

*На правах рукописи*

**Поморова  
Юлия Геннадьевна**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ  
БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
МАГИСТРАЛЬНЫХ АРТЕРИЙ ВЕРХНИХ  
КОНЕЧНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА ПО СКОРОСТИ  
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПУЛЬСОВОЙ ВОЛНЫ**

03.00.13 – физиология

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

Томск - 2005

**Работа выполнена** в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный университет федерального агентства по образованию»

**Научный руководитель:** доктор медицинских наук, профессор  
**Киселев Владимир Дмитриевич**

**Официальные оппоненты:** доктор биологических наук, профессор  
**Бушов Юрий Валентинович**

кандидат биологических наук, доцент  
**Студницкий Василий Борисович**

**Ведущая организация:** Государственное учреждение «Научно-исследовательский институт физиологии Сибирского отделения Российской академии медицинских наук»

**Защита состоится** «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2005 года в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 208.096.01 при Сибирском государственном медицинском университете (634050, г. Томск, Московский тракт, 2)

С диссертацией можно ознакомиться в научно-медицинской библиотеке Сибирского государственного медицинского университета (634050, г. Томск, пр. Ленина, 107)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2005 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Суханова Г.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Неинвазивная и корректная оценка биомеханических свойств сосудистой стенки требуется при различных заболеваниях, к числу которых относится атеросклероз, который в структуре заболеваний сердечно-сосудистой системы стоит на первом месте [Ганджа И.М., 1978].

В 60-е годы широкое распространение получил метод определения скорости распространения пульсовой волны (СРПВ) [Валтнерис, 1966]. В его основу положено уравнение Моенса–Кортвейга [McDonald, 1974], которое описывает связь СРПВ с модулем упругости Юнга, характеризующим упругие свойства сосудистой стенки. Возможность неинвазивного получения СРПВ побудили исследователей к широкому использованию данного метода для оценки упругих свойств сосудистой стенки в клинической практике [Савицкий, 1974; Коркушко, 1983; Бисярина и др., 1986; Липовецкий и др., 1988; Koji Seki, 1988; Мажбич, 1990; Ting et al., 1990; Breithaupt et al., 1995; Hasegawa, 1997; Wilkinson et al., 1998]. Однако в процессе применения СРПВ–метрии было отмечено, что получаемые у человека значения СРПВ могли сильно варьировать в пределах нескольких сердечных циклов [Валтнерис, 1966; Hofstra et al., 1994], по этой причине полученные результаты плохо воспроизводились, часто были противоречивыми и не соотносились с клиническими наблюдениями. Накопившиеся противоречия предопределили снижение интереса к данному методу [Столбун, 1980; Asmar et al., 1995]. Появились сомнения в информативности показателя СРПВ при оценке истинной величины упругости сосудистой стенки [Taylor, 1973].

Вместе с тем, при эпидемиологических обследованиях выявляются статистически значимые корреляции СРПВ с показателями общей и сердечно-сосудистой выживаемостью [Blacher et al., 1999, Кобалава, 2001]. Можно предположить, что большой статистический материал позволяет преодолеть какие-то ошибки случайного рода, связанные с СРПВ–метрической методикой.

Анализ противоречий, накопившихся при попытках индивидуальной диагностики свойств сосудов по СРПВ, на наш взгляд, может быть обусловлен тем, что СРПВ–метрия не учитывает тот факт, что стенка артериального сосуда является не однородной, не изотропной и не подчиняется закону Гука. Упругие свойства сосуда как целого определяются волокнами трех типов – эластином, коллагеном и гладкой мышцей, имеют нелинейные свойства и охарактеризовать их только одним значением модуля упругости Юнга, измеренном при одном

значении диастолического давления (ДД), нельзя [Bergel, 1972; Dobrin, 1969; Каро и др., 1981; Филатова и др., 2003]. Кроме этого, данная методика не обращает внимание на разницу по ДД в сравниваемых выборках, что может обуславливать разногласия, встреченные в литературе, так как часто сравниваются между собой значения СРПВ в группах с различным уровнем ДД [Бисярина и др., 1986; Липовецкий и др., 1988; Asmar et al., 1995; Blacher et al., 1999].

По этой причине, для корректной оценки биомеханических свойств сосудистой стенки требуется измерение СРПВ при нескольких значениях артериального кровяного давления (АД) в возможно более широком диапазоне АД.

В связи с этим **целью** настоящей работы явилась разработка метода оценки биомеханических свойств магистральных артерий верхних конечностей человека по скорости распространения пульсовой волны при контролируемых значениях внутрисосудистого артериального давления.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработать и применить в массовом обследовании способ неинвазивного управления внутрисосудистым артериальным давлением, сочетающий ортостатическое и компрессионное воздействие.
2. Подобрать адекватные критерии анализа СРПВ–метрических кривых.
3. Оценить возможности метода в выявлении возрастных, половых, экологических и других различий.
4. Изучить возможности СРПВ–метрии в оценке свойств магистральных артерий верхних конечностей у индивида.

#### **Научная новизна работы.**

Впервые разработан и применен в массовом обследовании способ неинвазивного управления внутрисосудистым давлением для получения кривых зависимостей СРПВ от давления. Предложены СРПВ–метрические показатели, адекватно характеризующие нелинейную зависимость биомеханических свойств сосудистой стенки от давления. Установлена чувствительность метода к выявлению различий, связанных с возрастом, полом, уровнем артериального давления и условиями проживания человека. Обнаружено смещение вниз СРПВ–метрических кривых у лиц старших возрастных групп и правый сдвиг кривых у лиц с артериальной гипертензией. Массовая неинвазивная СРПВ–метрия выявляет зависимости СРПВ от давления, соответствующие биомеханическим закономерностям, получаемым в эксперименте, тогда как для индивидуальной СРПВ–метрии характерен полиморфизм кривых и плохая воспроизводимость полученных

результатов. Установлено, что причиной этого являются высокоамплитудные (до 45 %), спонтанные, нерегулярные колебания тонуса активного элемента сосудистой стенки. Предложены способы оценки и интерпретации полученных данных.

**Теоретическая и практическая значимость работы.**

В работе показана природа высокой variability СРПВ магистральных артерий верхних конечностей и вскрыты причины, затрудняющие использование СРПВ–метрических методик в оценке упругих свойств сосудов у индивида. Полученные результаты расширяют теоретические представления о физиологии сосудистой стенки. Предложены способы анализа СРПВ–метрических данных, позволяющих проводить клинически пригодную, дифференцированную оценку свойств сосудов у индивида. Проведенные исследования расширяют представления о формах реагирования сосудов мышечного типа на воздействие ряда эндогенных и экзогенных (экологических) факторов.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Противоречия, накопившиеся в области практической СРПВ–метрии, обусловлены неадекватностью традиционного метода, не учитывающего нелинейную природу связи СРПВ с давлением. Предложенный метод позволяет получать комплекс показателей корректно характеризующих биомеханические свойства магистральных артерий.

2. Новый метод обнаруживает чувствительность к выявлению различий, связанных с возрастом, полом, уровнем артериального давления и условиями проживания человека.

3. Ведущая причина рассогласования СРПВ–метрических показателей и клинической картины объясняется нестационарными свойствами сосудистой стенки. Для оценки свойств сосудов у индивида требуются иные подходы, адекватные нелинейной и нестационарной природе исследуемого объекта.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований докладывались на III съезде физиологов Сибири и Дальнего Востока (Новосибирск, 1997), на XVII съезде физиологов России (Ростов-на-Дону, 1998), на XVIII съезде физиологов России (Казань, 2001), на IV съезде физиологов Сибири (Новосибирск, 2002).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, в том числе 5 статей.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 153 страницах, состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка использованной литературы, содержащего

137 отечественных и 121 иностранных источников и приложений. Работа иллюстрирована 25 рисунками и 21 таблицей.

### **КОНТИНГЕНТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Обследовано 444 жителя Алтайского края, в том числе 274 мужчины и 170 женщин в возрасте от 19 до 76 лет. 184 человека – жители сельской местности, рабочие и служащие двух леспромхозов Троицкого района. 136 человек – рабочие и служащие ремонтного завода рабочего поселка Павловск и 124 человека – рабочие и служащие автотранспортных предприятий, жители г. Барнаула.

Обследование проводилось однократно в летний период при добровольном согласии каждого испытуемого в условиях физического и психического комфорта в середине рабочего дня. Перед обследованием и после него измерялось артериальное давление (АД) методом Короткова.

По пульсовым кривым на трассе «верхняя часть плеча – палец» рассчитывалась скорость распространения пульсовой волны (СРПВ) по методике, предложенной и обоснованной А.Д. Валтнерисом (1966).

Для неинвазивного управления внутрисосудистым артериальным давлением был использован эффект ортостаза. Положение верхней конечности испытуемого варьировалось относительно уровня сердца, что приводило к изменению давления в этом сосудистом регионе («локальный» ортостаз). Первая регистрация пульсовых кривых производилась при горизонтальном положении руки. В этих условиях регистрировались пульсовые кривые, и рассчитывалась СРПВ при естественной величине ДД, поскольку конечность располагалась на уровне сердца. Затем рука пассивно поднималась вертикально вверх. В этой позиции величина ДД уменьшалась на величину гидростатического давления (ДД–гД). При последующем опускании руки вниз до вертикального положения величина ДД на эту же величину возрастала (ДД+гД). После поднятия и опускания рука возвращалась в горизонтальное положение. На каждом этапе производилась регистрация в среднем пяти – семи устойчивых пульсовых колебаний, по которым рассчитывались соответствующие величины СРПВ и ее средние значения.

Вклад гидростатического давления на исследуемом участке рассчитывался по следующей формуле:  $zD = 0,0735 \cdot h$ ; где  $zD$  – гидростатическое давление, мм рт. ст.;  $0,0735$  – коэффициент перевода мм вод. ст. в мм рт. ст.;  $h$  – половина расстояния исследуемого участка, мм.

В среднем гидростатическая прибавка составляла 20-25 мм рт. ст.

Для расширения диапазона давлений на заключительном этапе обследования регистрировалась СРПВ при минимально возможном давлении (давлении, близком к нулевым значениям –  $D_0$ ). Для этого в горизонтальном положении руки на плечо испытуемого накладывалась манжета, в которую нагнетался воздух до исчезновения пульсации лучевой артерии. После чего воздух из манжеты медленно выпускался. По первой пульсовой волне, возникающей ниже манжеты, рассчитывалась СРПВ, полученная при декомпрессии.

В целом время проведения исследования занимало 3 – 7 минуты на человека.

Сравнение между собой кривых проводилось по значениям СРПВ и по коэффициентам углов наклона  $b$  каждого участка кривой. Подобный анализ позволял оценивать форму кривых, выявлять смещение кривых относительно друг друга и сравнивать СРПВ при одинаковом давлении.

Результаты измерений подвергались статистической обработке с использованием пакета Microsoft Excel 2002 в среде Windows. Рассчитывались средние значения и ошибка среднего ( $M \pm m$ ). Различия принимались существенными при  $p < 0,05$ .

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### СРПВ–метрическая кривая

Применение «локального» ортостаза и манжеточной компрессии позволило неинвазивно варьировать внутрисосудистое давление и для каждого испытуемого получать значения СРПВ при четырех разных значениях давления и строить по полученным данным СРПВ–метрические кривые.

На рисунке 1 представлена СРПВ–метрическая кривая, построенная по средним значениям данных, полученным для всей выборки испытуемых.

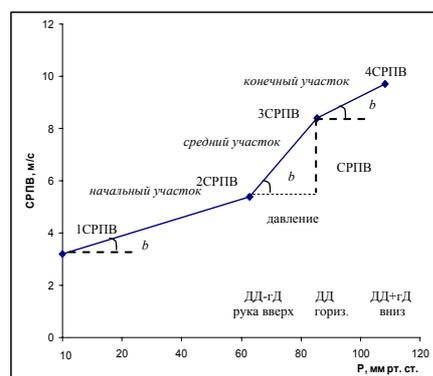


Рис. 1. СРПВ–метрическая кривая для всей выборки испытуемых ( $n = 444$ )

Из рисунка видно, что зависимость СРПВ от давления нелинейная и в диапазоне давлений от 10 до  $108,3 \pm 11,5$  мм рт. ст. имеет S-образный характер. На представленной кривой отчетливо выявляются три участка – начальный, средний и конечный (правый), характеризующие соответствующие изменения величины СРПВ в различных диапазонах давления. Хорошо заметно, что обозначенные участки отличаются значениями СРПВ и величиной угла наклона (коэффициент **b**), который рассчитывался, как отношение изменения СРПВ в данном диапазоне давления к изменению давления.

S-образный характер зависимости модуля упругости Юнга от давления получали в острых экспериментах Р.В. Dobrin et al. (1969), О.В. Филатова (1993, 2003), А.В. Требухов (2002). Схожую форму зависимости между СРПВ и давлением в модельных экспериментах описывал А.А. Кондыков (2002).

О.В. Филатова (1993, 2003), применяя для анализа подобных данных трехкомпонентную модель строения сосудистой стенки [Фолков, 1976], приходит к выводу о том, что S-образность обусловлена различными свойствами входящих в ее структуру элементов: эластина, гладкой мышцы и коллагена. В области малых давлений (от 0 до ~ 60 мм рт. ст.) упругие свойства сосуда в большей степени определяются эластиновыми волокнами. В диапазоне давлений выше 60 мм рт. ст. упругие свойства сосудистой стенки определяются свойствами эластина и функционированием активной гладкой мускулатуры. Вовлечение коллагена происходит при более высоких значениях давления (более 160 мм рт. ст.).

Анализ полученной нами СРПВ–метрической кривой показывает, что ее начальный участок совпадает с диапазоном давлений, где по результатам инвазивных экспериментов упругие характеристики сосуда определяются преимущественно свойствами эластинового компонента сосудистой стенки. Диапазон давлений, приходящийся на средний и конечный (правый) участок, обусловлен свойствами эластина и гладкой мускулатуры сосудистой стенки.

Численные расчеты с использованием формулы Моенса–Кортвейга [McDonald, 1974], по минимальному и максимальному значению СРПВ, которые встречались в наших исследованиях, выявили диапазон значений  $E$  в пределах от  $0,03 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup> до  $5 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>, что соответствовало значениям модуля упругости Юнга для эластина и гладкой мышцы. То есть, в затрагиваемом нашими исследованиями диапазоне давлений СРПВ–метрическая кривая дает возможность судить о биомеханических характеристиках сосудов с учетом изменения

свойств эластинового и гладкомышечного компонентов сосудистой стенки.

### Возраст

Возрастные динамики СД и ДД в группах 19-30, 31-40, 41-50, 51-60 и 61-76 лет подтвердили описанные S. Franklin et al. (1997, 1999), Ж.Д. Кобалава (2001) закономерности, полученные в крупных эпидемиологических обследованиях: с возраста 31-40 лет, уровень СД и ДД был существенно выше по сравнению с группой 19-30 лет. При этом возрастная динамика СРПВ носила противоположный характер. Начиная с возраста старше 40 лет, выявлялись достоверно более низкие значения СРПВ во всем диапазоне представленного давления по сравнению со значениями в группе 19-30 лет (табл. 1), что при построении СРПВ–метрических кривых проявлялось смещением их относительно друг друга вниз (рис. 2).

СРПВ–метрические кривые во всех представленных на рисунке возрастах имели S-образный характер зависимости в диапазоне давлений от 10 до  $108,3 \pm 11,5$  мм рт. ст., что отражалось повышением коэффициента угла наклона (**b**) в средней части кривых и снижением его в правой части (табл. 1).

Кроме смещения СРПВ–метрических кривых вниз с возрастом прослеживались некоторые закономерности изменения их формы, оцениваемые по углам наклона на различных участках.

Таблица 1  
Скорость распространения пульсовой волны ( $M \pm m$ ) и коэффициент угла наклона отдельных участков СРПВ–метрических кривых в различных возрастных группах

Возрастная группа	начальная часть кривой		средняя часть кривой		конечная часть кривой		
	1СРПВ	b	2СРПВ	b	3СРПВ	b	4СРПВ
19-30 лет, n=104	$3,5 \pm 0,07$	0,035	$5,5 \pm 0,13$	0,152	$9,0 \pm 0,16$	0,037	$9,9 \pm 0,18$
31-40 лет, n=125	$3,4 \pm 0,06$	0,036	$5,6 \pm 0,13$	0,132	$8,6 \pm 0,14$	0,049	$9,8 \pm 0,17$
41-50 лет, n=93	$3,2 \pm 0,08$ *	0,037	$5,6 \pm 0,16$	0,123	$8,4 \pm 0,16$ *	0,078	$10,1 \pm 0,23$
51-60 лет, n=102	$2,8 \pm 0,06$ *	0,034	$5,1 \pm 0,12$ *	0,112	$7,7 \pm 0,14$ *	0,070	$9,2 \pm 0,17$ *
61-76 лет, n=20	$2,8 \pm 0,11$ *	0,032	$4,9 \pm 0,34$ *	0,098	$7,0 \pm 0,36$ *	0,068	$8,6 \pm 0,33$ *

Примечание: \* – различия достоверны относительно группы 19-30 лет

Изменения коэффициента  $b$  начального участка СРПВ–метрических кривых с возрастом выражены незначительно (в среднем на 9 %) (табл. 1). Хорошо прослеживались возрастные динамики изменений углов наклона в средней и правой части кривых. С возрастом наблюдалось снижение угла наклона в средней части кривых и увеличение его на конечном участке. В группе 61-76 лет коэффициент  $b$  среднего участка оказывался на 36 % меньше, конечного – на 84 % больше, чем в группе 19-30 лет. То есть, с возрастом наблюдалась тенденция приближения формы СРПВ–метрической кривой к восходящей ветви параболы, при этом наибольшие изменения выявлены в диапазоне давлений от  $62,7 \pm 11,4$  до  $108,3 \pm 11,5$  мм рт. ст.

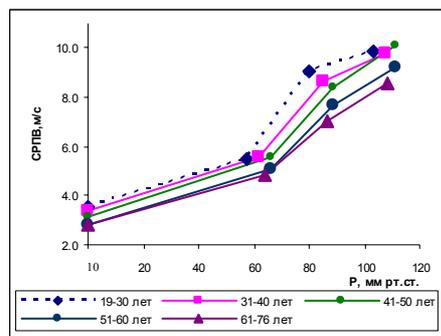


Рис. 2. СРПВ–метрические кривые различных возрастных групп

По данным D.H. Bergel (1961, 1972), К. Каро и др. (1981), Dobrin (1969), О.В. Филатовой и др., (2003),

изменение функциональной активности гладкой мышцы может значительно изменять форму зависимости от S–образной – в сосудах с тонизированной гладкой мускулатурой, до формы, напоминающей ветвь параболы, в сосудах с выключенной папаверином гладкой мышцей. В большей степени это проявляется в диапазоне давлений от ~ 60 до ~150-160 мм рт. ст., что позволило связать данный диапазон давлений преимущественно со свойствами гладкой мышцы сосудистой стенки, а изменение формы кривой в этом диапазоне связывать с изменениями ее активности. Анализ литературных данных свидетельствует о значительных качественных преобразованиях и эластической и гладкомышечной ткани с возрастом, носящих преимущественно деструктивный характер [Пурия и др., 1980; Фрунташ, 1982; Анестиади и др., 1983; Каро и др., 1981; Atkinson, 1998]. При этом, по данным Б.А. Пурия и др. (1980), В.Х. Анестиади и др. (1983), выраженность изменений гладкой мышцы может превышать масштабы изменений остальных тканевых элементов.

Таким образом, предложенный метод выявляет существенные различия по СРПВ–метрическим показателям между группами 19-30 и

старше 50 лет, которые проявляются смещением СРПВ–метрических кривых вниз и изменением углов наклона различных участков кривых у лиц в старших возрастных группах.

### Пол

Различия СРПВ–метрических показателей между мужчинами и женщинами выявлены в диапазоне давлений от  $85,5 \pm 11,3$  до  $108,3 \pm 11,5$  мм рт. ст. (рис. 3).

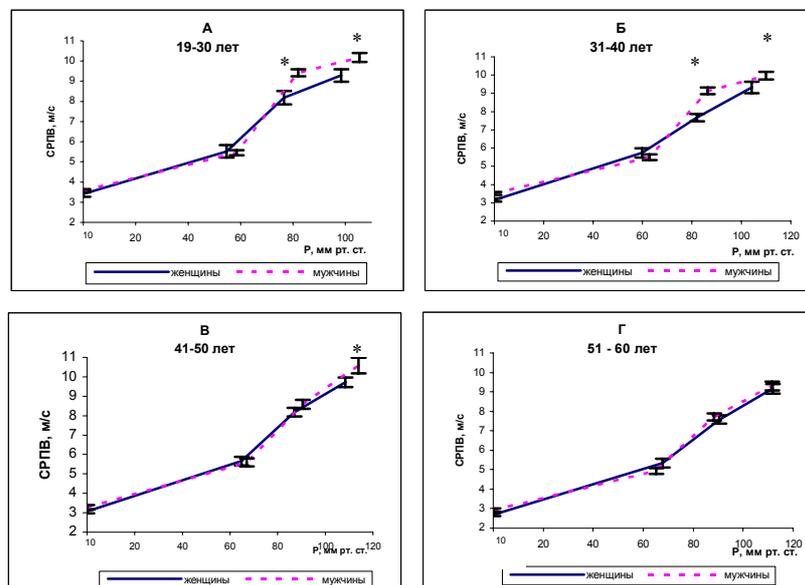


Рис. 3. СРПВ–метрические кривые ( $M \pm m$ ) для мужчин и женщин в возрастных группах 19-30 лет (А), 31-40 лет (Б), 41-50 лет (В) и 51-60 лет (Г) (\* – достоверные различия)

В группе 19-30 лет кривые имели одинаковую S-образную форму со смещением правой части кривых у женщин вниз (рис. 3А). В группе 31-40 лет у женщин выявлялось приближение формы кривой к ветви параболы (рис. 3Б). В группе 41-50 лет различия сглаживались (рис. 3В), а у лиц старше 50 лет полностью отсутствовали (рис. 3Г).

### Территория проживания человека

У жителей р.п. Павловск и Троицкого р-на возрастные изменения СРПВ–метрических показателей напоминали результаты, полученные в

целом по выборке (рис. 4Б, В). Кривые во всех возрастах имели S-образную форму и смещались вниз у лиц старших возрастных групп. Жители г. Барнаула отличались низкими значениями СРПВ в группах 19-30 и 31-40 лет, по этой причине возрастного смещения кривых у них выявлено не было (рис. 4А).

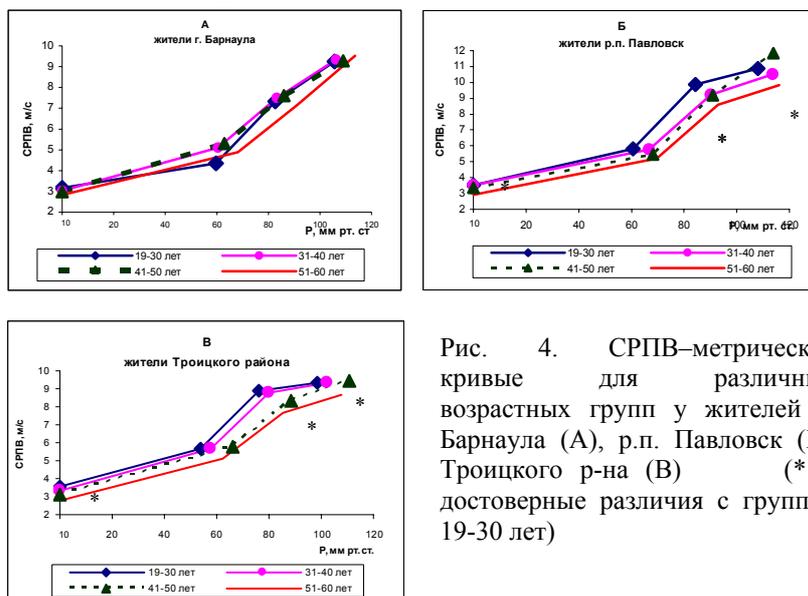


Рис. 4. СРПВ–метрические кривые для различных возрастных групп у жителей г. Барнаула (А), р.п. Павловск (Б), Троицкого р-на (В) (\* – достоверные различия с группой 19-30 лет)

Городские жители, особенно в возрастах 19-30 и 31-40 лет, отличалась от своих сверстников из Троицкого р-на и р.п. Павловск существенно более низкими значениями СРПВ (на 10-26 %) и не характерной для молодых людей приближенной к ветви параболы формой СРПВ–метрических кривых. По значениям АД горожане и сельские жители не отличались между собой.

На рис. 5 и 6 представлены СРПВ–метрические кривые для мужчин и женщин. Среди представленных групп в большей степени отличались результаты, полученные у жителей г. Барнаула.

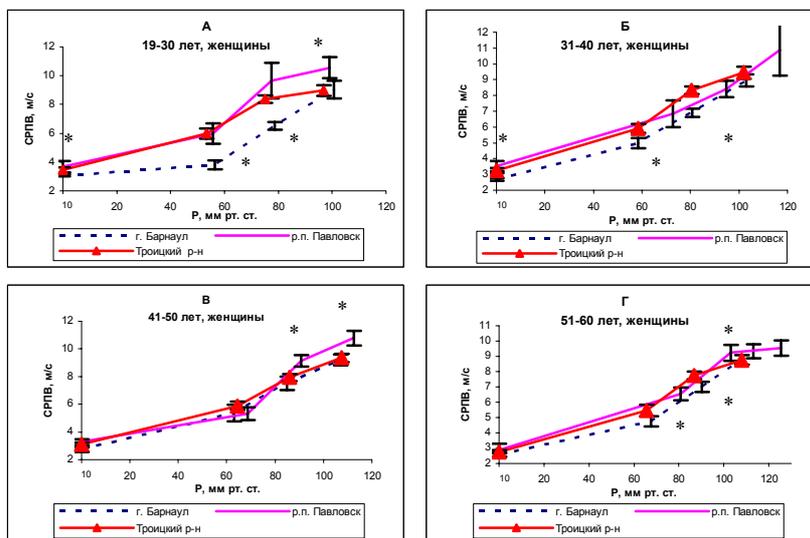


Рис. 5. СРПВ–метрические кривые ( $M \pm m$ ) женщин г. Барнаула, р.п. Павловск и Троицкого района в возрастных группах 19-30 лет (А), 31-40 лет (Б), 41-50 лет (В) и 51-60 лет (Г) (\* – достоверные различия)

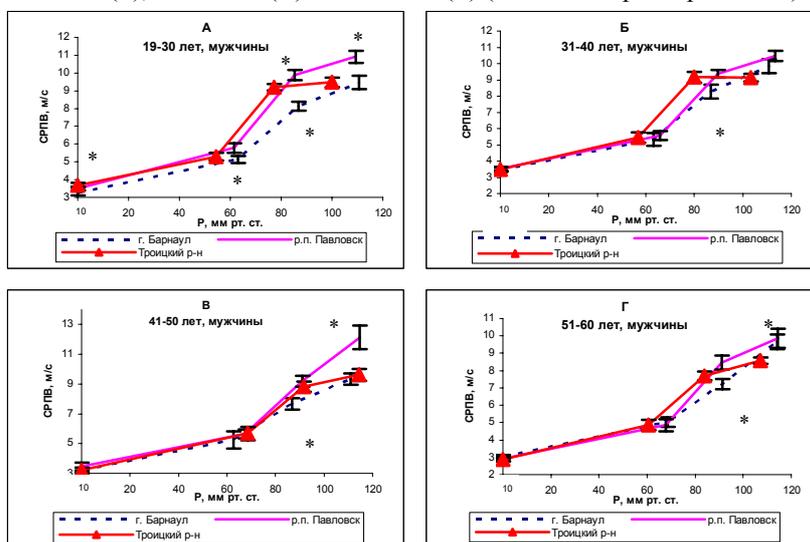


Рис. 6. СРПВ–метрические кривые ( $M \pm m$ ) мужчин г. Барнаула, р.п. Павловск и Троицкого района в возрастных группах 19-30 лет (А), 31-40 лет (Б), 41-50 лет (В) и 51-60 лет (Г) (\* – достоверные различия)

СРПВ–метрические кривые практически во всех поло-возрастных группах у горожан имели самые низкие значения СРПВ и приближенную к ветви параболы форму кривых. Отличия от других территорий были наиболее выражены в возрастной группе 19-30 лет (рис. 5А и 6А).

Если у мужчин смещение вниз СРПВ–метрических кривых в этой возрастной группе было выражено умеренно (18 %), то у женщин оно было аномально большим (37 %). Сдвиг кривых вниз преобладал в диапазоне давлений среднего и правого участка СРПВ–метрических кривых.

У жителей р. п. Павловск и у мужчин, и у женщин правый участок кривых выделялся наиболее высокими значениями СРПВ из всех представленных территорий, различий на других участках кривых не выявлено.

Для жителей Троицкого р-на была характерна S–образная форма кривых во всех возрастах.

Выявленные СРПВ–метрическим методом различия в представленных группах показывают, что свойства артерий верхних конечностей человека в значительной степени определяются факторами его условий проживания.

#### **Уровень артериального давления**

СРПВ–метрический анализ выявил у лиц с повышенным давлением существенно более высокие значения СРПВ по сравнению с нормотониками, что согласуется с данными L.A. Geddes et al. (1981), T.P. Finnegan et al. (1985), R. Asmar et al. (1995).

Формы кривых у нормотоников и у лиц с повышенным давлением оказались сходными, однако, по причине значительных различий по давлению в сравниваемых группах, сопоставляемые значения СРПВ у лиц с повышенным давлением были смещенными вправо относительно друг друга. Анализ кривых в одинаковом диапазоне давлений, ограниченном 100 – 120 мм рт. ст., показал, что у лиц с нормальным давлением в этом диапазоне выявлялась S–образная форма зависимости СРПВ–метрических кривых, а у гипертоников – близкая к ветви параболы. Выраженная точка перегиба у лиц с гипертензией лежит за пределами указанного диапазона.

Таким образом, у гипертоников выявляется смещение кривой вправо, в зону более высоких давлений, являющихся для них более характерными. Разница по давлению в сравниваемых группах не сказывалась на возрастной динамике СРПВ: и у нормотоников, и у лиц с повышенным давлением с возрастом наблюдалось снижение СРПВ,

кроме этого, выявлялись различия между мужчинами и женщинами по значениям СРПВ и по форме СРПВ–метрических кривых в правой части.

#### Характер трудовой деятельности

СРПВ–метрический анализ в группе водителей, рабочих и инженерно-технических работников одинакового пола - возрастного состава жителей г. Барнаула существенных различий по СРПВ и по форме кривых не показал. Выявленные особенности СРПВ–метрических данных, полученные в одинаковых профессиональных группах, но проживающих на различных территориях, в большей степени отражали закономерности, присущие различным территориальным выборкам.

### ИНДИВИДУАЛЬНАЯ СРПВ–МЕТРИЯ

#### Формы кривых

Индивидуальная СРПВ–метрия выявила разнообразие форм кривых, встречаемых у испытуемых, среди которых можно выделить три характерные разновидности. Первая – ветвь параболы (испытуемый Т. С., 41 год, рис. 7). Вторая – S–образная форма (испытуемый Г.А., 21 год, рис. 7). Третья – в правой части кривой с ростом давления СРПВ снижалась (испытуемый С.Н., 38 лет, рис. 7). Количество кривых, когда на каком-либо участке с ростом давления СРПВ или не увеличивалась или даже снижалась, составило 25 %, максимальное число подобных аномалий встречалось в правой части СРПВ–метрических кривых (23 %). Выявленное нами снижение СРПВ с ростом давления на некоторых участках индивидуальных кривых не проистекает из представлений классической биомеханики о связи СРПВ с давлением [McDonald, 1974]. По этой причине подобные кривые мы назвали «аномальными».

Прослеживались некоторые особенности по количеству «аномальных» кривых в различных группах. В группе 19-30 лет – 32 %, 31-40 лет – 29 %, в группе 41-50 лет – 14 %, в группе старше 50 лет – 16 %. У мужчин – 24 %, у женщин – 22 %; у сельских жителей Троицкого р-на – 35 %, у жителей р. п. Павловск – 18 %, у жителей г. Барнаула – 10 %.

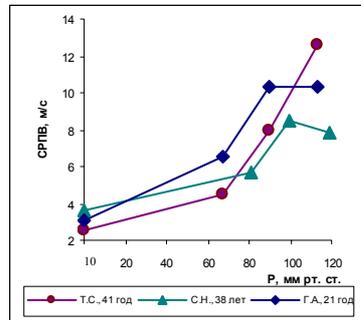


Рис. 7. Индивидуальные СРПВ–метрические кривые испытуемых Т.С., 41 год, С.Н., 38 лет и Г.А., 21 год

Выборка численностью в 21 человек обследовалась повторно спустя 14 дней. В данной выборке при первоначальном обследовании у двух испытуемых были «аномальные» формы кривых. Повторные результаты показали высокую вариабельность СРПВ у человека. У одних испытуемых СРПВ претерпевало значительные изменения по сравнению с предшествующими данными, у других это было выражено в меньшей степени. Анализ данных при повторном обследовании ни у одного испытуемого «аномальной» формы кривой не выявил. При этом, в отличие от СРПВ, артериальное давление проявляло себя как более стабильный показатель.

### **Гистерезис**

Из четырех точек, используемых для построения индивидуальных кривых, вторая и четвертая, полученные при поднятии руки вверх и ее опускании, являлись результатом усреднения данных 5–7 поцикловых значений СРПВ. Третья точка (рука на горизонтальной опоре) была получена в трех вариантах: первое значение было получено перед проведением проб (СРПВ1); второе – при увеличении давления при опускании руки из верхнего положения на горизонтальную опору, т.е. при нагружении (СРПВ2); третье – при снижении давления при поднятии руки из вертикального положения на горизонтальную опору, т.е. при разгрузении (СРПВ3).

В классической биомеханике кривые «нагружение – разгрузение» для вязко-упругого материала не совпадают, образуя петлю гистерезиса [Dobrin P.V. et al., 1969; Филатова О.В., 1992, 1993]. Площадь этой петли зависит от состояния гладкой мышцы сосуда, а максимальная разница между значениями выявляется в диапазоне давлений, близких к физиологическим значениям. Третья точка СРПВ–метрической кривой как раз попадает в данный диапазон давлений.

При сравнении значений СРПВ2 и СРПВ3 между собой у испытуемых обнаруживались различные варианты: СРПВ2 была и выше и ниже СРПВ3, т.е. вид петель на индивидуальных кривых был разнообразным, также встречались случаи, когда эти показатели были равны между собой.

Методом парного двухвыборочного t-теста для средних были показаны существенно более высокие значения СРПВ3 относительно СРПВ2 в возрастах 19-30 ( $P < 0,01$ ) и 31-40 ( $P < 0,05$ ) лет (табл. 2). Во всех остальных возрастах значимые различия между СРПВ2 и СРПВ3 не выявлены ( $P > 0,05$ ).

Таблица 2

Значения СРПВ2 и СРПВ3 ( $M \pm m$ ) в различных группах

Группы	Кол-во чел.	СРПВ2	СРПВ3	
19-30 лет	101	8,6±0,14	9,1±0,16	$P < 0,01$
31-40 лет	115	8,3±0,16	8,6±0,14	$P < 0,05$
41-50 лет	87	8,3±0,20	8,3±0,19	$P > 0,05$
старше 50 лет	123	7,5±0,16	7,6±0,20	$P > 0,05$

### Поцикловая СРПВ–метрия

Анализ поцикловых значений СРПВ выявил за 5–7 сердечных циклов вариации данного показателя достигающие 44,8 %. Показатели сердечного ритма варьировали в пределах от 0 до 28 %, но у подавляющего большинства (в 92 % случаев) они не превышали 10 %. Вариации амплитуды пульсовых волн составила от 0 % до 16,7 %.

Корреляционный анализ между СРПВ и значениями R–R интервалов показал, что у испытуемых коэффициент корреляции мог быть от  $-0,83$  до  $+0,65$ , а в целом по группе  $+0,06$  ( $P \gg 0,05$ ). При этом коэффициент корреляции за 5–7 циклов в различных положениях руки у одного и того же человека мог достигать значений от  $+1,0$  до  $-1,0$ .

Корреляционный анализ между СРПВ и амплитудой пульсовой волны показал, что у испытуемых коэффициент корреляции мог быть от  $-0,79$  до  $+0,70$ , а в целом по группе составили  $-0,11$  ( $P \gg 0,05$ ). При этом за 5–7 сердечных циклов у одного и того же человека этот показатель мог колебаться от  $+1,0$  до  $-0,88$ .

Представленные данные показывают, что вариации R–R и амплитуды пульсовой волны и обусловленные этим изменения ДД не являются ведущими в выявленной вариабельности СРПВ. То есть, имеет место наложение влияния каких-то других, более сильных факторов.

Соотнесение полученных у испытуемого С. (муж., 34 года) поцикловых значений СРПВ при диастолическом давлении (в горизонтальном положении руки) с пятиминутной мониторинговой кривой А.А. Кондыкова и др. (2001, 2002), отражающей хаотические колебания значений СРПВ, обнаруживает их схожесть и указывает на роль нестационарности гладкомышечного компонента сосудистой стенки в выявленной вариабельности СРПВ. Время, в течение которого производилась запись пульсовых кривых в нашем исследовании, соотносится со временем записи мониторинговой кривой (в среднем пять–семь минут). Отличия от мониторинговой записи СРПВ в наших исследованиях заключались в том, что СРПВ в течение данного времени

регистрировались не постоянно, а фрагментами ~ по 7 значений с промежутками времени, необходимыми для смены положения руки и стабилизации нулевой линии.

Сравнение с мониторинговой кривой показало, что полученные в наших исследованиях усредненные за 5-7 циклов значения СРПВ будут зависеть от того, в какие моменты времени были проведены замеры СРПВ. Так как каждая точка на СРПВ–метрической кривой получена через определенный промежуток времени, т.е. не одновременно, то изменение свойств сосудистой стенки за это время может даже перекрыть влияние изменения давления за счет ортостаза на сосудистую стенку, что объясняет получение «аномальной» формы зависимости СРПВ от давления. Этим также объясняется получение коэффициентов корреляции между СРПВ и показателями пульса у одного и того же человека за период исследования от  $-1$  до  $+0,88$ .

В пользу роли гладкой мышцы в выявленной изменчивости СРПВ свидетельствуют полученные нами результаты. Максимальное количество «аномалий», когда при увеличении давления СРПВ снижалась, выявлялось в диапазоне давлений  $85,5 \pm 11,3 - 108,3 \pm 11,5$  мм рт. ст. Исследования Bergel D.H. (1961, 1972), Dobrin (1969) и О.В. Филатовой и др. (2003) показали, что именно в данном диапазоне давлений активность гладкомышечного компонента в наибольшей мере влияет на свойства сосудистой стенки. Встречаемость «аномальных» по форме кривых в возрастной группе 19-30 лет была самой большой (32 %) в сравнении с другими возрастными (у лиц старше 50 лет – 16 %). Анализ литературы свидетельствует о значительных качественных преобразованиях эластической и гладкомышечной ткани с возрастом, носящих преимущественно деструктивный характер [Пуриня и др., 1980; Анезиади и др., 1983; Каро и др., 1981]. При этом, по данным Б.А. Пуриня и др. (1980), К. Каро и др. (1981), выраженность изменений гладкой мышцы может превышать масштабы изменений остальных тканевых элементов.

Таким образом, индивидуальные СРПВ–метрические кривые являются искаженными за счет модуляции пассивных характеристик сосуда спонтанными изменениями тонуса активного компонента, которые произошли за время измерений. Эта зашумленность происходит из свойств исследуемого объекта и носит характер ошибки случайного рода, которая может быть устранена накоплением данных, что решается в случае популяционных исследований.

Снижение влияния спонтанных изменений свойств сосудистой стенки для оценки пассивных свойств сосудов у индивида требует накопления данных с последующим их усреднением в каждом

положении руки. Численные расчеты показали, что для достижения уровня значимости 0,05 необходимо регистрировать не менее 40 поцикловых значений СРПВ в каждом положении руки, усреднять полученные данные, и по ним строить индивидуальные СРПВ–метрические кривые.

Другой способ индивидуальной СРПВ–метрии заключается в анализе минимальных и максимальных значений СРПВ, обнаруженных у испытуемого за все время исследования. Из суммирования данных экспериментальной биомеханики [Пурина Б.А. и др., 1980; Каро К. и др., 1981; Филатова О.В., 1993, 2003] и неинвазивной СРПВ–метрии следует, что минимальные значения СРПВ, встречающиеся у индивида, отражают вклад пассивного компонента сосудистой стенки в интегральный модуль Юнга  $E$ , который в данном случае складывается из свойств эластина и пассивных эластических свойств релаксированной гладкой мышцы. А максимальные значения СРПВ – или включение коллагена (что может произойти при значительном увеличении внутрисосудистого давления), или изменение функционального состояния гладкой мышцы. Так как в затрагиваемом нашими исследованиями диапазоне давлений коллаген в противодействие давлению не вступал, а, значит, не вносил вклад в биомеханические характеристики сосудистой стенки, за время исследования структурные изменения в эластино–колагеновом каркасе произойти не могли, а возможные изменения давления не в состоянии количественно объяснить выявленную у испытуемого вариабельность СРПВ, из этого следует, что максимальные значения СРПВ определяются свойствами растянутого диастолическим давлением эластина и активностью гладкой мышцы сосудистой стенки. В этом случае разница между максимальным и минимальным значением СРПВ, полученная у испытуемого, отражает свойства наиболее лабильного элемента сосудистой стенки – гладкой мышцы.

Полученные данные могут служить для дифференцированной оценки свойств активного и пассивного элементов сосудистой стенки, а параметры вариабельности СРПВ служить для оценки функциональности активного компонента сосудистой стенки.

Перспективным методом СРПВ–метрического анализа может быть расширение СРПВ–метрии методом односистолической СРПВ–метрии [Кондыков, 2002], когда получают СРПВ в диапазоне давлений от диастолического до систолического по запаздыванию анакрот сфигмограмм лучевой артерии, зарегистрированных на расстоянии 2 см одна от другой. Такой способ практически полностью исключает вышеописанную ошибку за счет нестационарности свойств активного

элемента и позволяет расширить диапазон исследования на величину пульсового давления. При данном способе становится возможной корректная СРПВ–метрия по максимумам сфигмограмм, поскольку исключается ошибка за счет изменения крутизны анакроты дистально регистрируемой сфигмограммы, а возможности неинвазивной СРПВ–метрии приближаются к информативности острого опыта.

### **ВЫВОДЫ**

1. Предложенный способ неинвазивного управления внутрисосудистым артериальным давлением позволяет получать СРПВ–метрические кривые, характеризующие свойства магистральных артерий верхних конечностей человека, аналогичные полученным в эксперименте на изолированном сосуде.

2. Предложенный метод обнаруживает:

А) Возрастное смещение вниз СРПВ–метрических кривых во всем представленном диапазоне давлений, изменение углов наклона различных участков кривых, «схлопывание» петли гистерезиса у лиц старших возрастных групп.

Б) Наибольшие различия СРПВ–метрических показателей между мужчинами и женщинами выявлялись в диапазоне давлений 75 – 120 мм рт. ст. (правая часть кривых). В возрастной группе 19-30 лет кривые имели одинаковую S–образную форму со смещением правой части вниз у женщин. В группе 31-40 лет у женщин наблюдалось увеличение угла наклона и приближение формы кривой к ветви параболы. В группе 41-50 лет различия сглаживались, а у лиц старше 50 лет отсутствовали.

В) Во всех поло-возрастных группах жителей Троицкого р-на наблюдалась S–образная форма СРПВ–метрических кривых. У жителей р.п. Павловск получены более высокие значения СРПВ в правой части кривых. У жителей г. Барнаула выявлено умеренное смещение вниз СРПВ–метрических кривых во всех поло-возрастных группах и аномально большое в группе 19-30 лет у женщин (на 37 %) и у мужчин (на 18 %). Городским жителям во всех поло-возрастных группах была присуща приближенная к ветви параболы форма СРПВ–метрических кривых

Г) У лиц с гипертензией всех территорий выявлен сдвиг СРПВ–метрической кривой вправо.

Д) Отличий СРПВ–метрических показателей у лиц с разным характером трудовой деятельности не обнаружено.

3. Индивидуальная СРПВ–метрия выявила полиморфность и нестабильность формы кривых. Вариабельность СРПВ за пять-семь

сердечных циклов достигала 45 %. Коэффициенты корреляции между СРПВ и показателями пульса за период исследования на значимом уровне ( $p < 0,05$ ) менялись от +1 до -0,88. Причиной выявленной нестабильности СРПВ является 45 % размах спонтанных колебаний тонуса гладкой мышцы сосудистой стенки.

4. Корректная, клинически пригодная оценка свойств сосудистой стенки у индивида на 5 % уровне значимости требует регистрации не менее 40 поцикловых значений СРПВ для каждого положения руки и в совокупности с оценкой минимальных и максимальных значений СРПВ за период всего исследования дает возможность оценки индивидуальных свойств активного и пассивного элементов сосудистой стенки.

#### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

1. Поморова Ю.Г., Киселев В.Д., Гольберг Я.С. Возрастные и половые различия эластометрических свойств артерий эластического и мышечного типов у работников леспромхозов Алтайского края // Актуальные вопросы возрастной, прикладной, и экологической физиологии. - Барнаул: АГУ, 1992. - С. 11-16.
2. Поморова Ю.Г., Киселев В.Д. Некоторые показатели гемодинамики у работников леспромхозов Алтайского края // Здоровье населения Сибири. Т. IV. - Новокузнецк: СО РАМН, 1993. - С. 23-24.
3. Поморова Ю.Г., Филатова О.В., Киселев В.Д., Ким А.В. Теоретические и практические аспекты артериальной эластометрии // Республиканская научная конференция физиологов, посвященная 95-летию со дня рождения М.В. Сергиевского. - Самара, 1993. - С. 59-60.
4. Поморова Ю.Г., Гольберг Я.С., Киселев В.Д., Филатова О.В. Эластометрия артериального русла верхних конечностей // I Науч. конф. "Перспективные методы функциональной диагностики", Барнаул, 20-21 окт. 1994: Тез. докл. - Барнаул, 1994. - С. 25-26.
5. Поморова Ю.Г. Скрининговая артериальная эластометрия взрослого населения Алтайского края // Фундаментальные, прикладные и клинические проблемы физиологии. - Барнаул: АГУ, 1996. - С. 39-44.
6. Поморова Ю.Г., Киселев В.Д. Половозрастные различия некоторых показателей гемодинамики работников леспромхозов Алтайского края // Проблемы медицины труда: Сб. тез. - Новокузнецк: СО РАМН, 1996. - С. 64.
7. Поморова Ю.Г. Многоточечная артериальная эластометрия верхних конечностей: "нормальные" и "аномальные" кривые // 3-ий Съезд физиологов Сибири и Дальнего Востока, 3-6 сент. 1997 г.: Сб. тез. - Новосибирск: Ин-т физиологии СО РАМН, 1997. - С. 179 -180.

8. Поморова Ю.Г. Зависимость от артериального давления эластомерических показателей артериального русла человека //XVII съезд Всероссийского физиологического общества им. И.П. Павлова: Тез. докл. - Ростов-на-Дону, 1998. - С. 316.
9. Поморова Ю.Г., Кондыков А.А., Киселев В.Д. Вариации связи скорости распространения пульсовой волны и артериального давления // Известия Алтайского государственного университета. - Барнаул: АГУ, 1998. - № 4. - С. 153 -157.
10. Поморова Ю.Г., Кондыков А.А., Требухов А.В., Филатова О.В. Анализ биомеханических свойств артериальной стенки в зависимости от давления и вектора потока // Известия АГУ. – Барнаул: АГУ, 2000. - № 3. – С. 84-86.
11. Поморова Ю.Г., Кондыков А.А., Плешкова Н.В., Требухов А.В., Филатова О.В. Измерение СРПВ как метод артериальной тонометрии //XVIII съезд физиологического общества им. И.П. Павлова: Тез. докл. - Казань, 2001. - С. 407.
12. Поморова Ю.Г., Кондыков А.А. ТонOMETрические аспекты СРПВ // XVIII съезд физиологического общества им. И.П. Павлова: Тез. докл. - Казань, 2001. - С. 405.
13. Поморова Ю.Г., Кондыков А.А. Роль аритмии, колебаний давления и сосудистого тонуса в вариабельности СРПВ // Известия АГУ. – Барнаул: АГУ, 2001. - № 3. – С. 99-104.

#### **Список использованных сокращений**

СРПВ – скорость распространения пульсовой волны  
АД – артериальное давление  
ДД – диастолическое давление  
гД – гидростатическое давление  
р.п. – рабочий поселок

---

Подписано в печать 22.04.05 г. Формат 60x84 1/16  
Печать – ризография. Усл.п.л. 1,39  
Тираж 120 экз. Заказ 2005 г.