

SATBAYEV UNIVERSITY

Алимбаев Чингиз Абдраимович

Гидростатика и кровь

Для инженеров, разрабатывающих медицинскую технику, важно понимать физиологические аспекты кровообращения, чтобы разрабатывать устройства, поддерживающие нормальный кровоток и компенсирующие гравитационные эффекты. Изучение гидростатики, то есть поведения жидкости (в данном случае крови) под воздействием гравитации, даёт ключ к созданию приборов, учитывающих гравитационные эффекты на организм человека.

Гидростатическое давление — это давление жидкости на различных уровнях в зависимости от её плотности и силы тяжести. В организме кровь циркулирует благодаря сердцу, создающему давление для перемещения крови по сосудам. Гравитация особенно влияет на кровоток, создавая перепады давления в вертикальных положениях тела.

$$P = \rho g h$$

P = давление жидкости

ρ = плотность жидкости

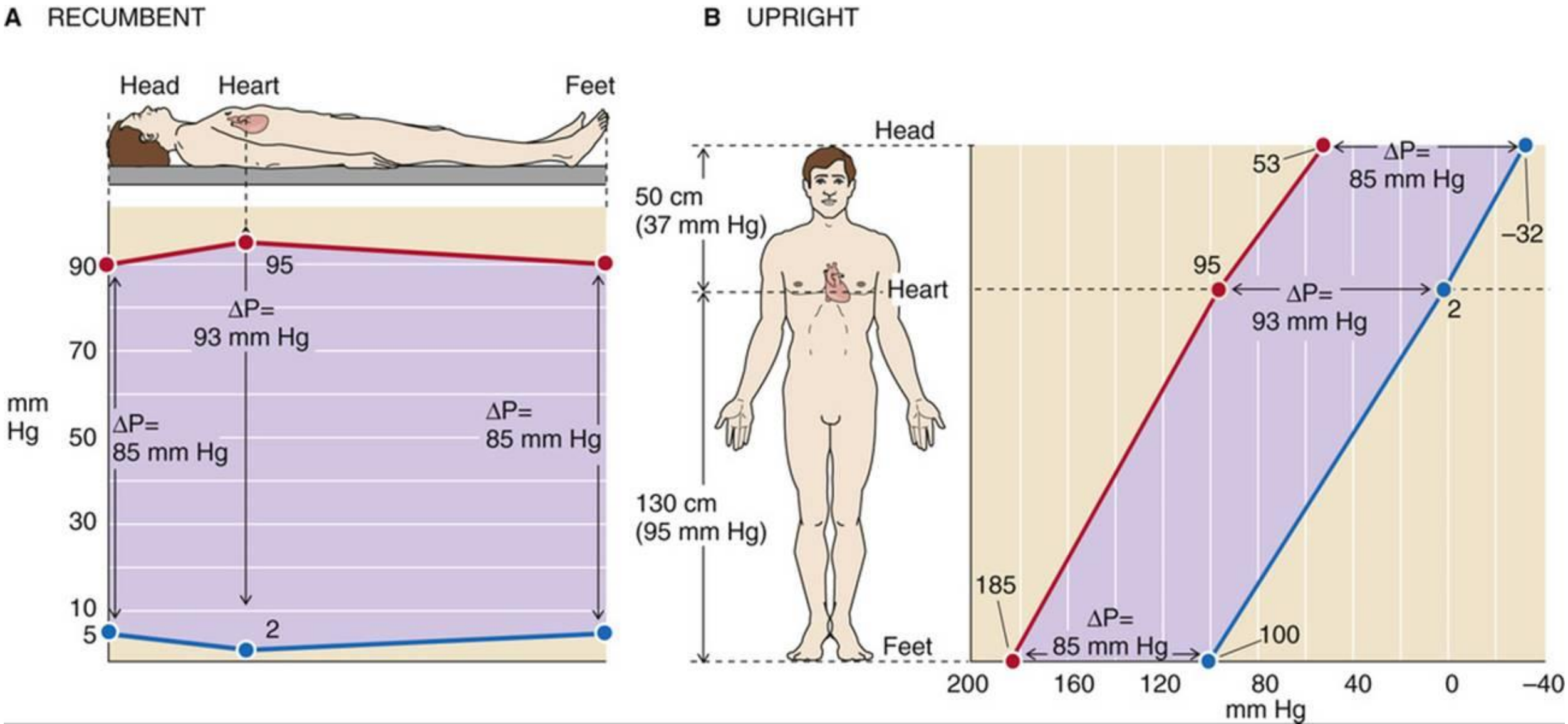
g = ускорение свободного падения

h = высота столба жидкости

Кровеносная система человека включает артерии (переносят кровь от сердца) и вены (переносят кровь обратно). Клапаны вен в нижних конечностях предотвращают обратный ток крови и способствуют её возврату к сердцу, компенсируя действие гравитации.

Давление в системе кровообращения создают четыре фактора: **сила тяжести, эластичность сосудов, вязкое сопротивление и инерция.**

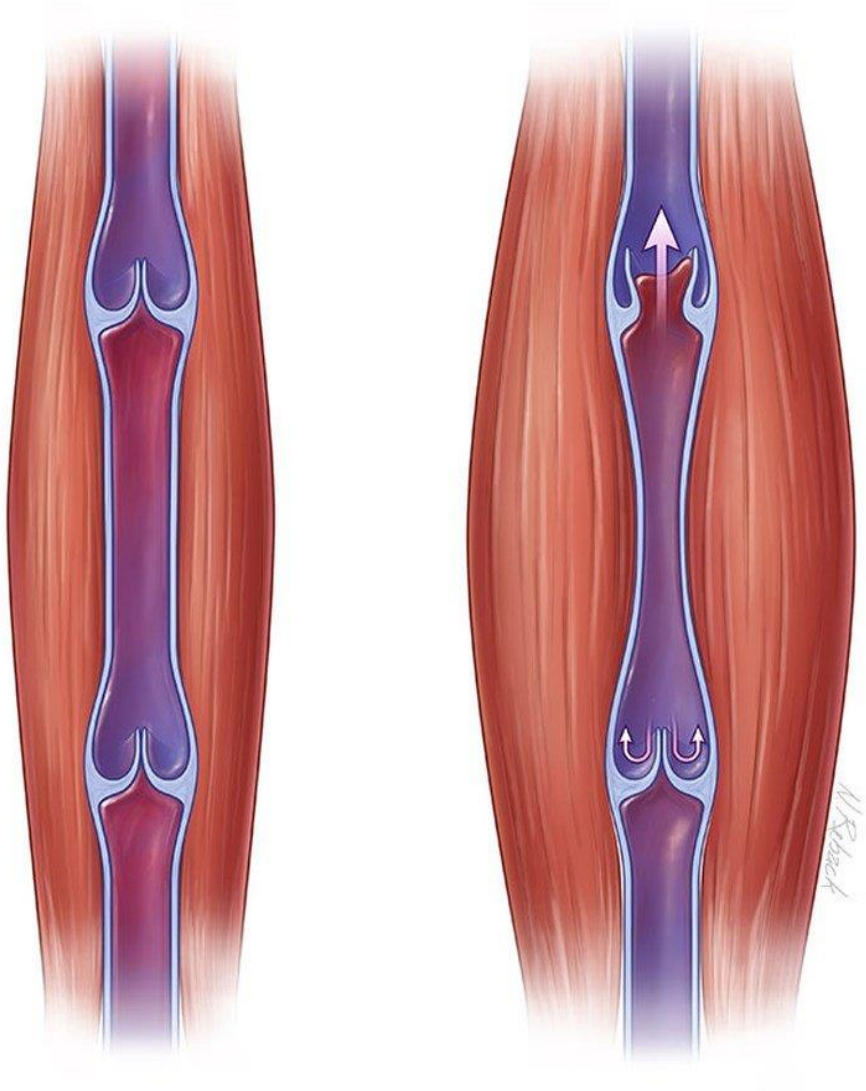
Гравитация вызывает разницу гидростатического давления, когда есть разница в высоте



Поскольку гравитация создает разницу гидростатического давления между двумя точками всякий раз, когда есть *разница в высоте* (Δh), необходимо всегда выражать давление относительно некоторого опорного уровня h. В сердечно-сосудистой физиологии эта точка отсчета — нулевая высота — является уровнем сердца.

Находится ли тело в горизонтальном (т. е. горизонтальном) или вертикальном (т. е. прямостоячем) положении, это оказывает огромное влияние на внутрисосудистое давление. В горизонтальном положении (рис. *A*), где мы предполагаем, что все тело находится на уровне сердца, нам не нужно добавлять компонент гидростатического давления к различным внутрисосудистым давлениям. Таким образом, среднее давление в аорте составляет 95 мм рт. ст., и — поскольку для перекачивания крови в концы крупных артерий требуется движущее давление ~5 мм рт. ст. — среднее давление в конце крупных артерий в стопе и голове составляет 90 мм рт. ст. Аналогично, среднее давление в крупных венах, дренирующих стопу и голову, составляет 5 мм рт. ст., и — поскольку для перекачивания крови в правое предсердие требуется движущее давление ~3 мм рт. ст. — среднее давление в правом предсердии составляет 2 мм рт. ст.

Когда человек ростом 180 см стоит (см. рис. 17-8 *B*), мы должны *добавить* 130 см столба крови (Δh между сердцем и крупными сосудами стопы) к давлению, преобладающему в крупных артериях и венах стопы. Поскольку водяной столб высотой 130 см эквивалентен 95 мм рт. ст., среднее давление для крупной артерии стопы будет 90 + 95 = 185 мм рт. ст., а среднее давление для крупной вены стопы будет 5 + 95 = 100 мм рт. ст. С другой стороны, мы должны *вычесть* 50 см столба крови из давления, преобладающего в голове. Поскольку водяной столб высотой 50 см эквивалентен 37 мм рт. ст., среднее давление для крупной артерии головы составит 90 − 37 = 53 мм рт. ст., а среднее давление для крупной вены головы составит 5 − 37 = −32 мм рт. ст. Конечно, это «отрицательное» значение на самом деле означает, что давление в крупной вене головы на 32 мм рт. ст. ниже контрольного давления на уровне сердца.

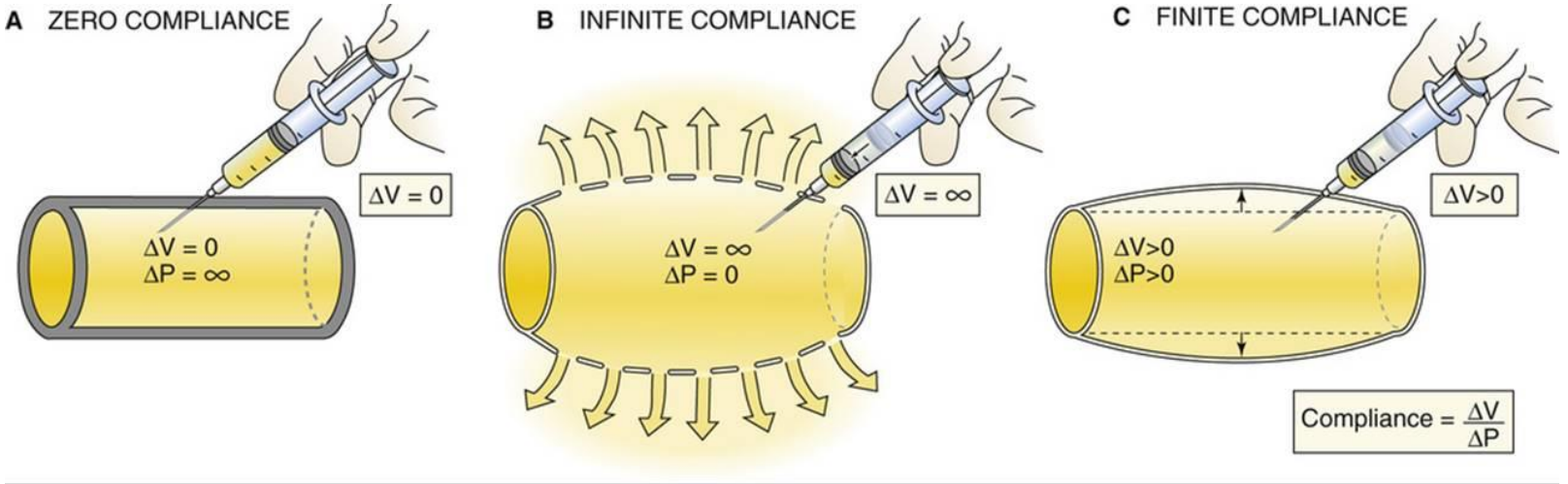


В этом примере мы несколько упростили ситуацию, проигнорировав клапаны, которые прерывают столб крови. На самом деле вены конечностей имеют ряд односторонних клапанов, которые позволяют крови течь только к сердцу. Эти клапаны действуют как ряд релейных станций, так что сокращение скелетных мышц вокруг вен проталкивает кровь от одного клапана к другому. Таким образом, вены стопы не «видят» полного гидростатического столба в 95 мм рт. ст., когда мышцы ног откачивают кровь из вен стопы.

Хотя абсолютное артериальное и венозное давление в стопе намного выше, чем в голове, ΔP , которое *управляет* кровотоком, одинаково в сосудистых руслах стопы и головы. Таким образом, в горизонтальном положении ΔP через сосудистые русла стопы или головы составляет $90 - 5 = 85$ мм рт. ст. В вертикальном положении ΔP для стопы составляет $185 - 100 = 85$ мм рт. ст., а для головы — $53 - (-32) = 85$ мм рт. ст. Таким образом, сила тяжести не влияет на движущее давление, которое управляет потоком. С другой стороны, в «зависимых» областях тела (т. е. сосудах «ниже» сердца в гравитационном смысле) гидростатическое давление имеет тенденцию увеличивать **трансмуральное давление** (внутрисосудистое по сравнению с внесосудистым «тканевым» давлением) и, следовательно, диаметр растяжимых сосудов. Поскольку различные анатомические барьеры разделяют различные тканевые отсеки, предполагается, что гравитация не оказывает существенного влияния на это тканевое давление.

Низкая податливость сосуда приводит к увеличению трансмурального давления при увеличении объема крови в сосуде

Если бы мы попытались ввести объем жидкости в действительно жесткую трубку с закрытыми концами, мы могли бы в принципе увеличить давление до бесконечности, не увеличивая объем трубки (рис. 17-9 *A*).



С другой стороны, если бы стенка трубки не оказывала никакого сопротивления деформации (т. е. бесконечная податливость), мы могли бы ввести бесконечный объем жидкости, вообще не увеличивая давление (см. рис. 17-9 *B*). Кровеносные сосуды лежат между этими двумя крайностями; они растяжимы, но имеют конечную податливость. Таким образом, если бы мы ввели объем крови в сосуд, объем сосуда увеличился бы на ту же величину (ΔV), и внутрисосудистое давление также увеличилось бы (см. рис. 17-9 *C*). ΔP, сопровождающее заданное ΔV, больше, если податливость сосуда ниже. Соотношение между ΔP и ΔV является *статическим* свойством стенки сосуда и сохраняется независимо от того, есть ли поток в сосуде. Таким образом, если бы мы влили кровь в кровеносные сосуды пациента, внутрисосудистое давление повысилось бы на протяжении всего кровообращения, даже если бы сердце остановилось.

Вязкое сопротивление крови вызывает разницу осевого давления при наличии потока

Как мы видели в законе гидродинамики Ома, во время установившегося потока по оси трубы движущее давление (ΔP) пропорционально как потоку, так и сопротивлению.

Q = ΔP/R - поток (Q) равен градиенту давления (ΔP), деленному на сопротивление (R)

$$\Delta p = \frac{8\mu LQ}{\pi R^4}$$

Δp = разность давлений между двумя концами трубы

μ = динамическая вязкость

L = длина трубы

Q = объемный расход

π = число пи

R = радиус трубы

С другой стороны, если мы хотим добиться постоянного потока, то чем больше сопротивление, тем большее ΔP мы должны применить вдоль оси потока. Из четырех источников давления в кровеносной системе это ΔP из-за вязкого сопротивления является единственным, которое появляется в законе Пуазейля

Адаптационные механизмы и их роль в медицинских устройствах

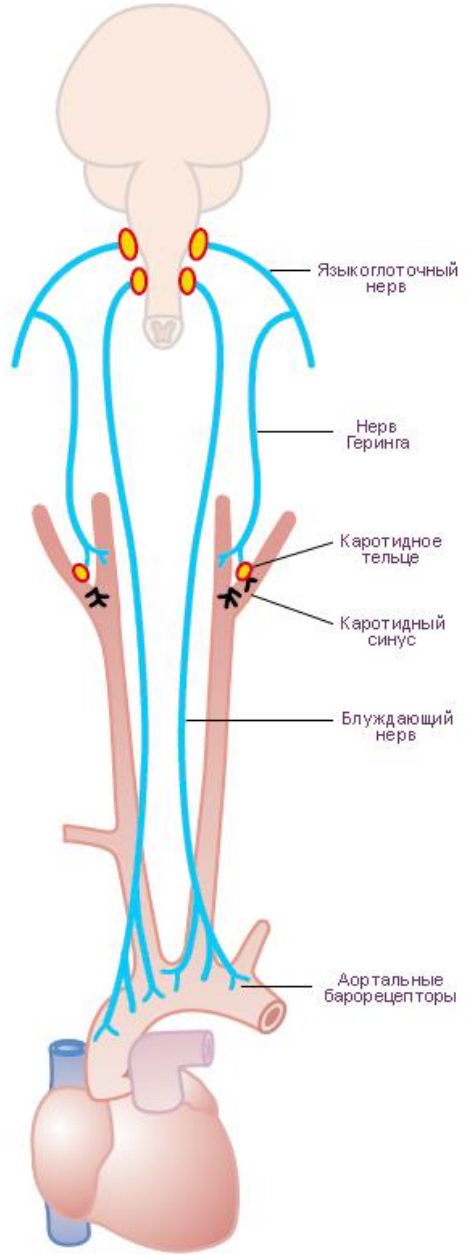
Барорецепторы — интерорецепторы, расположенные в кровеносных сосудах позвоночных животных; разновидность механорецепторов. Воспринимают изменения кровяного давления и реагируют на его уровень. Скопления барорецепторов сосредоточены преимущественно в рефлексогенных зонах (сердечной, аортальной, синокаротидной, лёгочной и др.). Повышенное кровяное давление приводит к активации барорецепторов, в результате чего они посылают импульсы в центральную нервную систему. Тонус сосудов снижается, парасимпатическая нервная система возбуждается, артериальное давление снижается. Частое и длительное изменение давления может привести к развитию гипертонии[1].



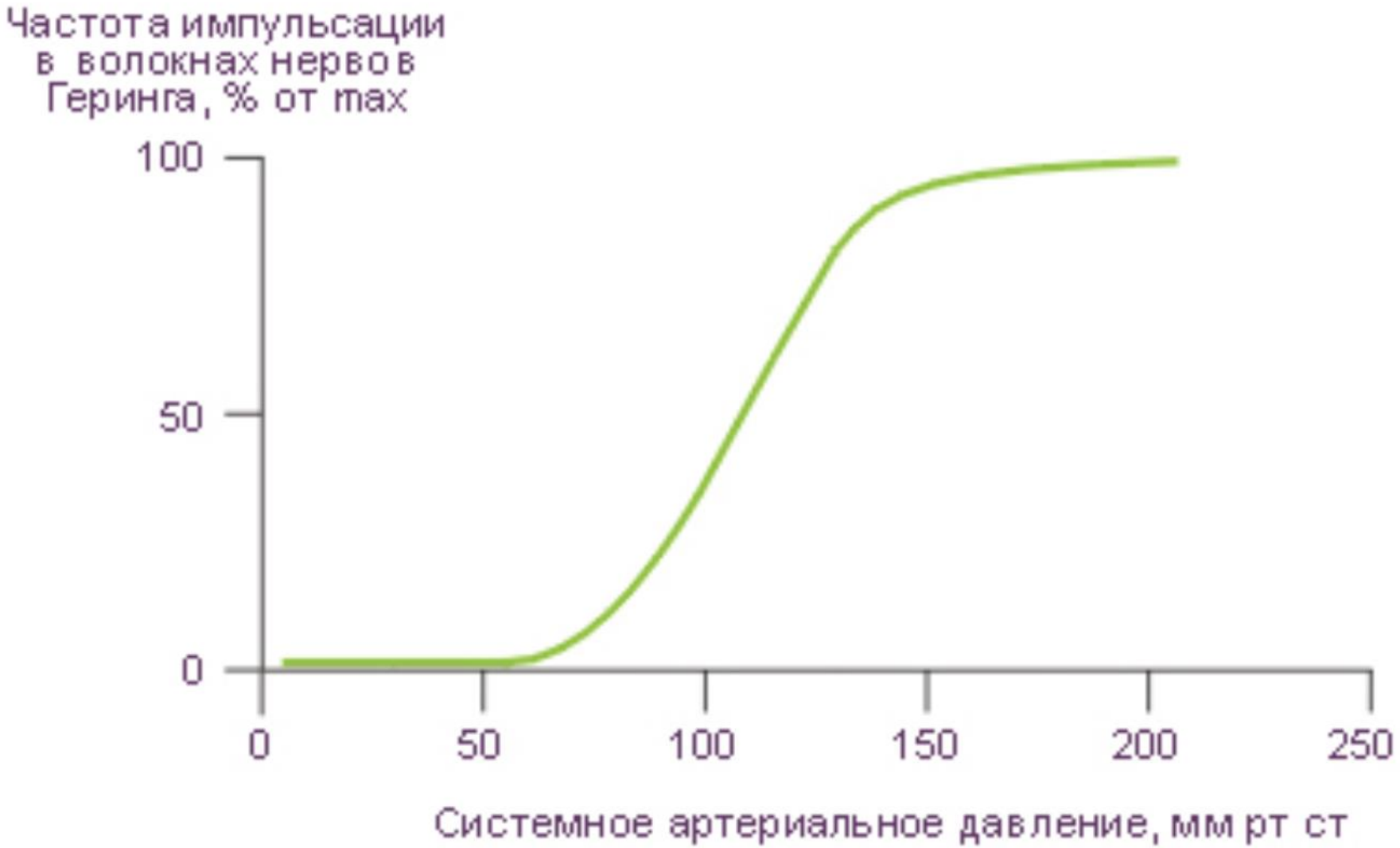
Барорецепторы каротидного синуса и дуги аорты

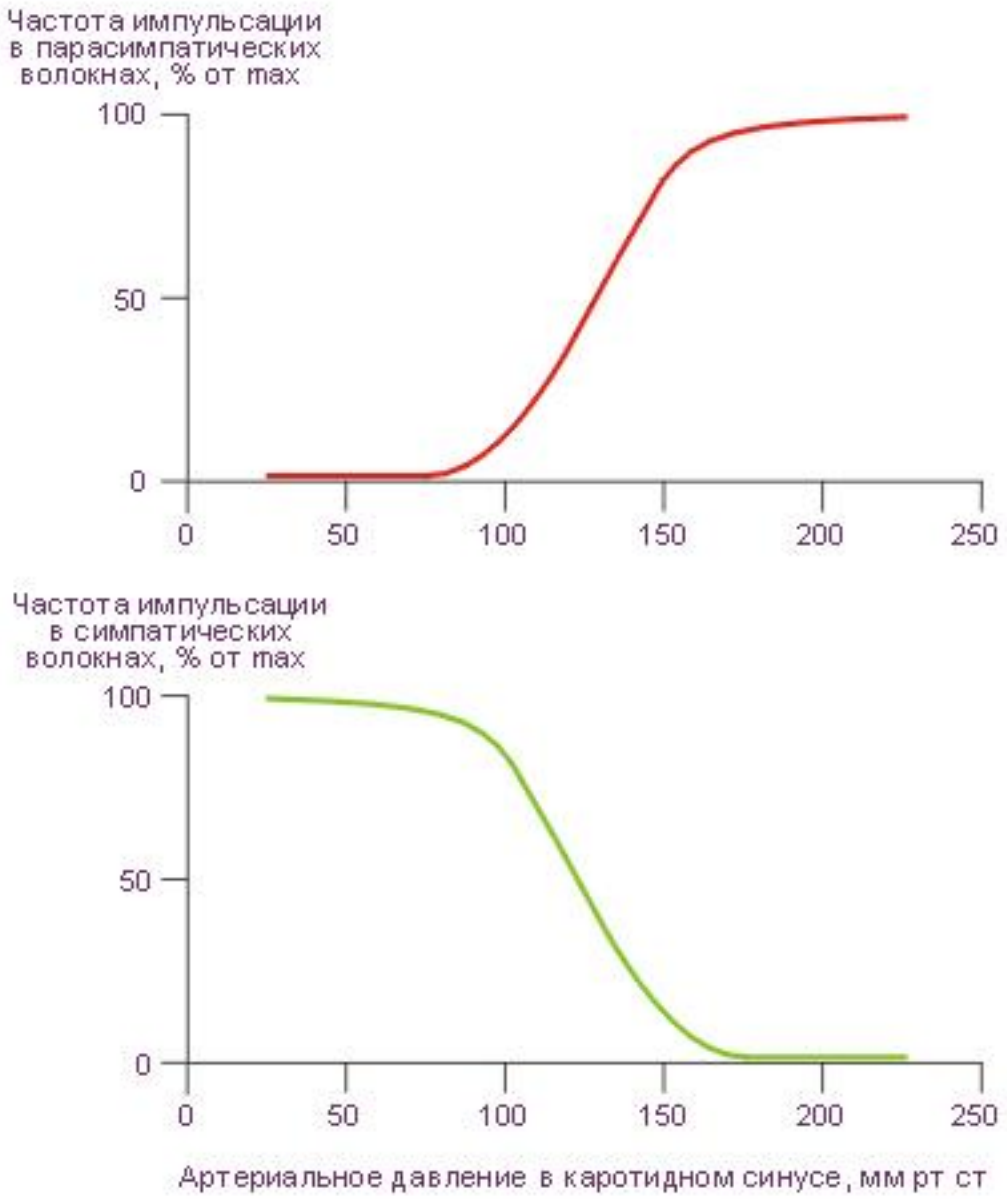
Почему барорецепторы расположены в каротидных синусах?

Каротидный синус содержит барорецепторы (рецепторы растяжения), которые чувствительны к изменениям давления в артериальной крови. Каротидный синус имеет плотную иннервацию многих типов рецепторов, которые играют роль в регуляции артериального давления.



Зависимость частоты импульсации барорецепторов от уровня артериального давления

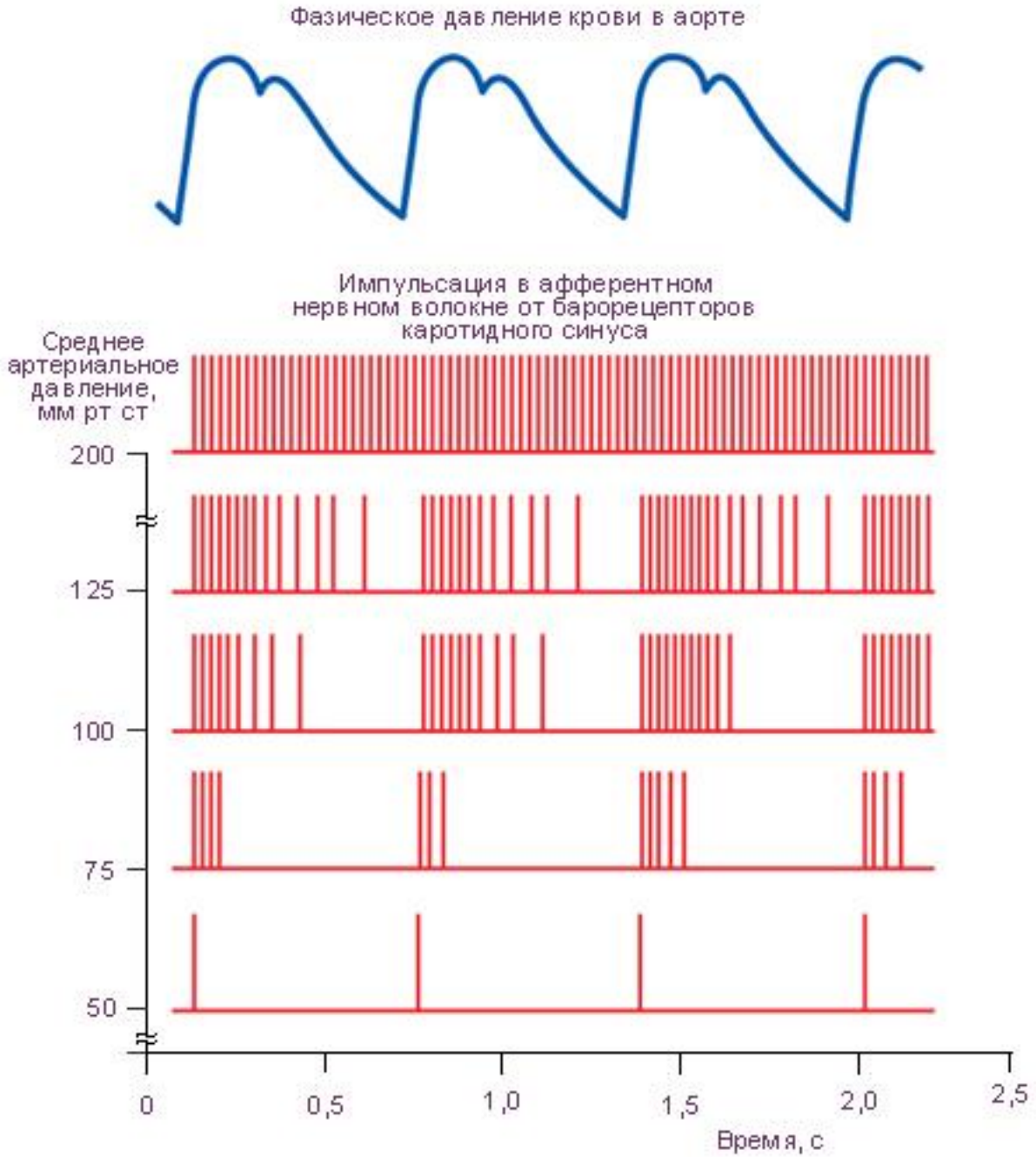


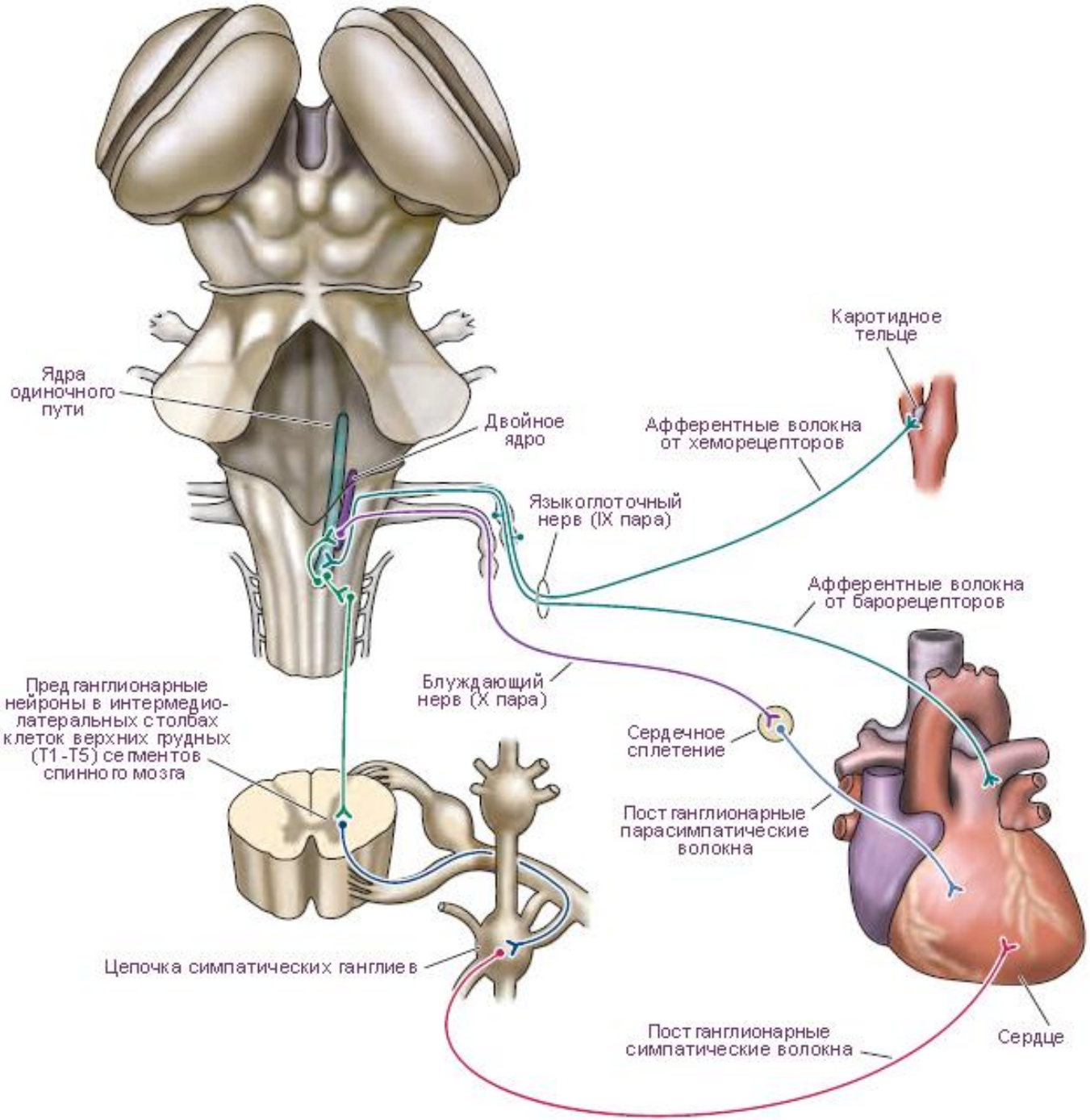


Зависимость частоты импульсации в эфферентных парасимпатических и симпатических нервных волокнах от уровня артериального давления в изолированном каротидном синусе

ЭФФЕРЕНТНЫЙ — нервные волокна, передающие сигналы из центральных отделов в нижележащие и периферические отделы н. с., а также сами эти сигналы.

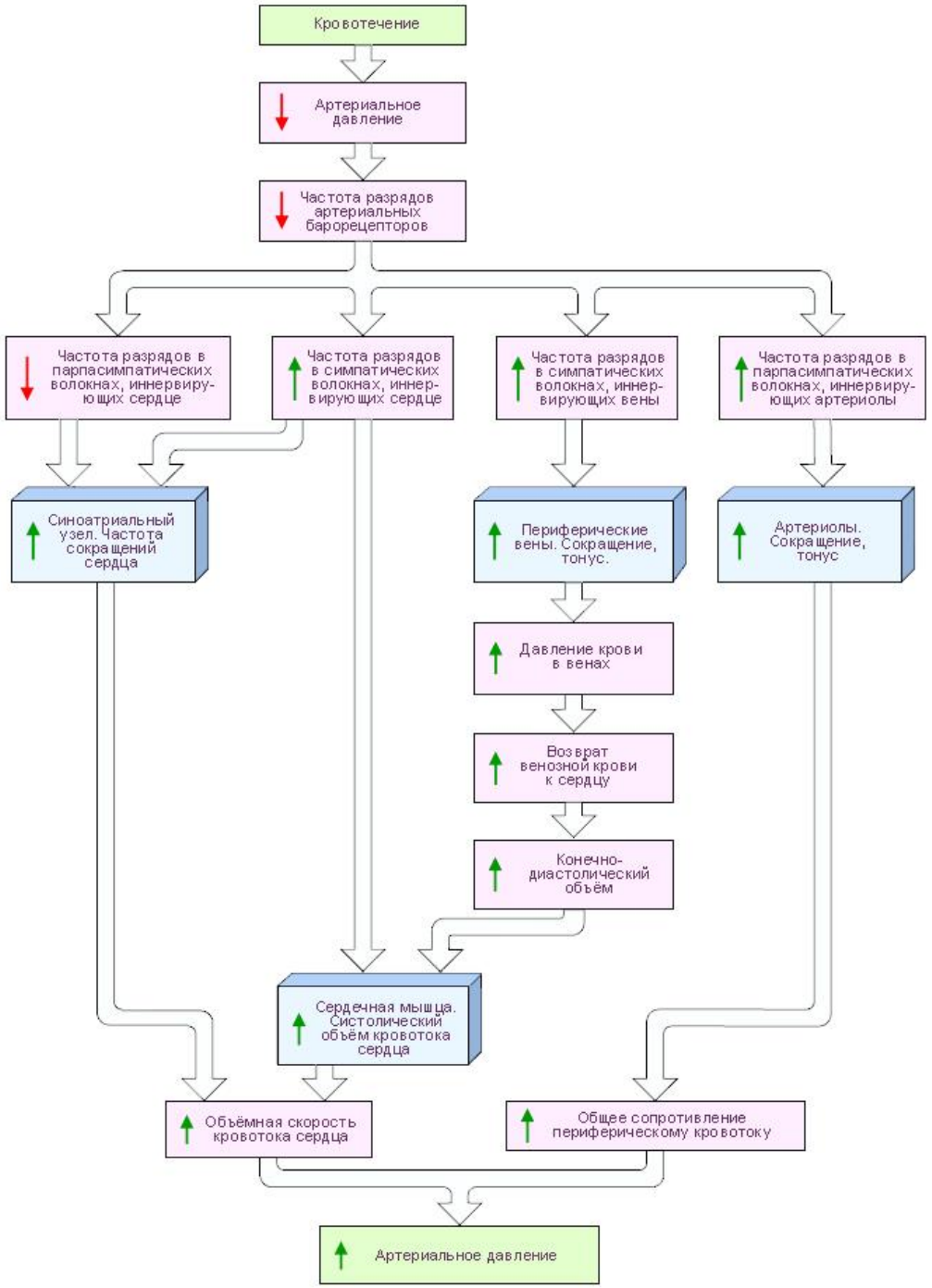
Взаимоотношения между фазическим давлением крови в аорте и характером импульсации в афферентном нервном волокне от барорецепторов каротидного синуса при различном уровне артериального давления.





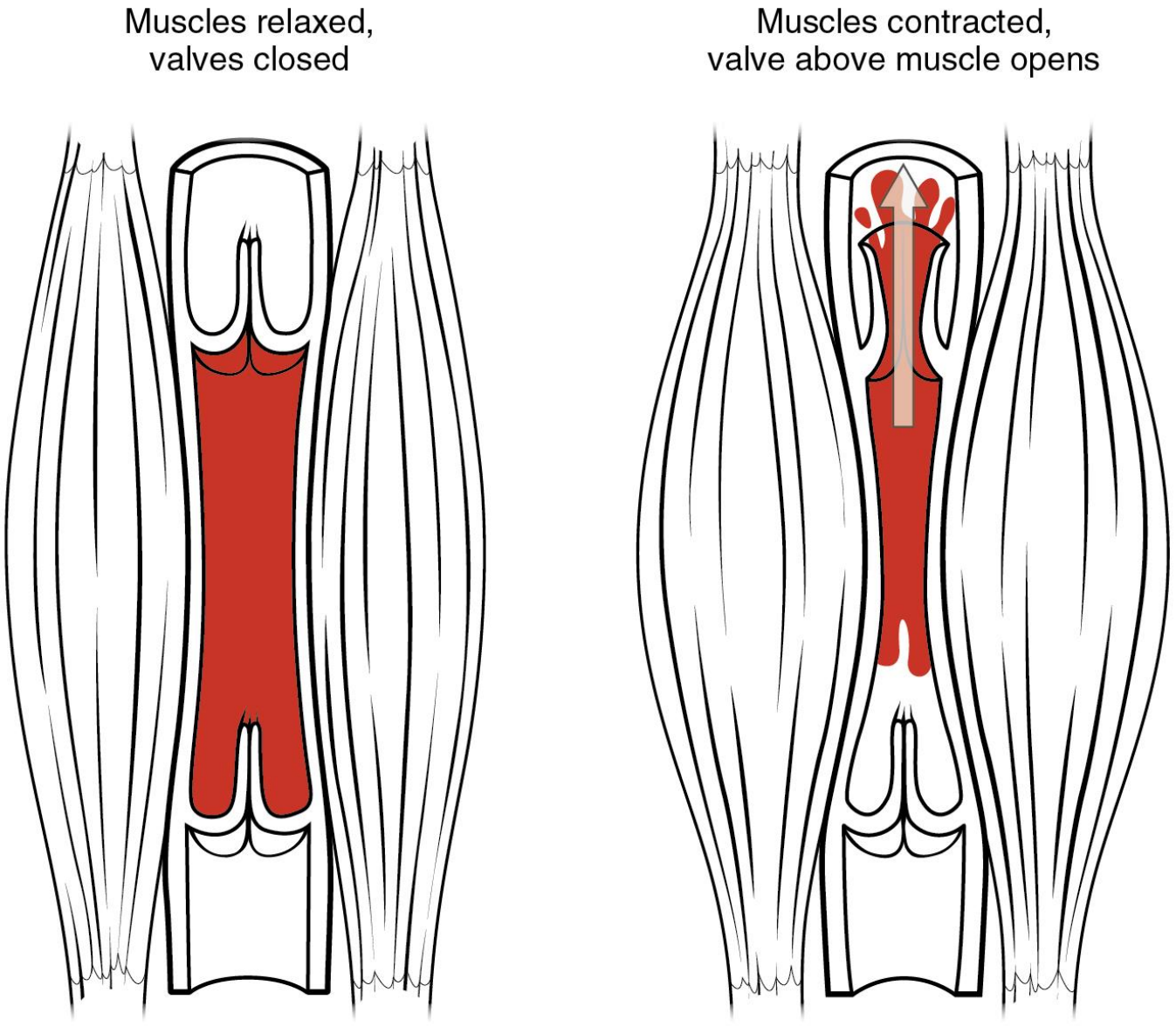
Вегетативные нейрональные цепи, осуществляющие управление гемациркуляцией

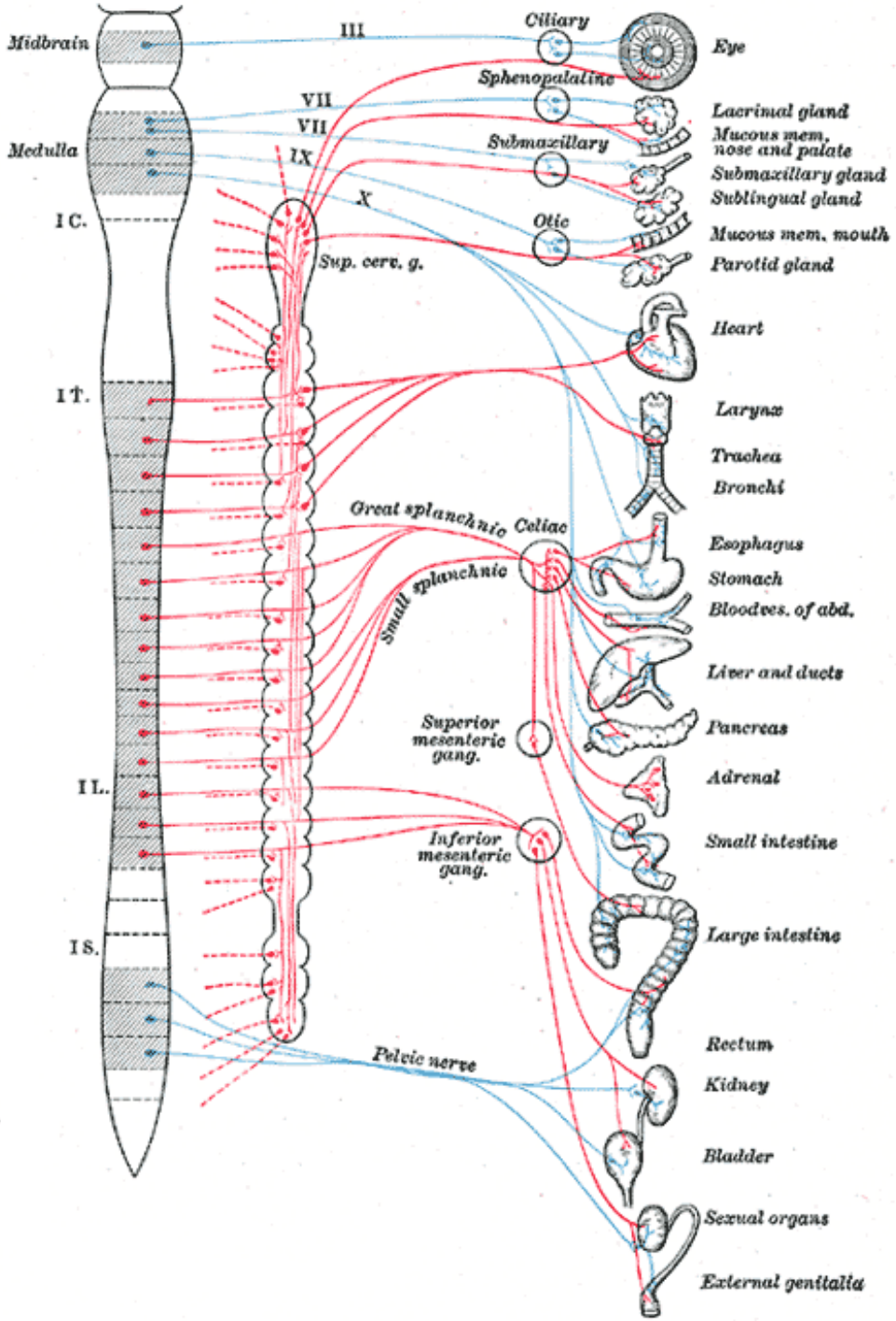
Роль барорецепторов в восстановлении давления крови после массивного кровотечения



Насос скелетных мышц

Скелетный мышечный насос или мышечно-венозный насос представляет собой совокупность скелетных мышц, которые помогают сердцу в циркуляции крови. Он особенно важен для увеличения венозного возврата к сердцу, но также может играть роль в артериальном кровотоке.



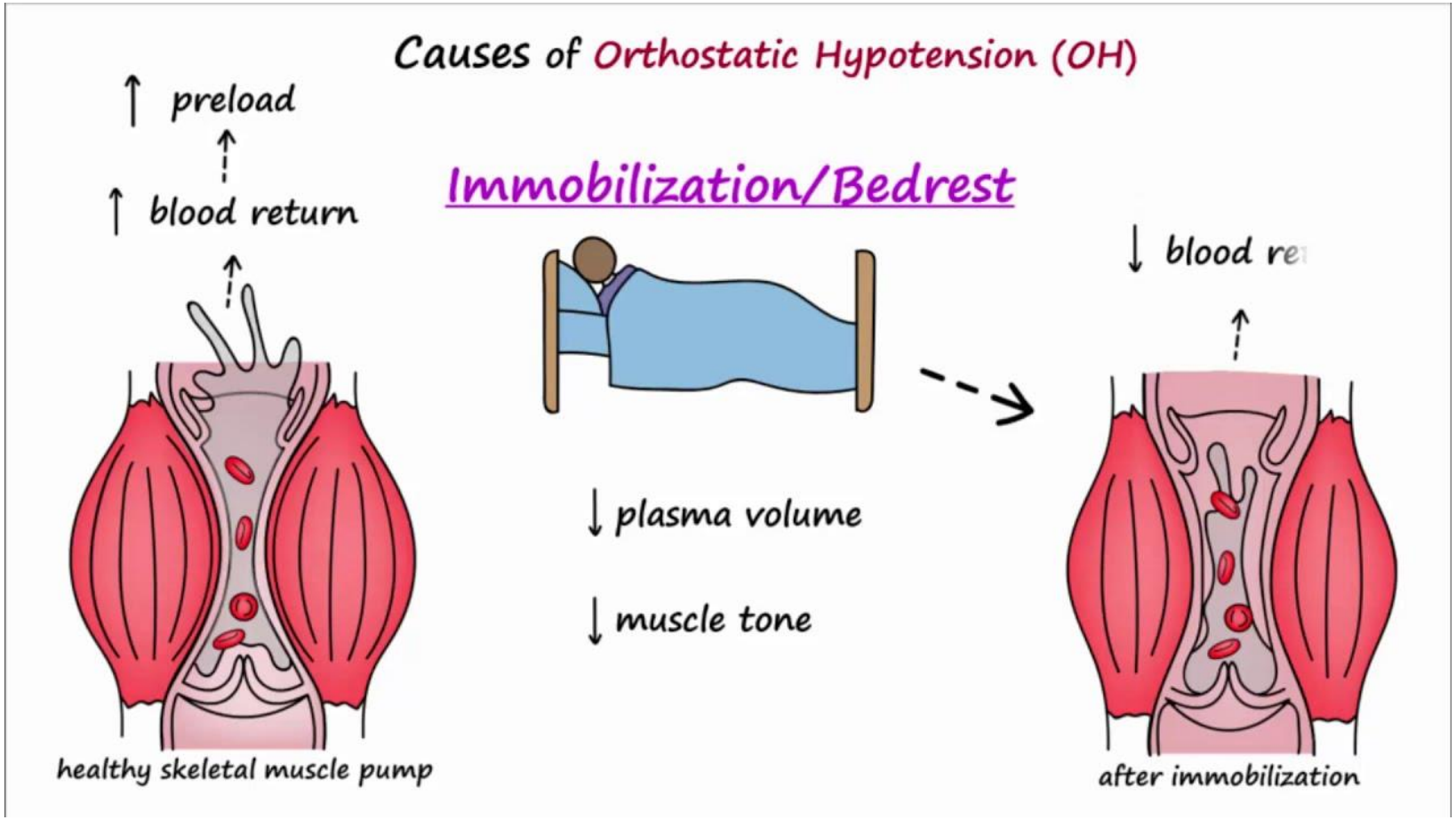


Симпатическая нервная система

Симпати́ческая не́рвная систе́ма — часть автономной (вегетативной) нервной системы, ганглии которой расположены на значительном расстоянии от иннервируемых органов. Управляет внутренними органами тогда, когда организм тратит энергию (при физической и эмоциональной нагрузке: стресс, бегство, нападение и тд), например, вызывает возбуждение сердечной деятельности и усиление обменных процессов.

Патологии, связанные с гравитационными эффектами

Ортостатическая гипотензия — также называемая постуральной гипотензией — это форма низкого кровяного давления, которая возникает при вставании после сидения или лежания. Ортостатическая гипотензия может вызвать головокружение или предобморочное состояние, а также возможный обморок.



Варикозное расширение вен

Варикозное расширение вен — развивается при длительном воздействии гравитации на венозную систему ног.

Медицинские компрессионные изделия и устройства с регулируемым давлением помогают предотвращать застой крови, что особенно полезно для пациентов с нарушениями кровообращения



Рекомендации для проектирования медицинских устройств

Учет положения тела пациента: Устройства для мониторинга давления и циркуляции крови должны учитывать положение тела пациента. Например, некоторые тонометры могут измерять давление, ориентируясь на гравитационные факторы.

Компрессионные устройства: Компрессионные манжеты и другие устройства с регулируемым давлением полезны для улучшения венозного возврата, предотвращения варикоза и снижения риска тромбоза у малоподвижных пациентов.

Технологии для компенсации барорефлекса: Инженеры должны учитывать способность устройства к распознаванию резких изменений давления для предотвращения ортостатической гипотензии.