

УДК 612.146+612.18

А.А. Кондыков, Ю.Г. Поморова

Роль аритмии, колебаний давления и сосудистого тонуса в вариабельности СРПВ

Введение. Скорость распространения пульсовой волны (СРПВ) была описана уравнением Моенса-Кортвега [1]. В связи с этим появилась надежда использовать такой неинвазивный, доступный метод исследования для оценки модуля упругости кровеносного сосуда. Поскольку в реальных условиях (*in vivo*) радиус, толщина стенки и модуль Юнга зависят от артериального давления, то делались попытки оценки артериального кровяного давления по данным СРПВ-метрии. Однако корреляция между СРПВ и давлением по разным литературным данным обнаруживает неустойчивый характер связи с колебанием коэффициента связи в весьма широких пределах [2]. При попытке оценки возрастных показателей СРПВ также получены весьма противоречивые данные. По одним данным [3] СРПВ с возрастом увеличивается, тогда как по другим [4] и по нашим [5] данным – имеет место снижение СРПВ. Опыты с многоточечной СРПВ-эластометрией обнаружили в 15% измерений парадоксальные реакции (снижение СРПВ) на увеличение артериального давления (локальный ортостаз [5]) в артериях верхних конечностей. Указанные противоречия не находят удовлетворительного объяснения на основе уравнения Моенса-Кортвега.

Методика. Путем применения локального ортостаза, как указывалось в работе [5], менялось внутрисосудистое давление, благодаря чему с верхней конечности рассчитано шесть значений скорости распространения пульсовой волны при разных давлениях на трассе плечо-палец. Три значения СРПВ в горизонтальном положении руки получены при одинаковом давлении, но отличались между собой условиями проведения эксперимента: рука в горизонтальном положении перед проведением эксперимента, после поднятия и после опускания руки. Время записи пульсовых кривых составило в целом около минуты. Был обследован 471 житель Алтайского края.

У 11 человек была произведена одномоментная компьютерная регистрация ЭКГ, сфигмограмм лучевой артерии на правой и левой руках в области запястья [5], регистрация производилась в течение 5 минут.

Кроме того, были использованы модельные расчеты, в основу которых была положена ап-

проксимация реальной функции внешнего диаметра артериального сосуда (полученной *in situ*) от внутрисосудистого давления, получаемой в эксперименте, с целью расчета некоторых гемодинамических параметров не измеряемых в опыте.

Результаты и их обсуждение. При проведении локального ортостаза было отмечено, что в группах, сформированных по различным признакам, усредненные значения СРПВ в горизонтальном положении руки после опускания оказывалось ниже на 1–7 %, чем СРПВ в горизонтальном положении руки после поднятия руки ($p > 0,5$), т.е. наблюдается тенденция гистерезиса. Однако при просмотре индивидуальных кривых, построенных по шести точкам и являющихся результатом усреднения пяти-семи поцикловых значений СРПВ для каждой точки, такой однонаправленной тенденции выявлено не было. Встречались разнообразные варианты, вплоть до разнонаправленных изменений давления и СРПВ, которые не находят объяснения исходя из традиционных представлений о зависимости давление-СРПВ.

Варианты изменения СРПВ от цикла к циклу на примере обследованных в леспромхозе «Боровлянка» представлены на рисунке 1. На оси X отложены поцикловые значения СРПВ в момент исследования: 1 – при горизонтальном положении руки перед пробами (при диастолическом давлении); 2 – при поднятии руки вверх (при давлении ниже диастолического); 3 – в горизонтальном после поднятия руки (при диастолическом давлении); 4 – при опускании руки (при давлении выше диастолического); 5 – в горизонтальном после опускания руки (при диастолическом давлении). По оси Y откладывались значения СРПВ. Максимальные и минимальные значения в группе отмечены сверху.

Как видно из рисунка, даже внутри каждой группы, т.е. в пределах 5–7 циклов, при одинаковых условиях эксперимента за очень короткий срок значения СРПВ сильно варьировали. Размах вариаций достигал 76%. При этом запись пульсовых кривых велась на задержке дыхания, а вариации сердечного ритма составили $\pm 2,2\%$. Следовательно, нестабильность СРПВ из-за влияния только данных факторов оказывается минимальной.

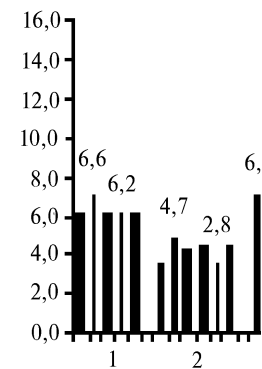
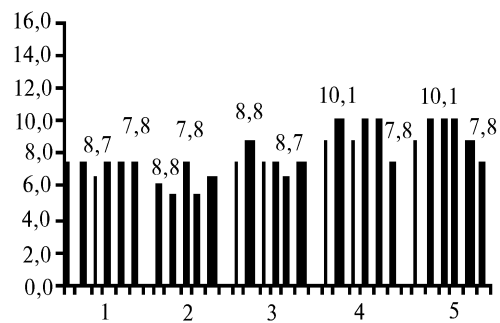
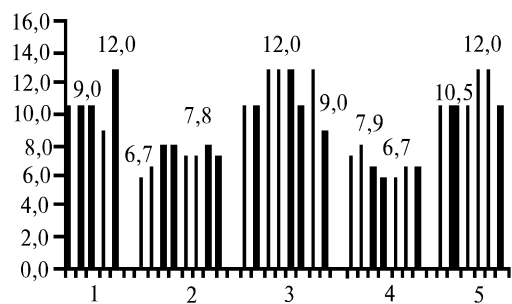
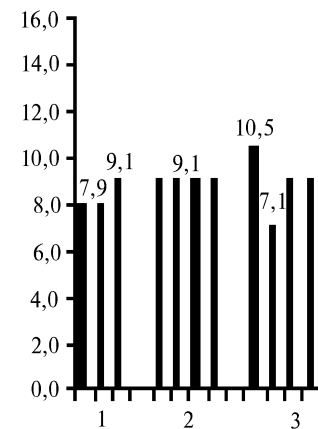
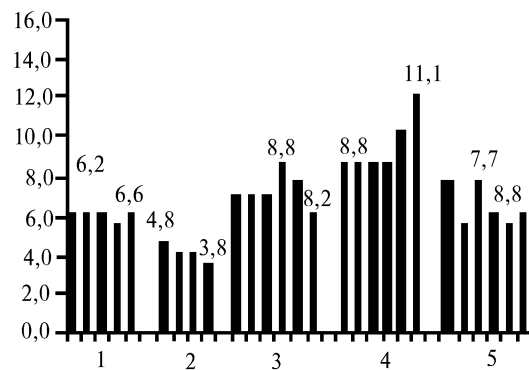
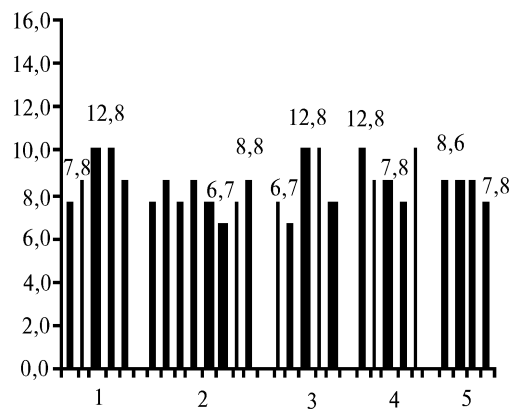


Рис. 1. Поцикловые измерения СРПВ при шести вариантах положения руки

Особенностью данных записей является то, что после каждой группы, т.е. после представленных 5–7 циклов, имеется перерыв, необходимый для стабилизации нулевой линии самописца после смены положения руки, равный в среднем 1–2 минутам.

Подобную динамику можно проследить и при непрерывной записи СРПВ в течение 5 минут. В данном случае задержки дыхания, естественно, не производилось, испытуемый располагался в положении лежа и находился в состоянии физиологического покоя. На рисунке 2 (пример 5-минутной регистрации СРПВ) четко прослеживаются периодические изменения СРПВ, среди которых можно выделить дыхательные волны, а также другие модуляции, имеющие различные период и амплитуду. Такое поведение СРПВ было характерно для всех обследованных.

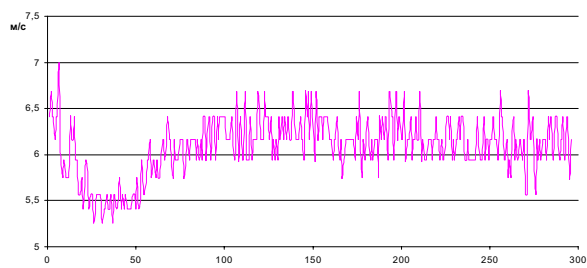


Рис. 2. Пример непрерывной записи СРПВ в течение 5 минут

С целью действительного выявления периодической динамики кривые СРПВ мы подвергли спектральному анализу с помощью разложения интегралом Фурье. Результат представлен на рисунке 3.

Анализ частотного спектра всей записи (300 отсчетов) произведенный в диапазоне от 0 до 6 рад/с (0–1 Гц, большой диапазон не имел смысла, так как сигнал был представлен с частотой 1Гц), не выявил регулярных колебаний. Хотя

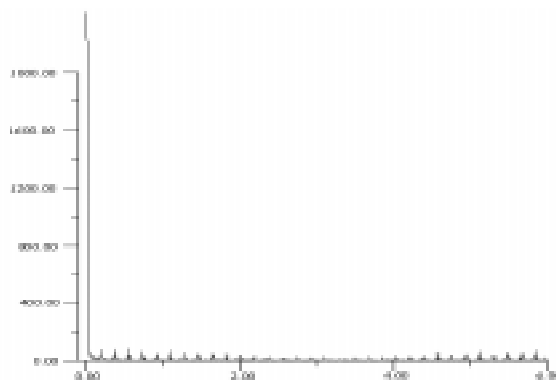


Рис. 3. Спектр частот в 5-минутной записи СРПВ (по оси абсцисс отложена угловая частота (рад/с), по оси ординат – спектральная мощность кривой СРПВ) (в относительных единицах)

в спектре выделяются некоторые составляющие, однако их мощность по сравнению с постоянной составляющей во времени (соответствует 0 рад/с) многократно меньше. Другими словами, колебания СРПВ имеют непостоянный период, крайне нестационарный, и подобны инфрадыхательным модуляциям амплитуды пульса.

Коэффициент корреляции между колебаниями СРПВ на правой и левой руках составил 0,26 ($p > 0,05$), т.е. они практически не взаимосвязаны. Индивидуальные коэффициенты в большинстве случаев также незначительны. Данные корреляционного анализа приводятся в таблице 1 (курсивом выделены значимые коэффициенты).

Используя модельные расчеты, проведенные для *a.brahialis*, мы рассчитали коэффициенты процентного прироста диаметра артерии, модуля Юнга и соответствующей им СРПВ в диапазоне давлений от 100 до 250 мм рт. ст. (т.е. растяжение сосуда от нормального до максимально напряженного). Оказалось, что меньший прирост наблюдается у диаметра сосуда, который составил 12%, а наибольший у диф-

Таблица 1
Коэффициенты корреляции между СРПВ для правой и левой рук с параметрами артериального пульса

№	ЧСС с амплитудой пульса справа	ЧСС с амплитудой пульса слева	ЧСС с СРПВ справа	ЧСС с СРПВ слева	Амплитуда пульса справа с амплитудой пульса слева	Амплитуд а пульса справа с СРПВ справа	Амплитуд а пульса слева с СРПВ слева	СРПВ справа с СРПВ слева
1	0,04188	-0,00565	-0,07681	0,02833	-0,31932	0,02846	0,51406	0,08818
2	0,05984	-0,05146	-0,07982	-0,08153	0,62194	0,46289	0,29073	0,28413
3	0,37357	-0,13157	0,06758	-0,0703	0,11666	0,29278	0,10729	0,46381
4	0,11946	-0,02515	-0,0487	0,08322	0,79428	-0,08682	0,07517	0,41695
5	0,26968	-0,1113	0,16628	0,16704	-0,16013	0,23494	0,62732	0,35108
6	0,22904	0,18425	0,132	0,07438	0,16928	0,24455	0,09119	-0,00205
7	0,295	0,4151	0,12896	0,14103	0,32468	0,19949	0,31012	0,19773
8	-0,21203	0,1735	-0,38446	0,16138	0,75757	0,77121	-0,16333	-0,10821
9	0,15753	-0,02598	0,04763	-0,24846	0,3447	0,25777	0,45401	0,12496
10	-0,08122	0,41099	0,06415	0,17797	-0,38152	-0,47571	0,45341	0,31977
11	0,15868	0,30072	0,35238	0,31764	0,3049	0,04489	0,5453	0,55985

ференциального модуля упругости – 194%, СРПВ – 53%. Те же самые коэффициенты для диапазона пульсовых колебаний давления (от 80 до 120) составили 5, 60 и 20% соответственно. При незначительном изменении АД на 5 мм рт. ст. эти коэффициенты приняли следующие значения: прирост диаметра – 0,63%, прирост модуля – 5,75%, прирост СРПВ – 2,19%. Другими словами, модуль, и соответственно СРПВ, являются более реактивными показателями по сравнению с диаметром сосуда. При колебаниях артериального давления сосуда *in vivo* (волны Траубе-Геринга) могут изменять амплитуду пульсовых колебаний. В таблице 2 приведена динамика прироста выбранных показателей для физиологического диапазона изменений диастолического давления.

Таблица 2
Процентный прирост диаметра сосуда, модуля Юнга и СРПВ при росте внутрисосудистого давления

P, мм рт. ст	D, %	E, %	СРПВ, %
40	4,0	32,6	10,7
50	3,2	26,9	9,1
60	2,6	23,1	8,1
70	2,2	20,2	7,3
80	1,8	17,8	6,6
90	1,6	15,6	5,9
100	1,4	13,6	5,1
110	1,2	11,7	4,4
120	1,1	10,1	3,8
130	1,0	8,7	3,2
140	1,0	7,7	2,8

В описанном выше эксперименте при 5-минутном измерении СРПВ проводился контроль АД на каждой минуте, который показал, что АД было практически постоянным (колебания в пределах 5 мм рт. ст.). Вариации сердечного ритма по данным ЭКГ составили в среднем $\pm 7\%$. Известно, что величина диастолического давления прямо зависит от частоты сердечного ритма. В среднем за время катакроты в сосудистой системе происходит падение давления на 40 мм рт. ст., само время катакроты составляет примерно 55% от длительности сердечного цикла. Исходя из этих условий нетрудно рассчитать, что при изменении сердечного ритма на $\pm 7\%$ диастолическое давление будет меняться на $\pm 2,8$ мм рт. ст., или на $\pm 3,5\%$. Допустив, что в эксперименте диастолическое давление варьировало в пределах 20 мм рт. ст. (80 ± 10 мм рт. ст.), что включает в себя изменение ДД за счет вариации сердечного ритма, волны давления третьего порядка, СРПВ, судя

по таблице 2, должны были колебаться в пределах 13,2%. Однако вариации СРПВ составили 26,5% для правой руки и 29,4% для левой. Коэффициенты детерминации, рассчитанные на основе коэффициентов корреляции между частотой сердечных сокращений и СРПВ, получились равными 13% и 4% для правой и левой рук соответственно, т.е. артериальное давление определяет вариации СРПВ менее чем на 13%.

Таким образом, вариации СРПВ, полученные в эксперименте, нельзя объяснить колебаниями артериального давления и флюктуациями частоты сердечных сокращений. Следовательно, большая часть вариации СРПВ связана с изменениями жесткости сосудистой стенки. Так как в течение 5 минут значительные изменения в пассивном скелетоне (эластино-коллагеновом каркасе) не могут произойти, определяющее значение будет играть активный гладкомышечный компонент сосудистой стенки, а СРПВ будет отражать, преимущественно, тонус гладких мышц сосудистой стенки.

В организме человека наблюдаются изменения тонической активности гладких мышц сосудистой стенки, не связанные с регуляцией артериального давления. Это дыхательные и инфрадыхательные модуляции тонуса, местная, эндотелий-зависимая потокиндуцируемая и ауторегуляция [6]. По-видимому, эти влияния и лежат в основе наблюдавшихся колебаний СРПВ.

Так как определяющую роль в значениях СРПВ играет тоническая активность гладких мышц, то при пассивном изменении внутрисосудистого давления, имевшем место при локальном ортостазе, несоответствие измеренного СРПВ модификациям давления (вплоть до противоположных изменений) в отдельных случаях становится понятным и вполне объяснимым. Лишь при огромной статистике ($n=500$) прослеживается влияние артериального давления. Этим же, по нашему мнению, можно объяснить и декорреляцию СРПВ и давления, встречающуюся у разных авторов [2, 7].

Выводы

1. СРПВ *in vivo* подвержена значительным вариациям. Интегральный вклад АД и аритмии пульса не превышает 14%, а 86% обусловлены колебаниями тонуса активного элемента сосудистой стенки.
2. Высокая тоногенная вариабельность СРПВ *in vivo* является ведущим фактором декорреляции зависимости давление – СРПВ и делает проблематичным суждение о динамике АД по СРПВ.

Литература

1. Pai R.G., Shah P.M. Relationship Between the Pulse Wave and Flow Velocity Wave and their Propagation Velocities in the Arterial System: Implication for the Assessment of Regional Physical Properties of the Arterial Beds // International Journal of Angiology. 1999. №8.
2. Маркман В.Г., Королева Е.Л. Анализ взаимосвязи СРПВ с измерениями АД у человека при функциональных нагрузках. // Физиология человека. 1987. №2.
3. Бисярина В.П., Яковлев В.М., Кукса П.Я. Артериальные сосуды и возраст. М., 1986.
4. Столбун Б.М. Упруго-вязкие свойства артерий в юношеском возрасте и влияние умственно-эмоционального напряжения // Возрастная физиология сердечно-сосудистой системы. М., 1980.
5. Поморова Ю.Г., Кондыков А.А., Киселев В.Д. Вариации связи скорости распространения пульсовой волны и артериального давления // Известия АГУ. 1998. №4.
6. Филатова О.В. Реакция активных и пассивных элементов стенки артериальных кровеносных сосудов в зависимости от давления и потока // Актуальные вопросы возрастной, прикладной и экологической физиологии: Сб. ст. Барнаул, 1992.
7. Namaura N. Pulse to pulse determination of diastolic pressure based on the pulse wave velocity. URL: <http://www.mei.titech.ac.jp/mei/shimizu/research/research.html>. 1997. 28 May.