

УДК 577.4

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ ЗДОРОВЫХ ЛЮДЕЙ НА ИЗМЕНЕНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

© 2013 г. Т.А. Зенченко<sup>1,2</sup>, А.Н. Скавуляк<sup>1</sup>, Н.И. Хорсева<sup>2,3</sup>, Т.К. Бреус<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, г. Пущино,  
Московская обл., Россия

<sup>2</sup> Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, г. Москва, Россия

На основании результатов четырехлетних наблюдений ежедневных вариаций уровня артериального давления (АД) и частоты сердечных сокращений (ЧСС) у семи здоровых добровольцев были обнаружены два отчетливых типа реакции комплекса физиологических показателей (ФП) на изменение метеопараметров, в первую очередь – атмосферной температуры ( $T_{\text{атм}}$ ). Первый тип – монотонное (но неравномерное по скорости) снижение уровня систолического АД с ростом температуры, наиболее выраженное при  $T_{\text{атм}} < -5\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $T_{\text{атм}} > 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при более слабой реакции диастолического АД и отсутствии реакции ЧСС (у четверых волонтеров). Второй тип реакции – немонотонная двухфазная зависимость показателей АД от  $T_{\text{атм}}$ , которая совпадает с первым типом в диапазоне  $T_{\text{атм}} < -5\text{ }^{\circ}\text{C}$  и характеризуется положительной корреляцией показателей АД и ЧСС с  $T_{\text{атм}}$  при  $T_{\text{атм}} > -5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (у двоих волонтеров). Анализируются детальные физиологические механизмы, которые могут обеспечивать наблюдаемый характер компенсаторно-приспособительных реакций здоровых лиц на действие атмосферных факторов в разных диапазонах температур. Показано, что с помощью обнаруженных закономерностей можно объяснить результаты, полученные авторами ранее.

*Ключевые слова:* артериальное давление, показатели гемодинамики, индивидуальная метеочувствительность.

PACS 91.62.Xy (Biosphere/atmosphere interactions)

### Введение

Биоклиматология – наука о реакции организма человека (в первую очередь большого или ослабленного стрессом) на действие факторов погоды – насчитывает много столетий. Еще в Древней Греции Гиппократ регулярно проводил метеорологические наблю-

дения и впервые отметил сезонное чередование обострений различных недугов. В своих книгах об эпидемических заболеваниях описание каждой болезни он начинает с характеристики влияния на нее метеорологических условий.

В XX в. биоклиматологические исследования получили значительное развитие; к числу потенциально биотропных внешних факторов добавились факторы космического происхождения, обусловленные солнечной активностью, что еще больше усложнило рассматриваемую картину. Предпринимались многочисленные попытки классифицировать полученные достаточно противоречивые результаты, были написаны монографии, выпущены сборники статей, посвященные этой тематике [Ассман, 1966; Андропова и др., 1982; Никберг и др., 1986; Шеповальников, Сороко, 1992].

«В отечественной литературе наиболее полно и последовательно концепция реакций на погодные условия как процесса, отражающего взаимодействие механизмов защиты с механизмами отклонения внутренней среды, изложена Т.И. Андроновой, Н.Р. Деряпой и А.П. Соломатиным [1982]. Эти авторы выделяют два типа реакций организма на действие погодных факторов: МПР, связанные с неспособностью организма поддерживать гомеостаз, и физиологическую адаптацию, связанную с выработкой нового устойчивого состояния. При этом метеотропность рассматривается как универсальное свойство всех биосистем, включающее в себя различные их состояния: от нормы через напряжение (адаптацию) до патологии» [Никберг и др., 1986].

Используя указанную классификацию состояний, предложенную Т.И. Андроновой с соавторами, можно сказать, что подавляющее число работ в области биоклиматологии относится к исследованию состояния патологии, а под понятием гелиометеотропных реакций в этом случае обычно понимается усиление симптомов хронических заболеваний или значительное ухудшение самочувствия. Экспериментальными материалами в этих исследованиях служат два типа данных – данные медицинской статистики по частоте случаев обращения в лечебные учреждения по поводу обострения различных заболеваний и результаты анкетирования больших групп людей, отражающие их субъективные представления о собственной чувствительности к различным погодным факторам. В обоих случаях полученные результаты относятся скорее к области медицинской социологии и не позволяют дать никаких объективных прогнозов относительно вероятности ухудшения состояния *конкретного человека* при изменении характеристик погоды.

Другое направление биоклиматологических исследований посвящено изучению процессов адаптации здоровых лиц к экстремальным условиям окружающей среды, например, к условиям Севера России [Деряпа, Рябинин, 1977; Андропова и др., 1982; Агаджанян, Петрова, 1996; Бойко, 2005; Гудков и др., 2012] или к условиям полярных зимовок [Шеповальников, Сороко, 1992], а также выявлению особенностей физиологии детей и подростков в условиях Севера [Поскотнинова, 2010]. Что касается здоровых жителей средних широт, то до последнего времени принято было считать, что организм здорового человека, как правило, хорошо приспосабливается к вариациям метеорологических и геомагнитных факторов, и поэтому они не сказываются на его самочувствии и настроении.

Однако данное мнение было основано в первую очередь на результатах анализа физиологических показателей (ФП), усредненных по группе лиц. В то же время индивидуальные характеристики реакций ФП на действие факторов погоды у разных лиц могут различаться не только по амплитуде, но и по знаку.

Еще в 1992 г. В.Н. Шеповальников и С.И. Сороко убедительно показали, что подход, ориентированный на исследование групповых реакций ФП на изменение метеоэлементов, нивелирует разнообразие индивидуальных реакций. «Реально существующий спектр метеотропных реакций индивидов оказывается гораздо шире “средних” реак-

ций, выведенных на основании сложения показателей разных людей» [Шеповальников, Сороко, 1992. С. 142]. При оценке индивидуальной чувствительности физиологических показателей к внешним факторам у полярников в период зимовки они сообщают о разнонаправленных реакциях показателей АД и ЧСС на различные сочетания метеорологических факторов.

Мы в своих работах также многократно обнаруживали значимые статистические корреляции показателей АД с метеорологическими факторами для лиц разного возраста, медицинского статуса и места проживания [Зенченко и др., 2007–2009, 2011]: в случае обратимых (компенсаторно-приспособительных) реакций в среднем от 30 до 90 % лиц разного возраста и медицинского статуса реагируют на вариации факторов погоды изменением уровня АД. При этом обобщить полученные результаты не удавалось, поскольку обнаруживались эффекты обоих знаков, количество значимых корреляций сильно варьировало в разных группах, а проведенные наблюдения различались по месту и сезону проведения измерений.

Целью данной работы является первичная оценка численных характеристик индивидуальных реакций показателей АД, ЧСС и других параметров гемодинамики практически здоровых волонтеров на действие метеорологических факторов в широком диапазоне температур и возможное объяснение широкого спектра реакций, полученных в предыдущих работах.

### Материалы и методы

Чтобы с достаточной степенью надежности оценить численные характеристики индивидуальных реакций ФП на действие внешних факторов и вид регрессионных функций, описывающих зависимость ФП от метеорологических факторов или их комплексов, необходимы были достаточно большие объемы индивидуальных измерений. Материалами для исследования послужили результаты измерений АД и ЧСС волонтеров, удовлетворяющих следующим критериям:

- 1) статус «практически здорового», т.е. без выявленных клинических патологий, человека;
- 2) постоянное проживание в одном географическом регионе (в данном случае – в г. Москве);
- 3) наличие достаточно длинных рядов наблюдений, так чтобы каждый сезон года встречался, по крайней мере, 2 раза (две зимы, две весны и т.д.).

Характеристики волонтеров и количество проведенных измерений для каждого из них приведены в табл. 1. Измерения показателей АД и ЧСС волонтеры проводили на протяжении 2007–2010 гг. один раз в сутки (трехкратные измерения с интервалом в 30–50 с и записью среднего значения) примерно в одно и то же время.

По этим значениям для каждого дня измерений по стандартным формулам гемодинамики [Гидродинамика кровообращения..., 1971; Каро и др., 1981] были рассчитаны дополнительные гемодинамические параметры (в мл) – ударный объем крови (УО), выбрасываемый сердцем при каждом сокращении, и минутный объем крови (МОК), или средний выброс (СВ), отражающий уровень кровенаполнения сосудов:

$$\begin{aligned} \text{УО} &= 100 + \text{САД}/2 - 0.6 \text{ ДАД} - 0.6 \cdot \text{возраст (лет)}, \\ \text{СВ (МОК)} &= \text{УО} \cdot \text{ЧСС}, \end{aligned}$$

где САД – систолическое АД; ДАД – диастолическое АД; ЧСС – частота сердечных сокращений.

Таблица 1. Характеристика обследованных волонтеров

Номер волонтера	Пол	Возраст (на начало измерений, 2007 г.)	Количество измерений каждого показателя
V1	ж.	50	1075
V2	ж.	39	243
V3	м.	67	386
V4	ж.	48	163
V5	ж.	40	429
V6	ж.	42	168
V7	м.	47	509

Был проведен анализ зависимостей каждого из ФП от следующих метеорологических параметров: атмосферное давление ( $P_{\text{атм}}$ ), относительная влажность ( $RH$ ) и температура ( $T_{\text{атм}}$ ) воздуха, весовое содержание кислорода в воздухе ( $P(\text{O}_2)$ ), межсуточная амплитуда изменения  $T_{\text{атм}}$  и  $P_{\text{атм}}$ .

Данные метеорологических параметров ( $P_{\text{атм}}$ ,  $RH$ ,  $T_{\text{атм}}$ ) по г. Москве взяты с сайта <http://meteo.infospace.ru/>. В расчетах использованы среднесуточные значения, полученные вычислением среднего арифметического восьми трехчасовых показателей. Амплитуды изменения  $P_{\text{атм}}$  и  $T_{\text{атм}}$  рассчитаны как разность суточных значений параметра за текущие и предыдущие сутки.

Значения весового содержания кислорода в атмосферном воздухе (в  $\text{г}/\text{м}^3$ ) были рассчитаны по формуле Клапейрона:

$$P = \frac{P_{\text{атм}} - e}{R \cdot T} \cdot 0.232 = 80.83 \frac{P_{\text{атм}} - e}{T},$$

где  $P_{\text{атм}}$  и  $e$  – атмосферное давление и абсолютная влажность воздуха соответственно,  $\text{гПа}$  ( $\text{hPa}$ );  $T$  – температура воздуха,  $\text{К}$ ;  $R$  – газовая постоянная для сухого воздуха, равная  $287 \text{ Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ ;  $0.232$  – доля кислорода по весу в сухом воздухе.

Расчеты производили в программной среде Матлаб R2010a. Методы анализа – кросскорреляционный и регрессионный анализы. Для оценки степени статистической связи были рассчитаны коэффициент корреляции Спирмена  $r_s$  и уровень его значимости  $p$ .

Для удобства представления результатов по каждой паре  $r_s$  и  $p$  использовался комбинированный коэффициент  $K_s = -\text{sign}(r_s) \cdot \lg(p)$ . Такая форма представления имеет преимущества по сравнению с традиционной (пары значений  $r_s$  и  $p$ ) при анализе больших массивов данных. Во-первых, использование  $K_s$  позволяет сравнивать и отображать на графиках результаты, полученные на временных рядах разной длины, а во-вторых,  $K_s$  возрастает (а не уменьшается, как  $p$ ) при повышении степени корреляционной зависимости, что упрощает анализ, не приводя при этом к потере информации, поскольку сохраняется информация о знаке корреляции. Значения  $K_s > 1.3$  и  $K_s < -1.3$  (где  $1.3 = -\lg(0.05)$ ) означают соответственно наличие положительной или отрицательной корреляции с уровнем значимости  $p < 0.05$ ;  $|K_s| > 2$  – наличие корреляции с уровнем значимости  $p < 0.01$ , а  $|K_s| < 1.3$  – отсутствие статистически значимой корреляции.

В рамках регрессионного анализа были использованы приближения полиномами третьей степени для оценки границ диапазонов, внутри которых зависимости ФП от метеорологических параметров могли рассматриваться как линейные.

В наших предыдущих работах количество измерений, на основании которых производилась оценка уровня статистической связи между ФП и определенным метеорологическим показателем, составляло от 50 до 150 для каждого волонтера и включало один

или два сезона. Высокий показатель дисперсии в этих рядах не позволял обоснованно применить для их аппроксимации приближения полиномами выше первого порядка, т.е. ранее оказывалось возможным оценить только сам факт наличия статистической связи и ее знак.

В данной работе анализируются временные ряды, включающие от 160 до 1075 индивидуальных измерений, выполненных на протяжении нескольких сезонов. Это обеспечило значительный массив индивидуальных данных и дало основание применить для их аппроксимации полиномы выше первой степени. Анализ зависимости коэффициента детерминации  $R^2$  от степени аппроксимирующей функции показал значительный рост данного показателя при переходе от первой степени к третьей и практически отсутствие зависимости при дальнейшем увеличении степени.

Точки перегиба аппроксимирующей функции были взяты в качестве границ интервалов температуры, внутри каждого из которых зависимости были приближены линейными функциями. Для каждого диапазона, помимо значения  $K_s$ , были вычислены значения коэффициентов линейной регрессии ( $x_1$ ), их стандартная ошибка ( $x_2$ ) и значимость отличия коэффициента регрессии от нуля ( $F$ ).

## Результаты

### *Зависимость САД, ДАД и ЧСС от метеорологических параметров*

В табл. 2 приведены значения комбинированного коэффициента корреляционной связи  $K_s$  показателей АД и ЧСС всех волонтеров с основными метеорологическими показателями. Видно, что наиболее часто встречается реакция показателей АД на температуру воздуха (6 случаев из 7 для САД и 5 для ДАД), далее следует реакция на относительную влажность воздуха (4 случая для САД и 2 для ДАД), затем на атмосферное давление. При этом статистическая связь ФП с показателями  $dP$  и  $dT$  оказывается на уровне случайного совпадения.

По характеру зависимости всего комплекса ФП организма человека от температуры воздуха можно условно выделить два типа реакции.

**Таблица 2.** Комбинированные коэффициенты корреляционной связи ( $K_s$ ) показателей АД и ЧСС с основными метеорологическими параметрами (по всему ряду наблюдений)

Номер волонтера	$P_{\text{атм}}$			$RH$			$T_{\text{атм}}$			$dP$			$dT$		
	САД	ДАД	ЧСС	САД	ДАД	ЧСС	САД	ДАД	ЧСС	САД	ДАД	ЧСС	САД	ДАД	ЧСС
V1	-0.14	-0.70	-0.14	0.08	0.70	-0.87	<b>-11.33</b>	0.04	0.39	-0.04	-0.08	0.90	-0.78	-1.14	0.04
V2	0.29	-0.04	-0.59	<b>8.44</b>	0.04	-0.60	<b>-7.81</b>	<b>-1.63</b>	0.11	-0.12	-0.05	0.02	-0.77	0.01	0.06
V3	0.17	-0.33	-0.32	<b>3.63</b>	<b>2.43</b>	-1.29	<b>-7.25</b>	<b>-3.08</b>	1.14	1.08	1.20	-0.29	-0.06	-0.43	0.07
V4	-0.24	<b>-1.89</b>	-0.17	1.27	0.16	-0.58	<b>-2.10</b>	-0.66	0.86	-0.04	0.21	<b>-1.34</b>	-0.17	-1.24	0.32
V5	<b>-1.57</b>	<b>-2.23</b>	<b>-2.20</b>	<b>-1.37</b>	-1.25	-0.03	<b>2.71</b>	<b>7.43</b>	<b>4.15</b>	-1.01	-0.36	0.11	0.74	0.05	-0.10
V6	-1.21	-1.23	-0.02	<b>-4.97</b>	<b>-4.04</b>	<b>-7.72</b>	<b>2.69</b>	<b>2.77</b>	<b>6.90</b>	0.02	0.06	-0.06	0.40	0.63	1.04
V7	-0.51	-0.48	-0.69	0.27	0.09	0.07	0.21	<b>1.69</b>	0.02	0.73	0.64	-0.30	-0.27	-0.12	0.41

*Примечание.* Здесь и далее в табл. 3–8 полужирным выделены случаи значимых величин  $|K_s| > 1.3$ .

К *первому типу* можно отнести волонтеров 1, 2, 3 и 4. Для них зависимость САД от температуры воздуха носит характер значимой отрицательной корреляции ( $K_s < -1.3$ ). Коэффициенты корреляции ДАД и  $T_{\text{атм}}$  оказываются либо более низкими, чем для САД, но также отрицательными (волонтеры 2 и 3), либо незначимыми (волонтеры 1 и 4), и ни в одном из этих случаев не наблюдается реакции ЧСС на температуру.

*Второй тип* реакции наблюдается у волонтеров 5 и 6 – значимая положительная корреляция всех трех ФП – САД, ДАД и ЧСС – от  $T_{\text{атм}}$ , а также отрицательная корреляция показателей АД с  $P_{\text{атм}}$  и  $RH$  (из восьми коэффициентов у пяти  $K_s < -1.3$ , а еще три находятся в интервале  $-1.3 < K_s < -1.2$ , т.е.  $p \leq 0.062$ ).

На рис. 1 приведены зависимости показателей САД, ДАД и ЧСС от температуры воздуха, построенные для каждого из семи волонтеров, а также результаты аппроксимации этих зависимостей полиномами третьей степени с 95%-ным доверительным интервалом.

Видно, что для волонтеров 1–4 зависимости САД ( $T_{\text{атм}}$ ) являются монотонными, а для волонтеров 5 и 6 – немонотонными – убывающими при отрицательных температурах и возрастающими при положительных.

Характерной чертой динамики САД у волонтеров 1–4 (см. рис. 1, *а–г*) является его снижение с ростом температуры в диапазонах  $T < -5^\circ\text{C}$  и  $T > 15^\circ\text{C}$  (границы диапазонов являются примерными, но хорошо согласуются у всех волонтеров); между этими значениями зависимость САД от  $T_{\text{атм}}$  выражена слабее. Для более детального анализа массивы данных каждого из волонтеров 1–4 были разбиты на три части, соответствующие указанным диапазонам температур, и внутри каждого диапазона проведен линейный регрессионный анализ, результаты которого приведены в табл. 3.

Данные, приведенные на рис. 1, *а–г* и в табл. 3, показывают, что для волонтеров 1–4 наблюдаются близкие профили реакции показателей АД и ЧСС от  $T_{\text{атм}}$ . Так, для всех четверых значимо отличаются от нуля коэффициенты регрессии САД ( $T_{\text{атм}}$ ) при  $T > 15^\circ\text{C}$ , а для троих и при  $T < -5^\circ\text{C}$ . К сожалению, у волонтера 2 мало измерений, относящихся к области низких температур, что, возможно, явилось причиной отсутствия значимой реакции его ФП в этой области.

Коэффициенты линейной регрессии САД ( $T_{\text{атм}}$ ) в соседних температурных диапазонах ( $x_1 \neq x_2$ ) значимо различаются между собой, т.е. подтверждается предположение, что зависимость САД ( $T_{\text{атм}}$ ) является нелинейной. Реакция ДАД на изменение  $T_{\text{атм}}$  у волонтеров 1–4 имеет ту же направленность, что и САД, однако выражена слабее. Анализ динамики ЧСС обнаруживает значимую положительную корреляцию этого показателя с  $T_{\text{атм}}$  в области высоких температур для волонтеров 1, 3 и 4. В то же время из данных табл. 3 видно, что статистическая значимость последнего эффекта достигается в основном за счет большого количества точек наблюдения, а сами регрессионные коэффициенты имеют невысокие значения, показывающие возрастание среднего значения ЧСС на 3–4 уд./мин при изменении  $T_{\text{атм}}$  на  $10^\circ\text{C}$ . По всему комплексу полученных результатов можно предположить, что в областях низких ( $T < -5^\circ\text{C}$ ) и высоких ( $T > 15^\circ\text{C}$ ) температур доминируют разные механизмы физиологической адаптации человека к внешним факторам.

Приведенные в табл. 2 и на рис. 1 зависимости ФП от  $T_{\text{атм}}$  отражают сезонные тенденции – можно сказать, что у шестерых обследованных значения САД зимой статистически значимо отличаются от значений летом. Но это явление может быть также объяснено, например, различным уровнем определенных гормонов в крови в зимнее и летнее время (что определяется не температурой, а, например, уровнем освещенности).

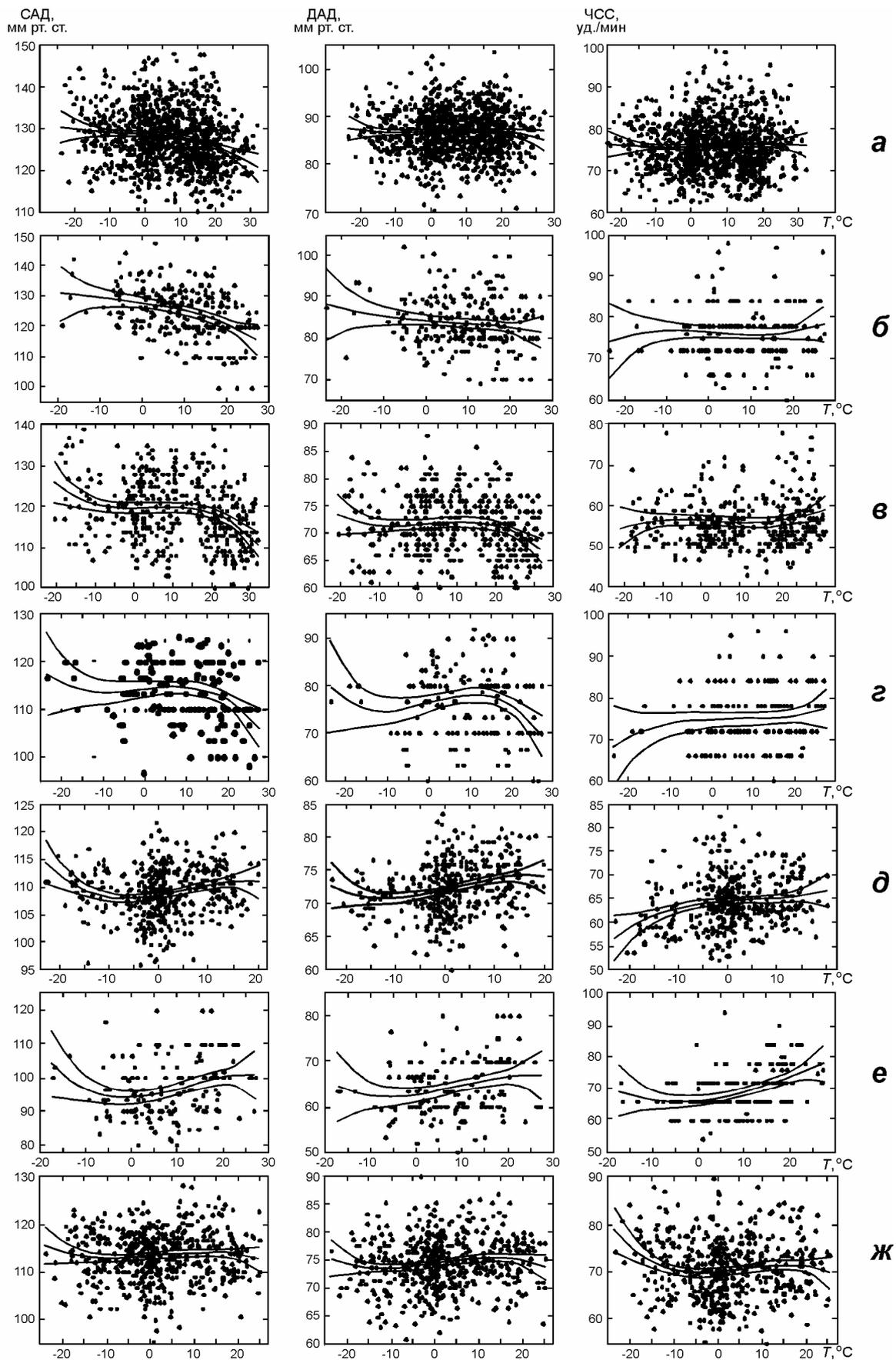


Рис. 1. Зависимости показателей САД, ДАД и ЧСС от значений  $T_{\text{атм}}$  для волонтеров 1–7 (а–ж соответственно)

**Таблица 3.** Комбинированные коэффициенты корреляционной связи ( $K_s$ ), значения коэффициентов линейной регрессии ( $x_1$ ), их стандартная ошибка ( $x_2$ ) и значимость отличия коэффициента регрессии от нуля ( $F$ ) для волонтеров 1–4

Номер волонтера, параметр	Физиологические показатели								
	САД			ДАД			ЧСС		
V1	$T < -5$	$-5 > T > 15$	$T > 15$	$T < -5$	$-5 > T > 15$	$T > 15$	$T < -5$	$-5 > T > 14$	$T > 14$
$T, ^\circ\text{C}$									
$K_s$	<b>-1.588</b>	<b>-1.964</b>	<b>-1.578</b>	-0.490	0.240	-0.675	-0.709	<b>1.871</b>	<b>4.129</b>
$x_1$	<b>-0.327</b>	<b>-0.102</b>	<b>-0.258</b>	-0.080	0.011	-0.094	-0.115	<b>0.113</b>	<b>0.276</b>
$x_2$	<b>0.131</b>	<b>0.048</b>	<b>0.108</b>	0.078	0.033	0.077	0.101	<b>0.048</b>	<b>0.085</b>
$F$	<b>0.013</b>	<b>0.034</b>	<b>0.018</b>	0.304	0.737	0.222	0.255	<b>0.020</b>	<b>0.001</b>
V2	САД			ДАД			ЧСС		
$T, ^\circ\text{C}$	$T < -5$	$-5 > T > 14$	$T > 14$	$T < -5$	$-5 > T > 14$	$T > 14$	$T < -5$	$-5 > T > 14$	$T > 14$
$K_s$	-0.029	<b>-1.408</b>	<b>-2.143</b>	-0.057	0.057	-0.908	-0.095	-0.169	0.320
$x_1$	-0.146	<b>-0.294</b>	<b>-0.757</b>	-0.087	-0.032	-0.279	-0.124	-0.143	0.151
$x_2$	0.333	<b>0.132</b>	<b>0.271</b>	0.244	0.101	0.215	0.192	0.131	0.264
$F$	0.666	<b>0.028</b>	<b>0.006</b>	0.724	0.751	0.198	0.525	0.278	0.570
V3	САД			ДАД			ЧСС		
$T, ^\circ\text{C}$	$T < -5$	$-5 > T > 14$	$T > 14$	$T < -5$	$-5 > T > 14$	$T > 14$	$T < -5$	$-5 > T > 14$	$T > 14$
$K_s$	<b>-2.119</b>	0.165	<b>-4.592</b>	-0.595	0.389	<b>-3.678</b>	0.208	0.173	<b>2.824</b>
$x_1$	<b>-0.801</b>	-0.018	<b>-0.573</b>	-0.271	0.032	<b>-0.362</b>	0.091	0.143	<b>0.320</b>
$x_2$	<b>0.280</b>	0.126	<b>0.123</b>	0.211	0.094	<b>0.091</b>	0.284	0.121	<b>0.117</b>
$F$	<b>0.006</b>	0.886	<b>0.000</b>	0.205	0.732	<b>0.000</b>	0.749	0.239	<b>0.007</b>
V4	САД			ДАД			ЧСС		
$T, ^\circ\text{C}$	$T < -5$	$-5 > T > 13$	$T > 13$	$T < -5$	$-5 > T > 13$	$T > 13$	$T < -5$	$-5 > T > 13$	$T > 13$
$K_s$	<b>-1.812</b>	-1.066	<b>-2.252</b>	<b>-2.161</b>	0.021	<b>-2.538</b>	0.377	<b>1.456</b>	<b>2.538</b>
$x_1$	<b>-0.557</b>	-0.220	<b>-0.564</b>	<b>-0.791</b>	0.070	<b>-0.639</b>	0.228	0.209	<b>1.090</b>
$x_2$	<b>0.180</b>	0.147	<b>0.198</b>	<b>0.157</b>	0.152	<b>0.209</b>	0.215	0.110	<b>0.362</b>
$F$	<b>0.008</b>	0.139	<b>0.006</b>	<b>0.002</b>	0.648	<b>0.003</b>	0.306	0.062	<b>0.004</b>

В этом случае полученная статистическая зависимость показателей АД и ЧСС от  $T_{\text{атм}}$  является опосредованной. Частично данное предположение можно опровергнуть на основе того факта, что наиболее выраженной зависимостью САД от  $T_{\text{атм}}$  является внутри диапазонов изменения температуры  $T < -5 ^\circ\text{C}$  и  $T > 15 ^\circ\text{C}$ , которые соответствуют зиме и лету – периодам, внутри которых освещенность меняется относительно слабо.

Чтобы дополнительно проверить это предположение, временные ряды значений всех ФП у волонтеров 1–4 были разбиты на неперекрывающиеся временные отрезки, соответствующие различным сезонам года, и анализ зависимости ФП от метеопараметров проводился отдельно для каждого такого участка. Результаты расчетов для волонтера 1 (как имеющего наибольшую длительность (14 сезонов) и количество измерений) приведены в табл. 4.

Из результатов табл. 4 можно сделать два вывода: по отдельным сезонам наиболее выраженной является статистическая связь между показателями САД и  $T_{\text{атм}}$  (11 случаев значимой отрицательной корреляции из 14). Следующей по числу значимых корреляционных связей является пара показателей ДАД– $T_{\text{атм}}$  (5 случаев отрицательной корреляции) и САД–RH (4 случая). Однако более внимательный анализ показывает, что три из четырех случаев значимой корреляции между САД и RH соответствуют зимним периодам. В эти сезоны между  $T_{\text{атм}}$  и RH (в частности, в Московском регионе) обычно наблюдается сильная прямая корреляция ежедневных значений, что позволяет отнести зависимость САД от относительной влажности к числу опосредованных связей [Зен-

**Таблица 4.** Комбинированные коэффициенты корреляционной связи ( $K_s$ ) показателей САД, ДАД и ЧСС волонтера 1 с основными метеорологическими параметрами по сезонам года

Сезон	N	$P_{\text{атм}}$			$RH$			$T_{\text{атм}}$			$dP$			$dT$			
		САД	ДАД	ЧСС	САД	ДАД	ЧСС	САД	ДАД	ЧСС	САД	ДАД	ЧСС	САД	ДАД	ЧСС	
2008 г.	Зима	67	0.86	0.29	-0.25	<b>-1.21</b>	-0.76	0.11	<b>-2.40</b>	-1.18	1.13	0.15	0.22	0.56	-0.31	-0.30	-0.59
	Весна	91	<b>-3.17</b>	<b>-2.62</b>	-1.21	0.90	1.02	0.09	<b>-3.87</b>	<b>-1.81</b>	<b>-2.07</b>	0.17	-0.38	-0.57	-1.26	-0.97	-0.36
	Лето	92	-0.29	0.01	-0.24	0.09	0.14	-0.64	<b>-2.49</b>	-0.40	0.80	-0.30	-0.07	<b>1.25</b>	0.09	-0.02	0.42
	Осень	93	-1.13	-0.79	0.30	-0.04	-0.53	0.54	<b>-1.65</b>	-0.86	0.92	-0.05	-0.09	<b>2.10</b>	-0.03	0.08	-0.17
2009 г.	Зима	58	-0.03	0.09	0.69	<b>-2.66</b>	-0.13	0.68	<b>-1.53</b>	0.29	0.15	0.00	-0.79	0.44	-0.63	0.78	-0.13
	Весна	87	0.16	0.38	-0.65	-0.40	<b>-1.48</b>	-1.13	<b>-1.57</b>	0.01	0.71	0.18	0.00	0.06	-0.04	0.02	0.16
	Лето	75	-0.75	-0.72	-0.69	0.70	0.84	<b>-1.39</b>	<b>-2.05</b>	<b>-1.78</b>	<b>2.90</b>	0.90	-0.01	-0.27	-0.27	0.06	-0.24
	Осень	69	0.05	-0.08	-0.06	<b>-1.50</b>	-0.58	0.11	-0.28	0.15	-0.07	0.16	0.07	0.08	-0.08	-0.13	<b>-1.37</b>
2010 г.	Зима	66	1.08	0.09	0.38	-0.25	-0.02	0.03	0.10	0.76	<b>-2.33</b>	-0.02	0.03	-0.30	-0.92	-0.57	-0.09
	Весна	71	0.96	-0.30	0.06	-0.23	0.20	0.37	<b>-1.94</b>	<b>-1.80</b>	0.30	0.44	-0.57	-0.13	-0.13	0.07	-0.60
	Лето	80	-0.07	-0.12	0.01	0.49	0.02	0.70	<b>-1.45</b>	-0.02	<b>-1.74</b>	0.65	-0.10	0.48	-0.04	-0.54	-0.67
	Осень	73	-0.11	-0.31	0.59	-0.38	0.43	0.14	-1.03	-0.49	-0.09	0.02	-0.38	-0.61	-0.09	-0.16	0.23
2011 г.	Зима	65	0.41	1.23	-0.02	<b>-1.95</b>	<b>-2.42</b>	0.01	<b>-1.92</b>	<b>-1.75</b>	0.03	0.54	1.22	0.20	-0.26	-0.55	0.83
	Весна	66	-0.21	0.13	-0.17	0.44	<b>1.80</b>	0.16	<b>-1.76</b>	<b>-1.72</b>	-0.04	-0.59	-0.07	0.31	-0.60	-0.40	0.61

ченко и др., 2009]. Для остальных пар параметров количество значимых корреляций оказывается примерно сопоставимым, сравнимым с уровнем случайного совпадения (1–2 случая из 14). Для волонтеров 2, 3 и 4 при анализе результатов измерений по отдельным сезонам были получены аналогичные результаты.

*Второй тип* реакции наблюдается у волонтеров 5 и 6, для которых по всему ряду наблюдений была получена значимая положительная корреляция САД, ДАД и ЧСС от  $T_{\text{атм}}$  (см. табл. 2). Вторым особенностью этого типа реакции является отрицательная корреляция показателей АД с параметрами атмосферного давления и относительной влажности, чего не наблюдалось в случае первого типа реакции.

Детальный анализ регрессионных зависимостей третьего порядка (см. рис. 1, д, е, и табл. 5, б) показывает, что для волонтеров 5 и 6 реакция показателей АД на температуру носит как минимум двухфазный характер. При этом в области низких температур их реакция аналогична реакции волонтеров 1–4 (отрицательная корреляция между показателями САД и  $T_{\text{атм}}$  и отсутствие зависимости ДАД от  $T_{\text{атм}}$ ), в то время как при  $T > -5$  °С все три ФП возрастают при повышении температуры воздуха. В сочетании с отрицательной корреляцией показателей АД и  $P_{\text{атм}}$  у волонтеров 5 и 6 (см. табл. 2, 5, б) можно говорить, что возрастание ФП происходит в условиях снижения парциального содержания кислорода в воздухе ( $P(\text{O}_2)$ ), обусловленного изменением метеорологических факторов. Важность данного атмосферного параметра для состояния больных с сердечно-сосудистыми и легочными патологиями была обоснована в работах В.Ф. Овчаровой [1975, 1978, 1981].

**Таблица 5.** Комбинированные коэффициенты корреляционной связи ( $K_s$ ) и коэффициенты линейной регрессии физиологических показателей волонтера 5 со значениями  $T_{\text{атм}}$ ,  $P_{\text{атм}}$  и  $P(\text{O}_2)$ 

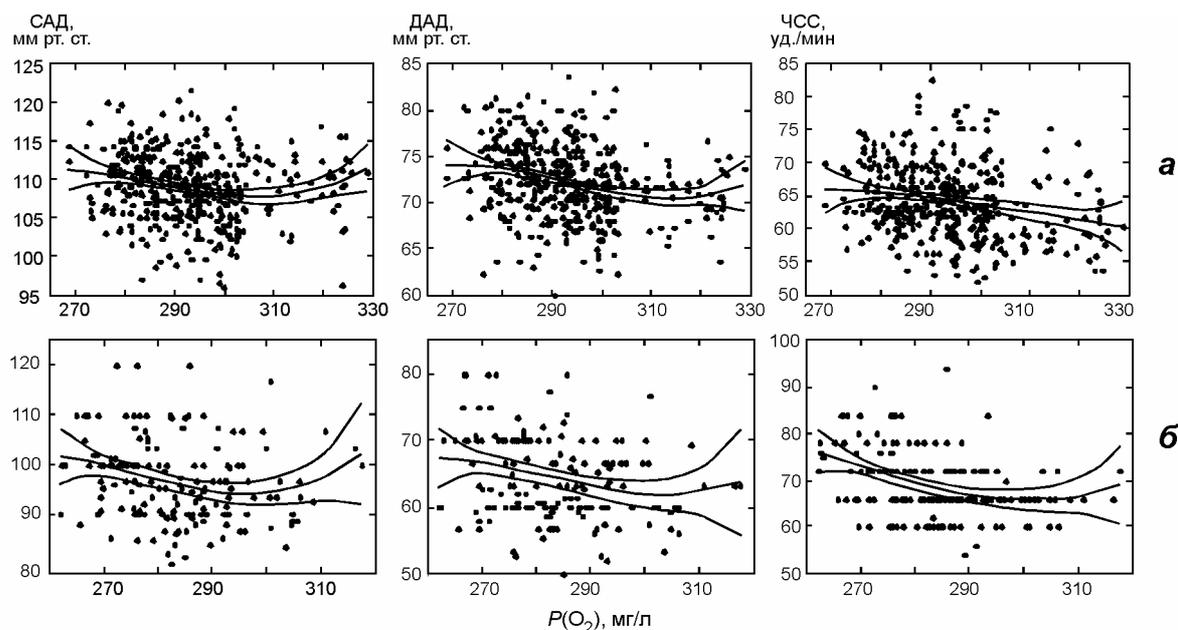
Метео-параметр	САД		ДАД		ЧСС	
	$T < -4^\circ\text{C}$	$T > -4^\circ\text{C}$	$T < -4^\circ\text{C}$	$T > -4^\circ\text{C}$	$T < 3.2^\circ\text{C}$	$T > 3.2^\circ\text{C}$
$T_{\text{атм}}$						
$K_s$	<b>-3.562</b>	<b>3.916</b>	-0.236	<b>4.353</b>	<b>4.077</b>	<b>1.947</b>
$x_1$	<b>-0.307</b>	<b>0.163</b>	-0.045	<b>0.142</b>	<b>0.230</b>	<b>0.211</b>
$x_2$	<b>0.086</b>	<b>0.040</b>	0.067	<b>0.036</b>	<b>0.056</b>	<b>0.099</b>
$F$	<b>0.0006</b>	<b>0.0001</b>	0.499	<b>0.0001</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.0354</b>
$P_{\text{атм}}$ , ГПа	$P < 993$	$P > 993$	$P < 993$	$P > 993$	$P < 993$	$P > 993$
$K_s$	0.20	<b>-2.58</b>	-0.07	<b>-6.05</b>	<b>-2.42</b>	<b>-2.60</b>
$x_1$	0.034	<b>-0.080</b>	0.020	<b>-0.116</b>	<b>-0.150</b>	<b>-0.094</b>
$x_2$	0.048	<b>0.029</b>	0.037	<b>0.027</b>	<b>0.058</b>	<b>0.033</b>
$F$	0.478	<b>0.006</b>	0.592	<b>0.000</b>	<b>0.011</b>	<b>0.028</b>
$P(\text{O}_2)$	<b><math>\text{O}_2 &lt; 302</math> мг/л</b>	$\text{O}_2 > 302$ мг/л	<b><math>\text{O}_2 &lt; 302</math> мг/л</b>	$\text{O}_2 > 302$ мг/л	<b><math>\text{O}_2 &lt; 302</math> мг/л</b>	$\text{O}_2 > 302$ мг/л
$K_s$	<b>-7.254</b>	0.033	<b>-6.608</b>	-0.568	<b>-2.742</b>	<b>-3.297</b>
$x_1$	<b>-0.150</b>	-0.006	<b>-0.122</b>	-0.049	<b>-0.110</b>	<b>-0.179</b>
$x_2$	<b>0.029</b>	0.062	<b>0.026</b>	0.049	<b>0.037</b>	<b>0.067</b>
$F$	<b>0.0000</b>	0.9295	<b>0.0000</b>	0.3215	<b>0.0031</b>	<b>0.0090</b>

**Таблица 6.** Комбинированные коэффициенты корреляционной связи ( $K_s$ ) и коэффициенты линейной регрессии физиологических показателей волонтера 6 со значениями  $T_{\text{атм}}$ ,  $P_{\text{атм}}$  и  $P(\text{O}_2)$ 

Метео-параметр	САД		ДАД		ЧСС	
	$T < -5^\circ\text{C}$	$T > -5^\circ\text{C}$	$T < -5^\circ\text{C}$	$T > -5^\circ\text{C}$	$T < -5^\circ\text{C}$	$T > -5^\circ\text{C}$
$T_{\text{атм}}$						
$K_s$	-0.457	<b>3.147</b>	-0.052	<b>2.388</b>	-0.134	<b>6.612</b>
$x_1$	-0.687	<b>0.264</b>	-0.011	<b>0.188</b>	-0.230	<b>0.381</b>
$x_2$	0.534	<b>0.085</b>	0.405	<b>0.066</b>	0.273	<b>0.070</b>
$F$	0.221	<b>0.002</b>	0.979	<b>0.005</b>	0.416	<b>0.000</b>
$P_{\text{атм}}$ , ГПа	$P < 993$	$P > 993$	$P < 993$	$P > 993$	$P < 993$	$P > 993$
$K_s$	-0.065	<b>-2.886</b>	-0.519	<b>-4.233</b>	-0.134	<b>11.877</b>
$x_1$	0.122	<b>-0.419</b>	0.010	<b>-0.327</b>	0.270	<b>-0.382</b>
$x_2$	0.147	<b>0.147</b>	0.124	<b>0.102</b>	0.214	<b>0.107</b>
$F$	0.409	<b>0.005</b>	0.933	<b>0.002</b>	0.222	<b>0.001</b>
$P(\text{O}_2)$	<b><math>\text{O}_2 &lt; 297</math> мг/л</b>	$\text{O}_2 > 297$ мг/л	<b><math>\text{O}_2 &lt; 297</math> мг/л</b>	$\text{O}_2 > 297$ мг/л	<b><math>\text{O}_2 &lt; 293</math> мг/л</b>	$\text{O}_2 > 293$ мг/л
$K_s$	<b>-3.019</b>	0.441	<b>-2.005</b>	0.439	<b>-3.974</b>	0.256
$x_1$	<b>-0.201</b>	0.480	<b>-0.145</b>	0.071	<b>-0.291</b>	0.107
$x_2$	<b>0.073</b>	0.419	<b>0.057</b>	0.294	<b>0.074</b>	0.113
$F$	<b>0.007</b>	0.271	<b>0.013</b>	0.814	<b>0.000</b>	0.351

С целью проверки данной гипотезы как объяснения полученных результатов были построены регрессионные функции третьего порядка для зависимостей уровня АД и ЧСС от парциального содержания кислорода (см. рис. 2, табл. 5, 6).

Анализ результатов, приведенных в табл. 5, 6 и на рис. 2, подтверждает высказанную гипотезу о возможном развитии компенсаторно-приспособительной реакции в ответ на пониженное содержание кислорода в воздухе. Видно, что значимая корреляция между показателями АД обоих волонтеров и  $P(\text{O}_2)$  наблюдается именно в области пониженных значений  $P(\text{O}_2)$ , начиная примерно с границы в 300 мг/л.



**Рис. 2.** Зависимость показателей САД, ДАД и ЧСС волонтеров 5 (а) и 6 (б) от парциального содержания кислорода в воздухе

Показаны приближения полиномами третьей степени и границы 95%-ного доверительного интервала

Нужно отметить также, что для волонтера 7 была обнаружена только значимая корреляция ДАД с  $T_{\text{атм}}$  (см. табл. 2). Однако при анализе связей его ФП с метеопараметрами в отдельных температурных диапазонах обнаружена реакция, имеющая сходство с реакцией волонтеров 5 и 6 – значимая положительная корреляция ЧСС с  $T_{\text{атм}}$  при  $T > -5$  °C ( $K_s = 2.94$ ) и соответственно отрицательная корреляция ЧСС с  $P(O_2)$  при  $P(O_2) < 302$  мг/л ( $K_s = -2.33$ ). Кроме того, зависимость от  $T_{\text{атм}}$  и  $P(O_2)$  была получена для ДАД ( $K_s = 1.78$  при  $T_{\text{атм}} > -5$  °C и  $K_s = -2.44$  при  $P(O_2) < 302$  мг/л).

### **Зависимость УО и МОК от метеорологических параметров**

Чтобы более обоснованно провести физиологическую интерпретацию обнаруженных зависимостей, по измеренным значениям САД, ДАД и ЧСС были вычислены и проанализированы такие гемодинамические показатели, как ударный объем (УО) и минутный объем крови (МОК). Результаты корреляционного анализа приведены в табл. 7, 8.

Из данных табл. 7 видно, что, как и в случае показателей АД и ЧСС, максимальное количество значимых коэффициентов корреляции УО наблюдается со значениями  $T_{\text{атм}}$  и тесно связанным с ним  $P(O_2)$ , причем связь наблюдается у волонтеров 1, 2, 3 и 5. Таким образом, показатель УО значимо коррелирует с  $T_{\text{атм}}$  у троих волонтеров, показавших первый тип реакции, и волонтера 5, у которого аналогичный вид реакции на  $T_{\text{атм}}$  наблюдался при  $T_{\text{атм}} < -5$  °C.

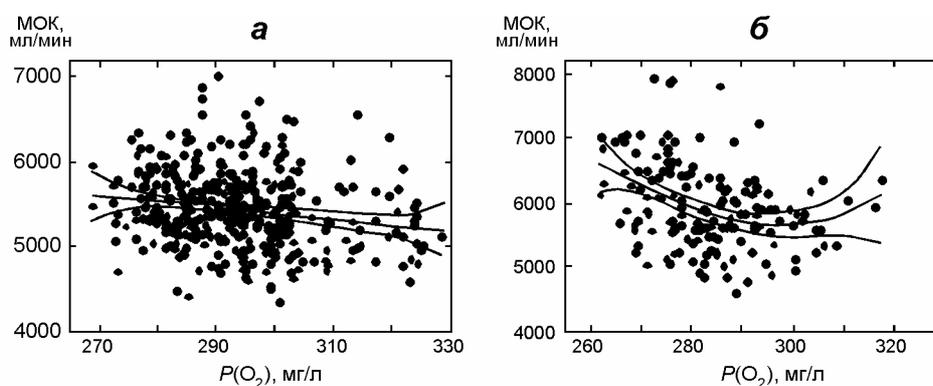
В то же время показатель МОК наиболее выражено реагирует у волонтеров 5 и 6, показавших второй тип реакции – минутный объем крови оказывается тем больше, чем выше температура воздуха и чем ниже парциальное содержание кислорода в нем (см. табл. 8). На рис. 3 приведены зависимости МОК волонтеров 5 и 6 от  $P(O_2)$ . Видно, что для волонтера 5 зависимость от  $P(O_2)$  наблюдается во всем диапазоне изменения данного параметра, для волонтера 6 – именно в области пониженных значений  $P(O_2)$ .

**Таблица 7.** Комбинированные коэффициенты корреляционной связи ( $K_s$ ) показателей УО с основными метеорологическими параметрами (по всему ряду наблюдений)

Номер волонтера	$P_{\text{атм}}$	$RH$	$T_{\text{атм}}$	$P(\text{O}_2)$	$dP$	$dT$
V1	0.22	-0.61	<b>-21.70</b>	<b>19.78</b>	0.12	0.03
V2	0.72	<b>9.13</b>	<b>-4.83</b>	<b>4.56</b>	0.36	-0.09
V3	1.20	0.64	<b>-3.89</b>	<b>4.54</b>	-0.08	0.26
V4	<b>1.81</b>	0.78	-0.38	0.65	-0.48	1.17
V5	0.21	0.12	<b>-2.35</b>	<b>1.70</b>	-0.56	1.15
V6	-0.05	-0.40	-0.10	0.06	-0.16	-0.14
V7	0.06	-0.02	<b>-1.14</b>	<b>1.17</b>	0.28	-0.04

**Таблица 8.** Комбинированные коэффициенты корреляционной связи ( $K_s$ ) показателей МОК с основными метеорологическими параметрами (по всему ряду наблюдений)

Номер волонтера	$P_{\text{атм}}$	$RH$	$T_{\text{атм}}$	$P(\text{O}_2)$	$dP$	$dT$
V1	-0.03	-0.82	<b>-2.10</b>	<b>2.17</b>	1.05	0.01
V2	-0.04	<b>1.41</b>	<b>-1.15</b>	<b>1.18</b>	-0.53	0.21
V3	-0.01	-0.77	0.13	-0.02	-0.19	0.23
V4	0.23	-0.18	0.42	-0.40	<b>-1.80</b>	0.57
V5	<b>-2.31</b>	-0.14	<b>3.74</b>	<b>-4.46</b>	0.07	0.08
V6	-0.04	<b>-8.20</b>	<b>5.71</b>	<b>-4.99</b>	-0.13	0.96
V7	-0.51	0.06	-0.38	0.14	-0.24	0.28



**Рис. 3.** Зависимость показателя МОК волонтеров 5 (а) и 6 (б) от парциального содержания кислорода в воздухе

Показаны приближения полиномами третьей степени и границы 95%-ного доверительного интервала

Из данных, приведенных на рис. 1, видно, что значения показателей АД и ЧСС этих волонтеров за все время наблюдений практически не превышают границ физиологической нормы. В то же время зависимости на рис. 3 показывают, что в условиях низкого содержания кислорода в воздухе у обоих волонтеров часто встречаются значения МОК, превышающие верхнюю границу нормы (6000 мл/мин).

### Обсуждение

На основе проведенного анализа зависимости показателей АД и ЧСС семерых здоровых волонтеров от основных атмосферных показателей на протяжении нескольких лет можно условно выделить два типа реакции:

а) монотонное (но неравномерное по скорости) снижение уровня САД с ростом температуры при более слабой реакции ДАД и отсутствии реакции ЧСС (у четверых волонтеров). Наиболее выражено САД зависит от  $T_{\text{атм}}$  в диапазонах  $T < -5^\circ\text{C}$  и  $T > 15^\circ\text{C}$ ;

б) двухфазное поведение, которое совпадает с первым типом реакции в диапазоне низких температур  $T < -5^\circ\text{C}$  и характеризуется положительной корреляцией САД, ДАД и ЧСС с  $T_{\text{атм}}$  при  $T > -5^\circ\text{C}$  (у двоих волонтеров).

Анализ зависимости ФП от метеофакторов по отдельным сезонам подтвердил гипотезу, что наблюдаемая зависимость показателей АД и ЧСС от  $T_{\text{атм}}$  обусловлена именно реакцией на температуру (и тесно связанным с ней параметром парциального содержания кислорода в воздухе), поскольку воспроизводимо повторяется в течение отдельных сезонов.

Расчет производных показателей гемодинамики – УО и МОК – для обследованных волонтеров показал, что в случае реакции первого типа чувствительность к температуре проявляет УО, особенно в области положительных температур, в то время как МОК не показывает значимой корреляции ни от одного погодного параметра. В случае реакции второго типа, напротив, сильную корреляцию с  $T_{\text{атм}}$  показывают значения МОК (в первую очередь за счет изменчивости ЧСС), а для параметра УО статистическая зависимость от  $T_{\text{атм}}$  оказывается крайне слабой (волонтер 5) или незначимой (волонтер 6). В случае волонтера 5 полученная зависимость совпадает с реакцией первого типа и обусловлена динамикой в области отрицательных температур, где САД в значительной степени зависит от температуры (первый тип реакции), а ДАД и ЧСС практически не зависят от этого метеопараметра.

Средние значения коэффициентов линейной регрессии АД и ЧСС от  $T_{\text{атм}}$  составляют 0.15–0.40 и в отдельных диапазонах температур могут достигать значения  $-0.8$  мм рт. ст./ $^\circ\text{C}$  (волонтер 2,  $T > 14^\circ\text{C}$ ; волонтер 3,  $T < -5^\circ\text{C}$ ). Это означает, например, систематическое увеличение среднего уровня САД на 15–16 мм рт. ст. при понижении температуры с  $-5$  до  $-25^\circ\text{C}$ .

Понимание того, что знак реакции может быть различным не только у разных людей, но и у одного человека в разных диапазонах температур, позволит более обоснованно подойти к интерпретации заключений, полученных на более коротких отрезках наблюдений, например включающих только один сезон. Они также позволяют оценить правомерность экстраполяции выводов о характере индивидуальной чувствительности человека, сделанных по такому короткому отрезку, на другие сезоны года, и предложить объяснение для многочисленных результатов, полученных нами ранее на более коротких временных рядах и оставлявших впечатление «рассыпанной мозаики».

Так, для группы здоровых молодых волонтеров, проводивших наблюдения в весенний период в г. Симферополе, значимая корреляция показателей АД с температурой воздуха была обнаружена у 6 человек из 17 (35 %), причем в четырех случаях знак корреляции был отрицательным, а в двух – положительным [Зенченко и др., 2008]. В группе здоровых волонтеров среднего возраста, постоянных жителей г. Москвы, проводивших измерения в разные сезоны года (разделения по сезонам не проводилось) зависимость показателей АД от температуры обнаружена для шести человек из десяти, во

всех случаях знак корреляции был отрицательным [Зенченко и др., 2009]. При анализе динамики показателей АД у лиц с диагнозом «Артериальная гипертензия I и II степени» в среднем у 60 % испытуемых были обнаружены статистически значимые разнонаправленные реакции на изменения атмосферного давления и температуры. В некоторых случаях влиянием именно этих факторов на показатели АД можно было объяснить наблюдаемые «ускользания» гипотензивного эффекта [Зенченко и др., 2007]. В той же работе мы наблюдали случаи как положительной, так и отрицательной корреляции с температурой, причем разделение их по сезонам не показало значимых отличий.

В работе [Зенченко и др., 2011] для 9 из 10 испытуемых с диагнозом «Артериальная гипертензия I и II степени», жителей г. Сыктывкара и г. Москвы, проводивших измерения в очень холодные периоды времени, наблюдалась значимая отрицательная корреляция показателей АД с  $T_{\text{атм}}$  и  $RH$ , причем для волонтеров из г. Сыктывкара средние амплитуды изменения АД были значительно больше, чем для волонтеров из г. Москвы. Средние значения  $T_{\text{атм}}$  за период измерений составили  $-17.1$  °C для волонтеров из г. Сыктывкара и  $-9.5$  °C для волонтеров из г. Москвы. В то же время для группы, проводившей наблюдения относительно мягкой зимой ( $T_{\text{ср}} = -5.4$  °C) в г. Москве, из шести обследованных лиц у четверых наблюдалась положительная корреляция показателей АД с температурой и относительной влажностью и у одного – отрицательная. Этот факт получает объяснение на основании результатов, полученных в данной работе, – средний диапазон изменения температуры в первых двух случаях приходился на область  $T_{\text{атм}} < -5$  °C и все наблюдаемые реакции показателей АД на температуру показывали возрастание уровня АД при усилении морозов. В случае относительно мягкой зимы диапазон температур сдвинулся, и наблюдаемые у части волонтеров реакции стали аналогичны реакциям волонтеров 5 и 6, рассматриваемых в данной работе в этом диапазоне температур.

Необходимо отметить, что для пациентов с артериальной гипертензией оценка средних амплитуд реакции показателей АД в работе [Зенченко и др., 2011] дает амплитуды до 15 мм рт. ст. при изменении  $T_{\text{атм}}$  в среднем на 10 °C, что сопоставимо с результатами, полученными в данной работе.

Важно подчеркнуть, что во всех описанных ранее случаях измерений значения положительных коэффициентов корреляции показателей АД с температурой наблюдали либо при нулевых, либо при положительных температурах. О возрастании индивидуальных показателей АД и ЧСС у части зимовщиков антарктической станции при «повышении температуры вплоть до оттепели» сообщают в своей книге В.Н. Шеповальников и С.И. Сороко [1992].

Ранее в литературе эффект возрастания уровня АД и ЧСС у больных, страдающих сердечно-сосудистой и легочной недостаточностью, при повышении температуры и снижении атмосферного давления биоклиматологи объясняли компенсаторной реакцией на кислородную недостаточность, обусловленную снижением парциального содержания кислорода в воздухе (экзогенная (внешняя), или погодная, гипоксия) [Овчарова, 1975, 1978, 1981; Андропова и др., 1982]. Однако еще раз необходимо подчеркнуть, что данная гипотеза и разработанные на ее основе медицинские прогнозы уровня патогенности погоды (с учетом парциального содержания кислорода как одного из параметров) в то время делались на основе анализа числа случаев обострения различных заболеваний. Данных о том, могут ли вариации парциального содержания  $O_2$ , обусловленные изменением погодных факторов, явным образом проявляться в индивидуальной динамике ФП здоровых лиц, в литературе практически не встречается.

### Возможные физиологические механизмы, объясняющие наблюдаемые типы реакции

В данной работе мы выделили и статистически обосновали наличие трех температурных диапазонов ( $T > 15-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T > -5\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $T < -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), в которых реакция комплекса показателей АД и ЧСС на атмосферные факторы (и в первую очередь на температуру) имеет разные проявления и может основываться на разных физиологических механизмах. Возможные пути развития физиологической реакции были построены на основе существующих представлений, описанных в академической медицинской литературе [Каро и др., 1981; Агаджанян, 1983; Гурин, 1989; Меерсон и др., 1989; Швалев и др., 1992; Козлов, 1993; Меерсон, 1993; Морман, Хеллер, 2000; Михайлов, 2001; Рафф, 2001; Камкин, Каменский, 2004; Ткаченко, 2005; Физиология..., 2005; Гайтон, Холл, 2008; Агаджанян, Смирнов, 2009]. Естественно, что в каждом из описанных температурных диапазонов возможно несколько взаимосвязанных путей развития физиологической реакции. Ниже обозначены только наиболее вероятные сценарии.

**1. Температурный диапазон  $T < -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , эффект морозов**, характеризуется повышением уровня САД при понижении атмосферной температуры (при независимости показателей ДАД и ЧСС от  $T_{\text{атм}}$ ). В настоящем исследовании этот феномен наблюдается у волонтеров 1, 3, 4 и 5, а ранее он наблюдался у девяти пациентов с диагнозом «Артериальная гипертензия I и II степени», жителей г. Москвы и г. Сыктывкара [Зенченко и др., 2011]. При измерениях в зимний период вариации показателей АД показывают статистически значимую корреляцию со значениями температуры на улице, но не в помещении [Зенченко и др., 2009].

Возможный физиологический механизм, вызывающий такую реакцию показателей АД, приведен на рис. 4. Данная зависимость может быть обусловлена необходимостью увеличения теплопродукции под действием морозного воздуха и являться следствием активизации работы щитовидной железы. Поскольку период полураспада гормонов щитовидной железы составляет 4 сут [Физиология..., 2005], вполне возможен отсроченный эффект возрастания уровня АД после пребывания человека на морозном воздухе.

Необходимо отметить, что согласно литературным данным [Авицын и др., 1979; Величковский, 2010] в условиях северных широт доминирующий механизм повышения уровня АД при усилении морозов (и понижении относительной влажности), по-видимому, связан со снижением коэффициента потребления кислорода во вдыхаемом воздухе (внутренняя гипоксия).

**2. Температурный диапазон  $T > 15-17\text{ }^{\circ}\text{C}$** . С ростом  $T_{\text{атм}}$  наблюдается понижение уровня САД (волонтеры 1-4), в меньшей степени – ДАД (волонтеры 3 и 4), возрастание ЧСС (волонтеры 1, 3 и 4). Возможный физиологический механизм (см. рис. 4), по-видимому, заключается в снижении объема циркулирующей крови за счет испарения жидкости, а также депонирования крови в периферических сосудах кожи из-за снижения их тонуса. Этот эффект мы наблюдали ранее при исследовании реакции показателей состояния микроциркуляторного русла на погодные факторы [Зенченко и др., 2009].

**3. Температурный диапазон  $T > -5\text{ }^{\circ}\text{C}$** . У волонтеров 5 и 6 наблюдается рост показателей САД, ДАД и ЧСС с повышением температуры. Ранее аналогичный вид реакции был получен у двоих молодых здоровых волонтеров [Зенченко и др., 2008] и четверых пациентов старшего возраста с диагнозом «Артериальная гипертензия» [Зенченко и др., 2011].

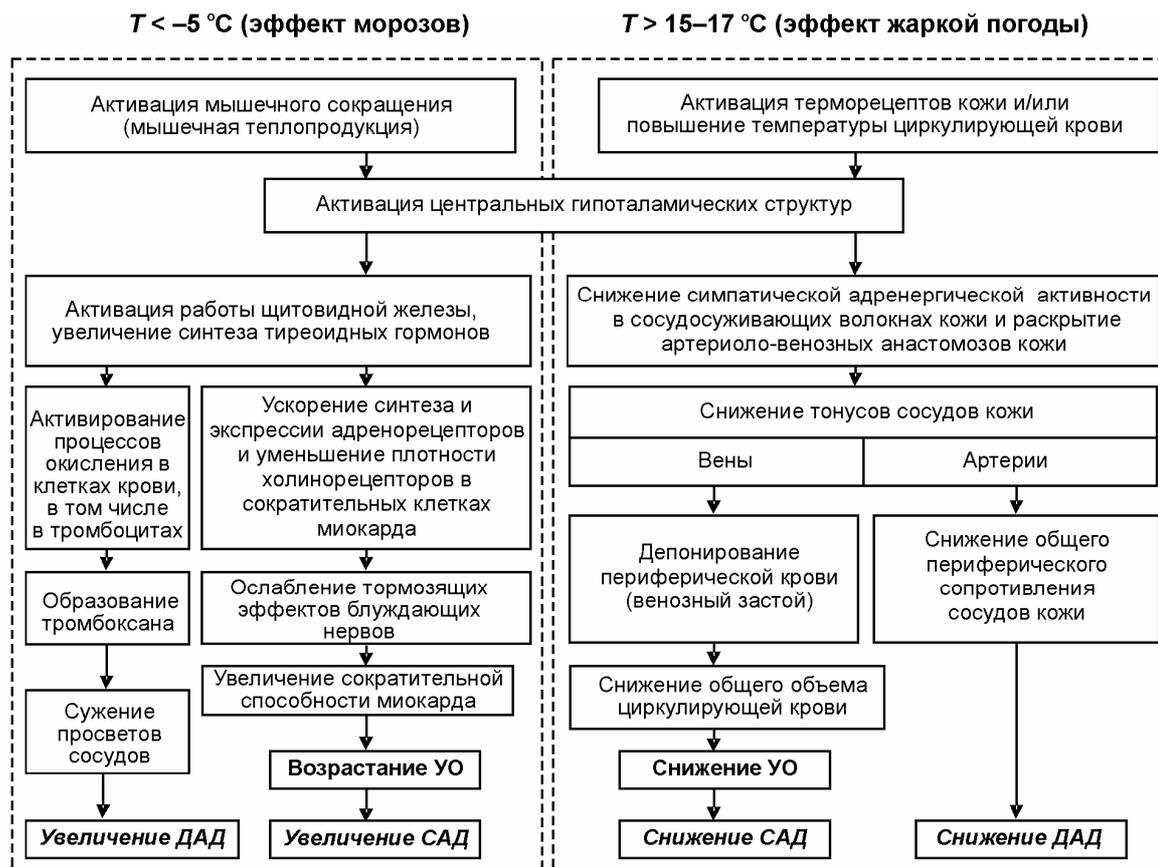


Рис. 4. Возможные механизмы реакции показателей АД на изменение  $T_{\text{атм}}$

Механизм, объясняющий данный эффект, был предложен В.Ф. Овчаровой [1975, 1979, 1981] как объяснение динамики обострения сердечно-сосудистых заболеваний. Он основан на идее развития в организме компенсаторно-приспособительной реакции на снижение весового содержания кислорода в атмосферном воздухе (внешняя гипоксия). Экспериментальные результаты, полученные нами для волонтеров 5 и 6 (рост показателей САД, ДАД и ЧСС наблюдается при повышении  $T_{\text{атм}}$  и понижении  $P_{\text{атм}}$ , т.е. снижении  $P(\text{O}_2)$ ), по всему комплексу признаков укладываются именно в эту гипотезу (рис. 5). В ее рамках можно объяснить эффект возрастания показателей АД во время зимних циклонов, когда происходит повышение температуры (вплоть до перехода через ноль) и снижение атмосферного давления. Так, в работе И.И. Никберга с соавторами [1986] указывается, что данный тип погоды характеризуется повышением числа случаев острых нарушений мозгового кровообращения. Кроме того, в условиях не очень острой нехватки кислорода развитие данного компенсаторного механизма может занимать время вплоть до нескольких суток, что согласуется также с полученными нами ранее результатами [Зенченко и др., 2011].

Тот факт, что знак реакции может быть различным не только у разных людей, но и у одного человека в разных диапазонах температур, позволяет гораздо обоснованнее подойти к интерпретации заключений, получаемых на более коротких временных отрезках наблюдений, например включающих один сезон, а также дает возможность оценить

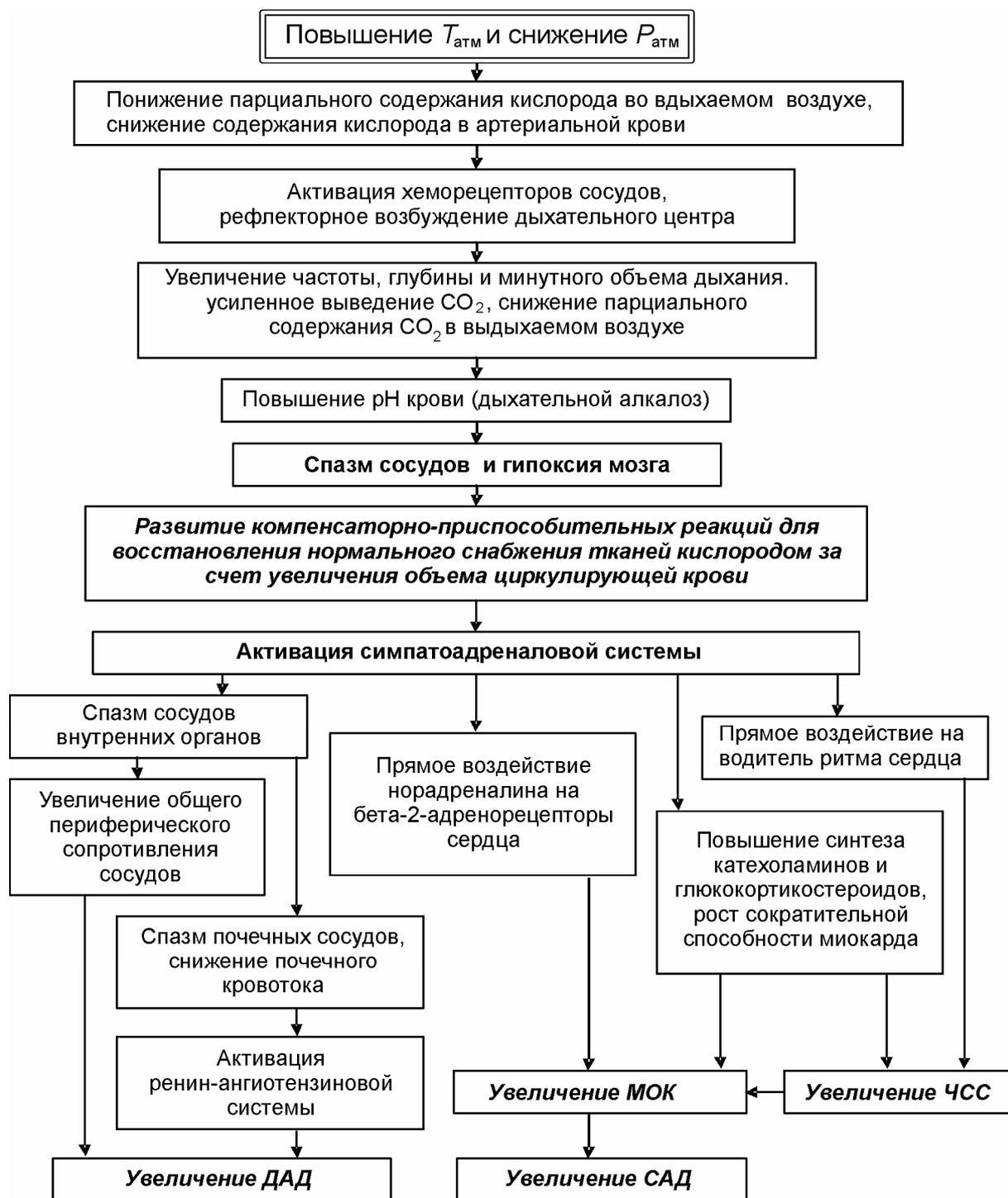


Рис. 5. Возможные механизмы реакции показателей АД и ЧСС на повышение  $T_{атм}$  и снижение  $P_{атм}$

правомерность экстраполяции выводов, сделанных по одному такому отрезку, на другие сезоны года. Так, например, наличие отрицательной корреляции показателей АД с  $T_{атм}$ , полученной по результатам зимних наблюдений, не дает основания утверждать, что в другие сезоны реакция останется аналогичной.

В данной работе типы реакций организма на изменение метеопараметров показаны для ограниченного числа испытуемых, однако каждый такой результат основан на

весьма значительном статистическом материале индивидуальных наблюдений, не имеющем более ранних аналогов. В сочетании с представлениями о возможных физиологических механизмах они являются основой для рабочей модели, которая допускает дальнейшее развитие и верификацию, и могут рассматриваться как «реперные» для сравнения и интерпретации результатов измерений других волонтеров, в том числе и полученных на более коротких интервалах наблюдений. В частности, в рамках предложенной модели находят объяснение казавшиеся разрозненными результаты предыдущих исследований индивидуальной чувствительности показателей АД к внешним факторам.

Верификация предложенной рабочей модели возможна и за счет расширения числа мониторируемых параметров, измеряемых неинвазивными методами, например показателей variability сердечного ритма (ВСР). К сожалению, в существующих на настоящий момент работах по анализу метео- и магниточувствительности индивидуальных показателей ВСР нет детального сопоставления их поведения с поведением показателей АД [Черноус и др., 2004; Поскотнинова, Григорьев, 2008].

Информация о численных характеристиках реакций основных гемодинамических показателей на изменение внешних факторов и детальное понимание механизмов таких индивидуальных реакций важны как в практическом, так и в теоретическом плане. На практике эта информация дает основания для обоснованной оценки персонального риска развития сердечно-сосудистых катастроф, обусловленных вариациями внешних факторов. В научном плане такие знания необходимы как платформа для предметного исследования характеристик реакции организма на действие факторов космической погоды. Так как одним из важных звеньев развития реакции на магнитные бури в настоящее время считается процесс активации симпатического звена вегетативной нервной системы, можно утверждать, что на действие факторов космической и земной погоды отвечают одни и те же системы организма. И реакция организма на действие магнитной бури может быть в значительной мере обусловлена его текущим состоянием, определяемом степенью активации регуляторных механизмов.

### Выводы

На основании результатов четырехлетних наблюдений ежедневных вариаций уровня АД и ЧСС у семи здоровых волонтеров были обнаружены два типа реакции комплекса ФП на изменение метеопараметров (в первую очередь – температуры воздуха):

а) монотонное (но неравномерное по скорости) снижение уровня САД с ростом температуры при более слабой реакции ДАД и отсутствии реакции ЧСС (у четверых волонтеров);

б) двухфазное поведение, которое совпадает с первым типом реакции в диапазоне низких температур и характеризуется положительной корреляцией САД, ДАД и ЧСС с  $T_{\text{атм}}$  при  $T > -5^\circ\text{C}$  (у двоих волонтеров).

Первый тип реакции выражается в понижении ударного объема крови при повышении температуры воздуха и слабо зависит от остальных метеорологических показателей (атмосферного давления и относительной влажности). Он может быть обусловлен сочетанием разных физиологических механизмов, обеспечивающих развитие компенсаторно-приспособительной реакции. Так, в области высоких значений темпе-

ратуры реакция уровня САД на температуру может быть вызвана активацией центральных гипоталамических структур, снижением тонуса вен и артерий кожи и снижением объема циркулирующей жидкости. При низких (отрицательных) значениях  $T_{\text{атм}}$ , по-видимому, доминирует эффект, связанный с активацией работы щитовидной железы.

Второй тип реакции выражается в возрастании МОК с ростом температуры (и снижением атмосферного давления) и по всему комплексу признаков совпадает с развитием компенсаторно-приспособительной реакции на недостаток содержания кислорода в воздухе (внешняя гипоксия). Зависимость от парциального содержания кислорода наблюдается именно в области пониженных значений  $P(\text{O}_2)$ .

Коэффициенты линейной регрессии показателей АД от температуры воздуха в отдельных диапазонах температур могут достигать значения 0.8 мм рт. ст./°С, что означает, например, увеличение среднего уровня САД на 15–16 мм рт. ст. при понижении температуры с –5 до –25 °С. Средние значения коэффициентов линейной регрессии составляют 0.15–0.40. Сходные величины амплитуд изменения АД были получены нами ранее при исследовании реакций волонтеров с диагнозом «Артериальная гипертензия» в условиях экстремальной северной зимы.

В настоящей работе типы реакций организма человека на изменение метеорологических параметров показаны для ограниченного числа испытуемых, однако каждый такой результат основан на значительном статистическом материале индивидуальных наблюдений, не имеющем ранних аналогов. В сочетании с предложенными детально проработанными физиологическими механизмами они являются основой рабочей модели, которая допускает дальнейшее развитие и верификацию, и могут рассматриваться как «реперные» для сравнения и интерпретации результатов измерений других волонтеров, в том числе и полученных на более коротких интервалах наблюдений. В частности, в рамках предложенной модели находят объяснение ранее казавшиеся разрозненными результаты предыдущих исследований индивидуальной чувствительности показателей АД к внешним факторам.

### Благодарности

Работа поддержана грантом Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине».

### Литература

- Авцын А.П., Марачев А.Г., Матвеев А.Н. Циркумпольярный гипоксический синдром // Вестник АМН СССР. 1979. № 6. С. 32–39.
- Агаджанян Н.А. Адаптация и резервы организма. М.: ФиС, 1983. 176 с.
- Агаджанян Н.А., Петрова П.Г. Человек в условиях Севера. М.: КРУК, 1996. 208 с.
- Агаджанян Н.А., Смирнов В.М. Нормальная физиология. М.: Мед. информ. агентство, 2009. 520 с.
- Адаптация к экстремальным геофизическим факторам и профилактика метеотропных реакций: Тез. докл. Регионального симпозиума, г. Новосибирск, 1–3 ноября 1989 г. Новосибирск, 1989. 91 с.

- Андропова Т.И., Деряпа Н.Р., Соломатин А.П. Гелиометеотропные реакции здорового и больного человека. Л.: Медицина, 1982. 247 с.
- Ассман Д. Чувствительность человека к погоде. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 245 с.
- Бойко Е.Р. Физиолого-биохимические основы жизнедеятельности человека на Севере. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 190 с.
- Величковский Б.Т. Причины и механизмы снижения коэффициента использования кислорода в легких человека на Крайнем Севере // Биосфера. 2010. Т.1, № 2. С. 213–217.
- Гайтон А.К., Холл Дж.Э. Медицинская физиология. М.: Логосфера, 2008. 1296 с.
- Гидродинамика кровообращения / Под ред. С.А. Регирера. М.: Мир, 1971. 271 с.
- Гудков А.Б., Попова О.Н., Небученных А.А. Новоселы на Европейском Севере: Физиолого-гигиенические аспекты. Архангельск: Изд-во Сев. гос. мед. ун-та, 2012. 285 с.
- Гурин В.Н. Терморегуляция и симпатическая нервная система. Минск: Наука и техника, 1989. 231 с.
- Деряпа Н.Р., Рябинин И.Ф. Адаптация человека в полярных районах Земли. Л.: Медицина, 1977. 218 с.
- Зенченко Т.А., Мёрзлый А.М., Солонин Ю.Г. Сравнение случаев индивидуальной метеочувствительности человека в экстремальных условиях зимы северных и средних широт // Экология человека. 2011. № 11. С. 3–13.
- Зенченко Т.А., Рехтина А.Г., Хорсева Н.И., Заславская Р.М., Бреус Т.К. Сравнительный анализ чувствительности различных показателей гемодинамики здоровых людей к действию атмосферных факторов в условиях средних широт // Геофизические процессы и биосфера. 2009. Т. 8, № 4. С. 61–76.
- Зенченко Т.А., Цагарешвили Е.В., Ощепкова Е.В., Рогоза А.Н., Бреус Т.К. К вопросам влияния геомагнитной и метеорологической активности на больных артериальной гипертензией // Клиническая медицина. 2007. № 1. С. 31–35.
- Зенченко Т.А., Цандеков П.А., Григорьев П.Е., Мёрзлый А.М., Зенченко К.И., Хорсева Н.И., Григал П.П. Исследование характера связей физиологических и психофизиологических показателей организма с метеорологическими и геомагнитными факторами // Геофизические процессы и биосфера. 2008. Т. 7, № 3. С. 25–36.
- Камкин А.Г., Каменский А.А. Фундаментальная и клиническая физиология. М.: Академия, 2004. 1072 с.
- Каро К., Педли Т., Шротер Р., Сид У. Механика кровообращения: Пер. с англ. М.: Мир, 1981. 624 с.
- Козлов А.Г. Адренергическая регуляция: молекулярные механизмы. Киев: Техника, 1993. 161 с.
- Меерсон Ф.З., Твердохлиб В.П., Боев В.М., Фролов Б.А. Адаптация к периодической гипоксии в терапии и профилактике. М.: Наука, 1989. 70 с.
- Меерсон Ф.З. Адаптационная медицина: концепция долговременной адаптации. М.: Дело, 1993. 138 с.
- Михайлов В.В. Основы патологической физиологии. М.: Медицина, 2001. 704 с.
- Морман Д., Хеллер Л. Физиология сердечно-сосудистой системы. СПб.: Питер, 2000. 256 с.
- Никберг И.И., Ревуцкий Е.Л., Сакали Л.И. Гелиометеотропные реакции человека. Киев: Здоров'я, 1986. 144 с.
- Овчарова В.Ф. Основные принципы специализированного прогноза погоды для медицинских целей и профилактики метеопатических реакций у больных заболеваниями сердечно-сосудистой системы // Физические факторы в лечении больных с сердечно-сосудистой патологией в условиях Сибири. Томск, 1975. С. 53–61.

- Овчарова В.Ф.* Медицинская интерпретация синоптических и метеорологических прогнозов // Влияние геофизических и метеорологических факторов на жизнедеятельность организма. Новосибирск, 1979. С. 38–44.
- Овчарова В.Ф.* Определение содержания кислорода в атмосферном воздухе на основе метеорологических параметров (давления, температуры, влажности) с целью прогнозирования гипоксического эффекта атмосферы // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физкультуры. 1981. № 2. С. 29–34.
- Поскотинова Л.В., Григорьев П.Е.* Зависимость типологических особенностей вегетативных реакций здоровых лиц от фоновых показателей // Экология человека. 2008. № 5. С. 3–8.
- Поскотинова Л.В.* Вегетативная регуляция ритма сердца и эндокринный статус молодежи в условиях Европейского Севера России. Екатеринбург, 2010. 264 с.
- Рафф Г.* Секреты физиологии. СПб.: БИНОМ–Невский диалект, 2001. 448 с.
- Ткаченко Б.И.* Нормальная физиология. СПб.: Питер, 2005. 928 с.
- Физиология человека. В 3-х т. Пер. с англ. / Под ред. Р. Шмидта и Г. Тевса. М.: Мир, 2005. 323 с.
- Черноус С.А.* Особенности variability сердечного ритма в период геомагнитных возмущений в полярных областях // Тезисы Междисциплинарного семинара «Биологические эффекты солнечной активности», г. Пушино, 6–9 апреля 2004 г. Пушино, 2004. С. 9–10.
- Швалев В.Н., Сосунов А.А., Гуски Г.* Морфологические основы иннервации сердца. М.: Наука, 1992. 368 с.
- Шеповальников В.Н., Сороко С.И.* Метеочувствительность человека / Отв. ред. В.А. Яковлев. Бишкек: Илим, 1992. 247 с.

#### *Сведения об авторах*

**ЗЕНЧЕНКО Татьяна Александровна** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН. 142290, Московская обл., г. Пушино, ул. Институтская, д. 3; старший научный сотрудник, Институт космических исследований РАН. 117997, г. Москва, Профсоюзная ул., д. 84/32. E-mail: zench@mail.ru

**СКАВУЛЯК Александр Николаевич** – младший научный сотрудник, Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН. 142290, Московская обл., г. Пушино, ул. Институтская, д. 3; врач анестезиолог-реаниматолог, больница Пушинского научного центра РАН. 142290, Московская обл., г. Пушино, ул. Институтская, д. 1. E-mail: skalexan@yandex.ru

**ХОРСЕВА Наталия Игоревна** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН. 119334, г. Москва, ул. Косыгина, д. 4. E-mail: sheridan1957@mail.ru

**БРЕУС Тамара Константиновна** – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт космических исследований РАН. 117997, г. Москва, Профсоюзная ул., д. 84/32. Тел.: 8-916-821-27-44. E-mail: breus36@mail.ru

## CHARACTERISTICS OF THE INDIVIDUAL REACTIONS OF THE CARDIOVASCULAR SYSTEM OF HEALTHY PEOPLE TO CHANGE THE METEOROLOGICAL FACTORS IN A WIDE TEMPERATURE RANGE

T.A. Zenchenko<sup>1,2</sup>, A.N. Skavulyak<sup>1</sup>, N.I. Khorseva<sup>2,3</sup>, T.K. Breus<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, Russia

<sup>2</sup> Emanuel Institute of Space Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Abstract.** Based on the results of four years of observations of daily variations in blood pressure (BP) and heart rate (HR) in seven healthy volunteers two distinct types of reactions of complex physiological parameters (PP) on the change in meteorological parameters were found. The first type of reaction – a monotonic (but non-uniform speed) decrease in systolic BP with increasing temperature, most pronounced in the  $T_{\text{atm}} < -5$  °C and  $T_{\text{atm}} > 15$  °C, with a weaker response of diastolic BP and HR of no response (from the four volunteers). The second type of reaction – the two-phase non-monotonic dependence of the BP of the  $T_{\text{atm}}$ , which coincides with the first type in the range  $T_{\text{atm}} < -5$  °C and is characterized by positive correlation of BP and HR to  $T_{\text{atm}}$  at  $T_{\text{atm}} > -5$  °C (for two volunteers). The detailed physiological mechanisms that can provide the observed nature of the compensatory-adaptive reactions of healthy individuals to the effect of weather conditions in different temperature ranges are analyzed. It is shown that the results obtained in earlier studies can be explained on the basis of the discovered patterns.

*Keywords:* blood pressure, parameters of hemodynamics, individual meteorological sensitivity.