

Способ векторной оценки динамики гемодинамических состояний

Т. В. Сергеев

Институт экспериментальной медицины, Санкт-Петербург

stim9@yandex.ru

Аннотация. Для изучения реакций сердечно-сосудистой системы при непрерывном наблюдении в динамике их развития и анализа основных показателей гемодинамики при перемещении-ориентации испытуемых (постуральных нагрузках) был разработан векторный способ оценки изменений параметров системной гемодинамики: ударного индекса и среднего артериального давления. Векторное представление позволяет получить представление о степени (интенсивности) изменений гемодинамического статуса испытуемого, выражаемых через длину вектора, и направлении этих изменений в сторону значительных вариаций артериального давления и ударного индекса, выражаемых через угол вектора относительно оси абсцисс. На основе предложенного способа разработана классификация гемодинамических реакций. Апробация разработанного способа производилась при ортостатических и антиортостатических нагрузках.

Ключевые слова: гемодинамика; вектор; ортостатические и антиортостатические нагрузки

I. ВВЕДЕНИЕ

С каждым сокращением сердца сердечно-сосудистая система (ССС) пребывает в новом гемодинамическом статусе и, следовательно, положение о медленном изменении гемодинамических показателей ошибочно [1, 2].

Одним из эффективных способов изменения функционального состояния сердечно-сосудистой системы является метод постуральных нагрузок (ПН). В результате таких нагрузок – смены ортостатических и антиортостатических положений происходят противоположно направленные реакции организма, в частности: отрицательная и положительная инотропная реакции сердца, вазоконстрикторные и вазодилатационные сосудистые реакции, положительный и отрицательный хронотропный эффект, перераспределение депонирования крови в сосудах нижней и верхней частей тела [1, 3, 4]. Соответственно на резистивную, емкостную и обменную функции сосудов оказываются периодические знакопеременные влияния, сложным образом зависящие от параметров ПН. Человек при этом находится в относительно пассивном состоянии, т.к. располагается на ложе с дистально фиксированными конечностями. При изменении положения-ориентации тела человека, т.е. при постуральных движениях, вследствие влияния силы тяжести и сил инерции происходит внутреннее перераспределение жидкостных сред. Это перераспределение оказывает выраженное воздействие на отдельные органы и системы, и, в том числе, на организм в целом. Направленное применение постуральных нагрузок позволяет вызывать специфичные и значимые реакции со стороны сердечно-

сосудистой, кардиореспираторной и других систем организма [5]. Интенсивность и продолжительность возникающих при этом эффектов сложным образом зависит как от состояния организма и от характеристик самого постурального воздействия.

При принятии телом вертикального положения сила тяжести перераспределяет объем крови так, что в течение 2-3 минут 500-800 мл крови, что составляет примерно 10% от общего объема крови, быстро перемещаются в нижнюю часть тела и в проксимальные части нижних конечностей [6]. Сниженная импульсация с сонных и сердечно-легочных барорецепторов в связи с разгрузочным оттоком крови от верхней части тела стимулирует симпатическую норадренергическую систему, которая повышает вазоконстрикторный тонус периферических сосудов, частоту и силу сердечных сокращений. При нарушениях ортостатической толерантности упомянутые компенсаторно-адаптивные реакции не работают или являются недостаточными.

У пациентов с ортостатическими нарушениями ключевым компонентом клинической оценки вегетативной функции сердечно-сосудистой системы является проведение тилт-тестов, где тело человека может быть пассивно наклонено вверх или вниз на определенный градус относительно горизонта [7, 8, 9]. Тилт-тест в сочетании с другими вегетативными пробами полезен в дифференцировке нейрогенных нарушений от нарушений другого генеза, выявлении недостаточности норадренергической симпатической системы при вегетативных нейропатиях и ганглиопатиях, а также в оценке симпатической барорефлекторной функции при альфа-синуклеинопатиях, таких как болезнь Паркинсона, множественная системная атрофия, истинная вегетативная недостаточность и деменция с телами Леви.

В связи с этим является необходимым изучение реакций ССС при непрерывном наблюдении в динамике развития, постуральных нагрузок, т.е. с синхронной регистрацией и анализом основных показателей гемодинамики и перемещения-ориентации испытуемых. Наиболее эффективным для этого представляется использование векторного представления. Таким образом, целью исследования являлась разработка векторного способа оценки изменений параметров системной гемодинамики (ударного индекса – УИ) и среднего артериального давления – АДср.) при ортостатических и антиортостатических нагрузках.

II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Регистрация поударных значений артериального давления проводилась с помощью прибора «Спироартериокардиоритмограф» (САКР), выпускаемого компанией ООО «ТД «ИНКАРТ» (Санкт-

Санкт-Петербург); поударных значений – ударного объема крови Реографом «ДИАМАНТ-Р», выпускаемого фирмой «Диамант» (Санкт-Петербург).

Изменения состояния гемодинамики отражаются в виде графиков зависимости АДср. = $f(t_i)$, УИ = $f(t_i)$, где t – время, i – номер стадии, а также как точки на номограмме гемодинамики (НГ) [2]. Точка состояния гемодинамики пациента (ТГ) формируется синхронными значениями АДср. и УИ. На НГ обозначены три диапазона значений кровотока и три диапазона значений АД (рис. 1). Их сочетание образует девять видов гемодинамических состояний, ограниченных девятью прямоугольниками, в каждом из которых может оказаться Точка состояния гемодинамики пациента.

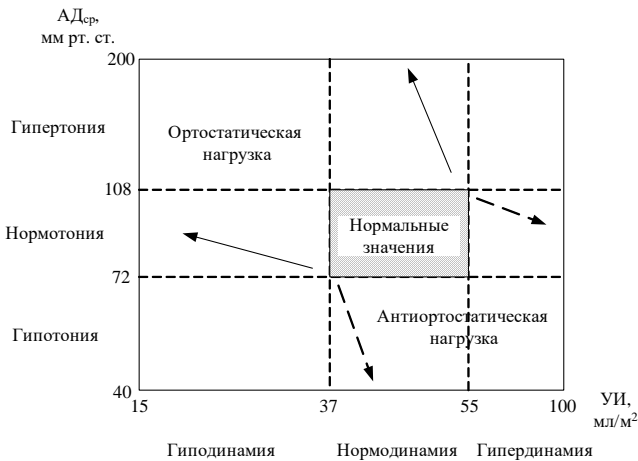


Рис. 1. Номограмма гемодинамики при простых ПВ: сплошные стрелки – направление изменений при простых ортостатических нагрузках, штрих – при антиортостатических

Восемь из девяти комбинаций представляют собой состояния гемодинамики, не соответствующие нормативным значениям при спокойном состоянии, и только одно – сочетающее нормодинамию с нормотонией, т.е. нормальное гемодинамическое состояние. Это состояние по формальным признакам является основной целью терапии нарушения гемодинамики, вызванного именно гемодинамическими причинами (но не сепсисом, эндокринными заболеваниями или нарушениями проводимости). Еще раз отметим, что показанные границы на номограмме соответствуют состоянию человека, находящемуся в покое. Первая из представленных реакций ССС это реакция на ортостатическую нагрузку, она «сдвигает» гемодинамические показатели в сторону больших значений АДср и меньших значений УИ, по номограмме влево вверх, на антиортостатическую нагрузку – в сторону меньших значений АДср и больших значений УИ, т.е. вправо вниз (рис. 1). Показанные направления изменений гемодинамического статуса обозначены как ортостатическое и антиортостатическое соответственно.

Для изучения динамики изменений – показателей сердечно-сосудистой системы – предлагается использовать их векторное представление на НГ. Такое представление обеспечивает большую ясность и уменьшение количества интерпретируемых данных без потери их информативности (например, в случае анализа двух точек НГ). С помощью НГ требуется учесть, как

минимум, две точки, т. е. четыре значения в координатах УИ, АДср для оценки изменений гемодинамического статуса испытуемого. Если соединить эти две точки вектором, то тот же процесс можно описать двумя значениями: интенсивность изменений – это длина вектора, направление изменений – угол вектора. Поскольку в исследовании участвуют только здоровые испытуемые и их гемодинамический статус, как правило, находится в области нормы НГ, то двумя значениями, соответствующими началу вектора можно пренебречь.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Вектор образовывается между двумя точками на плоскости УИ – АДср, где начальная точка вектора это исходное состояние гемодинамики испытуемого, или другими словами, его гемодинамический статус (ГС) во время i -й стадии ПВ: УИ $_i$, АДср $_i$; а конечная – ГС во время произвольной $(i + n)$ стадии ПВ (n – натуральное положительное число): УИ $_{i+n}$, АДср $_{i+n}$. Векторное представление позволяет получить представление о степени (интенсивности) изменений ГС испытуемого, выражаемых через длину вектора, и направление указанных изменений в сторону значимых вариаций АД или УИ. Они могут быть выражены через угол вектора относительно оси абсцисс.

Длина вектора гемодинамической реакции (ГР) рассчитывается по следующей формуле:

$$GR_{i+n} = \sqrt{(УИ_{i+n} - УИ_i)^2 + (АДср_{i+n} - АДср_i)^2}. \quad (1)$$

Угол вектора гемодинамической реакции относительно оси абсцисс, т. е. её направление (НГР) рассчитывается по следующей формуле:

$$НГР_{i+n} = \arctg \begin{cases} \left(\frac{АДср_{i+n} - АДср_i}{УИ_{i+n} - УИ_i} \right), & \text{при } УИ_{i+n} - УИ_i > 0 \\ \left(\frac{АДср_{i+n} - АДср_i}{УИ_{i+n} - УИ_i} \right) + \pi, & \text{при } УИ_{i+n} - УИ_i < 0 \\ \frac{\pi}{2}, & \text{при } УИ_{i+n} - УИ_i = 0 \text{ и } АДср_{i+n} - АДср_i > 0 \\ -\frac{\pi}{2}, & \text{при } УИ_{i+n} - УИ_i = 0 \text{ и } АДср_{i+n} - АДср_i < 0 \end{cases}. \quad (2)$$

В соответствии с положениями, изложенными в работе А.А. Антонова (2006) [2] и выражениями (1) и (2) гемодинамические реакции могут классифицироваться по их интенсивности и направлению. Градации интенсивности реакций выбраны из значения длины диагонали зоны нормы на НГ, т. е. длины, отвечающей вектору вероятного выхода точки гемодинамического статуса из зоны нормы и рассчитанной по формуле (1):

$$GR_H = \sqrt{(55 - 37)^2 + (108 - 72)^2} = 40.$$

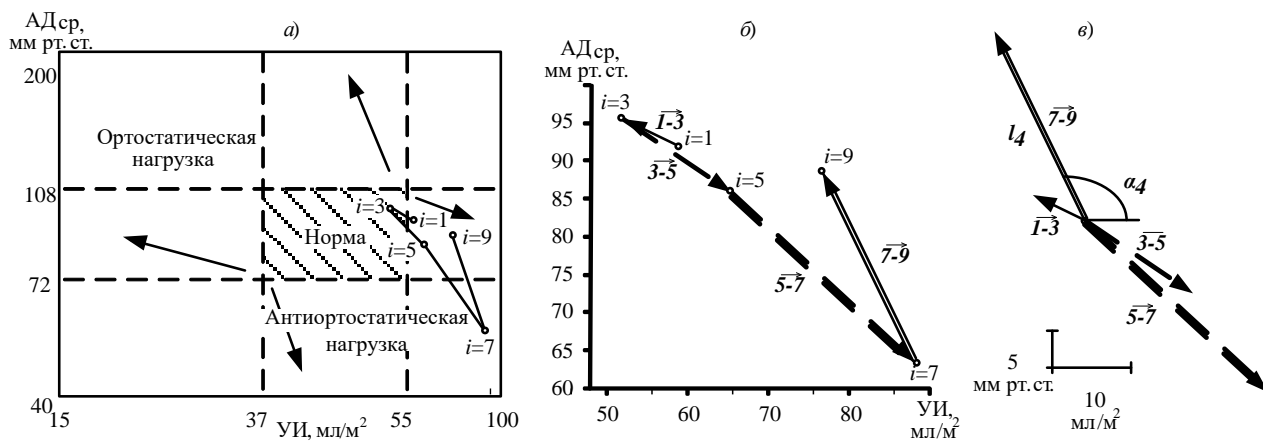


Рис. 2. Направления гемодинамических реакций при простых поструральных воздействиях (стрелки) и гемодинамический статус испытуемого ГАА в ходе этих воздействий №1 (линии) (а). Векторы изменений гемодинамического статуса (б), начала этих векторов сведены в одну точку (в)

Тогда значения $ГР > 40$ условных единиц (у.е.) соответствуют реакции большой интенсивности, $40 < ГР < 10$ у.е. – средней, $ГР < 10$ у.е. – малой.

Направления $ГР$ классифицируются следующим образом: увеличение сократимости и волемии – это угол от 0° до 90° , т.е. происходит усиление гемодинамики; уменьшение сосудистого сопротивления и антиортостатическая реакция – это угол от 0° до 90° ; увеличение сосудистого сопротивления и ортостатическая реакция – это угол от 90° до 180° ; уменьшение сократимости и волемии – это угол от 90° до 180° , т.е. происходит ослабление гемодинамики.

На пересечении трёх диапазонов интенсивности и четырёх диапазонов направлений гемодинамических реакций, таким образом, можно выделить двенадцать типов реакций, характеризующих изменения гемодинамики.

Использование векторного представления иллюстрирует рис. 2. На рис. 2а на номограмме гемодинамики испытуемого ГАА показано изменение его гемодинамического статуса в ходе поструральных нагрузок включающих в себя пять стадий (i): $i = 1$ начальное горизонтальное положение (ГП), $i = 2$ ортостатическое положение 18° (ОП), $i = 3$ промежуточное ГП, $i = 4$ антиортостатическое положение -80° (АОП), $i = 5$ заключительное горизонтальное положение. В каждом положении испытуемый находится в течение 3 минут. Переход состояния испытуемого из одного гемодинамического статуса в другой показан линиями.

На рис. 2б представлен тот же процесс в большем масштабе, линии заменены векторами, прерывистые линии векторов соответствуют антиортостатическому движению испытуемого, т.е. вниз головой; сплошные – ортостатическому движению, т.е. вверх головой, одинарные линии соответствуют нахождению испытуемого выше горизонта, а двойные – ниже.

Для наглядного представления и сравнения реакций на различные ПВ начала векторов сведены в одну точку, при этом вектор определяется длиной и углом относительно оси УИ (абсцис), в частности, длина четвертого вектора I_4 , а угол α_4 , для оценки изменений показан масштаб (рис. 2в). В приведенном примере при движении вниз головой (вектора 2 и 3) и вверх (вектора 1

и 4) видна схожая направленность изменений гемодинамического статуса. Итоговый вектор реакции отложен на этой же диаграмме. Это может быть представлено либо как сумма четырёх векторов, либо как линия между точками 1 и 5. Результирующий вектор служит для обобщенной сравнительной оценки реакций испытуемых на те или иные воздействия.

Векторное представление позволяет получить представление о степени (интенсивности) изменений гемодинамического статуса испытуемого. Они выражены через длину векторов, и направления этих изменений в сторону значительных вариаций АД или УИ, выражаемых через угол вектора относительно оси абсцисс.

IV. ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены изменения гемодинамического статуса у 15-и испытуемых в двумерном пространстве УИ и АДср. Изменения происходят в течение пяти стадий поструральных нагрузок описанных выше ($i = 1, 3, 5, 7, 9$). При этом каждая стадия обозначена соответствующим значком. Такое представление позволяет проиллюстрировать разброс и распределение у испытуемых значений УИ и АДср для соответствующих стадий ПН. Сопоставление интенсивностей и направлений реакций в течение четырёх переходов (1-3, 3-5, 5-7 и 7-9) между пятью статичными положениями ($i = 1, 3, 5, 7, 9$) обеспечено тем, что начальные точки всех векторов сведены в точку начала координат на плоскости УИ – АДср. Конечные точки этих векторов будут расположены так, как показано на рис. 3. Один вектор с длиной l_{3-5} и углом α_{3-5} , соответствующий гемодинамической реакции одного из испытуемых при его переводе из ортостатического положения в горизонтальное, показан для примера.

При переходе из ГП в ортостатическое, как и обратно, интенсивность реакций имеет различающиеся значения, зависящие от их направления, т.е. чем больше интенсивность реакции, тем больше вектора смещается в сторону роста ударного индекса. Чем больше длина вектора гемодинамической реакции, тем ближе его направление к оси абсцисс (УИ); самые короткие вектора имеют направления близкие к направлению оси ординат (АДср).

При переходе из горизонтального положения в антиортостатическое, как обратно, интенсивность реакций имеет различные значения, но с меньшим разбросом, чем при переходе из горизонтального положения в ортостатическое. При этом отсутствует зависимость интенсивности реакций и их направления.

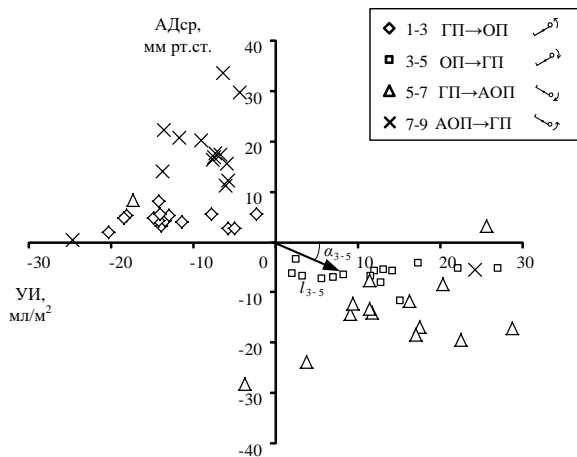


Рис. 3. Конечные точки векторов гемодинамических реакций 15-и испытуемых в течение четырёх переходов (1-3, 3-5, 5-7 и 7-9) между пятью статичными положениями ($i = 1, 3, 5, 7, 9$) при постральных нагрузках

Отметим, что практически пустыми остались 1-й и 3-й квадранты плоскости УИ – АДср (по одному исключению), соответствующие одновременному росту или падению значений УИ и АДср. Один вектор попал не в «свой» квадрант, при этом по абсолютным значениям его показатели находятся в пределах нормы. Такой эффект может быть связан с силой симпатических влияний у испытуемого, его показатель низкочастотных составляющих (LF) вариабельности сердечного ритма имеет одни из наибольших значений среди всех испытуемых при ПН. Это может свидетельствовать о том, что при переводе испытуемого в АОП не происходит достаточной вазодилатации сосудов, а значит, усиление инотропного эффекта выливается не в рост УИ, а в увеличение АД.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан способ векторного представления и классификации гемодинамических реакций в области АДср. и УИ, т. е. по интенсивности и направлению. Этот способ предназначен для интерпретации результатов исследований гемодинамики и анализа механизма гемодинамических регуляционных процессов при сложных нагрузках.

В работе подробно рассмотрена упрощенная вероятностная модель биосистемы в связи с возможностью ее использованием в качестве базовой модели патологического процесса.

Развитием данного подхода является трехмерное пространство, образованное тремя переменными (например, добавляется частота сердечного пульса) и содержащее облако точек-наблюдений. Многомерное пространство, образованное четырьмя и более переменными, содержит N-мерное «гипероблако» точек.

Следует отметить, что даже явно детерминированные модели состояний и процессов также могут быть представлены в рамках N-мерного пространства признаков. В этом случае модель будет представлять собой кривую, а не скопление точек. Эта кривая имеет строго определенное положение в многомерном пространстве признаков.

В общей форме нормальной задачей гомеостаза можно считать удержание всех биологических параметров в пределах, оптимальных для активного поведения индивида и для его самосохранения. Предложенный способ может служить адекватной оценкой возможности организма решать задачу поддержания гомеостаза.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражаю большую благодарность доктору биологических наук профессору Николаю Борисовичу Суворову за научное руководство при разработке предложенного способа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Shannaho-Khalsa D.S., Yates F.E. Ultradian sleep rhythms of lateral EEG, autonomic, and cardiovascular activity are coupled in humans // *International J. of Neuroscience*. 2000. Vol. 101(1 4). P. 21-43.
- [2] Антонов А.А. Гемодинамические аспекты гипертонической болезни // *Сердце*. 2006. Т. 5, № 4 (28). С. 210-215.
- [3] Toska K., Walloe L. Dynamic time course of hemodynamic responses after passive head-up tilt and tilt back to supine position // *J. Appl. Physiol*. 2002. Vol. 92. P. 1671-1676.
- [4] Софронов Г.А., Суворов Н.Б., Толкачев П.И., Сергеев Т.В. Влияние постральной коррекции гемодинамики на параметры сердечного ритма // *Медицинский академический журнал*. 2014. №3. С. 38-51.
- [5] Сергеев Т.В., Агапова Е.А., Анисимов А.А., Белов А.В., Гусева Н.Л., Куропатенко М.В., Новикова Т.В., Сагиров А.Ф., Суворов Н.Б., Толкачев П.И., Шабров А.В. Комплексное исследование физиологических реакций организма человека на сложные постральные воздействия // *Медицинский академический журнал*. Том 21, № 4 (2021). С. 31-46. 35.
- [6] Müller-Putz, G.R. Electroencephalography // *Handbook of Clinical Neurology*. 2020. Vol. 168. P. 249-262.
- [7] Cheshire W.P. Jr, Goldstein D.S. The physical examination as a window into autonomic disorders // *Clinical autonomic research*, 2018, 28(1), 23-33. 24.
- [8] Goldstein D.S., Cheshire W.P. Jr. The autonomic medical history // *Clinical autonomic research*, 2017, 27(4), 223-233. 40.
- [9] Petersen L.G., Petersen J.C., Andresen M., Secher N.H., Juhler M. Postural influence on intracranial and cerebral perfusion pressure in ambulatory neurosurgical patients // *American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology*, 2016, 310(1), 100-104.