Math-Net.Ru
Общероссийский математический портал

А. Минеев, Открытые и замкнутые ...,
Квант, 2024, номер 4, 8–13

https://www.mathnet.ru/kvant4365

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
https://www.mathnet.ru/rus/agreement

Параметры загрузки:
IP: 18.97.9.171
20 января 2026 г., 06:25:46

Открытые и замкнутые...

А.МИНЕЕВ

Брось эти шуточки! У тебя там не закрытый, а открытый перелом!

Из кинофильма «Бриллиантовая рука»

Заголовок статьи может навести на мысли о характерах людей и их психологических особенностях, а эпиграф – вообще увести в сторону. На деле в статье речь пойдет об особенностях *сосудистых* систем в природе – открытых и замкнутых. Более конкретно – открытых систем у деревьев и закрытых (или, иначе, замкнутых) у животных. А также о том, что замыкает открытые системы у деревьев и приоткрывает замкнутые у человека. В заключение будет рассказано о том, насколько важен для человека сон в ночное время и двигательная активность днем.

Пример открытой сосудистой системы деревьев

Сосудистую систему деревьев образуют два слоя трубчатых клеток. По одному слою – *ксилеме* (в переводе с греческого – дерево) – вода и минеральные вещества поднимаются вверх; по другому слою – *флоэме* (в переводе с греческого – кора) – питательные вещества из листьев перемещаются к корням и плодам. Расположение слоев ксилемы и флоэмы показано на рисунке 1.

Сосудистая система деревьев считается примером *открытой* системы. Вода из почвы через корни поднимается наверх по сосудам ксилемы до листьев (или до хвои в хвойных деревьях) и затем испаряется (рис. 2). Начало этого тока воды вместе с минеральными веществами – в земле, окончание – в атмосфере. Сосуды ксилемы являются фактически полыми трубками,

DOI: https://doi.org/10.4213/kvant20240402

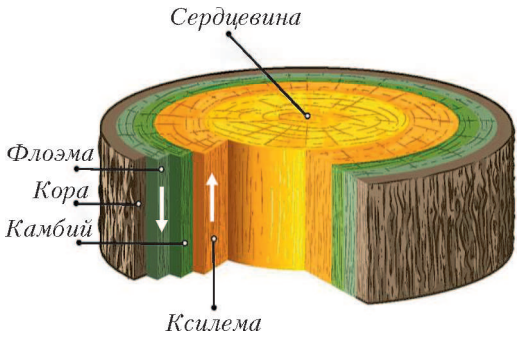

Рис. 1. Сечение ствола дерева. Показано расположение слоев: сердцевина – сосуды ксилемы – камбий – сосуды флоэмы – кора, а также направление движения воды по сосудам ксилемы (вверх по стволу) и флоэмы (вниз)

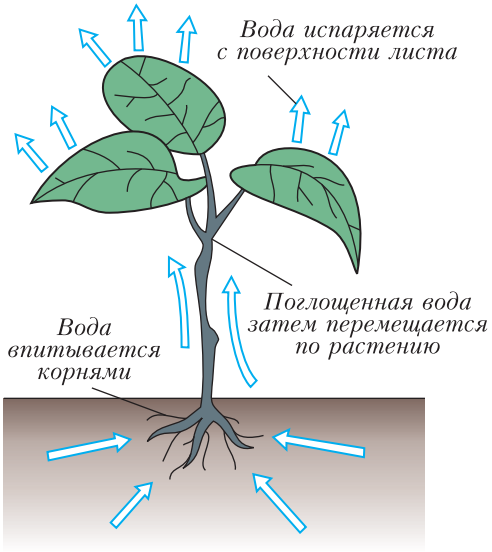

Рис. 2. Схема движения воды по сосудам ксилемы

состоящими из бывших клеток одревесневшего ствола дерева. Движение по сосудам ксилемы происходит вверх.

Для дальнейшего роста и развития необходимо распространение органических веществ по всему дереву. Эти органические вещества образуются в листьях при фотосинтезе, при этом разные длины волн падающего на лист света приводят к образованию углеводов – красная часть спектра и аминокислот и белков – синяя часть спектра. А само перемещение продуктов фотосинтеза происходит по сосудам флоэмы.

Восходящий и нисходящий потоки разделены слоем камбия – клеток, которые делятся в течение всей жизни дерева. Камбий дает жизнь клеткам как ксилемы, так и флоэмы. Деление клеток камбия, замирающее только зимой, образует годовые кольца, которые видны на срезе ствола (см. рис. 1). Камбий и прилегающие к нему слои ксилемы и флоэмы представляют собой наиболее активные части ствола дерева. Вместе с листьями и корневыми волосками они образуют единый организм, обеспечивающий рост и развитие дерева. По мере удаления от камбия внутрь ствола проводящие свойства ксилемы постепенно утрачиваются, и она превращается в прочную сердцевину. А при удалении во внешнюю часть флоэма превращается в кору, выполняющую в основном защитные функции. Поскольку ствол дерева со временем утолщается, кора на растущем стволе дерева должна постепенно растрескиваться.

Особенности дерева, как открытой системы, это непрерывный рост (и утолщение ствола) в течение всей жизни, ежегодное сбрасывание листьев (хвои) и обновление корневых волосков. Часть продуктов жизнедеятельности дерева накапливается в его сердцевине. Своеобразное замыкание такой открытой сосудистой системы деревьев происходит на нескольких уровнях и, тем самым, связывает элементы дерева в единый организм.

Первый – на уровне питательных веществ. Надземные органы (ствол, ветви, листья, почки) нуждаются в минеральных веществах и воде из почвы, которые всасываются корнями. А корни нуждаются в продуктах фотосинтеза, происходящего в листьях. Если этот обмен недостаточен, то замедляется рост, сокращаются и уменьшаются в размерах ветки и листья, число плодов…

Второй – с помощью гормонов. В этом проявляется некоторое сходство с животным миром, хотя количество *фито*гормонов меньше и их функции у растений проще. Фитогормоны участвуют в процессе роста и ростовых движений растения, при стрессах, в явлениях цветения, развития плодов, сбрасывания листьев…

Имеется несколько гормонов, активирующих рост растения. Два основных фитогормона роста синтезируются в корнях, это цитокинин, и в развивающихся почках и листьях, это ауксин. Цитокинин перемещается по ксилеме от корней наверх дерева, а ауксин, наоборот – от верхушек побегов по флоэме вниз к корням дерева. Эти гормоны и их взаимодействие фактически связывают дерево в единый организм, давая возможность дальнейшему развитию как верхней, так и нижней части дерева. При этом важно присутствие обоих гормонов и баланс между ними. Так, цитокинин вызывает деление клеток только в присутствии ауксина. Еще один гормон роста – гиббереллин – образуется как в листьях, так и в корнях и переносится по сосудам и ксилемы, и флоэмы. Его роль – удлинение стеблей. Камбий расположен между ксилемой, по которой цитокинины перемещаются вверх по стволу, и флоэмой, по которой ауксины движутся вниз. Это приводит к тому, что при избытке цитокинина происходит преимущественное образование флоэмы, а при избытке ауксинов – ксилемы.

Есть несколько фитогормонов, которые наоборот подавляют рост. Это важно, например, осенью, когда их накопление переводит клетки почек в состояние покоя. А весной уменьшение их содержания пробуждает рост почек. При стрессах растений (в результате обезвоживания, холода и др.) действие таких гормонов затормаживает процессы обмена и защищает клетки от гибели. Осенью эти гормоны приводят к листопаду и опаданию плодов.

Нехватка гормонов роста и нарушение баланса между ними приводит либо к синтезу недостающих, либо к угнетению развития растения. Приведем пример восстановления баланса между производством ауксина и цитокинина. Если срезать молодую ветку ивы и поместить ее в вазу с водой (при этом сохранив верхнюю часть с ауксинами и удалив нижнюю с цитокининами), то через некоторое время в районе среза появляются корневые волоски. В этом случае образование гормонов смещается в сторону цитокининов и приводит к отрастанию нового корня. И наоборот, на оставшейся после среза части ветки ивы с корнем (сохранена часть с цитокининами, удалена – с ауксинами) появляется новый побег.

Несколько уровней замыкания различных частей дерева фактически интегрируют его в единый организм. А камбий, с одной стороны, формирует оба потока воды и минеральных веществ вверх и вниз по стволу дерева, а с другой – разделяет эти потоки. При этом камбий сохраняет активность на протяжении всей жизни дерева, в отличие от большинства остальных частей дерева.

Пример замкнутой кровеносной системы животных и человека

Кровеносная система животных считается замкнутой и состоит из двух кругов кровообращения: один круг замыкает сердце и легкие, другой – сердце и внутренние органы (рис. 3). В то же время представление о полной замкнутости кровеносной системы неточно. Ее функционирование нуждается во взаимодействии с несколькими открытыми системами: дыхательной, пищеварительной и лимфатической.

По *дыхательной* системе в легкие поступает кислород и выводится углекислый газ. Этот процесс протекает в альвеолах легких, пронизанных капиллярами кровеносной системы.

Пищеварительная система – основной поставщик «строительных материалов» в организм.

Роль *лимфатической* системы менее известна. Некоторые медики полагают, что, несмотря на множество глубоких исследований, лимфатическая система остается одной из самых загадочных частей организма. Остановимся подробнее на ее особенностях.

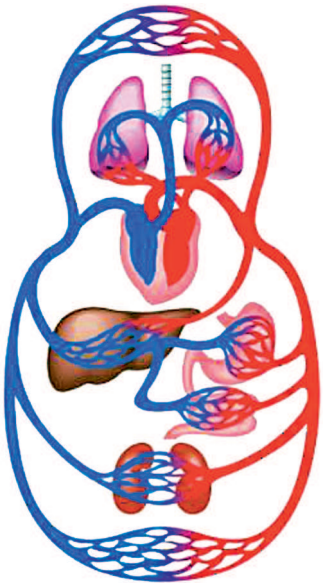

Рис. 3. Два круга кровообращения кровеносной системы. Красным цветом показаны артерии, синим – вены

Человек: несколько цифр и оценок

Сердце в течение минуты прокачивает по замкнутой кровеносной системе 3–6 литров крови (при физической нагрузке до 20–30 литров), за сутки – несколько тонн, за всю жизнь – порядка 100–200 тысяч тонн крови! Открытая пищеварительная система человека перерабатывает в течение жизни 30–50 тонн пищи и 40–60 тонн воды (соответственно, приблизительно 1,5 килограмма пищи и 2 литра воды в день). Разница между массой прокачанной через сердце крови и суммарной «съеденной» массой пищи более трех порядков.

В теле взрослого человека около 100 триллионов (10^{14}) клеток. Масса типичной клетки примерно 10^{-9} г, ее объем $V_{кл} \sim 10^{-9}$ см^3 и характерный размер $V_{кл}^{1/3} \sim 10^{-3}$ см = 10 мкм. Общее количество эритроцитов в организме человека достигает $2 \cdot 10^{13}$ (4–5 литров крови, в каждом литре $(4–5) \cdot 10^{12}$ эритроцитов). Объем

эритроцита порядка 100 мкм^3 ~ 10^{-16} м^3 ~ ~ 10^{-10} см^3, масса порядка 10^{-10} г. Масса всех эритроцитов в организме масштаба двух килограммов. Сопоставление цифр показывает, что объем эритроцита примерно на порядок меньше объема типичной клетки, количество эритроцитов составляет 20% от полного количества клеток, а объем всех эритроцитов человека – около 40% от полного объема крови.

Каждый день в костном мозге человека образуется около $2 \cdot 10^{11}$ эритроцитов. За это же время во всем организме человека возникает близкое количество новых клеток (~ $3 \cdot 10^{11}$). Умножая эту величину на массу клетки (10^{-9} г), получим, что в течение дня обновляется 300 граммов клеток! А в течение жизни в организме человека появляется примерно $(5–8) \cdot 10^{15}$ клеток, что по массе составляет почти 10 тонн. В этом смысле организм за жизнь многократно обновляется.

Время жизни клеток разных органов существенно различается. Вместо отмирающих клеток образуются новые. В основном (86%) это клетки крови (эритроциты и лейкоциты), которые образуются из стволовых клеток костного мозга, 12% новых клеток образуется в эпителии пищеварительной системы и около 1% – новые клетки кожи. Очень быстро обновляются клетки эпителия желудка и кишечника (~ 5 дней), медленнее – клетки печени (1 год), костей (10 лет), мышц (15 лет), мускулатура сердца обновляется раз в 20 лет. А вот клетки глазной сетчатки и хрусталика вообще не обновляются за всю жизнь. Долгожитель и мозг человека. Возникает вопрос – как организм избавляется от отмирающих клеток разных органов?

Приведем еще несколько цифр, связанных с функционированием дыхательной системы. Проведены подсчеты, которые показали, что средний человек каждый день вдыхает несколько граммов нерастворимых мельчайших частиц пыли, за год 1–1,5 килограмма, а в течение жизни 50–100 килограммов. И в этом случае появляется похожий вопрос: каким образом из легких выводится такое количество мусора?

Ответ на оба вопроса один: удалением отмирающих клеток и пыли из организма и много чем еще занимается лимфатическая система. С ее помощью из организма выводятся продукты жизнедеятельности клеток и сами отмирающие клетки, пыль, вирусы и бактерии. По сосудам лимфатической системы они попадают в лимфоузлы и там обезвреживаются.

Замкнутая кровеносная система «приоткрывается»

Кровеносная система не может быть полностью изолирована от остального организма. Взаимодействие (обмен веществ) происходит в переходных областях, на одном их конце систему еще можно считать замкнутой, а на другом – уже разомкнутой. Поясним специфику этих областей на двух примерах. Начнем с «интерфейса» дыхательной и кровеносной систем, который происходит в легких, в самой крайней их оконечности – альвеолах (рис. 4). При этом альвеолы играют роль

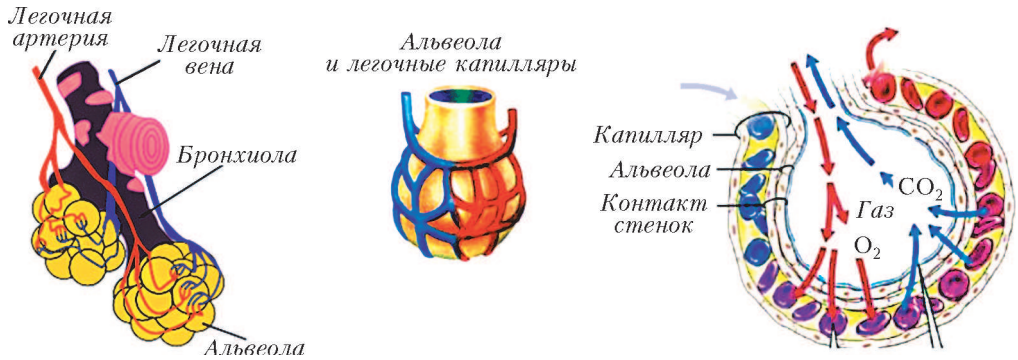

Рис. 4. Альвеолы – область взаимодействия дыхательной и кровеносной систем

своеобразных мельчайших единиц (квантов) дыхательной системы человека.

В альвеолах (тонкостенных пузырьках, покрытых сеткой капилляров) и происходит газообмен: из воздуха в кровь поступает кислород, а из крови удаляется углекислый газ. Поскольку в воздухе, заполняющем альвеолы, давление кислорода больше, чем в венозной крови, кислород диффундирует из альвеол в венозную кровь и превращает ее в артериальную. Диаметр альвеол порядка 300 микрон, их количество – сотни миллионов, а суммарная площадь области взаимодействия (воздух-кровь) масштаба 100 м^2. При глубоком вдохе суммарная поверхность альвеол за счет их растяжении может увеличиваться до 250 м^2 (!) (на два порядка больше площади поверхности человека). В ходе газообмена в выдыхаемом воздухе содержание кислорода уменьшается с 21 до 16%, а углекислого газа растет с 0,03 до 4%.

Второй пример относится к «интерфейсу» кровеносной и лимфатической систем. Область их взаимодействия – тканевая жидкость (рис. 5). В то время как объем крови в организме составляет 4–6 литров, а объем лимфы 2–4 литра, объем тканевой жидкости существенно больше – это 10–12 литров. Она заполняет все промежутки между клетками и состоит из плазмы крови. Из тканевой жидкости клетки снабжаются питательными веществами и в нее перемещаются продукты обмена клеток или сами отмирающие клетки.

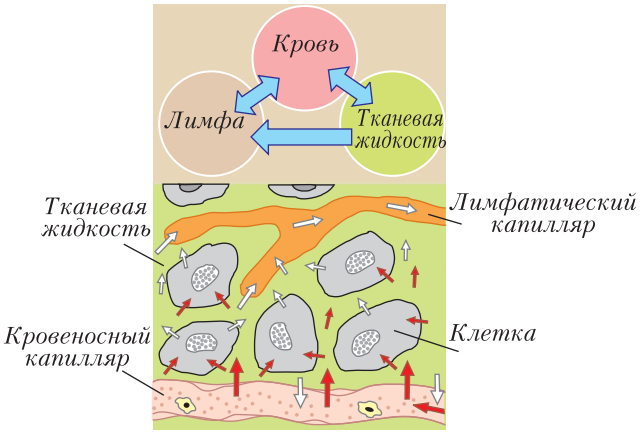

Рис. 5. Область взаимодействия крови, тканевой жидкости и лимфы

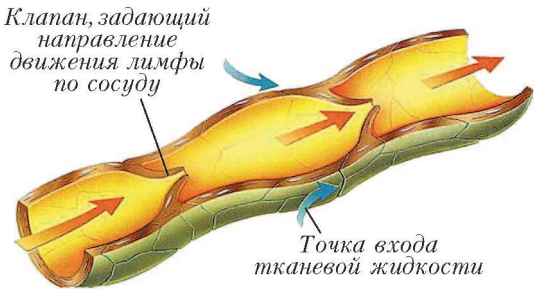

Рис. 6. Вид клапана в лимфатическом сосуде. Стрелкой показано направление движения лимфы

Приводным механизмом движения крови по кровеносной системе, своеобразным насосом, являются сокращения сердца. В случае с лимфой ситуация иная: «насос» отсутствует, движение лимфы происходит против сил тяготения и довольно медленно. При сокращении мышц, окружающих лимфатические сосуды, лимфа проталкивается в одну сторону. Перемещению ее в обратную сторону мешают специальные клапаны (рис. 6). В результате именно подвижность самого человека служит мотором для лимфы. Больше движений – лучше выводятся вредные вещества. Меньше – вредные вещества накапливаются в организме.

Сравним скорость движения крови по кровеносной системе и лимфы по лимфатической и перекачиваемые объемы по обеим системам. В минуту через сердце проходит около 6 литров крови. При этом через стенки кровеносных капилляров фильтруется в тканевую жидкость 15 миллилитров. Из них в лимфатические сосуды в минуту поступает только 3 миллилитра жидкости, за сутки – до 4 литров. Разница перекачиваемых объемов за единицу времени – более трех порядков. Вместе с потоком лимфы весь «мусор» поступает в лимфатические узлы, в которых обезвреживается или уничтожается с помощью кле-

ток иммунной системы и далее удаляется из организма.

Много ли «мусора» образуется при работе мозга?

Мозг – еще один пример казалось бы изолированной от остального организма системы человека (от инфекций или лекарств, которые мы иногда принимаем). Нервные клетки – долгожители организма и требуют особо бережного отношения и защиты. Если приглядеться, то у мозга действительно имеется несколько барьеров защиты. Первый – от внешних воздействий, это прочная черепная коробка толщиной около 7 мм. Второй – также оберегающий от травм, это жидкость, в которой плавает мозг, она является демпфером при резких воздействиях. И, наконец, третий, самый загадочный, гематоэнцефалический барьер (ГЭБ) – между сетью кровеносных сосудов и тканями мозга. Барьер специфический и избирательный: через него в мозг поступают кислород и питательные вещества, а выводятся углекислый газ и продукты деятельности мозга. В то же время здоровый ГЭБ мозга должен быть непроницаем для бактерий, вирусов, принимаемых лекарств, а также опухолевых клеток.

Но что с отходами деятельности мозга? Ведь для работы мозга расходуется 20–25% от всей получаемой организмом энергии (во время сна около 10%). Много энергии – много отходов: в течение месяца в мозге образуется более 100 граммов отработанных веществ, за год выходит 1,2–1,5 килограмма – примерно столько же, какова масса самого мозга.

Каким образом выводятся отходы из области мозга? В течение долгого времени (более ста лет) считалось, что в мозге лимфатические сосуды отсутствуют. Однако в последнее время между клетками мозга были обнаружены тонкие заполненные жидкостью каналы. По ним и происходит очищение мозга от отходов. Такая система, некий аналог лимфатической, получила похожее название – глимфатической.

Но когда это происходит? И на это недавно дан ответ: во время сна. Оказалось, что основная функция мозга во время сна заключается в удалении вредных веществ, накопившихся в дневное время. И лишь во вторую очередь мозг во время сна перерабатывает информацию и воспоминания дня. Именно поэтому организму необходимо треть жизни проводить во сне. Более того, оказалось, что клетки мозга во время сна уменьшаются в размерах. При этом увеличивается расстояние между клетками и облегчается вывод отходов.

Вот насколько важны сон в ночное время и движение днем!

Вниманию наших читателей

Подписаться на журнал «Квант» можно с любого номера в любом почтовом отделении. Наш подписной индекс в каталоге «Пресса России» – 90964. Купить журнал «Квант» возможно в магазине «Математическая книга» издательства МЦНМО (адрес интернет-магазина: biblio.mccme.ru), а также в московских книжных магазинах «Библио-глобус», «Молодая гвардия», «Московский дом книги» и в редакции журнала.

Архив вышедших номеров журнала «Квант» имеется на сайте http://kvant.ras.ru