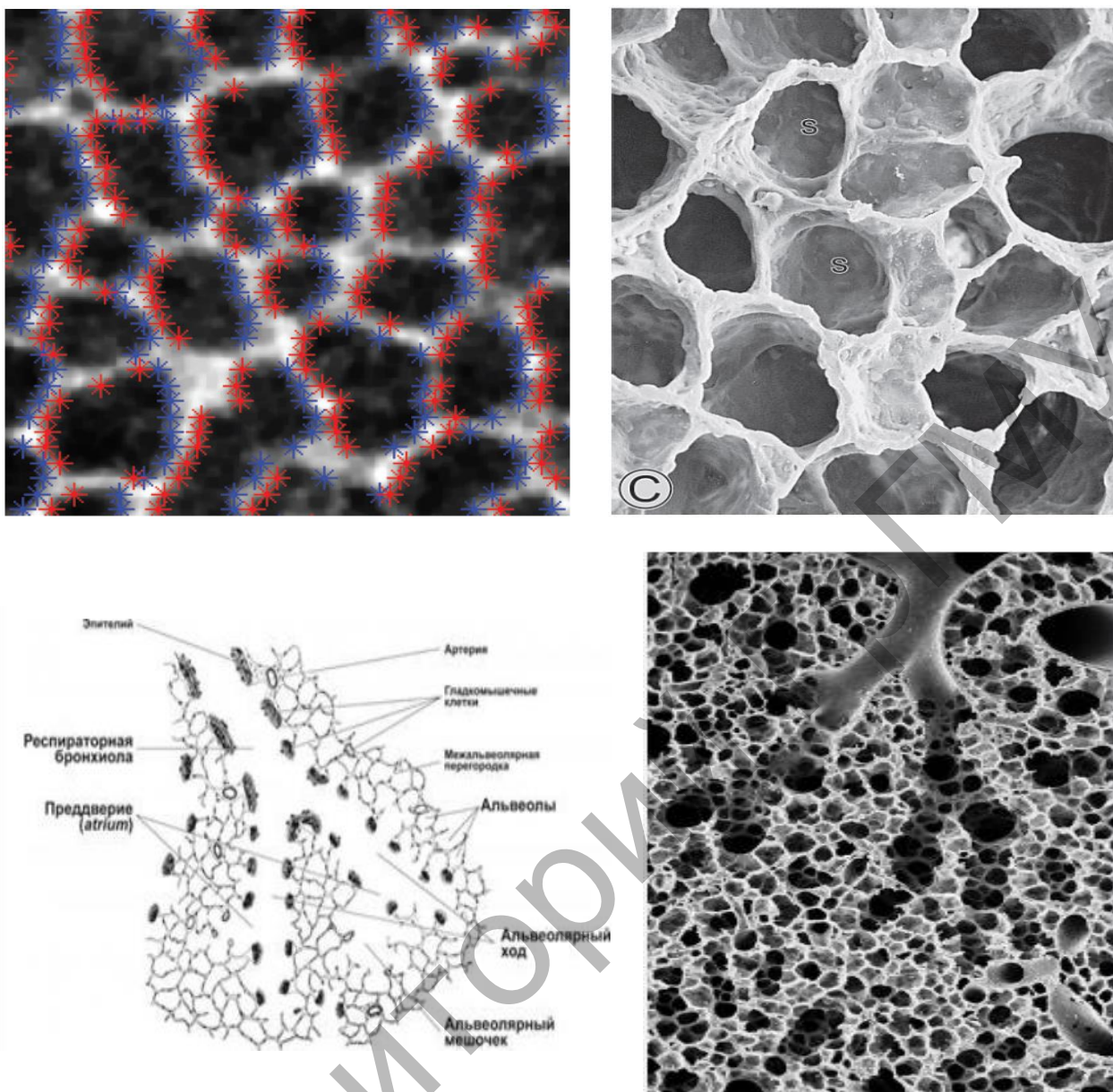
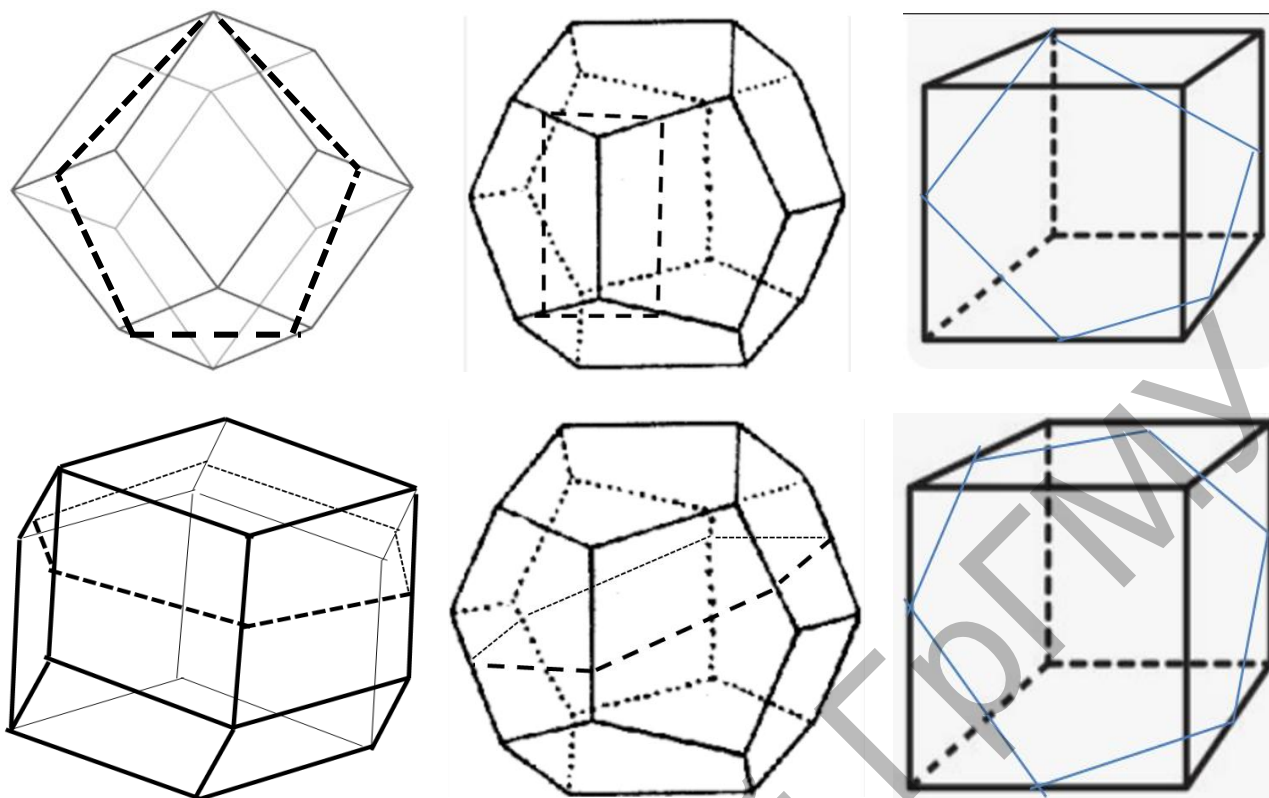


Рисунок 2. – Срезы легочной ткани

Построение сечений, представляющих необходимые многоугольники, представлено на рис 3. Результат: перечисленные многоугольники (от треугольника до шестиугольника), присутствуют на срезах всех многогранников, собственно на рисунке представлены срезы, реализующие наиболее сложные многоугольники. Поскольку все многогранники имеют требуемые многоугольники в своих сечениях, то следующий шаг: получить оценки для частоты встречаемости разных многоугольников, на срезах легких. Возможно, полученный результат можно будет использовать для создания математического описания многогранников упаковки, выбирая их исходя из сравнения с распределения частот встречаемости многоугольников на препаратах.



Ромбический додекаэдр.
Пунктиром приведены
сечения пятиугольником и
шестиугольником

Додекаэдр. Сверху сечение 4-
х угольником Снизу в
сечении шестиугольник

На срезах куба видны и
пятиугольник и
шестиугольник.

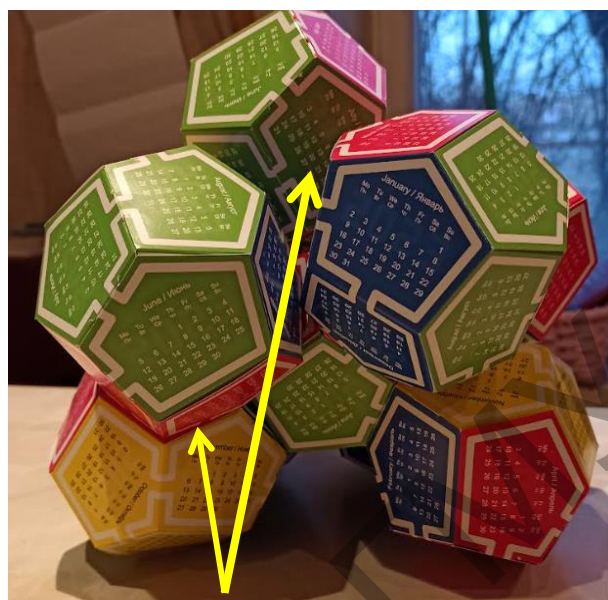
Рисунок 3. – Многоугольные сечения присутствуют во всех многогранниках

Следующий, после анализа многогранников, шаг состоит в выборе вида укладки. На рис 4 представлена упаковка ромбическими додекаэдрами и додекаэдрами. Отметим, что при укладке додекаэдрами образуются пустоты, могут быть заполнены как соединительной тканью, так и бронхиальной, артериальной и венозной системами. Дополнительным аргументом в пользу додекаэдров может быть объединение альвеол в ацинусы. Суть аргумента: рост массы ткани, заполняющей пустоты, является сигналом к формированию ацинуса. Другими словами, чем больше неполнота заполнения, тем меньше вероятность образования новых альвеол, и тем выше вероятность покрытия уже образовавшихся соединительной тканью (плеврой).

Следует указать, что в работах, исследующих движение воздуха от трахеи до альвеол, используется укладка усеченными октаэдрами, см. Рис 5 взятый из [4]. В этом случае укладка плотная. Почти такую же укладку, вокруг шестигранной призмы, можно сделать из шести додекаэдров. Только в случае додекаэдров укладка будет неплотная.



Плотная укладка, ромбические додекаэдры



Есть рост щелей между гранями, додекаэдры

Рисунок 4. – Укладка пространства «простыми» многогранниками. Стрелками отмечены образующиеся, при укладке додекаэдрами, пустоты. Отчетливо видно появление и нарастание щелей при укладке пространства додекаэдрами. Заполнять эти щели будет легочная ткань. Рост объема соединительной ткани вполне может быть сигналом к формированию ацинуса

Результаты и обсуждение. Для эффективности описания анатомической структуры легких следует ответить на вопрос, какой многогранник предпочтительней. Возможный ответ следующий: имея исходную протоальвеолу, легче обеспечить укладку, если все грани одинаковы. В этом случае это или ромбический додекаэдр, у него все грани ромбы, или додекаэдр, у которого все грани пятиугольники. Тем не менее, в работах по аэродинамике легких используются и усеченные октаэдры, см. Рис 5

Пространство может быть заполнено также комбинацией многогранников. Существует математическая теория (Федоровские группы, [2]), которая дает описание таких комбинаций. Сомнения в использовании многогранников разных типов, для построения альвеол, основаны на упомянутом аргументе: имея исходную альвеолу «проще» строить следующие на её гранях. Но если говорить о тканях, то они могут состоять из двух типов клеток. Следовательно, полезно знать о возможности заполнения пространства несколькими типами многогранников.

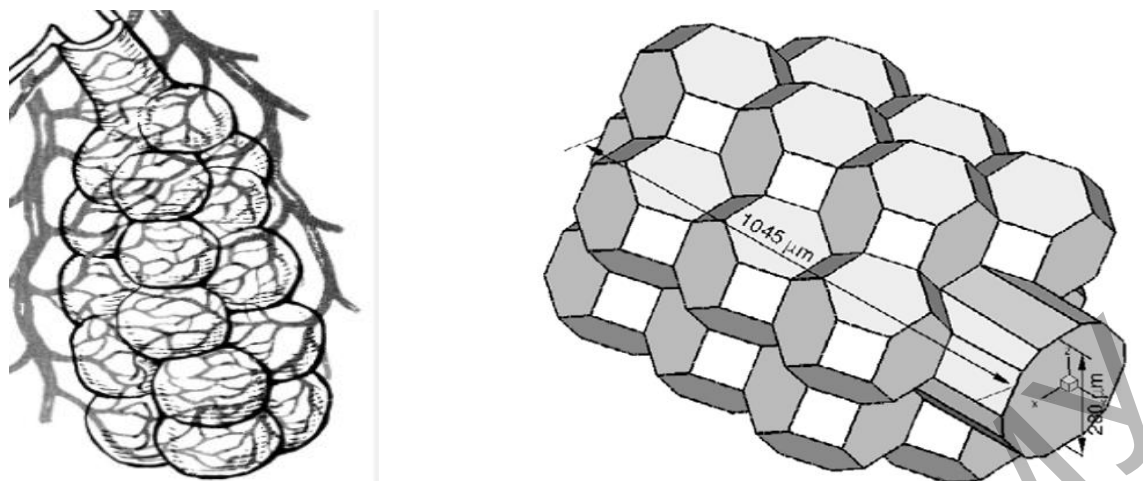


Рисунок 5. – Слева ацинус-альвеолярные мешочки вокруг дыхательного хода (конечной бронхиолы). Справа модель – дыхательная трубка, шестигранная призма, вокруг призмы выложены усеченные октаэдры. Из публикации [4]

Выводы. Предложены структуры, составленные из многогранников, позволяющие моделировать структуру легких.

Список литературы:

1. Вейбель, Э. Р. Морфометрия легких человека / Э. Р. Вейбель. – М. : Медицина. – 1970. – 175 с.
2. Гильберт, Д. Наглядная геометрия / Д. Гильберт, С. Кон-Фоссен. – М. – 1981. – 344 с.
3. Левитин, К. Геометрическая Рапсодия / К. Левитин. – С-Пб : « Амфора». – 2016. – 313 с.
4. The effects of geometry on airflow in the acinar region of the human lung / Kumar Haribalan [et al.] // J. Biomech. – 2009. – Vol. 42, № 11. – P. 1635–1642.
5. Computational lung modelling in respiratory medicine / S. Neelakantan // J. R. Soc. Interface. – 2022. – Vol. 19, № 191.
6. Многогранники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mnogogranniki.ru/> . – Дата доступа: 01.04.2023.

АЛВЕОЛЫ: СТРУКТУРА – ФУНКЦИЯ

Кислухина Е. В., Кислухин В. В.

Московский городской научно-исследовательский институт скорой помощи
имени Н. В. Склифосовского, Российская Федерация

Актуальность. Проблема функционирования легких формулируется просто: почему между вентилицией и перфузией (в норме) есть соответствие. В покое перфузируется порядка 10% легочных капилляров [1], другими словами перфузируется 10-20% альвеол. При этом, если бронхи проходимы, могут вентилироваться все альвеолы. Но при патологии соответствие вентилиция-перфузия нарушается. Среди факторов, ведущих к нарушению