

Синхронизации контуров регуляции кровообращения в математической модели сердечно-сосудистой системы

Авторы Ишбулатов Ю. М., Вахлаева К.П.

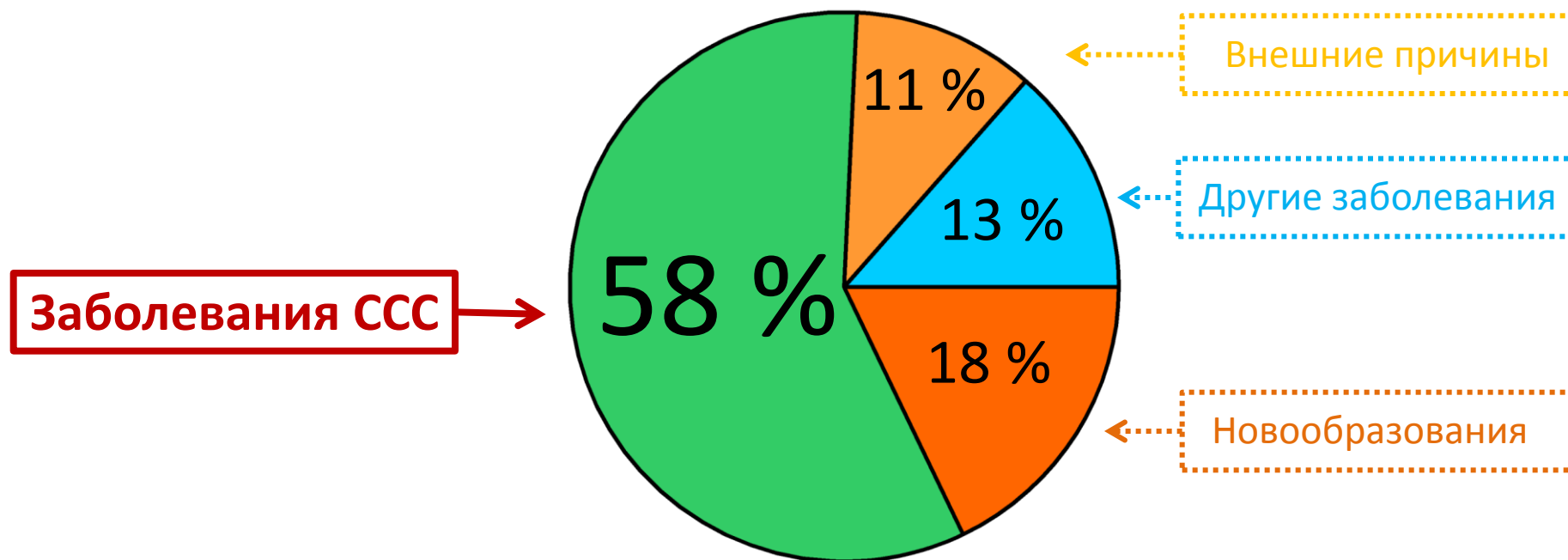
E-mail докладчика: ishbulatov95@mail.ru

Сайт научной группы: www.nonlinmod.sgu.ru

Мотивация работы

Цель: Математическое моделирование сердечно-сосудистой системы во время физиологических проб и при патологиях

Структура смертности в развитых странах



Проблемы экспериментального исследования ССС

1. Этические проблемы

- Исследования ограничены риском для здоровья испытуемых
- Невозможность исследовать ССС пациентов с патологиями

2. Техническая сложность измерений

- Многие величины сложно или невозможно измерить

3. Сложность обработки экспериментальных данных

- Экспериментальные записи короткие и нестационарные
- Сложно адекватно подобрать параметры методов анализа
- Сложно интерпретировать результаты

Преимущества исследования ССС с помощью моделей

1. Возможность тестировать методы анализа

- В модели известно, какой результат должны давать методы анализа, что позволяет проверить их работоспособность и подобрать параметры.

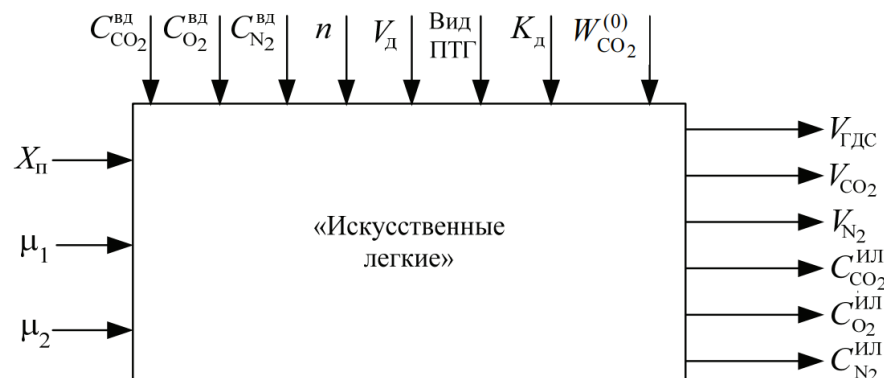
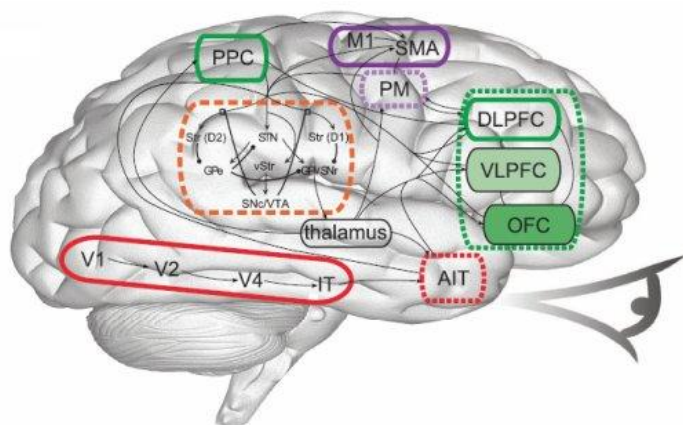
2. Отсутствие технических ограничений

- В модели возможно сгенерировать данные любой длины и без шумов.
- В модели возможно наблюдать за любым параметром без операционного вмешательства

3. Возможность тестировать гипотезы

- Возможно сгенерировать несколько вариантов модели, которые реализуют разные гипотезы, и сопоставить с реальными данными.

Актуальность моделирования



Изучение мозга человека

- Tenti G, Sivaloganathan S., Drake J.M. // Neurosurgery. 2008 62(5):1146-56
- Некоркин В.И., Дмитричев А.С., Щапин, Д.С. и др. // Математическое моделирование. 2005. 17(6):75–91.
- Diesmann M., Gewaltig M.O., Aertsen A. // Nature. 1999. 402(6761): 529–533.

Изучение дыхания

- King, J., Unterkofler, K., Teschl, G. et al. // Journal of mathematical biology. 2011. 63: 959.
- Белебезьев Г.И., Козяр В.В. Физиология и патофизиология искусственной вентиляции легких. Часть I. 2003

Изучение распространения заболеваний

- Daley, D. J. & Gani, J. (2005). Epidemic Modeling: An Introduction. NY: Cambridge University Press.
- Brauer, F. & Castillo-Chávez, C. (2001). *Mathematical Models in Population Biology and Epidemiology*. NY: Springer.

Изучение раковых заболеваний

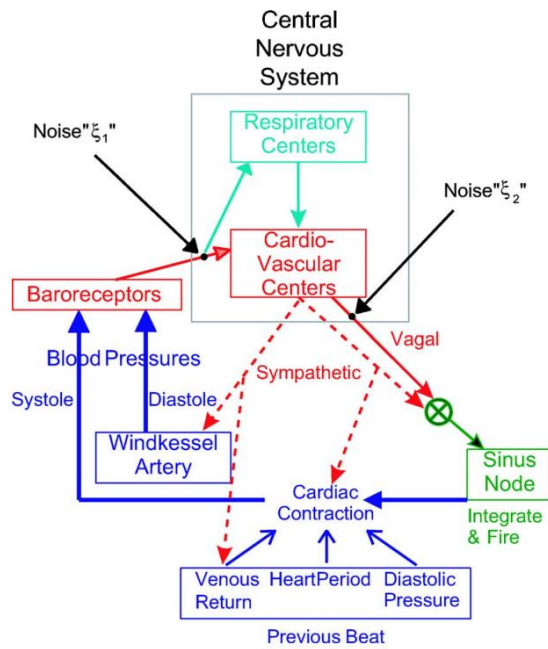
- Philipp M.A., Lin L.L., Franziska M. // Nature reviews. Cancer. 2015. 15: 730-745.
- Serre R., Benzekry S., Padovani L. // Cancer Research 2016. 76(17):4931-40.

Изучение устройства печени

- Remien C.H., Adler F.R., Waddoups L. // Hepatology. 2012. 56(2):727-34.
- Yamamoto, K. N., Ishii M., Hirokawa F. et al. // Science Reports. 2016. 6: 34214

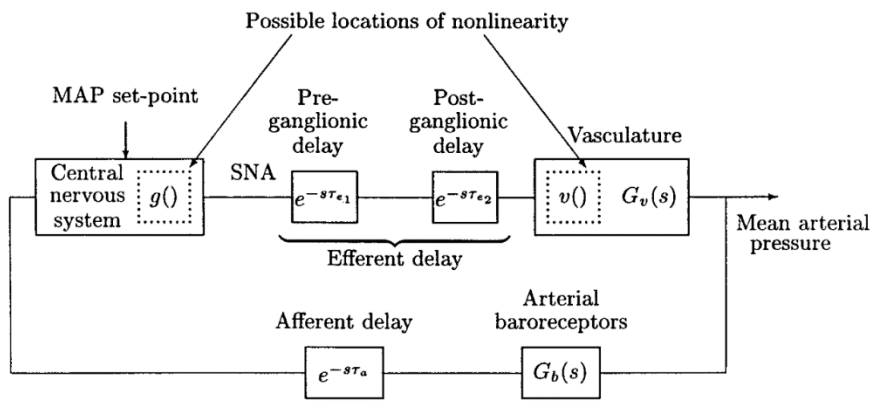
Существующие модели

Многокомпонентные модели



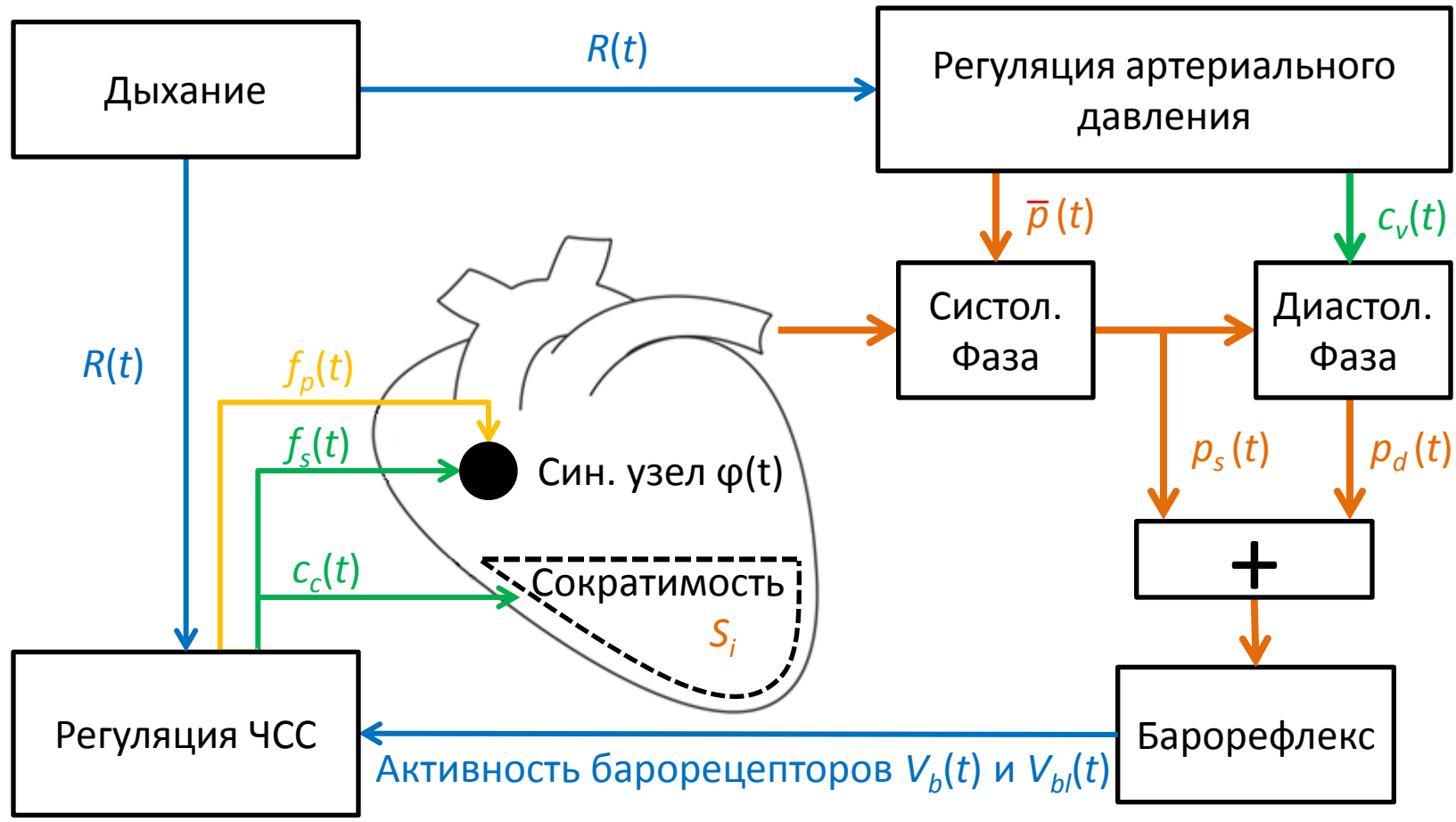
- *Kotani K. et al.* // Physical Review E. -2005. -V. 72. - 041904.
- *Ottesen J.T.* // Mathematical and Computer Modelling. 2000. V. 31. P. 167.
- *Silvani A. et al.* // Autonomic neuroscience: basic&clinical. 2011. V. 162. P. 66.
- *Seidel H., Herzog H.* // Physica D: Nonlinear Phenomena. 1998. V. 115. P. 145.
- *Ursino M. et. al.* // J. Integrative Neuroscience. -2003. -V. 2. -No. 2. -P. 219.

Локальные модели



- *Warner H.R.* // Circulation. 1958. Res. 6. P. 35.
- *Ringwood J.V. et al.* // American Journal of Physiology. 2001. V. 280. P. 1105.
- *Burgess D.E. et. al.* // American Journal of Physiology. 1997. V. 273. P. R1878.

Модель ССС



- Симпатическая активность
- Артериальное давление
- Парасимпатическая активность
- Другие сигналы

*Kotani K., Struzik Z.R. Takamasu K. Stanley H.E., Yamamoto Y. // Physical Review E. -2005. -V. 72. -041904.
 Ringwood J., Malpas S. // Am. J. Physiol. -2001, -V.280, -№.4, -R1105-R1115.*

Модель ССС

$$1) \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{1}{T_0} f_s(t) f_p(t)$$

$$2) \frac{dp_{dia}(t)}{dt} = -\frac{p_{dia}(t)}{R(t)C}$$

$$3) \frac{dc(t)}{dt} = -\frac{c(t)}{\tau_{cNa}} + 1.2 v_s(t - \theta)$$

$$4) \varepsilon \frac{d\bar{p}(t)}{dt} = -\bar{p}(t) + f(\bar{p}(t - \tau)) + 2.5 B(t)$$

$$5) S_i(t) = S'_i(t) + (35.0 - S'_i) \frac{S'_i(t)^3}{35.0^3 + S'_i(t)^3}$$

$$6) S'(t)_i = -13.8 + 40 c(t) + 10T_{i-1}$$

$$7) p_{sys}(t) = D_{i-1} + S_i(t) \frac{(t - T_{i-1})}{T_{sys}} \exp(1 - \frac{(t - T_{i-1})}{T_{sys}}) + 3.0 \bar{p}(t)$$

$$8) R(t) = R_0(1 + 0.015 f(\bar{p}(t - \tau_e)))$$

$$9) v_b(t) = 0.02(p(t) - 50) + 0.00125 \frac{dp(t)}{dt}$$

$$10) v_s(t) = \max(0, -0.7v_b(t) + 0.025 B(t))$$

$$11) v_p(t) = \max(0, 0.3v_b(t) + 0.025 B(t) + \xi(t))$$

$$12) f_s(t) = 1 + 1.6 \left(c(t) + (2.0 - c(t)) \frac{c(t)^2}{2.0^2 + c(t)^2} \right)$$

$$13) f_p(t) = 1 + 5.8 \left(v_p(t - \theta_p) + (2.5 - v_p(t - \theta_p)) \frac{v_p^2(t - \theta_p)}{2.5^2 + v_p^2(t - \theta_p)} \right) F(\varphi(t))$$

$$14) F(\varphi(t)) = (t)^{1.3} (\varphi(t) - 0.45) \frac{(1 - \varphi(t))^3}{(1 - 0.8)^3 + (1 - \varphi(t))^3}$$

T_0	0.55 c	ε	2.0
\hat{S}	35 MM PT. CT.	τ	3.6 c
n_c	3	k_m^r	2.5
k_S^c	40 MM PT. CT.	f_r	0.29 1/c
k_S^i	10 1/MM PT. CT.	G	1.65
T_{sys}	0.125 c	r^*	2
k_p^M	3 MM PT. CT.	α	1
R_0C	1.5 c	β	2
k_v^M	0.015	x^*	0.5
τ_e	3.24 c	y^*	0
k_1	0.02 1/MM PT. CT.	k_ϕ^c	1.6
k	0.00125 c/MM PT. CT.	\hat{c}	2.0
p_0	50 MM PT. CT.	n_c	2.0
$v_s^{(0)}$	0.8	k_ϕ^p	5.8
k_s^b	0.7	θ_p	0.5 c
k_s^r	0.025	\hat{v}_p	2.5
$v_p^{(0)}$	0.0	n_s, n_p	2.0
k_p^b	0.3	τ_c	2.0 c
k_p^r	0.025	k_c^s	1.2
$std \xi(t)$	0.1	θ_c	1.65 c

Модель ССС

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{1}{T_0} f_s(t) f_p(t)$$

$$p_{sys}(t) = D_{i-1} + S_i(t) \frac{(t - T_{i-1})}{T_{sys}} \exp\left(1 - \frac{(t - T_{i-1})}{T_{sys}}\right)$$

$$\frac{dp_{dia}(t)}{dt} = -\frac{p_{dia}(t)}{R(t)C}$$

$$R(t) = R_0(1 + 0.015 c_v(t))$$

$$v_b(t) = 0.1(p(t) - 50) + 0.005 \frac{dp(t)}{dt}$$

$$v_{bl}(t) = 0.1(p(t) - 40) + 0.001 \frac{dp(t)}{dt}$$

$$v_s(t) = -2.5 \tanh(0.5v_b(t) - 6.5) + 1 + 0.23B(t)$$

$$v_{sl}(t) = -2.5 \tanh(0.5v_{bl}(t) - 6.5) + 1 + 0.23B(t)$$

$$v_p(t) = \max(0, 0.3v_b(t) + 0.025 R(t) + \xi(t))$$

$$f_s(t) = 1 + 1.6 \left(c_c(t) + (2.0 - c_c(t)) \frac{c_c(t)^2}{2.0^2 + c_c(t)^2} \right)$$

$$\frac{dc_c(t)}{dt} = -\frac{c_c(t)}{\tau_{cNa}} + 1.2 v_s(t - \theta)$$

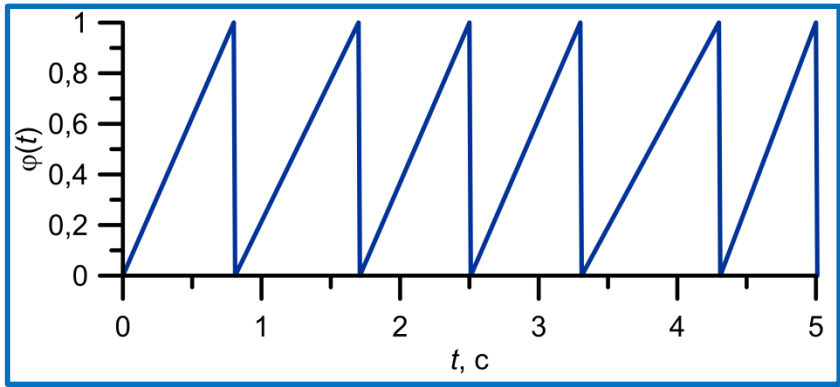
$$\frac{dc_v(t)}{dt} = -\frac{c_v(t)}{\tau_{cNa}} + 0.036 v_{sl}(t - \theta)$$

$$S_i(t) = S'_i(t) + (35.0 - S'_i) \frac{S'_i(t)^3}{35.0^3 + S'_i(t)^3}$$

$$S'_i(t)_i = -13.8 + 40 c(t) + 10T_{i-1}$$

$$f_p(t) = 1 + 5.8 \left(v_p(t - \theta_p) + (2.5 - v_p(t - \theta_p)) \frac{v_p^2(t - \theta_p)}{2.5^2 + v_p^2(t - \theta_p)} \right) F(\varphi(t))$$

$$F(\varphi(t)) = (t)^{1.3} (\varphi(t) - 0.45) \frac{(1 - \varphi(t))^3}{(1 - 0.8)^3 + (1 - \varphi(t))^3}$$



- Симпатическая активность
- Парасимпатическая активность

- Артериальное давление
- Другие сигналы

Модель ССС

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{1}{T_0} f_s(t) f_p(t)$$

$$p_{sys}(t) = D_{i-1} + S_i(t) \frac{(t - T_{i-1})}{T_{sys}} \exp\left(1 - \frac{(t - T_{i-1})}{T_{sys}}\right)$$

$$\frac{dp_{dia}(t)}{dt} = -\frac{p_{dia}(t)}{R(t)C}$$

$$R(t) = R_0(1 + 0.015 c_v(t))$$

$$v_b(t) = 0.1(p(t) - 50) + 0.005 \frac{dp(t)}{dt}$$

$$v_{bl}(t) = 0.1(p(t) - 40) + 0.001 \frac{dp(t)}{dt}$$

$$v_s(t) = -2.5 \tanh(0.5v_b(t) - 6.5) + 1 + 0.23B(t)$$

$$v_{sl}(t) = -2.5 \tanh(0.5v_{bl}(t) - 6.5) + 1 + 0.23B(t)$$

$$v_p(t) = \max(0, 0.3v_b(t) + 0.025 R(t) + \xi(t))$$

$$f_s(t) = 1 + 1.6 \left(c_c(t) + (2.0 - c_c(t)) \frac{c_c(t)^2}{2.0^2 + c_c(t)^2} \right)$$

$$\frac{dc_c(t)}{dt} = -\frac{c_c(t)}{\tau_{cNa}} + 1.2 v_s(t - \theta)$$

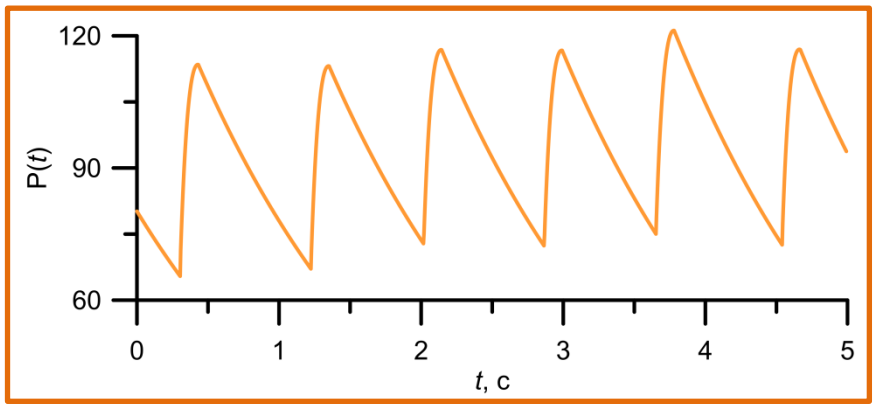
$$\frac{dc_v(t)}{dt} = -\frac{c_v(t)}{\tau_{cNa}} + 0.036 v_{sl}(t - \theta)$$

$$S_i(t) = S'_i(t) + (35.0 - S'_i) \frac{S'_i(t)^3}{35.0^3 + S'_i(t)^3}$$

$$S'_i(t)_i = -13.8 + 40 c(t) + 10T_{i-1}$$

$$f_p(t) = 1 + 5.8 \left(v_p(t - \theta_p) + (2.5 - v_p(t - \theta_p)) \frac{v_p^2(t - \theta_p)}{2.5^2 + v_p^2(t - \theta_p)} \right) F(\phi(t))$$

$$F(\phi(t)) = (t)^{1.3} (\phi(t) - 0.45) \frac{(1 - \phi(t))^3}{(1 - 0.8)^3 + (1 - \phi(t))^3}$$



- Симпатическая активность
- Парасимпатическая активность

- Артериальное давление
- Другие сигналы

Модель ССС

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{1}{T_0} f_s(t) f_p(t)$$

$$p_{sys}(t) = D_{i-1} + S_i(t) \frac{(t - T_{i-1})}{T_{sys}} \exp\left(1 - \frac{(t - T_{i-1})}{T_{sys}}\right)$$

$$\frac{dp_{dia}(t)}{dt} = -\frac{p_{dia}(t)}{R(t)C}$$

$$R(t) = R_0(1 + 0.015 c_v(t))$$

$$f_s(t) = 1 + 1.6 \left(c_c(t) + (2.0 - c_c(t)) \frac{c_c(t)^2}{2.0^2 + c_c(t)^2} \right)$$

$$\frac{dc_c(t)}{dt} = -\frac{c_c(t)}{\tau_{cNa}} + 1.2 v_s(t - \theta)$$

$$\frac{dc_v(t)}{dt} = -\frac{c_v(t)}{\tau_{cNa}} + 0.036 v_{sl}(t - \theta)$$

$$S_i(t) = S'_i(t) + (35.0 - S'_i) \frac{S'_i(t)^3}{35.0^3 + S'_i(t)^3}$$

$$S'_i(t)_i = -13.8 + 40 c(t) + 10T_{i-1}$$

$$f_p(t) = 1 + 5.8 \left(v_p(t - \theta_p) + (2.5 - v_p(t - \theta_p)) \frac{v_p^2(t - \theta_p)}{2.5^2 + v_p^2(t - \theta_p)} \right) F(\varphi(t))$$

$$F(\varphi(t)) = (t)^{1.3} (\varphi(t) - 0.45) \frac{(1 - \varphi(t))^3}{(1 - 0.8)^3 + (1 - \varphi(t))^3}$$

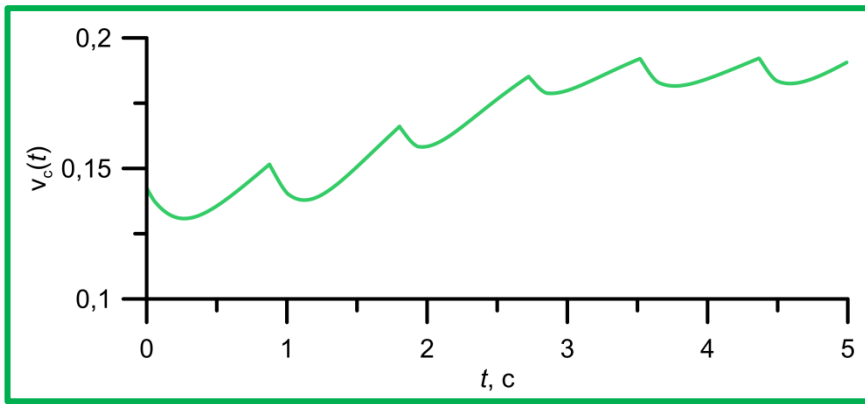
$$v_b(t) = 0.1(p(t) - 50) + 0.005 \frac{dp(t)}{dt}$$

$$v_{bl}(t) = 0.1(p(t) - 40) + 0.001 \frac{dp(t)}{dt}$$

$$v_s(t) = -2.5 \tanh(0.5v_b(t) - 6.5) + 1 + 0.23B(t)$$

$$v_{sl}(t) = -2.5 \tanh(0.5v_{bl}(t) - 6.5) + 1 + 0.23B(t)$$

$$v_p(t) = \max(0, 0.3v_b(t) + 0.025 R(t) + \xi(t))$$



- Симпатическая активность
- Парасимпатическая активность

- Артериальное давление
- Другие сигналы

Модель ССС

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{1}{T_0} f_s(t) f_p(t)$$

$$p_{sys}(t) = D_{i-1} + S_i(t) \frac{(t - T_{i-1})}{T_{sys}} \exp\left(1 - \frac{(t - T_{i-1})}{T_{sys}}\right)$$

$$\frac{dp_{dia}(t)}{dt} = -\frac{p_{dia}(t)}{R(t)C}$$

$$R(t) = R_0(1 + 0.015 c_v(t))$$

$$v_b(t) = 0.1(p(t) - 50) + 0.005 \frac{dp(t)}{dt}$$

$$v_{bl}(t) = 0.1(p(t) - 40) + 0.001 \frac{dp(t)}{dt}$$

$$v_s(t) = -2.5 \tanh(0.5v_b(t) - 6.5) + 1 + 0.23B(t)$$

$$v_{sl}(t) = -2.5 \tanh(0.5v_{bl}(t) - 6.5) + 1 + 0.23B(t)$$

$$v_p(t) = \max(0, 0.3v_b(t) + 0.025 R(t) + \xi(t))$$

$$f_s(t) = 1 + 1.6 \left(c_c(t) + (2.0 - c_c(t)) \frac{c_c(t)^2}{2.0^2 + c_c(t)^2} \right)$$

$$\frac{dc_c(t)}{dt} = -\frac{c_c(t)}{\tau_{cNa}} + 1.2 v_s(t - \theta)$$

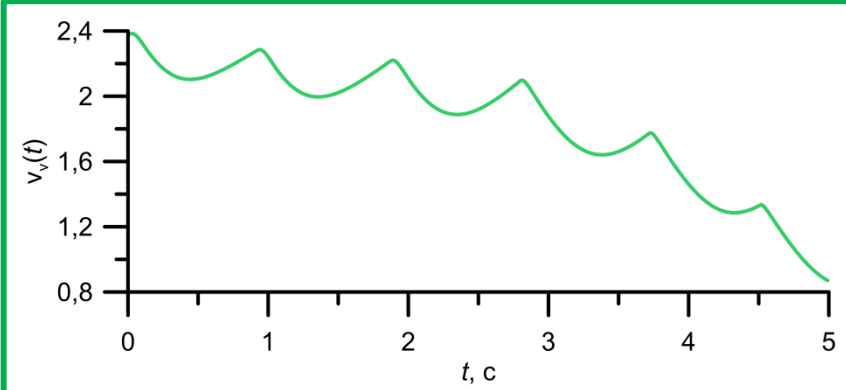
$$\frac{dc_v(t)}{dt} = -\frac{c_v(t)}{\tau_{cNa}} + 0.036 v_{sl}(t - \theta)$$

$$S_i(t) = S'_i(t) + (35.0 - S'_i) \frac{S'_i(t)^3}{35.0^3 + S'_i(t)^3}$$

$$S'_i(t)_i = -13.8 + 4.0 c(t) + 10T_{i-1}$$

$$f_p(t) = 1 + 5.8 \left(v_p(t - \theta_p) + (2.5 - v_p(t - \theta_p)) \frac{v_p^2(t - \theta_p)}{2.5^2 + v_p^2(t - \theta_p)} \right) F(\phi(t))$$

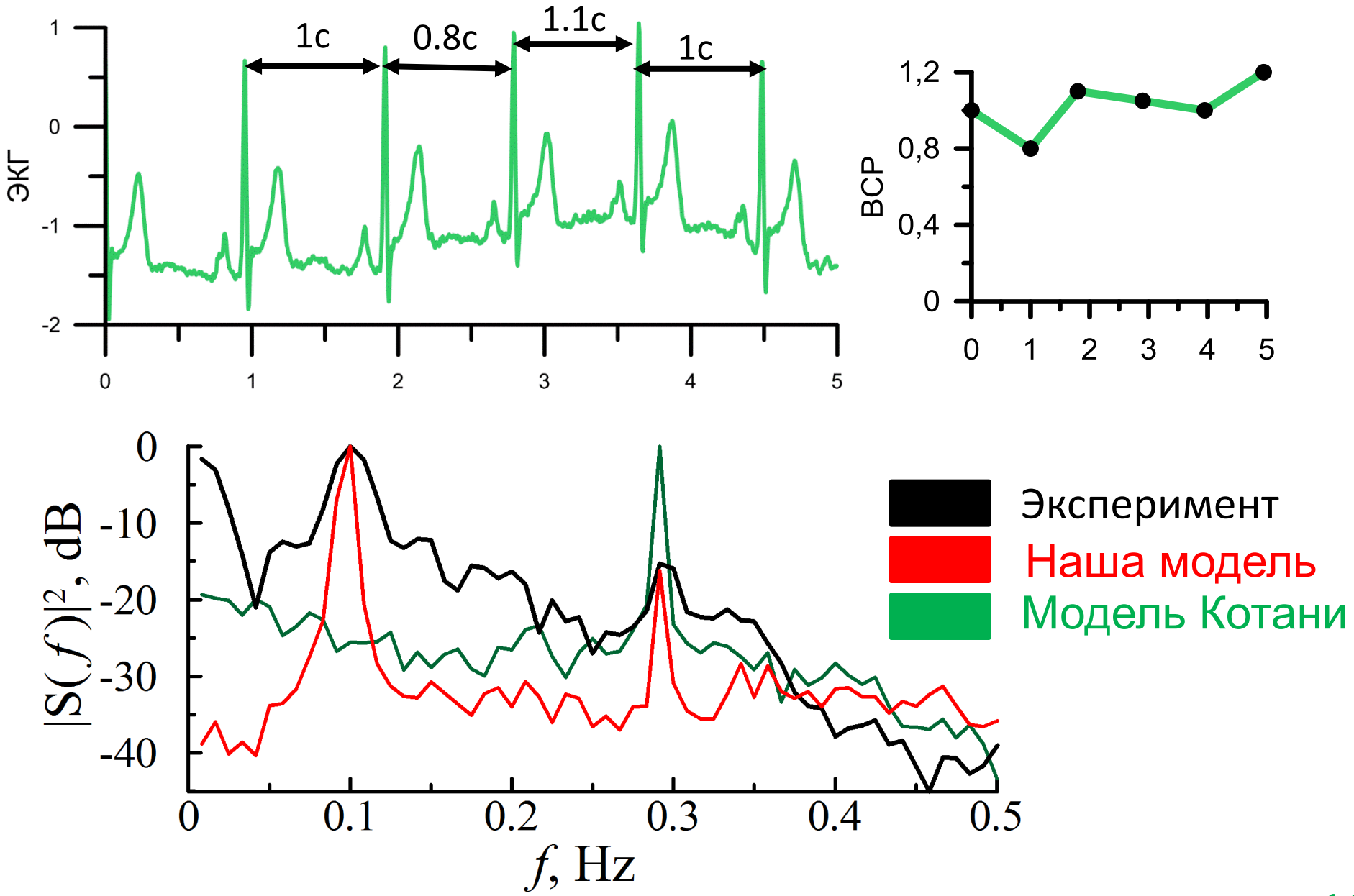
$$F(\phi(t)) = (t)^{1.3} (\phi(t) - 0.45) \frac{(1 - \phi(t))^3}{(1 - 0.8)^3 + (1 - \phi(t))^3}$$



- Симпатическая активность
- Парасимпатическая активность

- Артериальное давление
- Другие сигналы

Воспроизведение реального сигнала ВСР



Воспроизведение характеристик реального сигнала ВСР

10 здоровых пациентов, 20-25 лет.

Записи ВСР длиной 10 минут.

Спектральный анализ					
Индекс	HF	LF	LF/HF	HFpc	LFpc
Эксперимент	543 ± 348	549 ± 218	1.92 ± 1.18	30 ± 12	40 ± 14
Наша модель	249 ± 22	607 ± 29	2.47 ± 0.34	29 ± 4	69 ± 5
Модель Котани	1719 ± 88	228 ± 24	0.13 ± 0.02	66 ± 2	11 ± 2

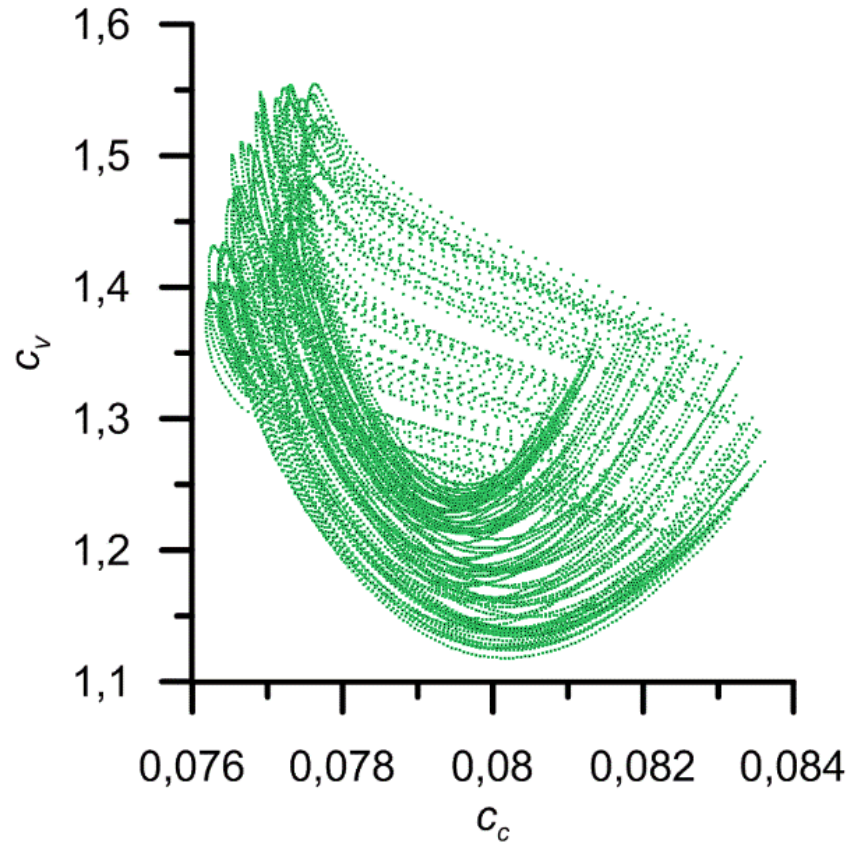
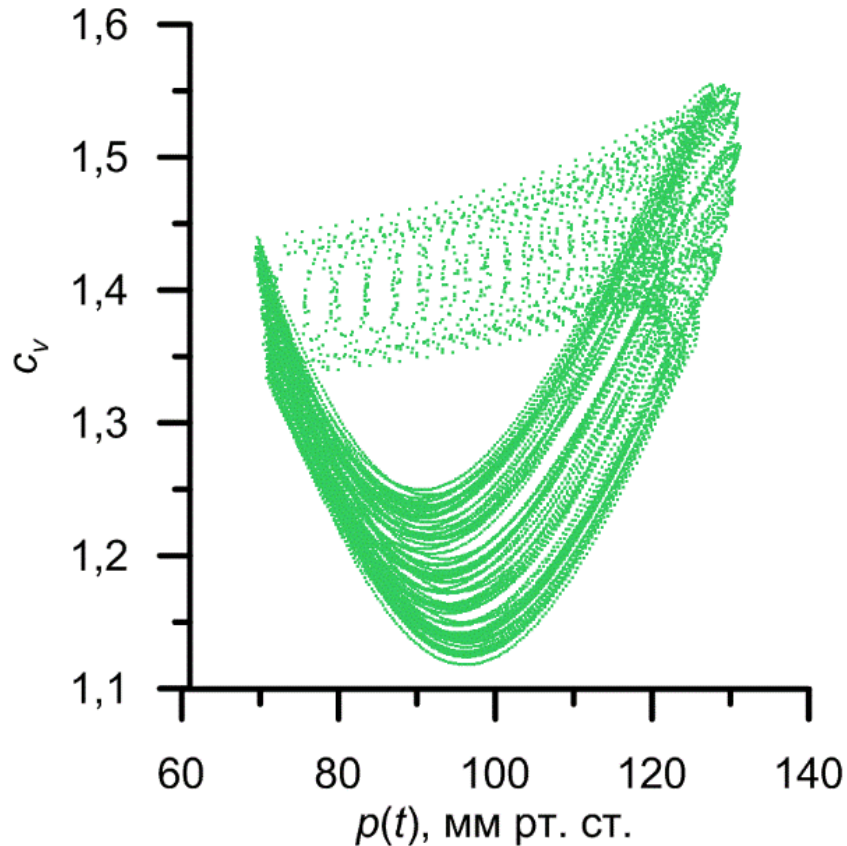
Статистика					
Индекс	HR	SDNN	CV	RMSSD	pNN50
Эксперимент	74 ± 9	57 ± 11	7.0 ± 0.8	46 ± 19	27 ± 18
Наша модель	89 ± 0	45 ± 0	6.8 ± 0.1	52 ± 2	29 ± 2
Модель Котани	46 ± 0	64 ± 1	5.3 ± 0.1	122 ± 3	71 ± 2

Баевский Р.М., Иванов Г. Г. // Вестник аритмологии. Т. 24. 2001. С. 65–86.

Task Force of the European Society of Cardiology the North American Society of Pacing Electrophysiology // Circulation. -1996. -V. 93. -P. 1043-1065. doi:10.1161/01.CIR.93.5.1043

Динамический хаос в модели

Фазовые портреты



Старший показателя Ляпунова: 0.045 ± 0.02

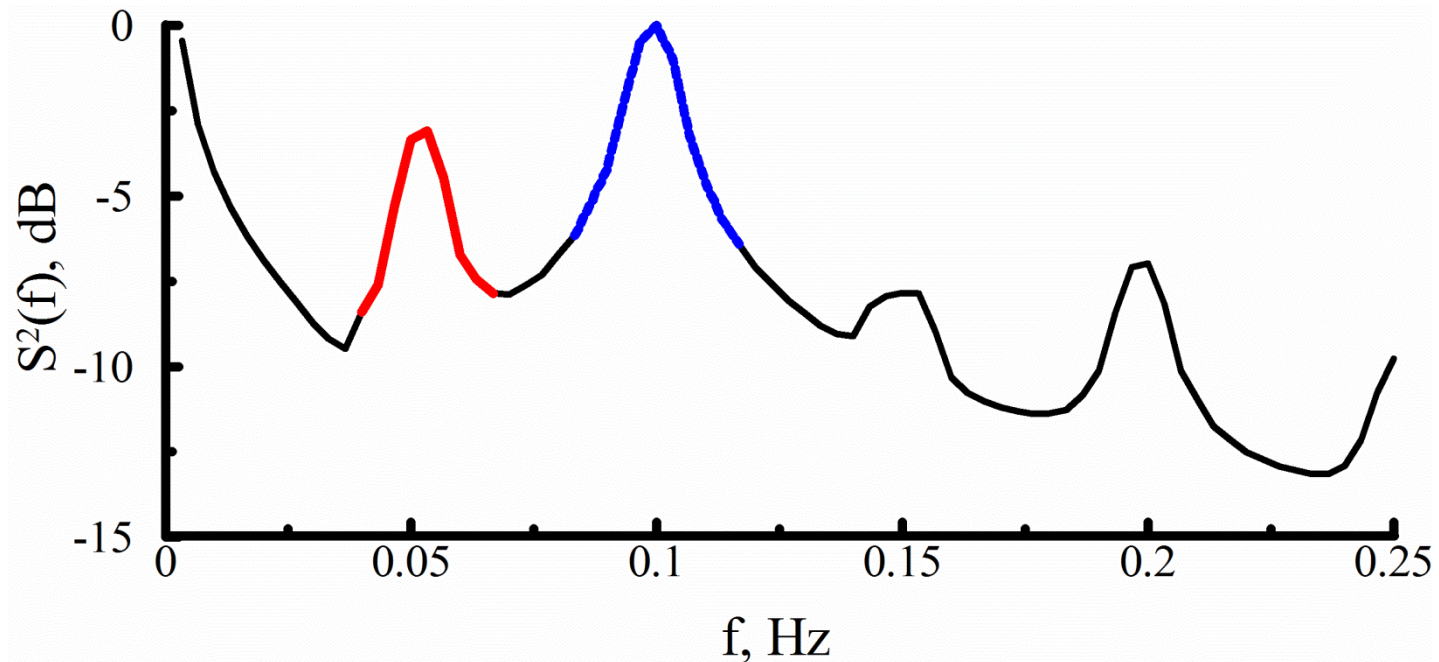
Pool R. // Science (1989) 243: 604

Chialvo D.R., Gilmour JR R.F., Jalife J. // Nature (1990) 343: 653 – 657

Poon C., Merrill C.K. // Nature (1997) 389: 492-495

Частотная синхронизация между дыханием и ритмами регуляции

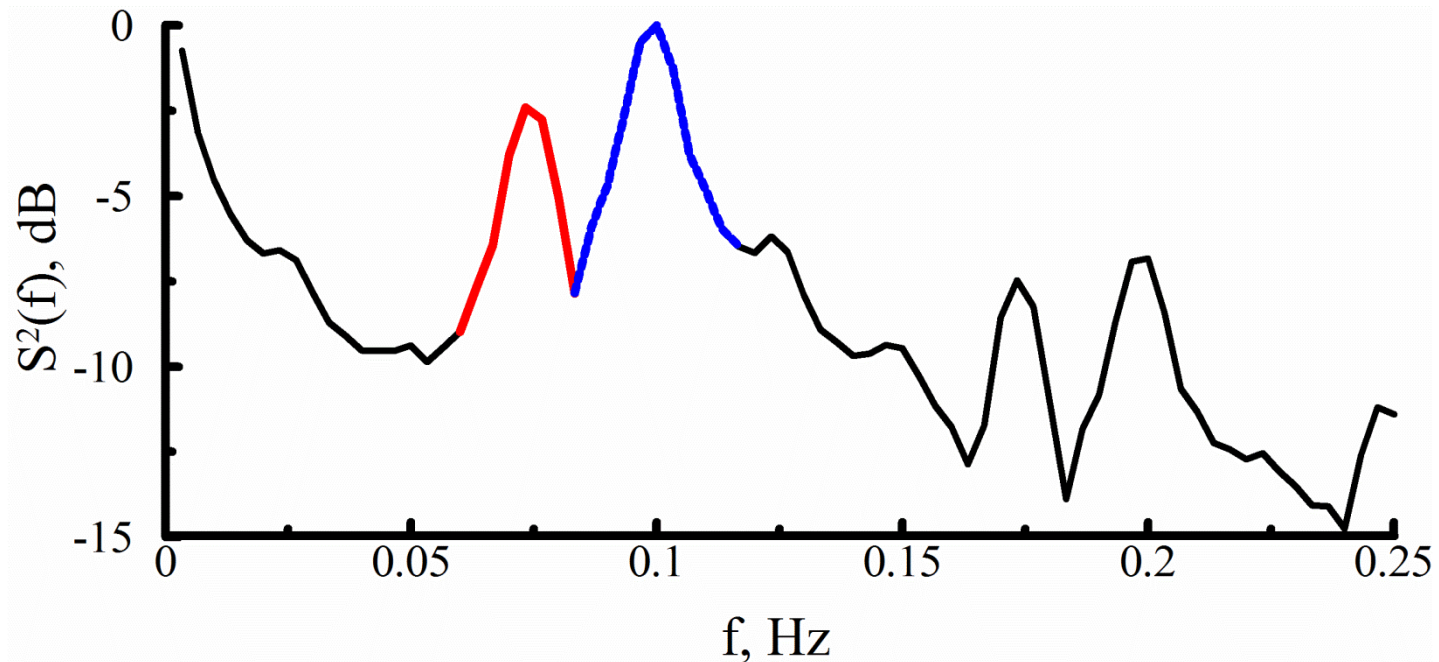
Эксперимент с дыханием по звуковому сигналу, с линейно нарастающей частотой. Частота меняется от 0,05-0,25 Гц. Длительность эксперимента 30 мин.



- Модельный спектр ВСР
- Ритм дыхания
- Ритм регуляции тонуса сосудов

Частотная синхронизация между дыханием и ритмами регуляции

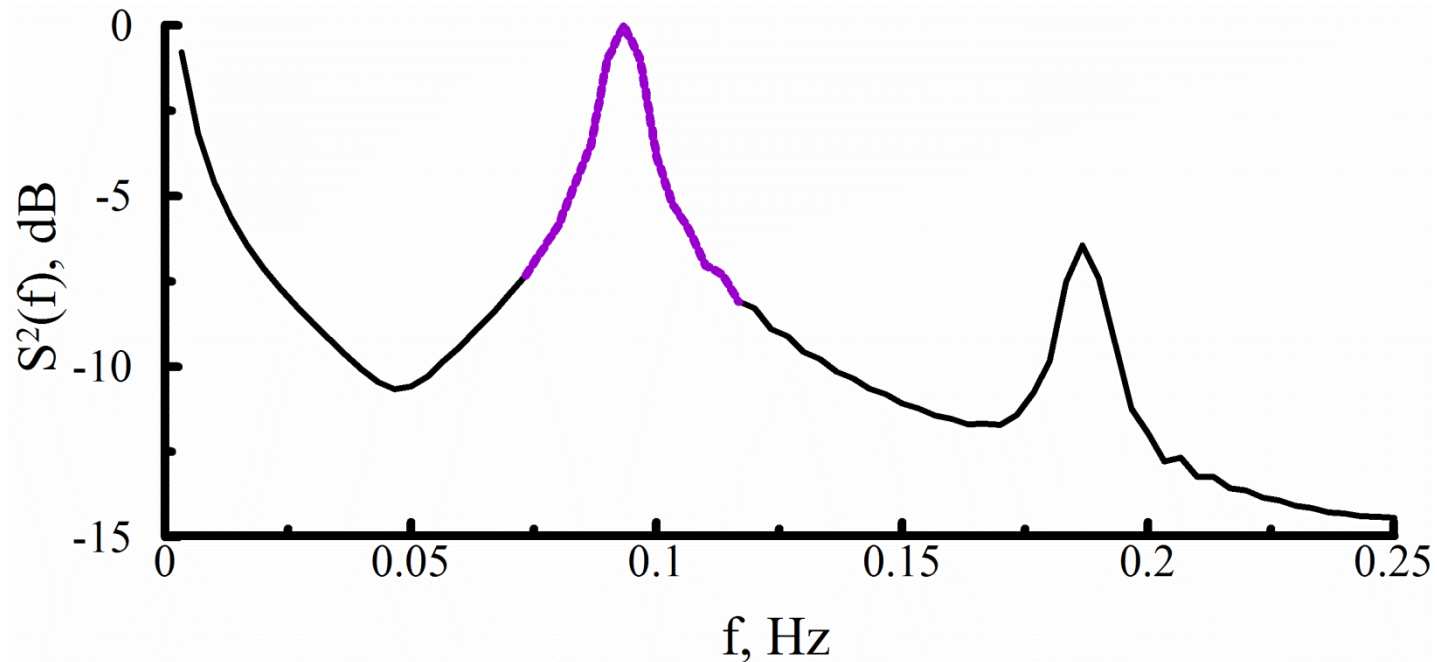
Эксперимент с дыханием по звуковому сигналу, с линейно нарастающей частотой. Частота меняется от 0,05-0,25 Гц. Длительность эксперимента 30 мин.



- Модельный спектр ВСР
- Ритм дыхания
- Ритм регуляции тонуса сосудов

Частотная синхронизация между дыханием и ритмами регуляции

Эксперимент с дыханием по звуковому сигналу, с линейно нарастающей частотой. Частота меняется от 0,05-0,25 Гц. Длительность эксперимента 30 мин.



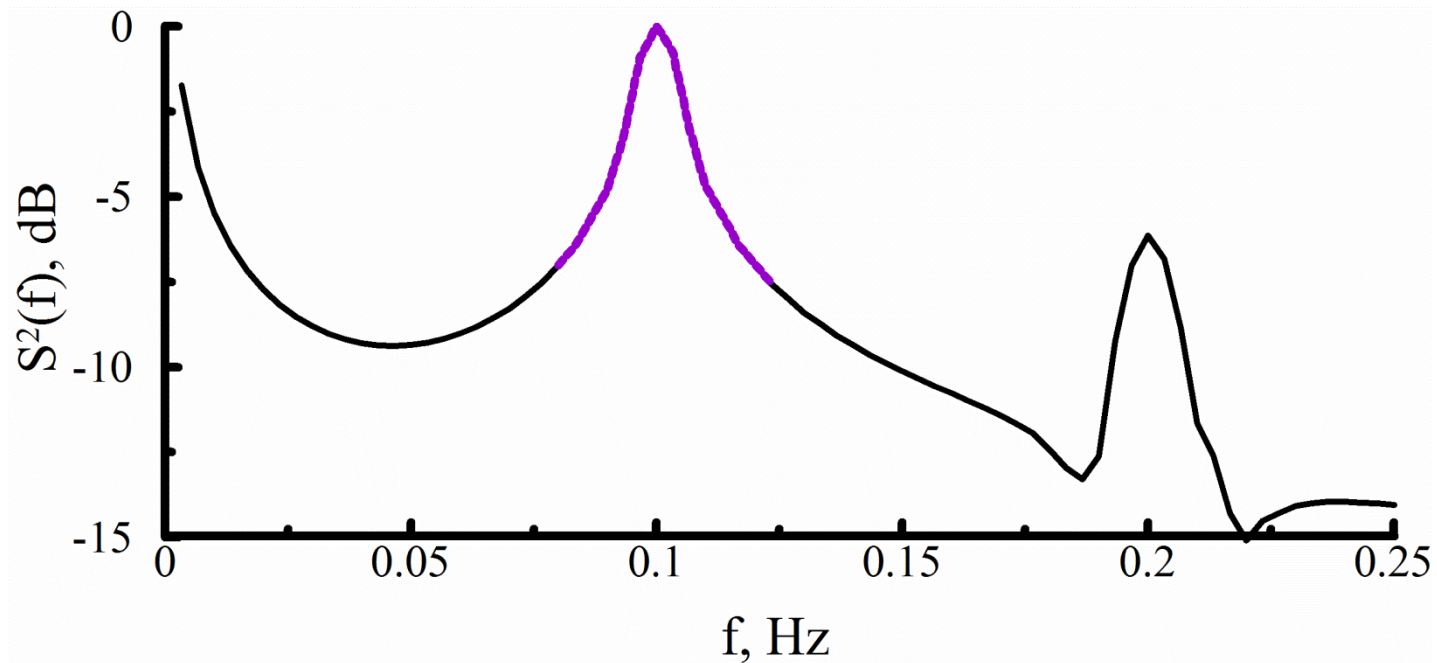
Модельный спектр ВСР



Синхронизированные ритмы

Частотная синхронизация между дыханием и ритмами регуляции

Эксперимент с дыханием по звуковому сигналу, с линейно нарастающей частотой. Частота меняется от 0,05-0,25 Гц. Длительность эксперимента 30 мин.



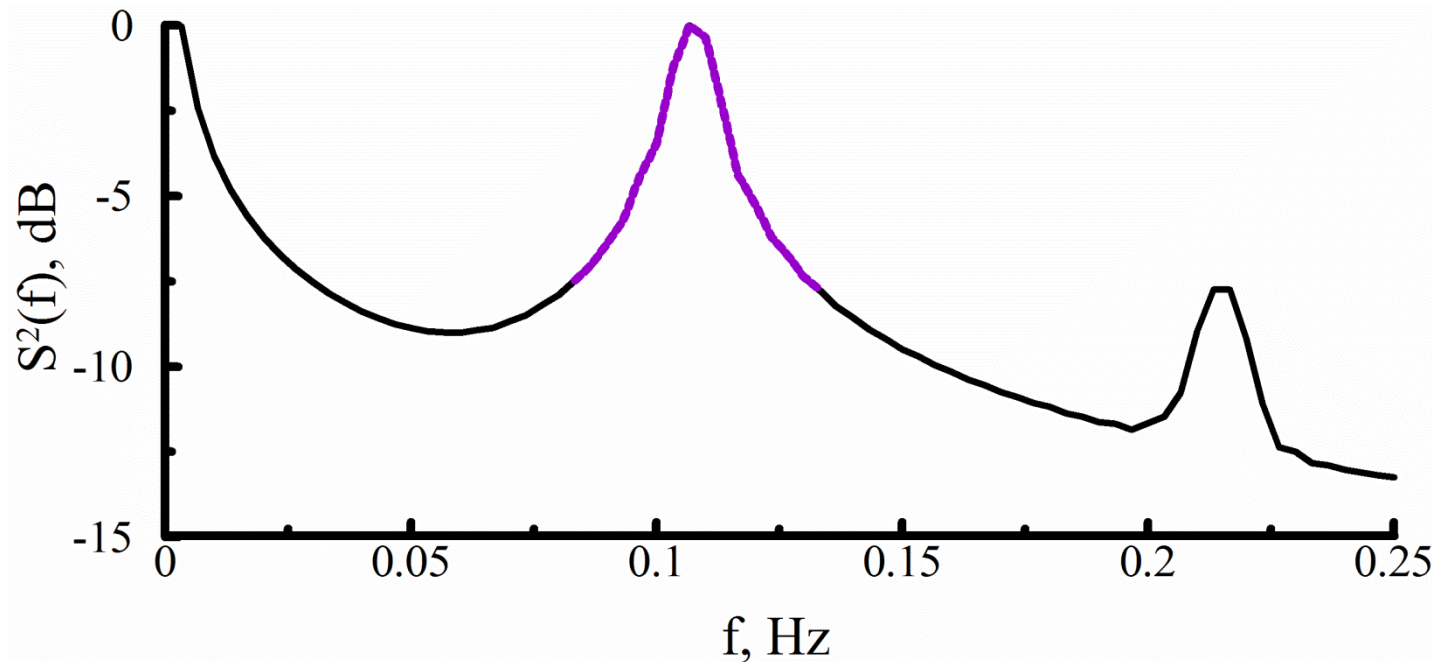
Модельный спектр ВСР



Синхронизированные ритмы

Частотная синхронизация между дыханием и ритмами регуляции

Эксперимент с дыханием по звуковому сигналу, с линейно нарастающей частотой. Частота меняется от 0,05-0,25 Гц. Длительность эксперимента 30 мин.



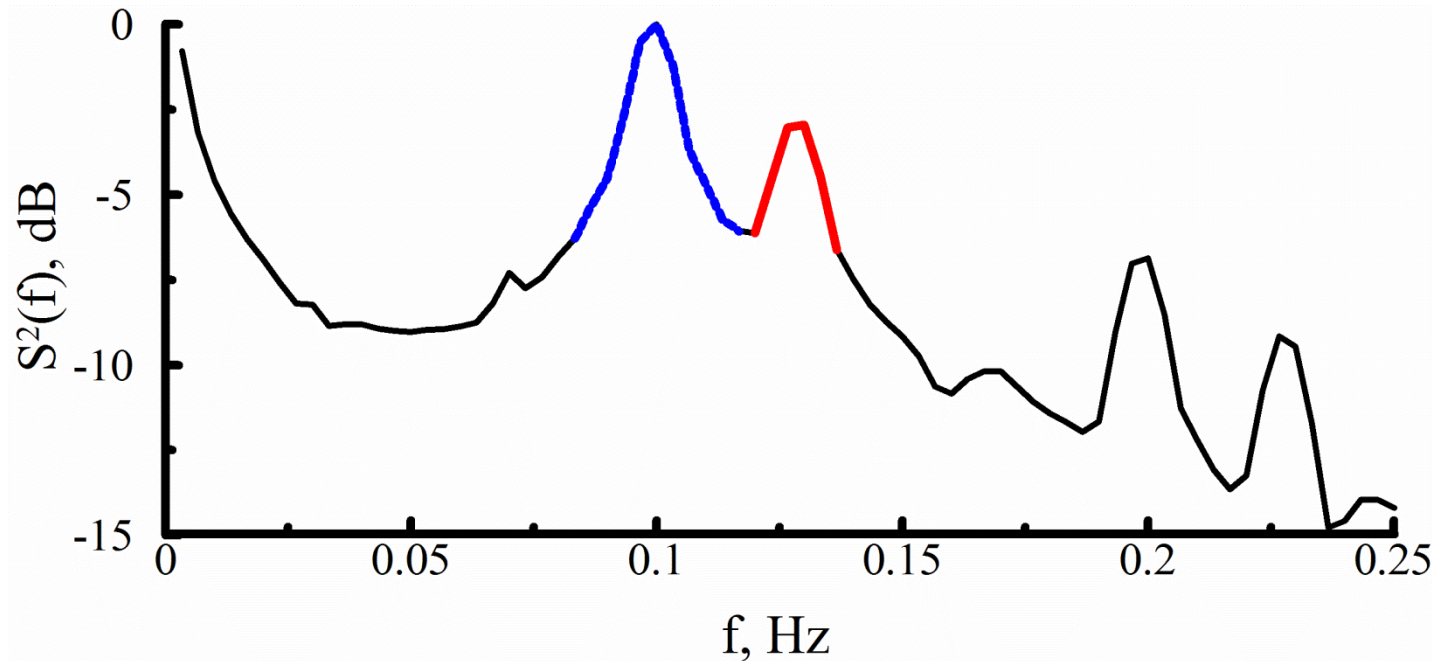
Модельный спектр ВСР



Синхронизированные ритмы

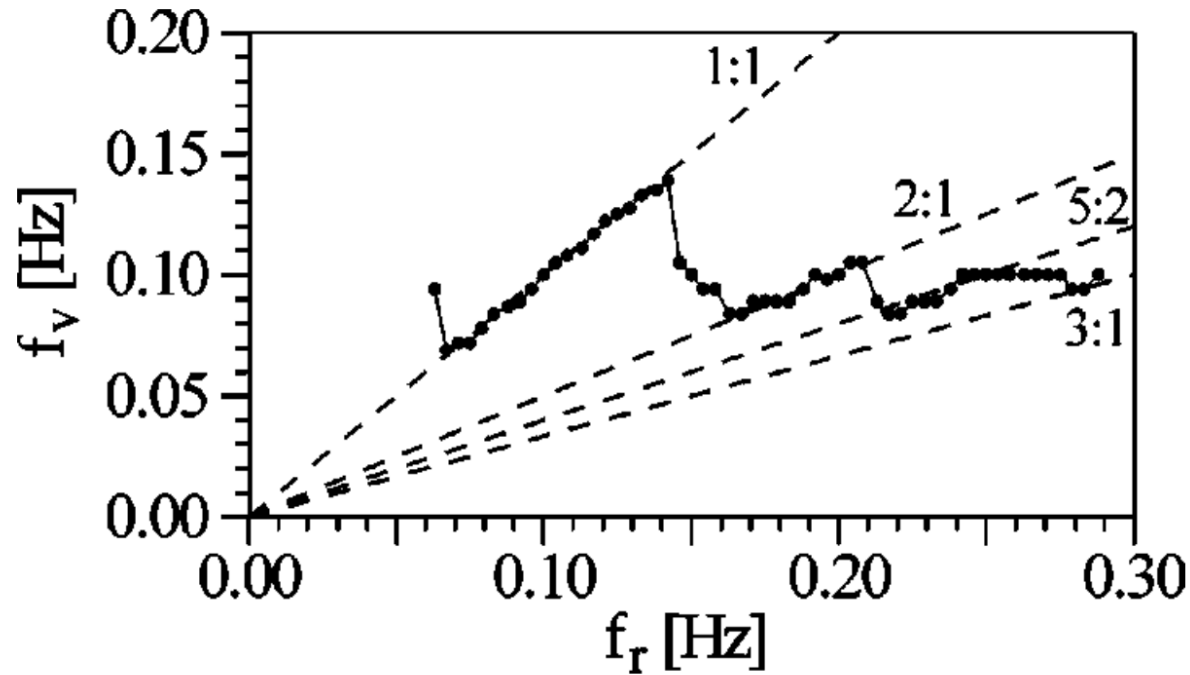
Частотная синхронизация между дыханием и ритмами регуляции

Эксперимент с дыханием по звуковому сигналу, с линейно нарастающей частотой. Частота меняется от 0,05-0,25 Гц. Длительность эксперимента 30 мин.



- Модельный спектр ВСР
- Ритм дыхания
- Ритм регуляции тонуса сосудов

Частотная синхронизация между дыханием и ритмами регуляции



Обнаружение эффекта

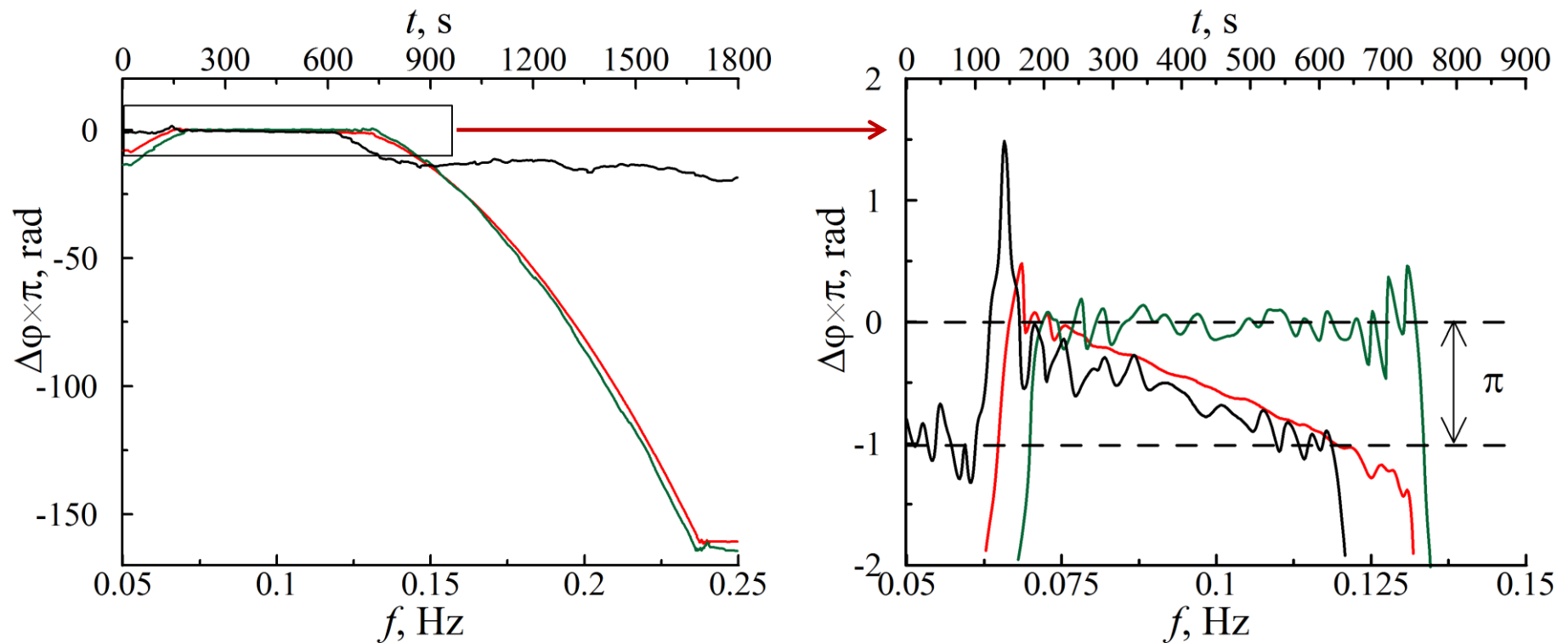
- Prokhorov M.D., Ponomarenko V.I., Gridnev V.I. // Phys. Rev. E, 2003, V.68, 041913

Методы диагностики синхронизации

- Kiselev A.R., Karavaev A.S., Gridnev V.I., Prokhorov M.D., Ponomarenko V.I., Borovkova E.I., Shvartz V.A., Ishbulatov Y.M., Posnenkova O.M., Bezruchko B.P. // Russian Open Medical Journal, 2016, V.5, N.1, e0101.
- Hramov A.E., Koronovskii A.A., Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D. // Phys. Rev. E, 2007, V. 75, 056207.

Частотная синхронизация между дыханием и ритмами регуляции

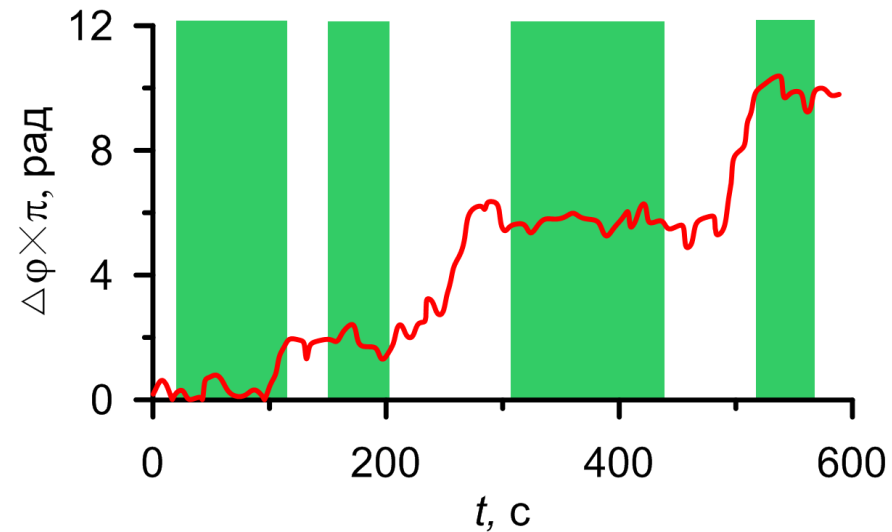
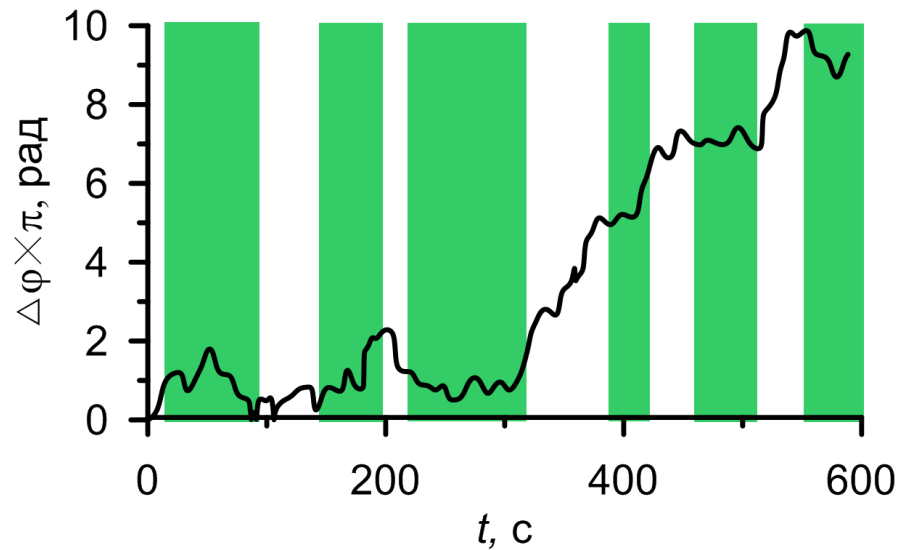
Эксперимент с дыханием по звуковому сигналу, с линейно нарастающей частотой. Частота меняется от 0,05-0,25 Гц. Длительность эксперимента 30 мин.



- Эксперимент
- Наша модель
- Модель Котани

Hramov A.E. et al. // Physical Review E 2007 (75) 056207
Hramov A.E. et al. // Physical Review E 2006 (73) 026208

Воспроизведение синхронизации контуров регуляции ЧСС и АД



Прикладное значение степени синхронизации

- Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D., Karavaev A.S., Kiselev A.R., Gridnev V.I., Bezruchko B.P. // Eur. Phys. J. Special Topics, 2013, V.222, N.10, P.2687–2696.
- Kiselev A.R., Gridnev V.I., Karavaev A.S., Posnenkova O.M., Prokhorov M.D., Ponomarenko V.I., Bezruchko B.P. // Applied Medical Informatics. 2011. -V. 28. -No. 1. -P. 1-8.

Полученные результаты и выводы

Результаты:

- I. Разработана модель ССС
- II. Воспроизведены характеристики реального сигнала ВСР, хаотичность ССС
- III. Частотная синхронизация в ССС

Вывод: Предложенная модель адекватно отражает динамику регуляции артериального давления и ЧСС и может быть использована для изучения ССС и развития методов диагностики и персонафицированной медицины

По результатам работы опубликовано:

- 4 статьи в **WoS**
- 2 статьи в **SCOPUS**
- 6 статей в **ВАК**
- 20 статей **РИНЦ**
- 10 свидетельств о регистрации ПО

Спасибо за внимание!

Публикации по теме работы

WoS

1. *Karavaev A.S., Ishbulatov J.M., Ponomarenko V.I. et al.* // Journal of the American Society of Hypertension. -2016. –V. 10. –Iss. 3. –P. 235-243.
2. *Ishbulatov Y.M., Karavaev A.S., Kiselev A.R., et al.* // Progress in biomedical optics and imaging - proceedings of SPIE "saratov fall meeting 2015" -2016. -P. 99173n.
3. *Kiselev A.R., Karavaev A.S., Gridnev V.I. et al.* // Russian Open Medical Journal. 2016. -V. 5. -Iss. 1. –P. 1-13.
4. *Shvartz V.A., Karavaev A.S., Borovkova E.I. et al.* // Russian Open Medical Journal. 2016. -V. 5. – Iss. 6. –P. 1-5.

SCOPUS

1. *Karavaev A.S., Ishbulatov Yu.M., Ponomarenko V.I. et al.* // Human Physiology. 2017. -V. 43. -Iss 1. -P. 61-70. (**Scopus**)
2. *Ishbulatov J.M., Karavaev A.S., Ponomarenko V.I. et al.* // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. -2016. –V. 80. -№. 2. –P. 180-185.

BAK

1. *Ishbulatov Y. M., Karavaev A. S., Ponomarenko V. I. et al.* // Izvestiya of Saratov University. New series. Series Physics. -2015. –V. 15. -Iss. 2. –P. 32-38.
2. *Karavaev A. S., Ishbulatov Yu. M., Borovkova E. I. et al.* // Izvestiya of Saratov University. New series. Series Physics. -2016. -V. 16. – Iss. 1. –P. 35-40.
3. *Ишбулатов Ю.М., Караваяев А.С., Пономаренко В.И. и др.* // Нелинейная динамика. -2017. -Т. 13. –№. 3. -С. 381–397.
4. *Ишбулатов Ю.М., Караваяев А.С., Пономаренко В.И. и др.* // Ученые записки физического факультета МГУ. -2015. -№. 4. -154319. [Офиц. сайт]. URL: <http://uzmu.phys.msu.ru/abstract/2015/4/154319>
5. *Боровкова Е.И., Ишбулатов Ю.М., Миронов С. А.* // Саратовский научно-медицинский журнал –2014. –Т. 10. – No 3.–P. 390–395.
6. *Караваяев А.С., Руннова А.Е., Боровкова Е.И.* // Саратовский научно-медицинский журнал –2016. –Т. 12. –No 4.– P. 541–548.

Публикации по теме квалификационной работы

Свидетельства о регистрации ПО

1. *Ишбулатов Ю.М., Шварц В.А., Бутенко А.А., Караваяев А.С., Киселев А.Р., Миронов С.А., Бокерия О.Л.* “Программа для удаления двигательных артефактов пальцевой фотоплетизмограммы (PPG-corrector)” №2015662368. Заявка № 2015619555. Дата поступления 09.10.2015. Дата регистрации: 24.11.2015 Правообладатель ФГБУ “Научный центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева” Минздрава РФ.
2. *Киселев А.Р., Караваяев А.С., Пономаренко В.И., Боровкова Е.И., Миронов С.А., Шварц В.А., Ишбулатов Ю.М., Прохоров М.Д., Бокерия О.Л.* “Программа для предварительного выделения низкочастотных составляющих физиологических ритмов для адаптивного сжатия данных (Smart Biocompressor)” №2015662545. Заявка № 2015619518. Дата поступления 09.10.2015. Дата регистрации: 26.11.2015 Правообладатель ФГБУ “Научный центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева” Минздрава РФ.
3. *Ишбулатов Ю.М., Бутенко А.А., Шварц В.А., Караваяев А.С., Киселев А.Р.* “Программа – генератор суррогатного сигнала дыхания (Breather-S)” №2015662787. Заявка № 2015619547. Дата поступления 09.10.2015. Дата регистрации: 01.12.2015 Правообладатель ФГБУ “Научный центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева” Минздрава РФ.
4. *Ишбулатов Ю.М., Караваяев А.С., Пономаренко В.И., Безручко Б.П., Киселев А.Р., Шварц В.А.* Программа для реконструкции по временным реализациям параметров систем с запаздыванием методом вспомогательной системы (Time-Delay Recovery – S2)” №2015662786. Заявка № 2015619566. Дата поступления 09.10.2015. Дата регистрации: 01.12.2015 Правообладатель ФГБУ “Научный центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева” Минздрава РФ.
5. *Ишбулатов Ю.М., Караваяев А.С., Шварц В.А., Безручко Б.П., Киселев А.Р.* Программа для оцифровки сигналов с бумажных носителей (Biodata scanner-extractor). №2015662830. Заявка № 2015619540. Дата поступления 09.10.2015. Дата регистрации: 03.12.2015 Правообладатель ФГБУ “Научный центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева” Минздрава РФ.
6. *Кульминский Д.Д., Киселев А.Р., Миронов С.А., Ишбулатов Ю.М., Шварц В.А., Караваяев А.С., Бокерия О.Л.* Программа для оценки функции когерентности двух сигналов (Coheranalyser). №2015662825. Заявка № 2015619541. Дата поступления 09.10.2015. Дата регистрации: 03.12.2015 Правообладатель ФГБУ “Научный центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева” Минздрава РФ.

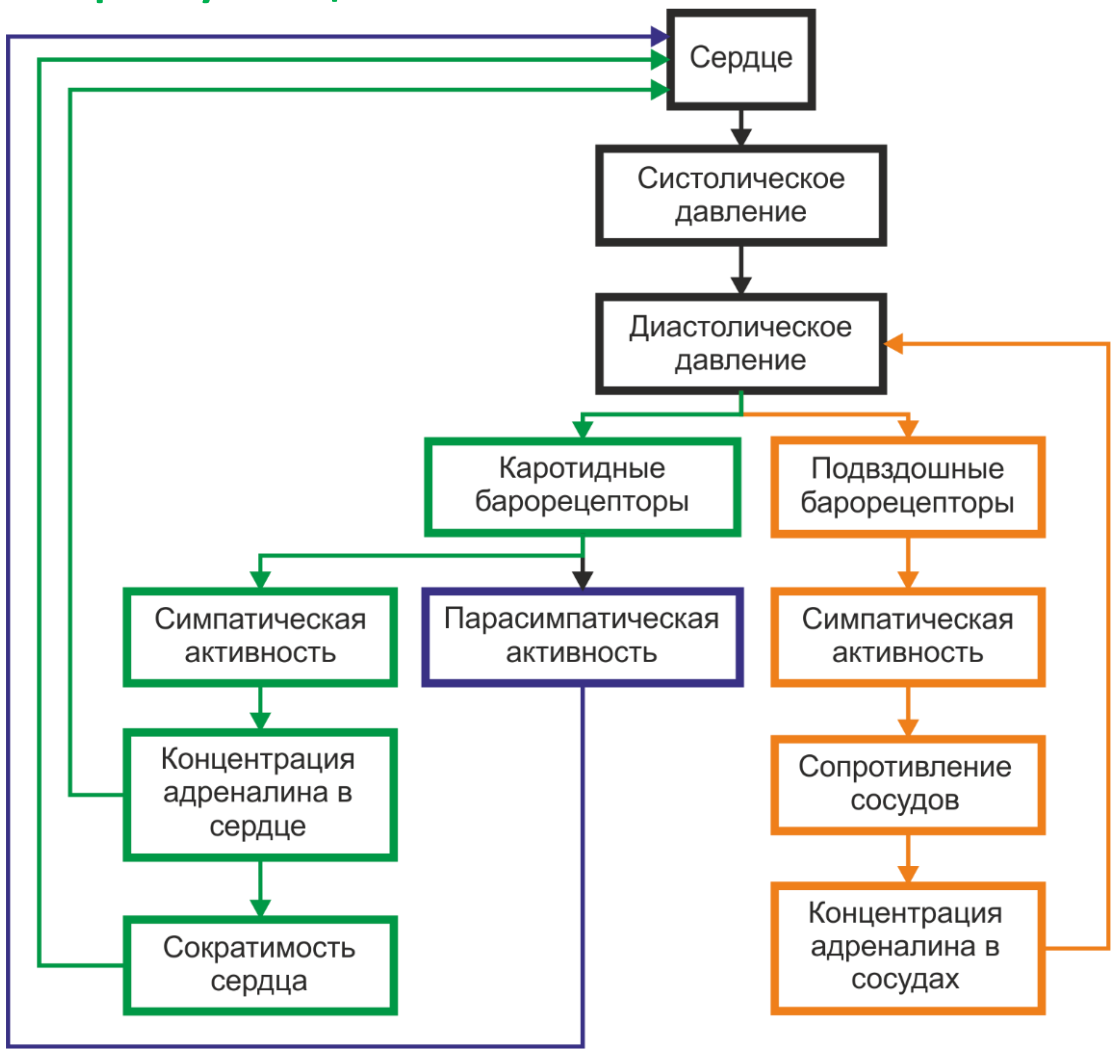
Публикации по теме квалификационной работы

Свидетельства о регистрации ПО

7. *Шварц В.А., Боровкова Е.И., Киселев А.Р., Ишбулатов Ю.М., Миронов С.А., Караваев А.С., Бокерия О.Л.* “Программа для выделения неэквидистантной кардиоинтерваллограммы из фотоплетизмограммы по быстро нарастающему переднему фронту пульсовой волны, реализуемый в реальном времени (PPG-RR-extractor LE)” №2015662448. Заявка № 2015619548. Дата поступления 09.10.2015. Дата регистрации: 24.11.2015 Правообладатель ФГБУ “Научный центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева” Минздрава РФ.
8. *Ишбулатов Ю.М., Караваев А.С., Шварц В.А., Киселев А.Р.* “Программа для генерации реализаций цветного шума с заданными параметрами (Noise-PR)” №2015662785. Заявка № 2015619552. Дата поступления 09.10.2015. Дата регистрации: 01.12.2015 Правообладатель ФГБУ “Научный центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева” Минздрава РФ.
9. *Ишбулатов Ю.М., Караваев А.С., Киселев А.Р., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Шварц В.А., Бокерия О.Л., Безручко Б.П.* Программа для моделирования активности сердечно-сосудистой системы человека с автоколебательным контуром барорефлекторной регуляции тонуса артериальных сосудов (CVSmodel-SE). №2016617540. Заявка № 2016614826. Дата поступления 12.05.2016. Дата регистрации: 07.07.2016 Правообладатель ФГБУ “Научный центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева” Минздрава РФ.
10. *Ишбулатов Ю.М., Караваев А.С., Шварц В.А., Киселев А.Р., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Лапшева Е.Е., Бокерия О.Л.* Программа для диагностики фазовой синхронизации автоколебательной системы внешним сигналом с изменяющейся частотой с помощью вейвлетного анализа (PSynch-VF). №2016617600. Заявка № 2016614894. Дата поступления 13.05.2016. Дата регистрации: 08.07.2015 Правообладатель ФГБУ “Научный центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева” Минздрава РФ.

Спасибо за внимание!

Схемы модели регуляции ССС



Симпатическая регуляция ЧСС

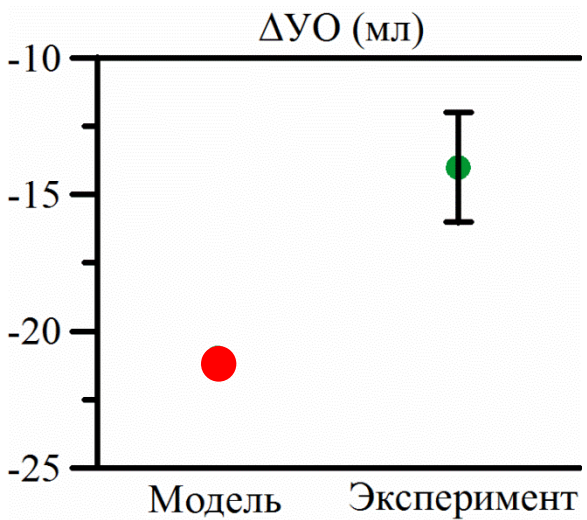
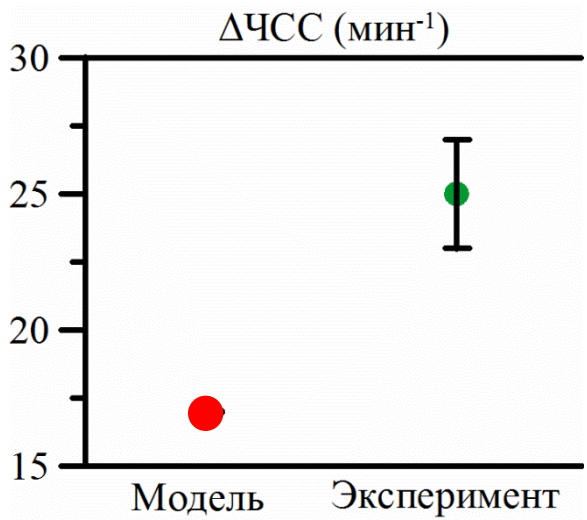
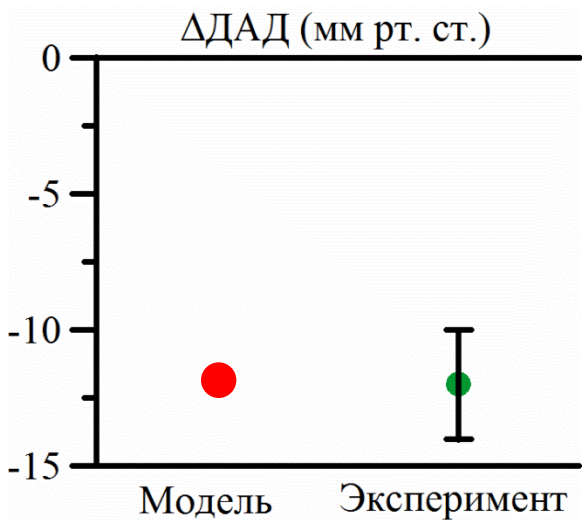
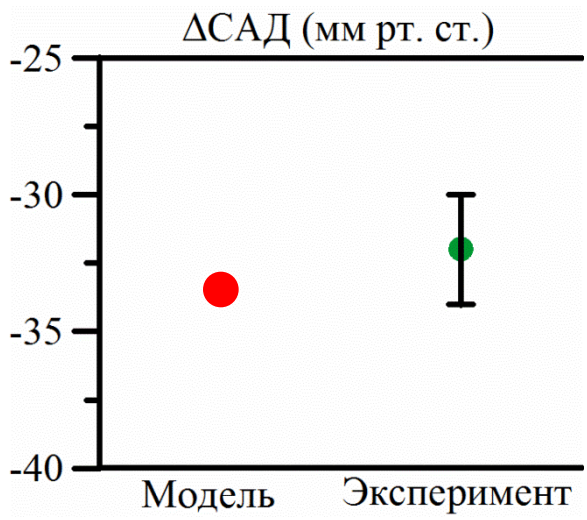
Парасимпатическая регуляция ЧСС

Симпатическая регуляция АД

*Kotani K., Struzik Z.R. Takamasu K. Stanley H.E., Yamamoto Y. // Physical Review E. -2005. -V. 72. -041904.
 Ringwood J., Malpas S. // Am. J. Physiol. -2001, -V.280, -№.4, -R1105-R1115.*

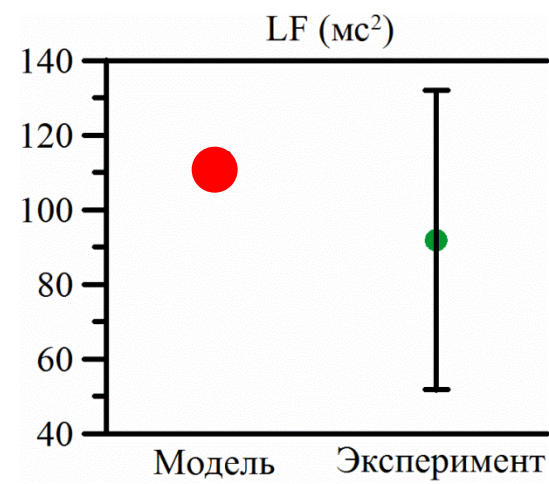
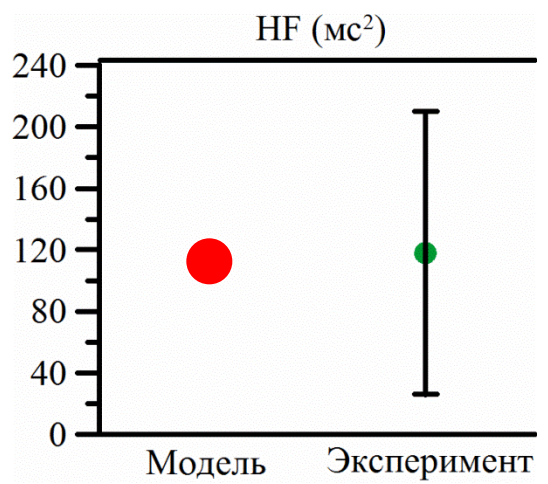
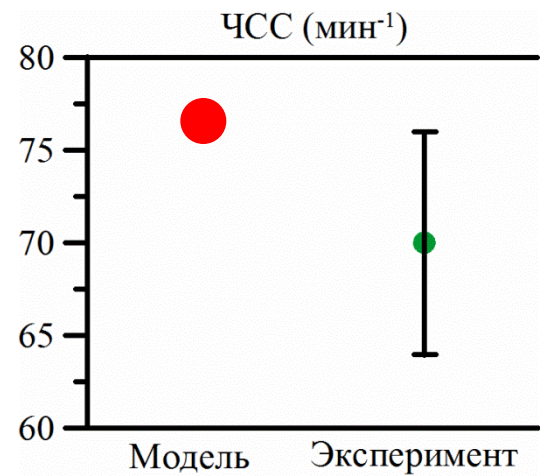
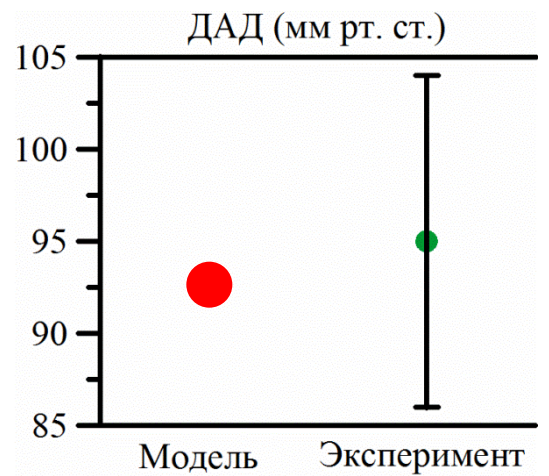
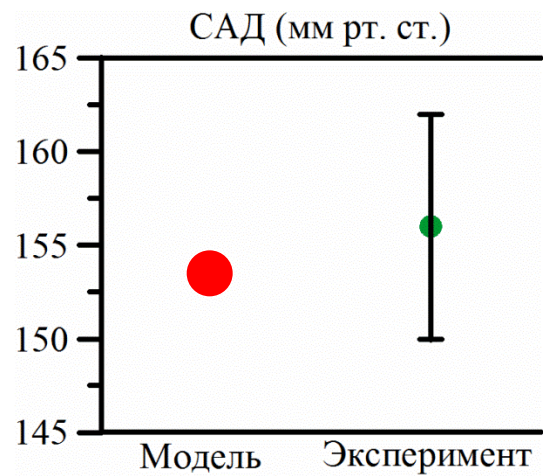
Воспроизведение фармакологической блокады

Воспроизведение изменения параметров ССС после развития фармакологической блокады систем регуляции артериального давления (АД) и ЧСС



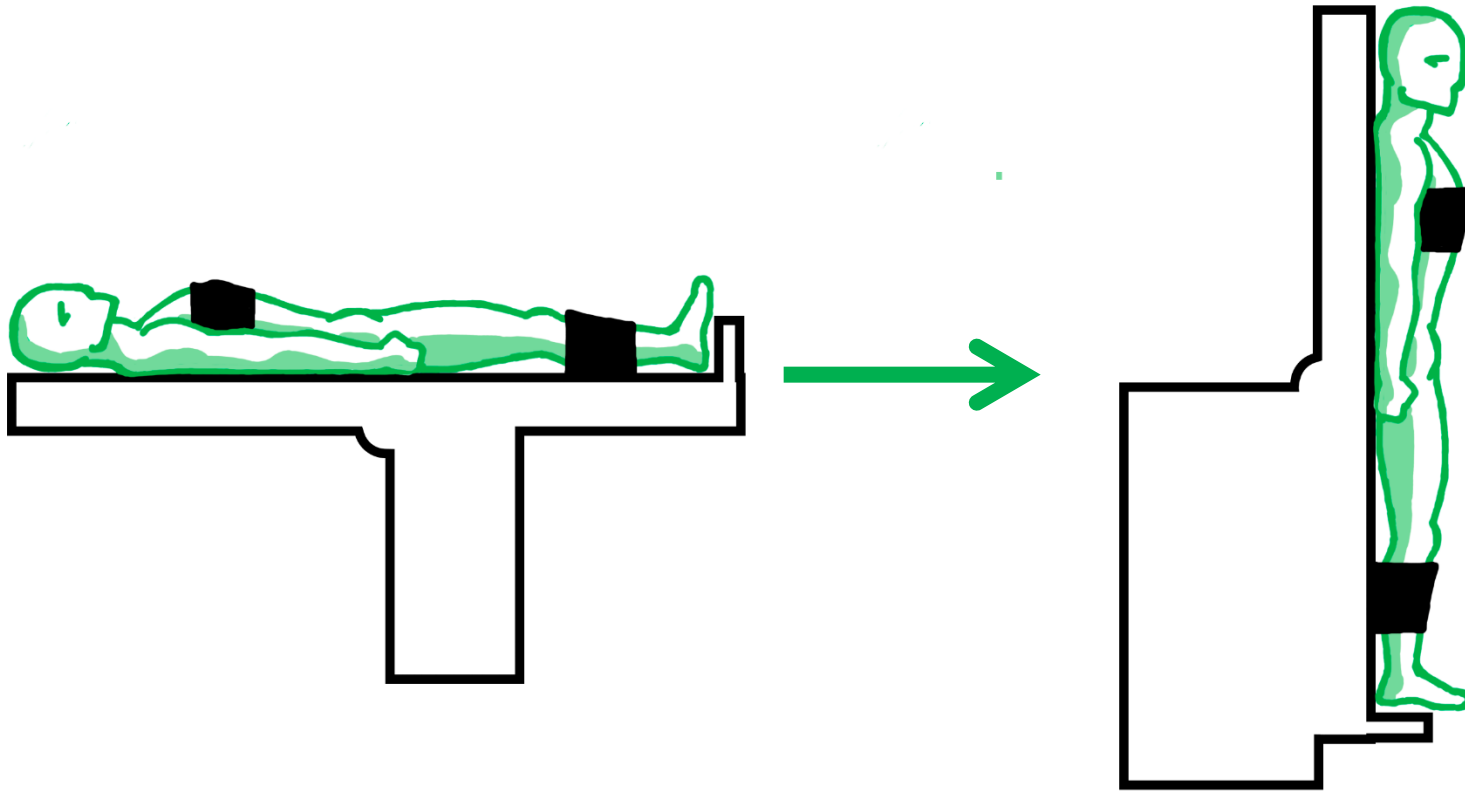
Воспроизведение артериальной гипертонии

Воспроизведение динамики ССС у пациента с артериальной гипертонией, вызванной снижением эластичности сосудов и снижением чувствительности систем регуляции АД



Ортостатическая проба

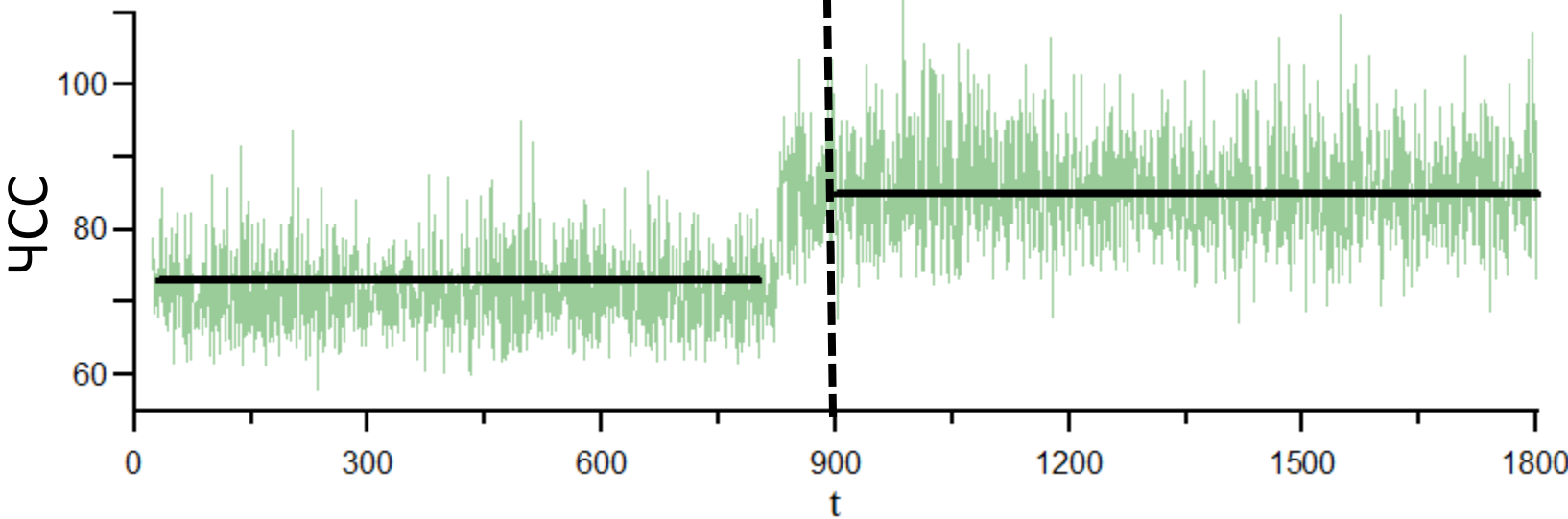
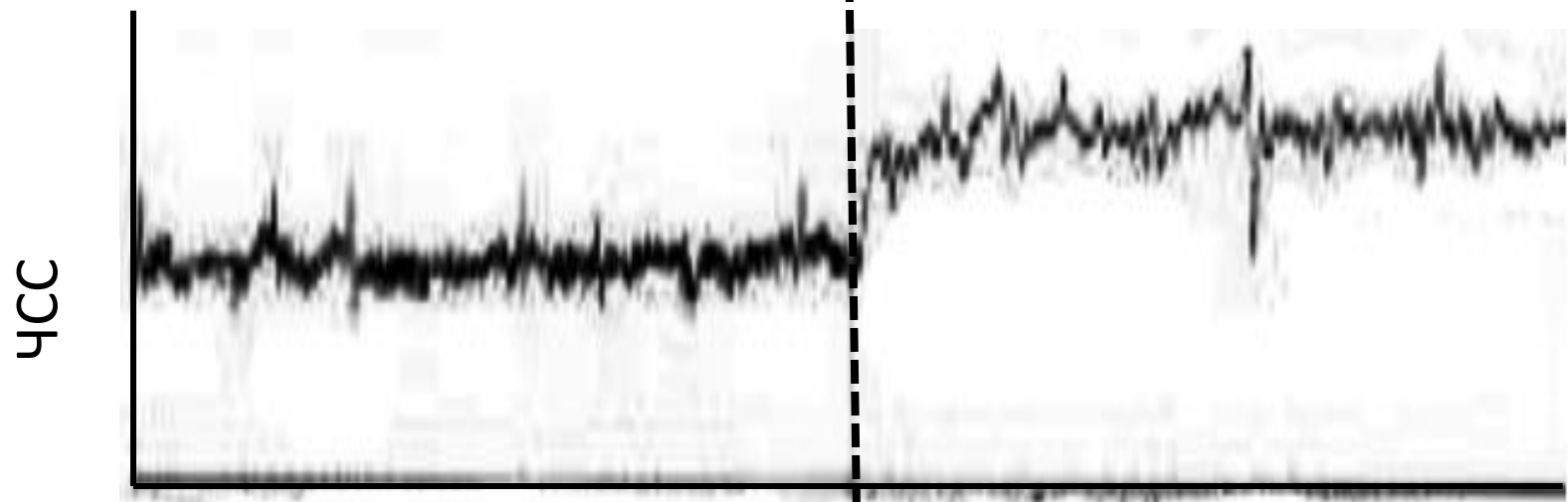
Метод исследования ССС, основанный на определении каких-либо физиологических параметров до и после перехода испытуемого из горизонтального положения в вертикальное



Ортостатическая проба

Горизонтально

Вертикально

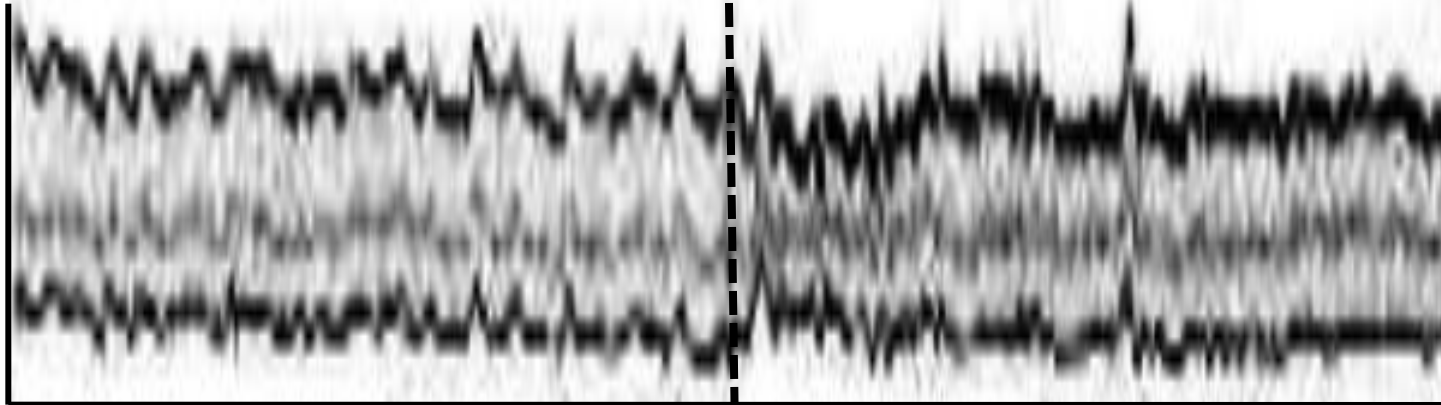


Орто статическая проба

Горизонтально

Вертикально

АД



АД

