

Возможности оценки взаимодействия потоков артериальной и венозной крови в головном мозге по данным МРТ

Богомякова О.Б., Станкевич Ю.А., Тулупов А.А.

к.м.н., врач отделения МРТ Технологии

ФГБУН Международный томографический центр СО РАН

VIII СЪЕЗД КАРДИОЛОГОВ СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА
ОТ ПЕРВИЧНОЙ ПРОФИЛАКТИКИ ДО ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В КАРДИОЛОГИИ

Кемерово, 2019

Актуальность

- Множество заболеваний центральной нервной системы (ишемические изменения, нейродегенеративные заболевания, гипертензионно-гидроцефальный синдром) обусловлено нарушением внутричерепного соответствия, обеспечиваемого адекватным притоком артериальной и оттоком венозной крови, нормальной ликвороциркуляцией;
- Недостаточное понимание механизмов взаимодействия артериального, венозного и ликворного звена;
- Трудности в диагностической оценке изменений гомеостаза жидких сред центральной нервной системы;
- Ограничение большинства современных методик в оценке анатомо-морфологических и функциональных особенностей сосудистой и ликворной системы;

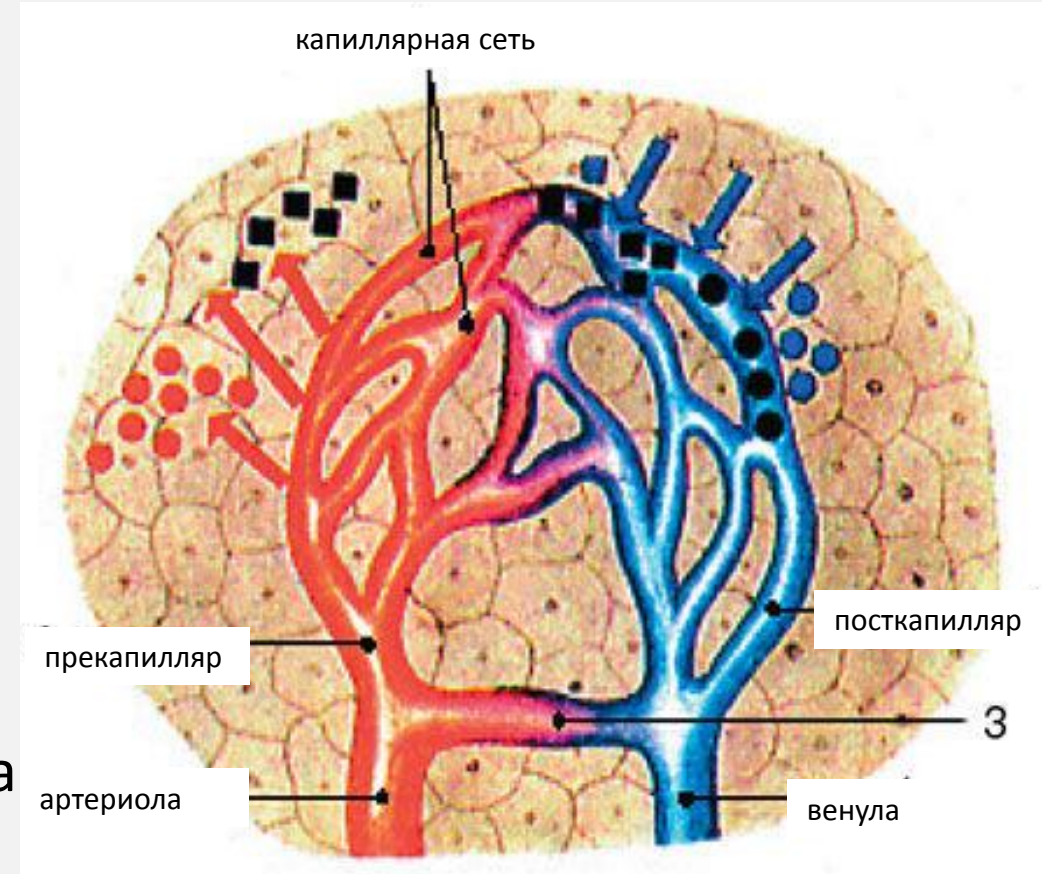
Актуальность

- Равномерное распространение пульсовой волны, ее перераспределение в веществе головного мозга влияет на адекватное его питание и обменные процессы;
- Перемещение жидкости из сосудистой стенки в интерстициальное пространство является одним из механизмов развития интерстициального отека головного мозга;
- Спазм на уровне мелких сосудов приводит к нарушению перфузии мозговой ткани;
- Изменения в периваскулярных и периневральных ликворных пространствах приводит к нарушению процессов метаболизма.

Цель

* Все эти процессы происходят на микроциркуляторном уровне, а их изучение напрямую не всегда возможно ввиду малого калибра сосудистых структур и их окружения. Именно поэтому важна разработка интегральных характеристик, отражающих функциональные изменения на микроциркуляторном уровне

* Цель наших исследований: изучить различные интегральные характеристики, дающие возможность оценки взаимодействия жидких сред центральной нервной системы (артериальной, венозной крови и цереброспинальной жидкости) на основании данных магнитно-резонансной томографии



Концепция Монро-Келли

Компоненты
интракраниального объема



Паренхима
головного мозга



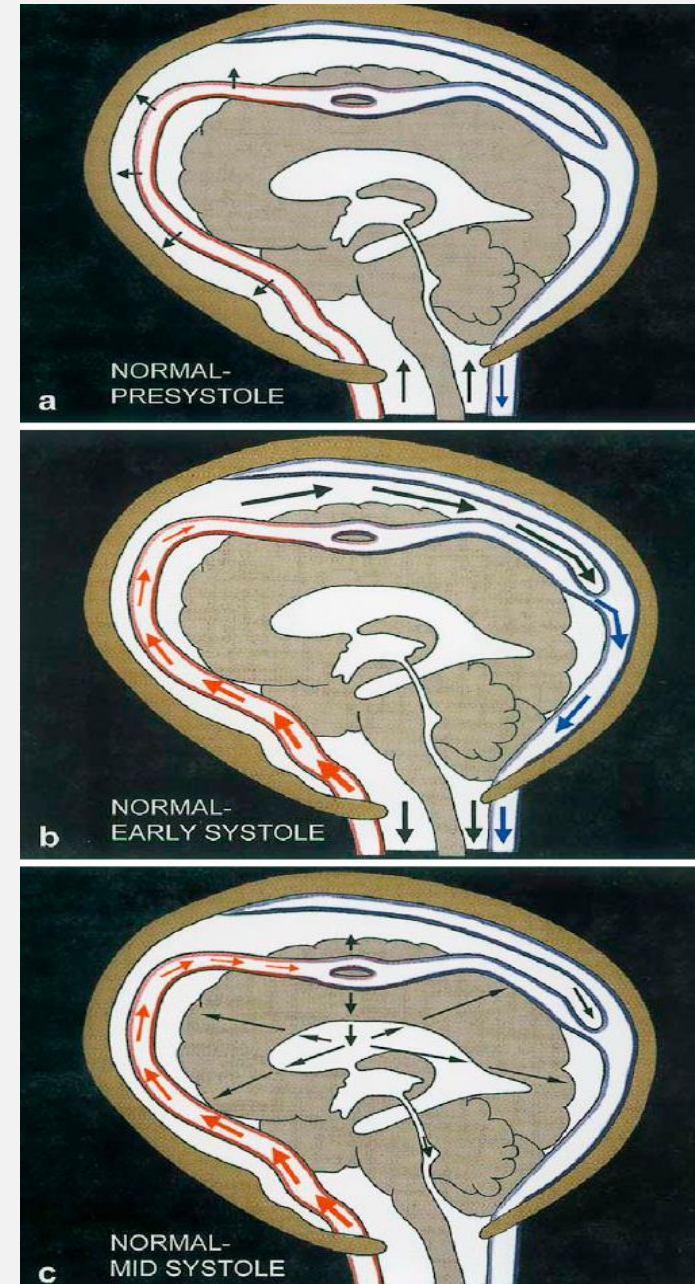
Кровь



Цереброспинальная жидкость

Концепция Монро-Келли:

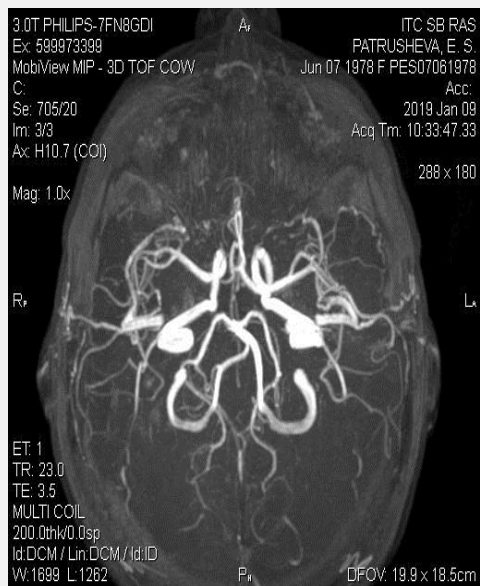
изменение объема одного из компонентов на фоне постоянного уровня внутричерепного давления неизбежно приводит к компенсаторным изменениям величины других КОМПОНЕНТОВ



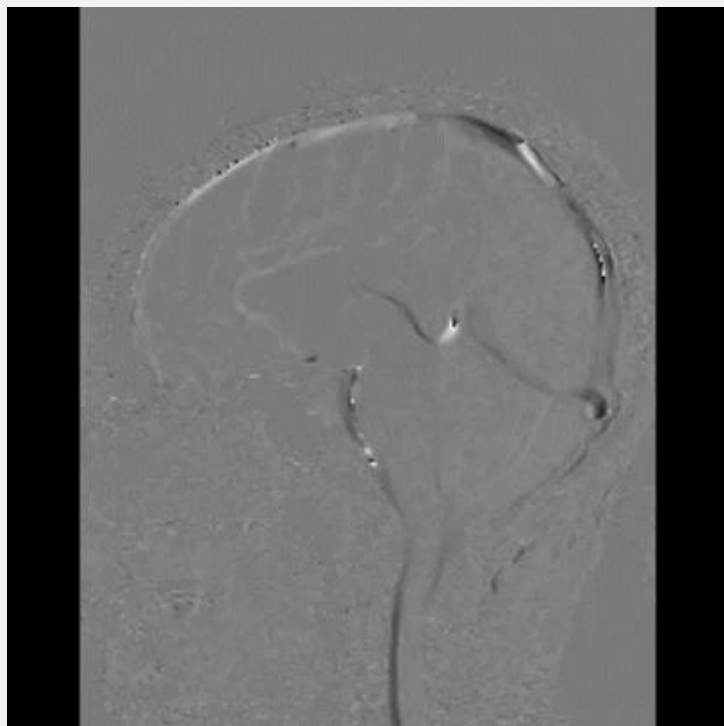
* - иллюстрация из
D.Greitz MR imaging of
cerebrospinal fluid
dynamics in health and
disease, Acta Radiol,
1994; 35:204-211

Возможности МРТ в оценке сосудистой и ликворной систем

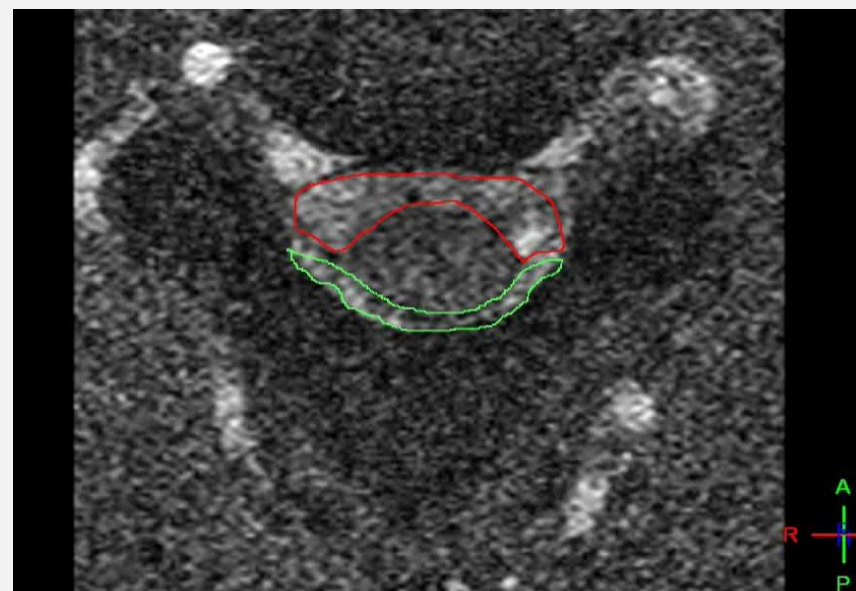
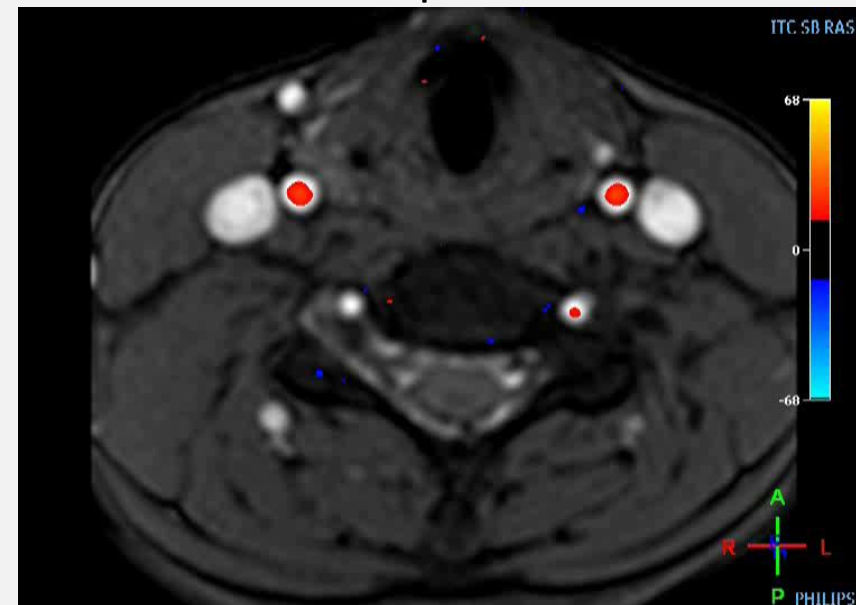
Статическая МР-ангиография



Кино-методика МР-ангиографии

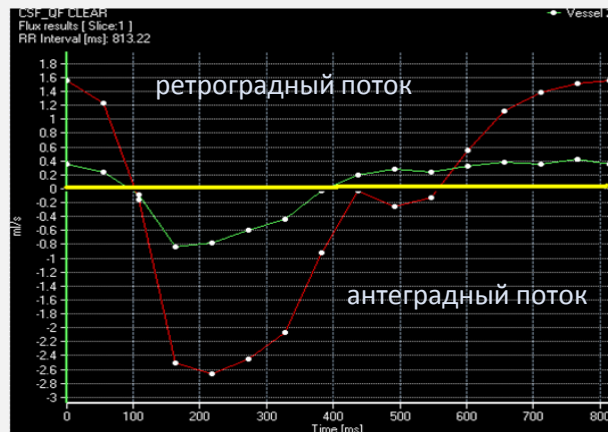
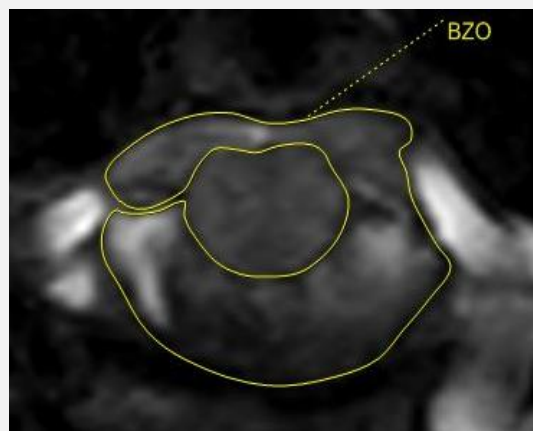
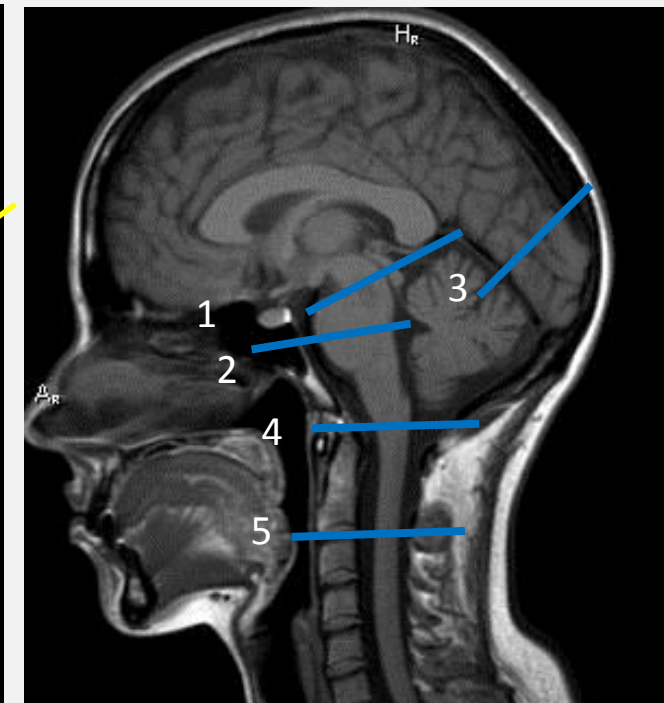
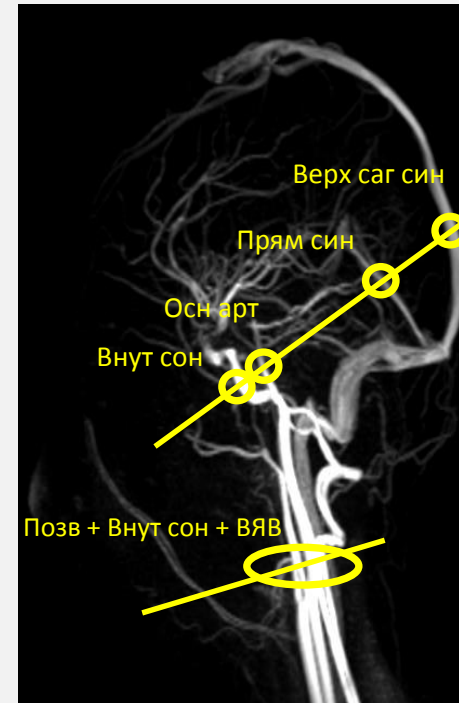


Фазо-контрастная МРТ



Методика фазо-контрастной МРТ

- Методика количественной оценки потока Quantitative Flow
- Характеристики: ретроспективная кардиосинхронизация (15 фаз); TR = 14 мс; TE = 8,3 мс; FA = 15°; коэффициент скорости потока = 15 см/сек – для ликворных структур; 100 см/сек – для сосудистых структур
- Получаемые характеристики:
 - линейная скорость – см/с
 - объемная скорость - мл/с
 - пиковая скорость – см/с
 - площадь поперечного сечения - см²



- 1 – водопровод мозга
- 2 – основная артерия, вертикальные сегменты VCA
- 3 – верхний сагиттальный и прямой синусы
- 4 – субарахноидальное пространство БЗО, VCA, ПА, ВЯВ на уровне БЗО
- 5 – субарахноидальное пространство C2-C3 сегмента, VCA, ПА, ВЯВ на уровне БЗО

Рассчитываемые параметры

- Объемно-скоростные показатели:

- пульсационный индекс (PI, pulsatility index)
- резистивный индекс (RI, resistive index)
- общий объем крови, притекающей к головному мозгу и оттекающей от него (tCBFa, tCBFv)
- ударный объем ликвора ($SV = \int FdT$)

- Временные параметры:

- артерио-венозная задержка (AVD, arterio-venous delay)
- артерио-ликворная задержка (ALD, arterio-liquorous delay)
- коэффициент ALDC2-C3/AVD

- Индекс внутричерепного комплайенса – ICC (intracranial compliens)

Формулы для расчета



- $PI = \Delta F / F_{max}$, $PI = \Delta F / F_{aver}$
- $PI(fill) = \Delta F / F_{aver(fill)}$, $PI(flush) = \Delta F / F_{aver(flush)}$
- $RI = \Delta V / V_{max}$, $RI = \Delta V / V_{aver}$
- $tCBFa = \sum F_i$, $i = A. Basilaris, A. Carotis Interna D/S$
- $tCBFv = \sum F_i$, $i = Sinus Rectus, Sinus Sagittalis Sup.$

- $SV = \int F dt$
- $CAR = SV_{cerv} / SV_{aq}$
- $AVD = |T_{peak(art)} - T_{peak(ven)}|$
- $ALD = |T_{peak(art)} - T_{peak(liq)}|$
- $ICC = SV_{liq(flush)} / tCBF_{art(sys)}$

Пульсационный индекс (PI, pulsatility index)

- $PI = \Delta F / F_{max}$, $PI = \Delta F / F_{aver}$
- характеризует крутизну нарастания объёмной скорости в зависимости от времени, а, соответственно ригидность сосудистой стенки

в норме составляет:

основная артерия - 0,53 мл/с

внутренние сонные артерии - 0,56-0,57 мл/с

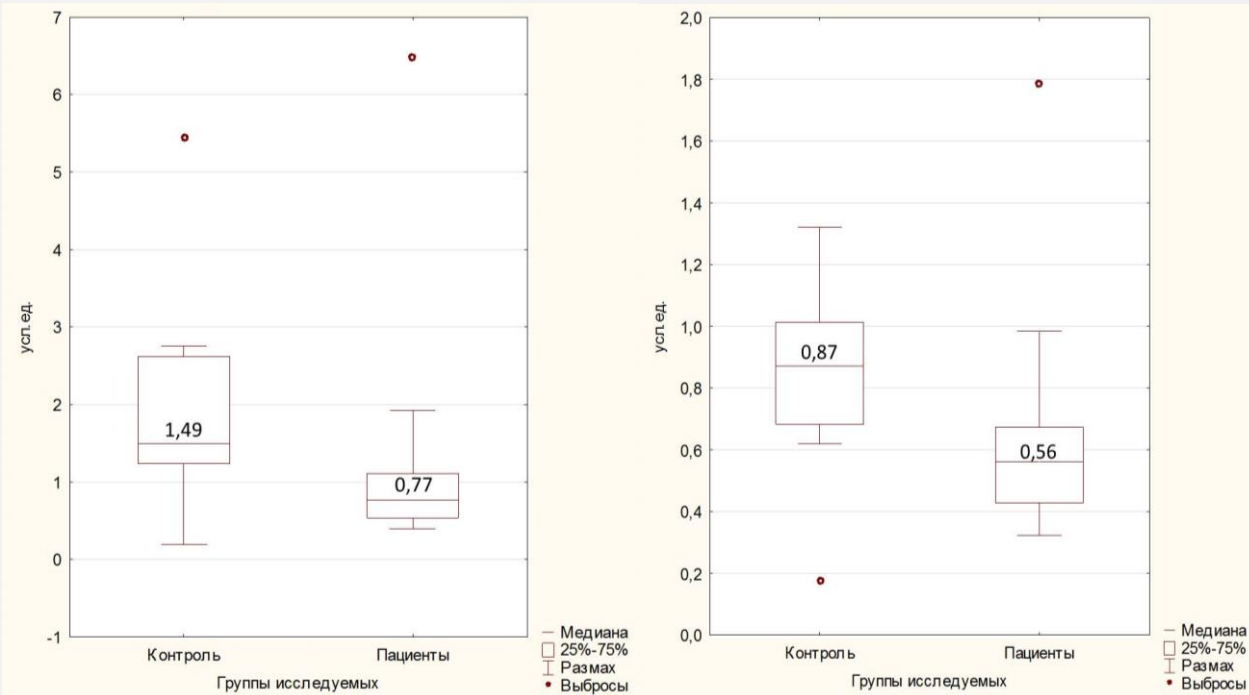
внутренние яремные вены - 0,9-1,03 мл/с

водопровод мозга - 2,12 мл/с

БЗО - 2,97 мл/с

PI_{Faver} (общий артериальный приток)

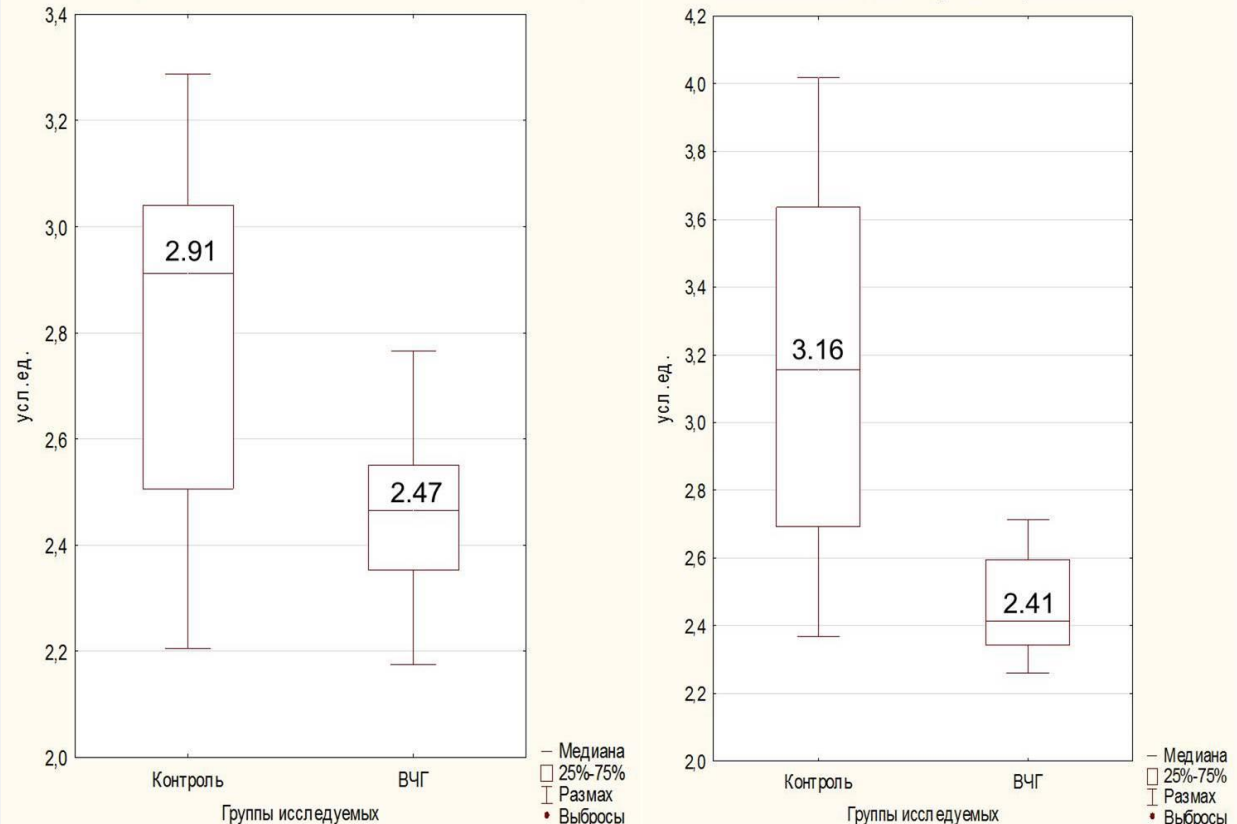
PI_{Faver} (общий венозный отток)



* - $p < 0.05$, ** - $p < 0.01$

PI_{Fmax}* (большое затылочное отверстие)

PI_{Fmax}* (C2-C3)



Резистивный индекс (RI, resistive index)

- $RI = \Delta V/V_{\max}$, $RI = \Delta V/V_{\text{aver}}$
- характеризует удельное сопротивление сосудистой стенки и, соответственно, как и пульсационный индекс отражает степень пульсационной активности

Общий объем мозгового кровотока

- Объем, притекающей крови (arterial total cerebral blood flow - tCBFa);

$tCBFa = \sum F_i$, i = основная артерия, левая и правая внутренние сонные артерии

- в норме - 13,426 мл/с

- Объем. Оттекающей крови (venous total cerebral blood flow - tCBFv);

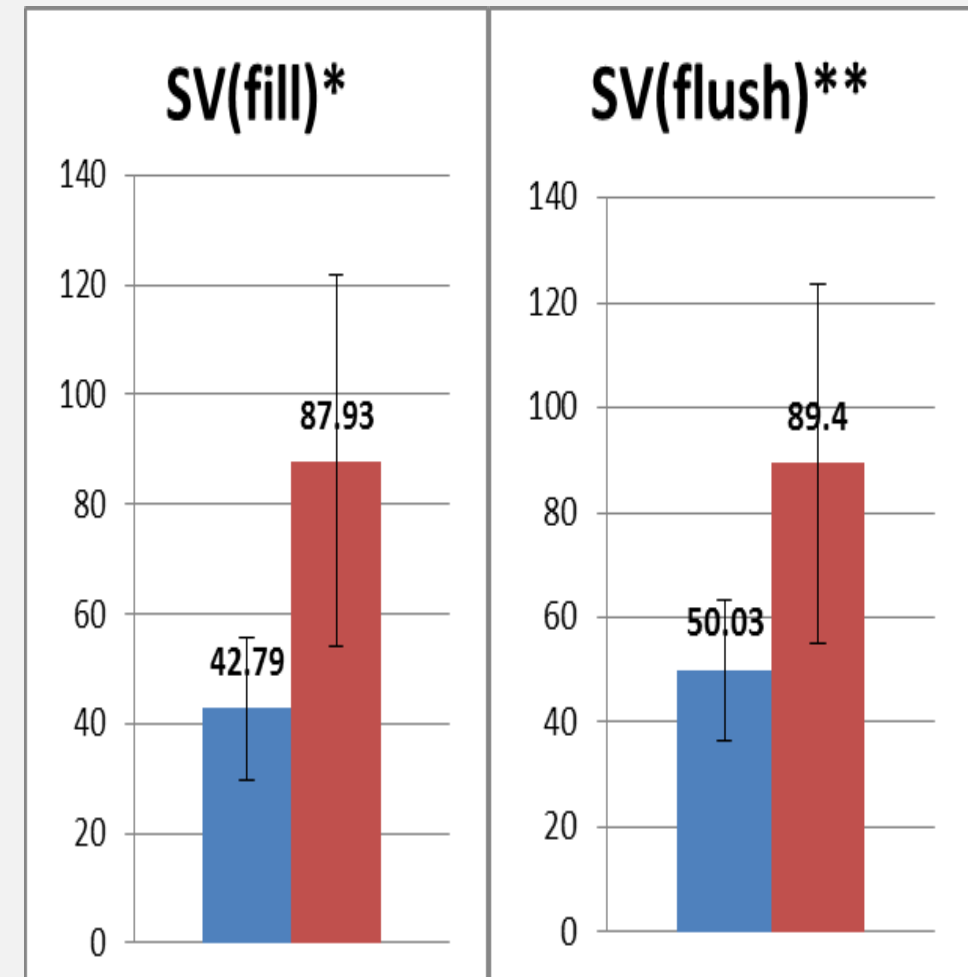
$tCBFv = \sum F_i$, i = прямой синус, верхний сагиттальный синус

- в норме - 12,87 мл/с

- Позволяют оценить адекватность кровоснабжения головного мозга и венозного оттока от него
- Может использоваться для определения гемодинамической значимости извитости, стенозов магистральных сосудов, для оценки эффективности лечения дисциркуляторных заболеваний

Ударный объем ликвора (SV, stroke volume)

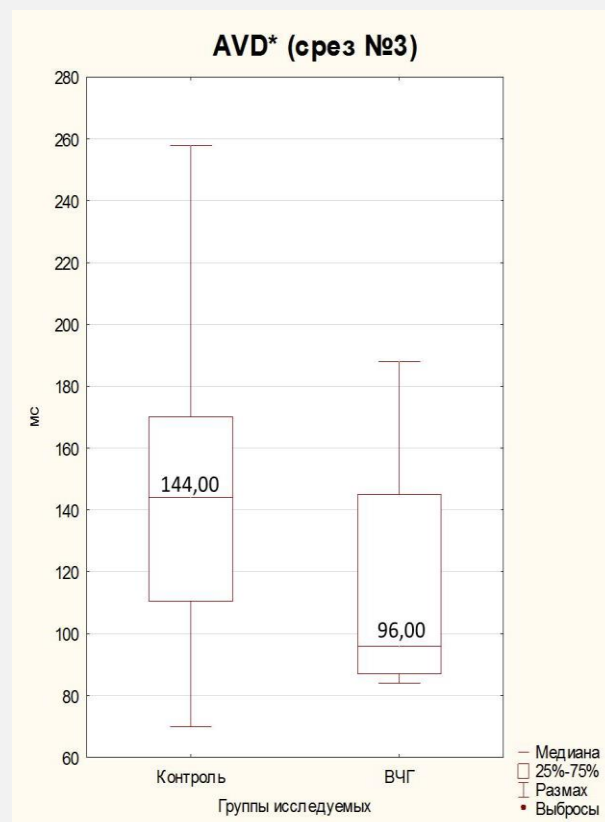
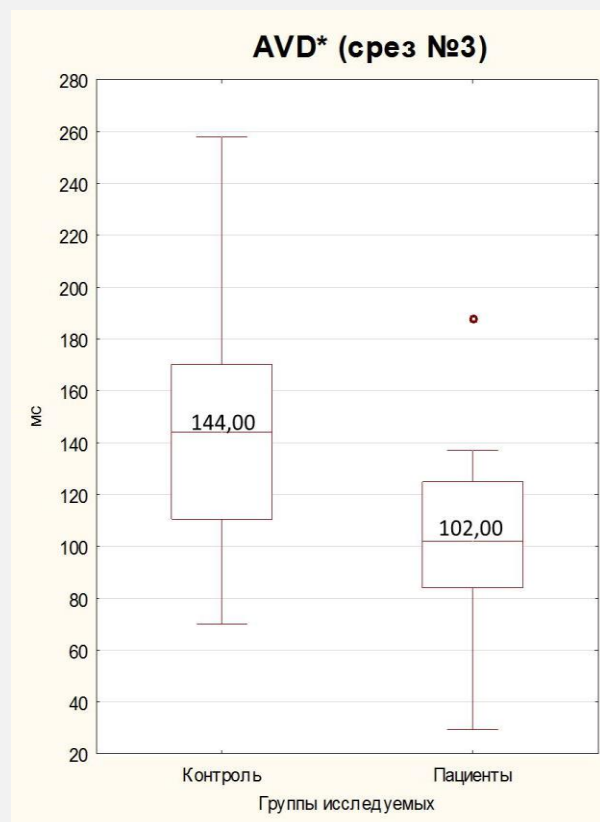
- $SV = \int F dt$
- результирующий $SV = (V_{olsys} + V_{oldias})/2$.
- позволяет оценить объём ликвора, протекающего через водопровод мозга, субарахноидальное пространство большого затылочного отверстия или шейного отдела позвоночника в систолу и в диастолу
- характеризует колебательный компонент движения ликвора



Сравнение SV для групп контроля и пациентов с сообщающейся гидроцефалией на уровне водопровода мозга

Артерио-венозная задержка (AVD, arterio-venous delay)

- $AVD = |T_{peak}(art) - T_{peak}(ven)|$
- характеризует скорость прохождения пульсовой волны вдоль сосудов
- зависит от таких свойств микроциркуляторного русла, как податливость и ригидность, определяющих сопротивление току крови



391 мс - между внутренней сонной артерией и верхним сагиттальным синусом
32,5 мс - между ВСА и прямым синусом
82 мс - между ВСА и ЦСЖ

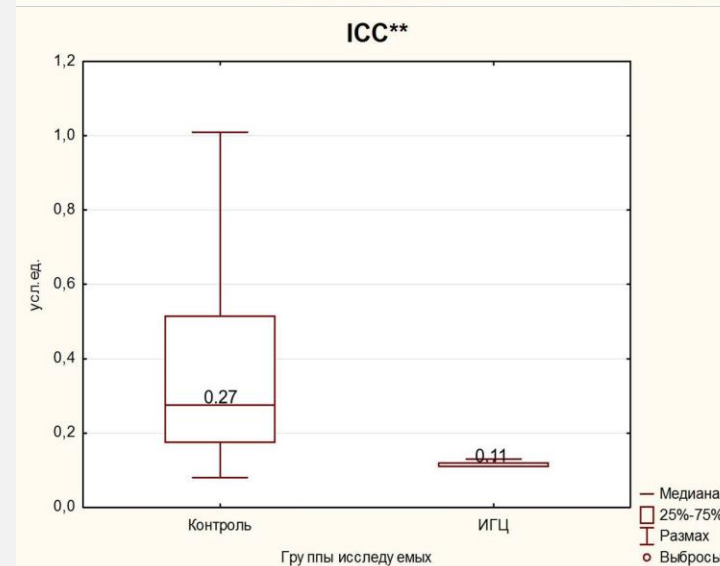
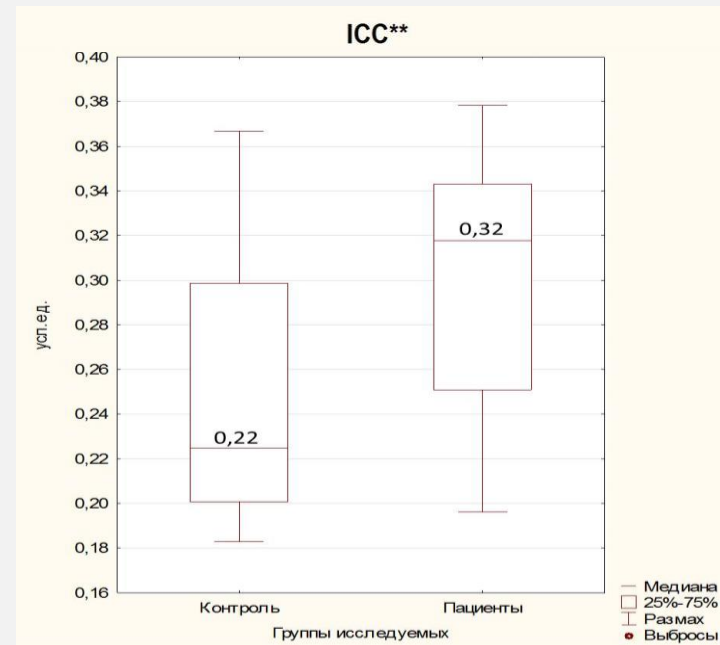
* - $p < 0.05$

Индекс внутричерепного комплайенса (ICC, intracranial compliens)

- $\underline{ICC} = SV_{liq}(flush) / tCBF_{art}(sys)$

- характеризует способность мозговой ткани к расширению во время притока крови и оттеснению своим увеличивающимся объёмом равного объёма ликвора из субарахноидального пространства

- чем лучше выражена подобная компенсаторная способность мозга, тем больший объём крови он потенциально может в себя вместить, тем меньше риск гипоперфузии у пациента



Заключение

- Используя количественные характеристики потоков крови и ликвора, возможен расчет интегральных характеристик, отражающих взаимодействие жидких сред центральной нервной системы
- Наибольшую клиническую значимость имеют: пульсационный индекс, артерио-венозная задержка, индекс внутричерепного соответствия (комплаенса)
- Применение интегральных количественных характеристик потоков артериальной и венозной крови дает дополнительную информацию о функциональном состоянии жидких сред центральной нервной системы и может существенно расширить диагностические возможности у пациентов с расстройствами гемодинамики.

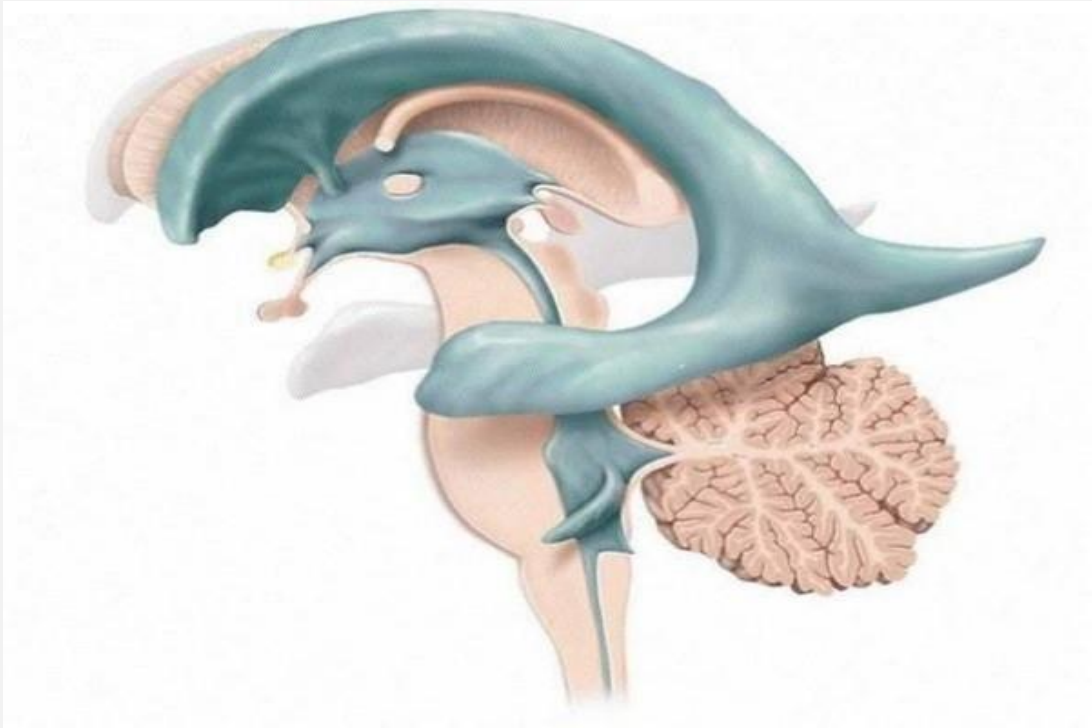
Заключение

- У пациентов с хронической ишемией головного мозга выявлено повышение внутричерепного комплайенса более чем на 30% по сравнению с нормой, а также снижение пульсационного индекса на уровне артериального звена на 25% и на уровне венозных синусов на 18%;
- Подобные изменения говорят о нарушении артериального притока, характера распространения и распределения пульсовой волны в головном мозге у таких пациентов и ведут к дизрегуляции мозгового кровотока в микроциркуляторном русле.

Благодарим за внимание!



Общие свойства ликворной системы



Общий объём ликвора в полости черепа и позвоночного канала:

у новорождённого - 15-20 мл

у годовалого ребёнка - 35 мл

у взрослого человека – около 140-150 мл

Обновление ликвора в течение суток происходит 4-6 раз.



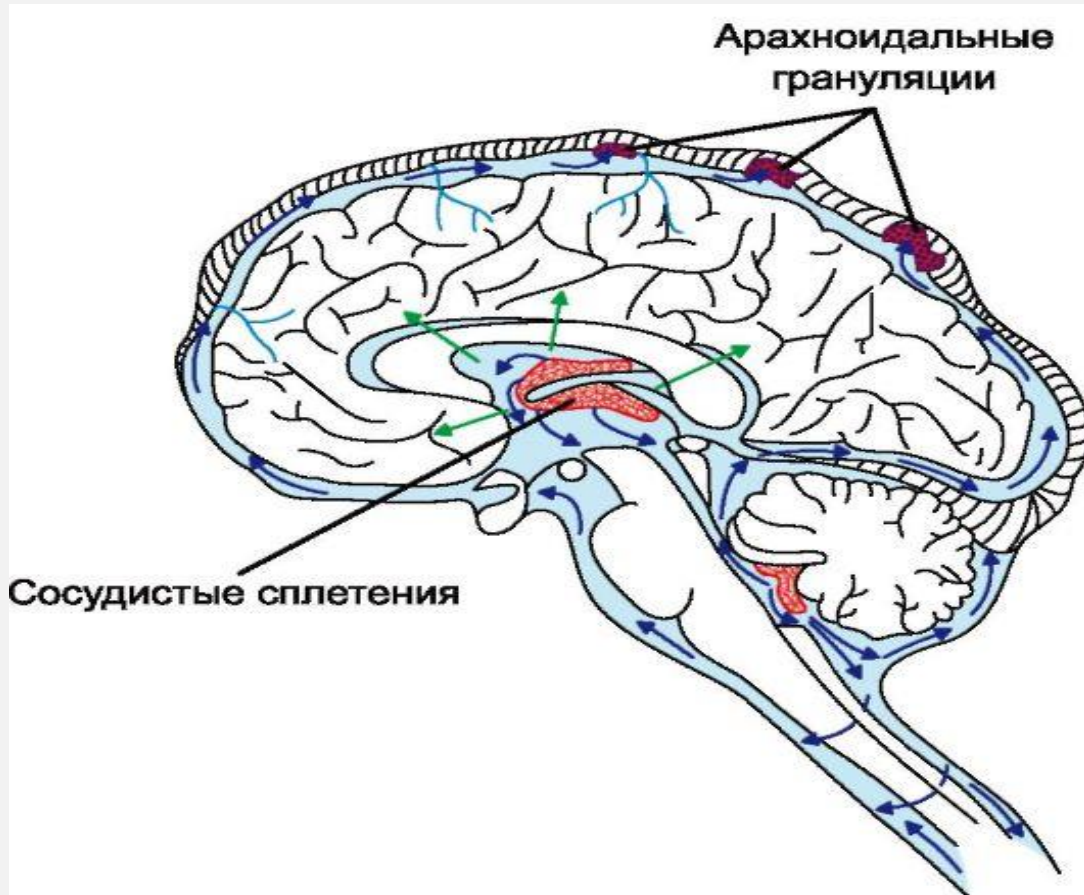
В сутки продуцируется 600-900 мл ЦСЖ

В спинномозговом субарахноидальном пространстве давление цереброспинальной жидкости у взрослых:

- **при положении лежа на боку** достигает 100-180 мм вод. ст.
- **в положении сидя** - повышается до 250-300 мм вод. ст.

У детей давление цереброспинальной жидкости ниже, чем у взрослых.

Продукция (образование) ликвора



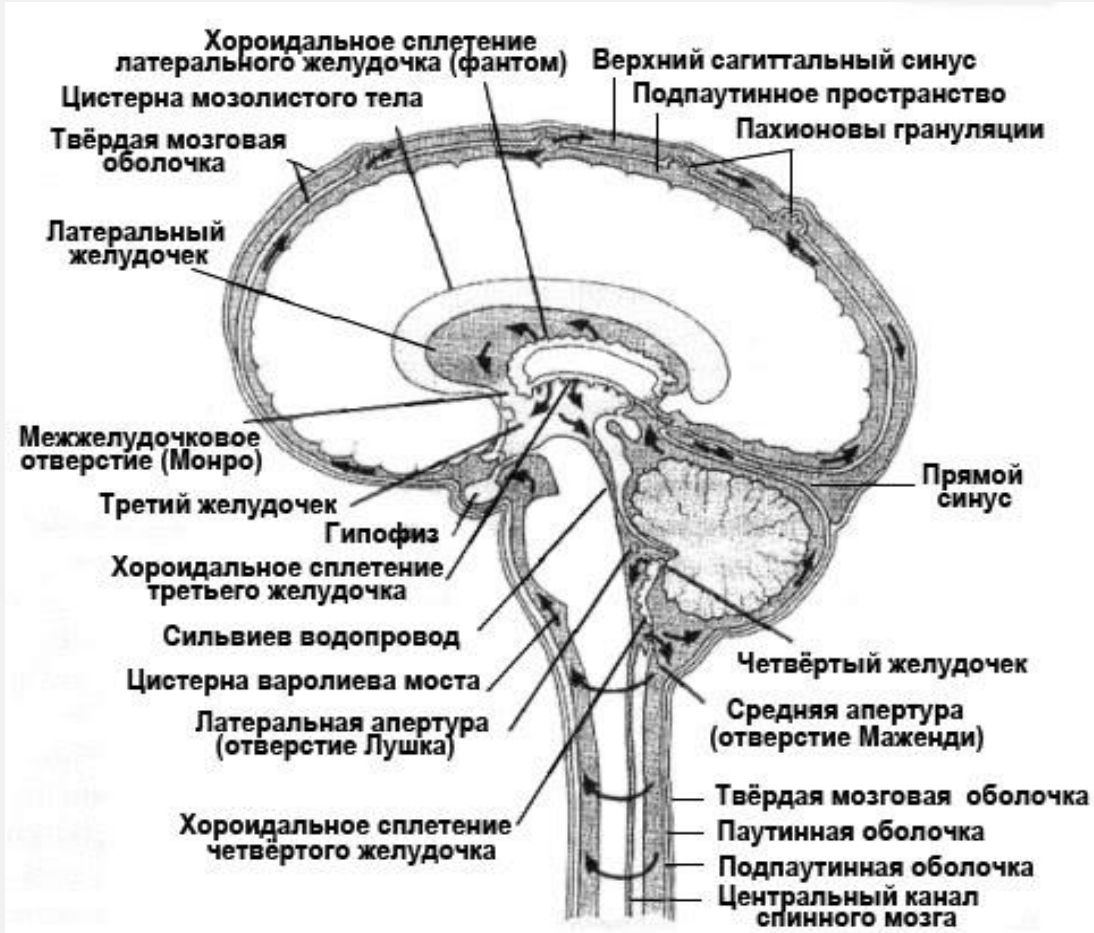
Внутрижелудочковая продукция:

- сосудистые сплетения желудочков головного мозга (секреция железистыми клетками) – 80%
- диализ крови через стенки сосудов и эпендиму желудочков мозга – 20%

Внежелудочковая продукция:

- сосудистая сеть мозга и его оболочек, клетки мозговой ткани (нейроны и глия) – незначительное количество

Нормальная ликвородинамика



М.Бер, М.Фротшер под ред. З.А. Суслиной
«Топический диагноз в неврологии по Петеру
Дуусу», 2009

Циркуляция ликвора

Механизмы перемещения ликвора:

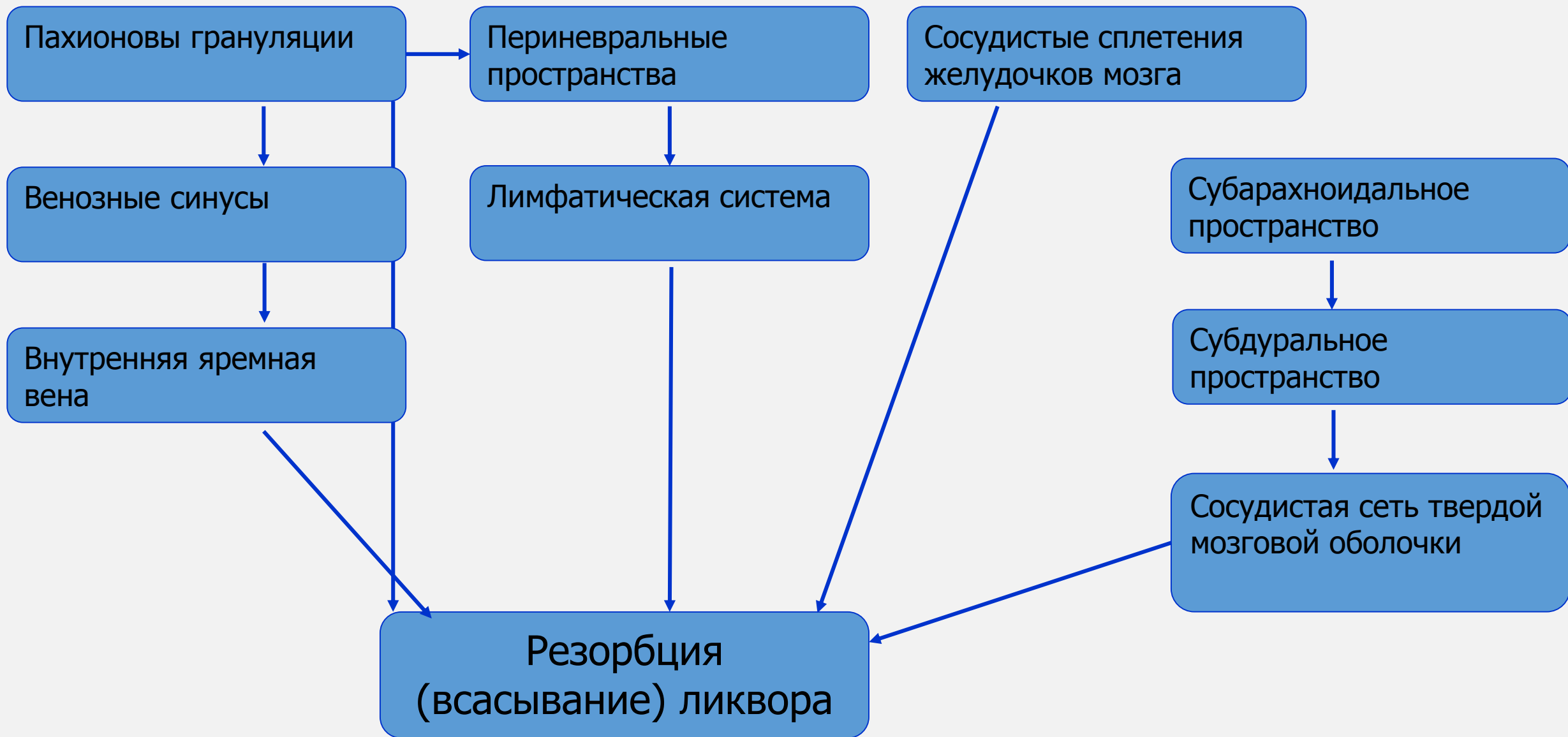
Быстрые потоки:

- доминирующий пульсирующий поток, зависящий от артериальных пульсаций во время сердечного цикла, который отвечает за перемещение и перемешивание ликвора. Соответственно расширению мозговых артериальных сосудов и капилляров, происходит отток цереброспинальной жидкости;

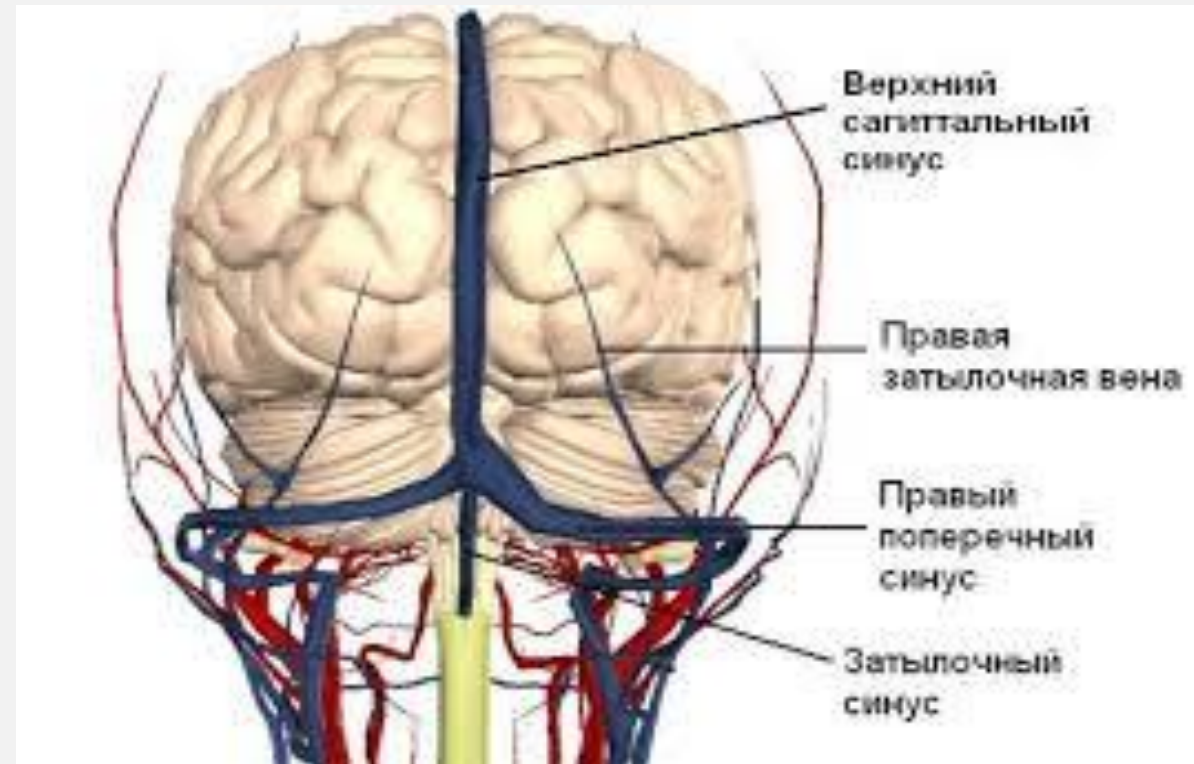
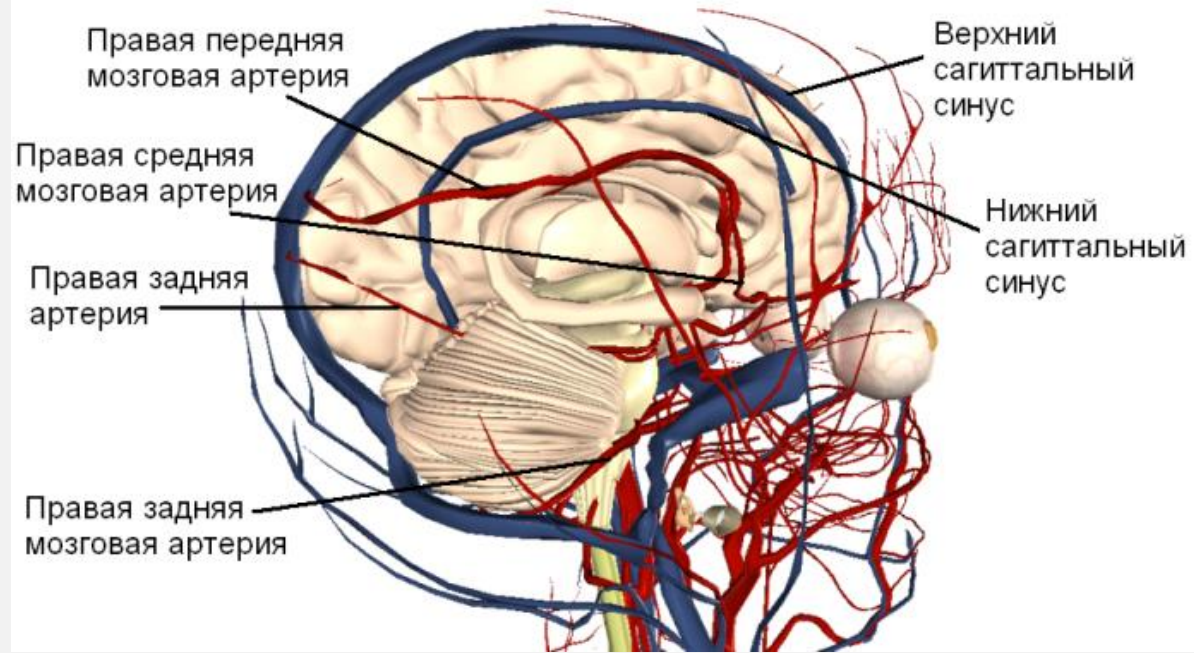
Медленные потоки:

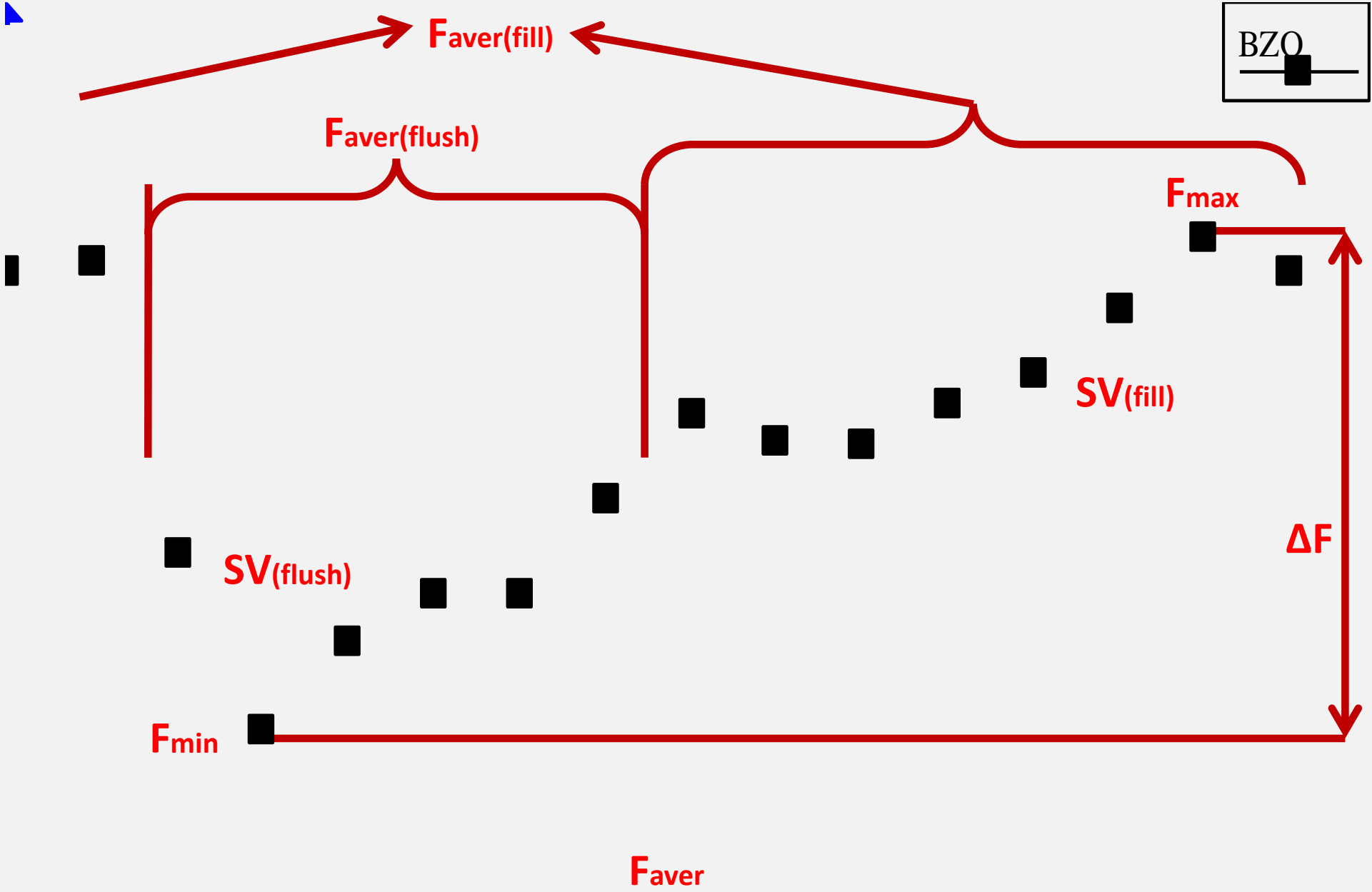
- во время пресистолы (при отсутствии градиента давления в головном мозге), происходит свободное перемещение ликвора из спинномозгового канала в полость черепа, всасывание ликвора в венозные структуры;
- медленные потоки ликвора, расположенные в концевых верхних и нижних отделах субарахноидальных пространств.

Резорбция (всасывание) ликвора



КРОВΟΣНАБЖЕНИЕ ГОЛОВНОГО МОЗГА





Рассчитываемые параметры

- $PI = \Delta F/F_{\max}$, $PI = \Delta F/F_{\text{aver}}$
- $PI_{(\text{fill})} = \Delta F/F_{\text{aver}(\text{fill})}$, $PI_{(\text{flush})} = \Delta F/F_{\text{aver}(\text{flush})}$
- $RI = \Delta V/V_{\max}$, $RI = \Delta V/V_{\text{aver}}$
- $tCBFa = \sum F_i$, $i = A. \text{ Basilaris}, A. \text{ Carotis Interna D/S}$
- $tCBFv = \sum F_i$, $i = \text{Sinus Rectus}, \text{Sinus Sagittalis Sup.}$
- $SV = \int F dT$
- $CAR = SV_{\text{cerv}}/SV_{\text{aq}}$
- $AVD = |T_{\text{peak}(\text{art})} - T_{\text{peak}(\text{ven})}|$
- $ALD = |T_{\text{peak}(\text{art})} - T_{\text{peak}(\text{liq})}|$
- $ICC = SV_{tCBF_{\text{art}}(\text{sys})}/SV_{\text{liq}(\text{flush})}$

Изменение внутрочерепного объёма за один сердечный цикл равняется нулю:

$$ICVC_{CC} = (F_{art} + a \cdot F_{ven} + F_{CSF}) \cdot T_{CC} = 0$$

Градиент давления на уровне БЗО (связь с линейной скоростью движения жидкости отражает уравнение Навье-Стокса)

$$\nabla P = -\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V \right) + \mu \cdot \nabla^2 V$$

где ρ – плотность ликвора ($1,0007 \text{ g/cm}^3$), μ – вязкость ликвора ($1,01-1,06 \text{ cP}$), P и V – векторы давления и линейной скорости соответственно.

Первое слагаемое с помощью центрального оператора дифференцировки первого порядка рассчитывается по следующей формуле:

$$-\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} \cong \frac{\rho}{2\Delta t} [\omega(x, y; t + \Delta t) - \omega(x, y; t - \Delta t)]$$

где ω – линейная скорость кровотока; x, y – координаты плоскости среза

Для упрощения второго слагаемого используется центральный оператор дифференцировки второго порядка:

$$\mu \cdot \nabla^2 V = \frac{\mu}{\Delta x^2} [\omega(x + \Delta x, y; t) - 2\omega(x, y; t) + \omega(x - \Delta x, y; t)] + \frac{\mu}{\Delta y^2} [\omega(x, y + \Delta y; t) - 2\omega(x, y; t) + \omega(x, y - \Delta y; t)].$$

Индекс краниального комплайнса (ICC): отношение изменения внутрочерепного объёма к градиенту давления ликвора на уровне БЗО за определенное время

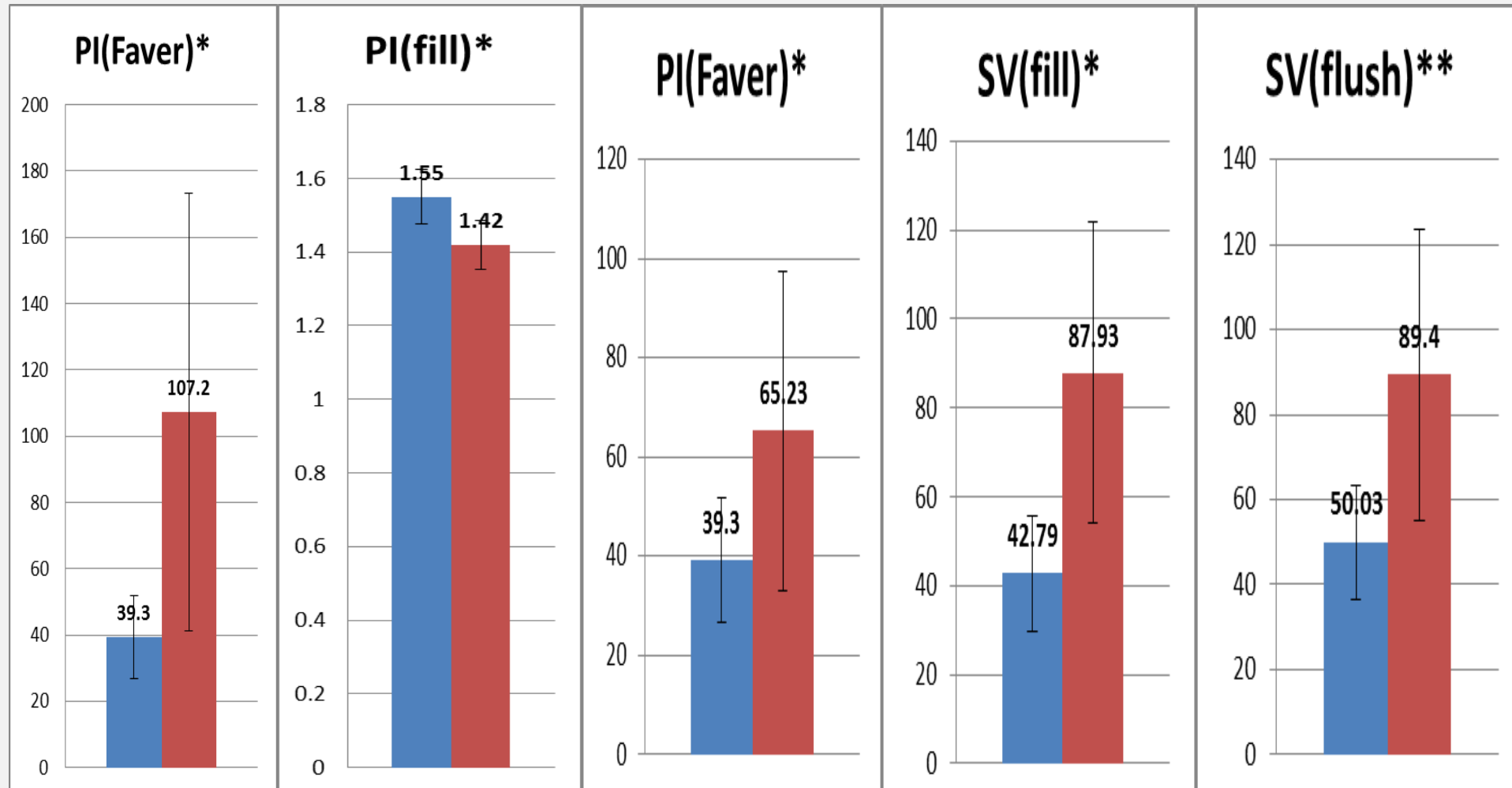
$$ICC = ICVC/P$$

Результаты

Водопровод мозга

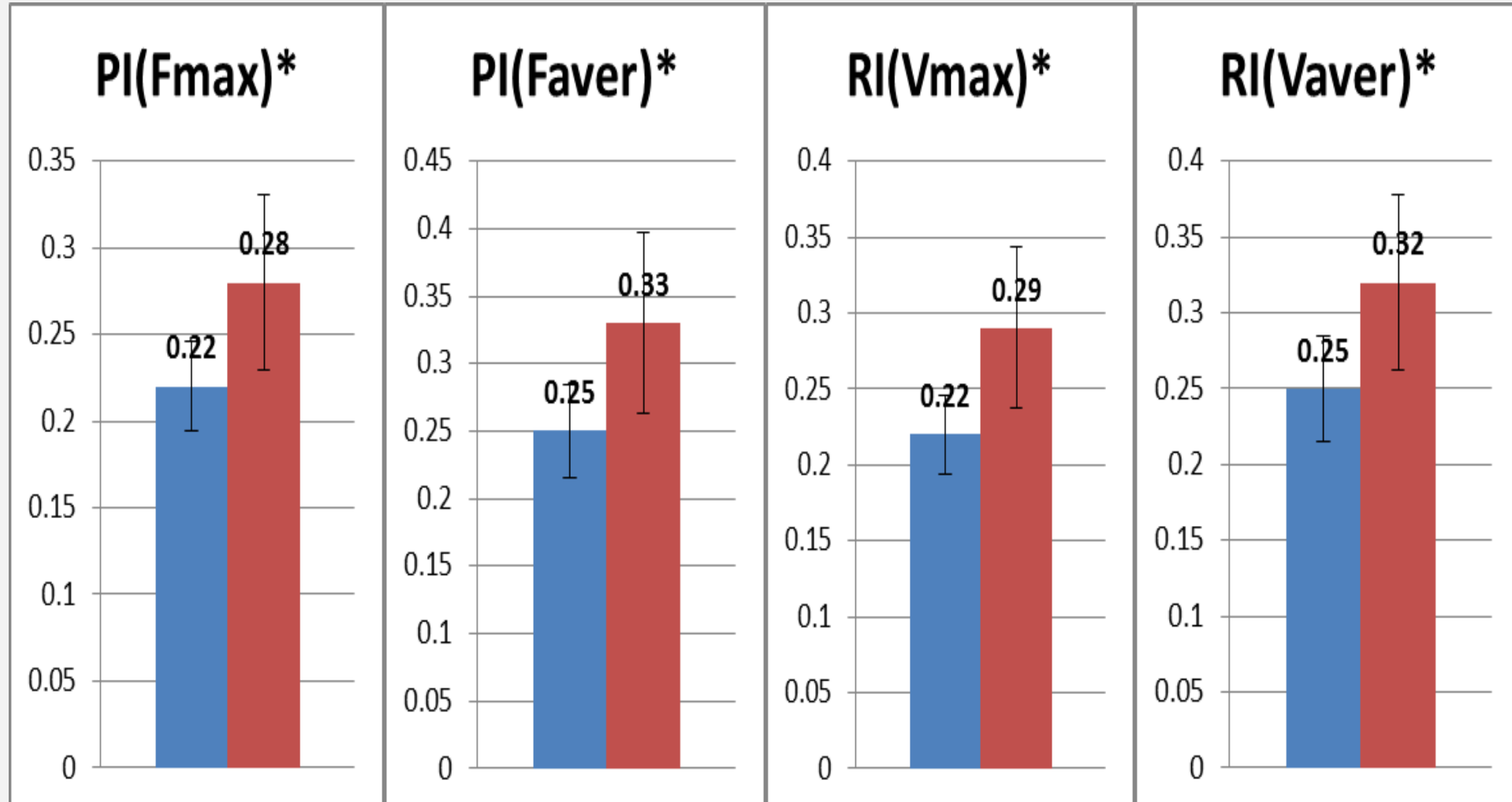
Контроль - пациенты

Контроль - ИГЦ



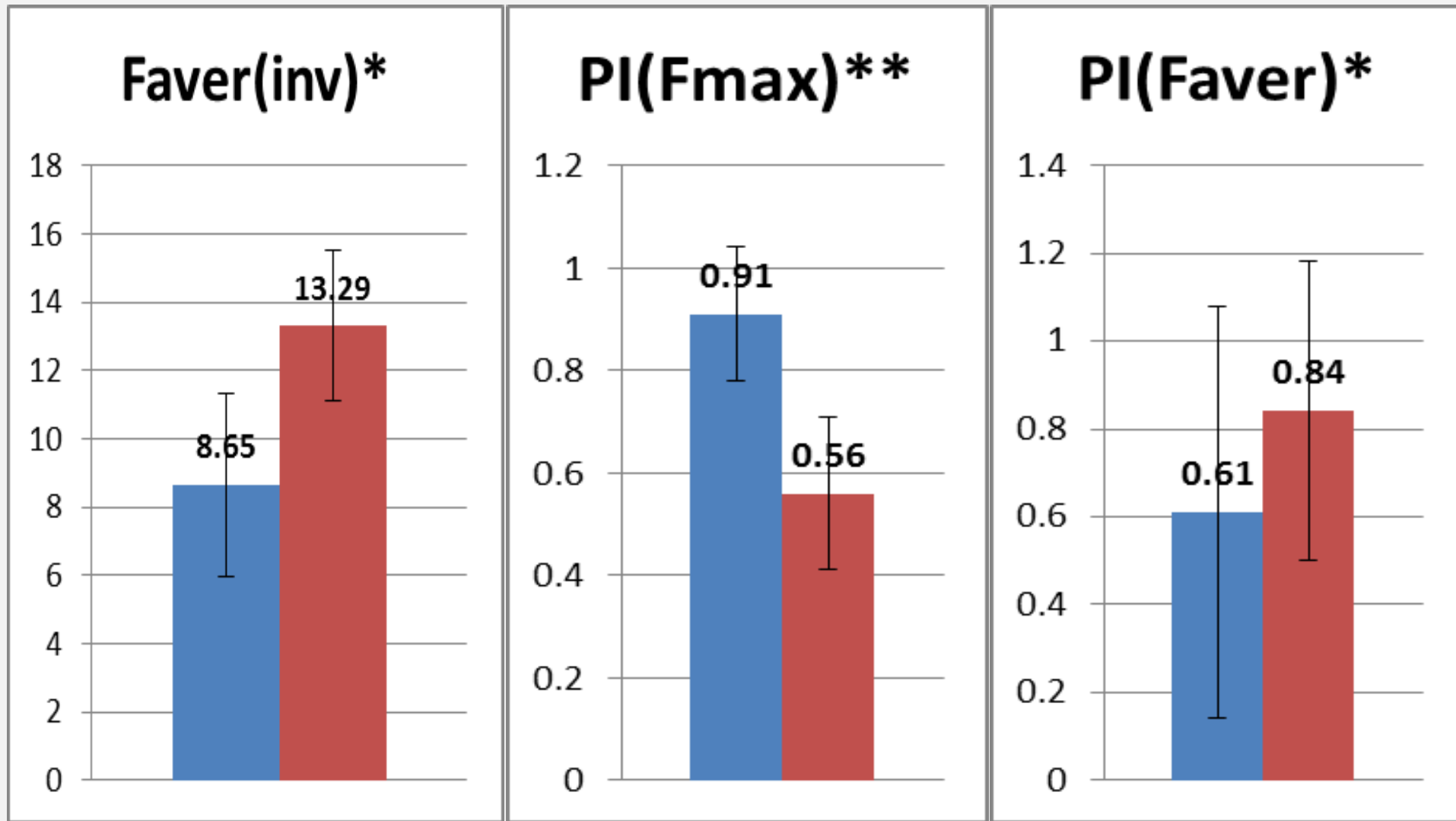
Прямой синус

Контроль - ИГЦ



Общий венозный отток от мозга

Контроль - пациенты



Артерио-венозная задержка и комплайнс

Контроль - пациенты

