УДК 612.017.2 + 517 DOI: 10.18699/SSMJ20230405

Оригинальное исследование / Research article

Адаптивные особенности перестройки кардиогемодинамики и газообмена при тестирующей нагрузке у молодых уроженцев Севера различных поколений

И.В. Аверьянова[1], А.Л. Максимов[1, 2]

[1] НИЦ «Арктика» ДВО РАН
685000, г. Магадан, просп. Карла Маркса, 24
[2] Институт физиологии Коми НЦ УрО РАН
167982, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 50

Резюме

Целью нашего исследования явилось изучение перестройки показателей гемодинамики, газообмена и вариабельности сердечного ритма в ответ на нагрузочную пробу с дыханием в замкнутом пространстве (респирация) у различных поколений молодых уроженцев – европеоидов, постоянно проживающих в Магаданской области. **Материал и методы.** Выполнена оценка частоты сердечных сокращений (ЧСС), артериального давления, уровня кислорода и углекислого газа у 200 юношей-европеоидов Магаданской области в возрасте 18–21 года из числа мигрантов и уроженцев 1–3-го поколения, как в состоянии покоя, так и в процессе дыхания в замкнутом пространстве. Вариабельность кардиоритма определяли с помощью комплекса «Варикард», сопряженного с программным обеспечением «Иским-6», содержание газов в выдыхаемом воздухе – с использованием анализатора НПК «Карбоник», насыщение крови кислородом регистрировали пульсоксиметром, артериальное давление – электронным тонометром. **Результаты и их обсуждение.** В целом проведенный анализ показателей вариабельности кардиоритма как в состоянии покоя, так и в ответ на респирацию выявил более низкие показатели ВСР в группе юношей-мигрантов (0-е поколение), что указывает не только на уменьшение активности автономного контура регуляции, но и на дисбаланс в симпатической и парасимпатической регуляции кардиогемодинамики. Однако у лиц 3-го поколения как в состоянии покоя, так и при функциональной нагрузочной пробе с респирацией отмечается оптимальный и устойчивый баланс между звеньями вегетативной регуляции, что отражается в параметрах артериального давления и газообмена. При этом наиболее информативными являются не абсолютные величины изучаемых показателей, а разница между их фоновыми и нагрузочными значениями, которые позволяют судить о функциональных резервах изучаемых систем организма уроженцев различных поколений, постоянно проживающих в экстремальных условиях Севера. Установлено, что увеличение парасимпатической активности и ее влияния на сердечный ритм как в состоянии покоя, так и при ответе на дыхательную пробу наиболее ярко проявляется в группе уроженцев 3-го поколения, что отражает более глубокую степень их адаптированности к северным условиям. По всей видимости, это служит проявлением общей стратегии функциональной перестройки регуляторных систем организма, направленной на формирование оптимальных компенсаторно-приспособительных перестроек газового гомеостаза при увеличении срока проживания на Севере.

Ключевые слова: Север, респирация, вариабельность сердечного ритма, поколения.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена за счет бюджетного финансирования НИЦ «Арктика» ДВО РАН в рамках выполнения темы «Изучение межсистемных и внутрисистемных механизмов реакций в формировании функциональных адаптивных резервов организма человека «северного типа» на разных этапах онтогенеза лиц, проживающих в дискомфортных и экстремальных условиях с определением интегральных информативных индексов здоровья» (рег. № АААА-А21-121010690002-2).

Автор для переписки: Аверьянова И.В., e-mail: Inessa1382@mail.ru

Для цитирования: Аверьянова И.В., Максимов А.Л. Адаптивные особенности перестройки кардиогемодинамики и газообмена при тестирующей нагрузке у молодых уроженцев Севера различных поколений. *Сибирский научный медицинский журнал*. 2023;43(4):55–64. doi: 10.18699/SSMJ20230405

The adaptive features of cardiohemodynamic and gas exchange readjustment under test load in young northern natives of different generations

I.V. Averyanova[1], A.L. Maksimov[1, 2]

[1] Scientific Research Center "Arctica" of FEB of RAS
685000, Magadan, Karla Marksa ave., 24
[2] Institute of Physiology of Komi Science Centre of UB of RAS
167982, Syktyvkar, Pervomayskaya st., 50

Abstract

The research aimed to study the restructuring of hemodynamics, gas exchange, and heart rate variability parameters in response to the stress test with breathing in confined space in different generations of young Caucasoid natives permanently residing in Russia's Magadan region. **Material and methods.** Two hundred 18–21 year old male migrants and those born to them in 1–3 generations, all Caucasians by origin, participated in the Magadan city survey. During the resting and confined space rebreathing sessions we registered subjective heart rate, blood pressure, oxygen and carbon dioxide level. The heart rate variability was recorded by the Varicard complex coupled with the Iskim-6 software. The exhaled gas level was determined by the Karbonik analyzer. The blood oxygen saturation was measured by a pulse oximeter. An electronic tonometer was used for the blood pressure control. **Results and discussion.** Both resting and rebreathing tests revealed lower HRV rates in the group of migrants (zero generation): not only did they exhibit a decrease in the activity of the autonomic regulation contour – they also reported an imbalance in the sympathetic and parasympathetic regulation of cardiac hemodynamics. However, the 3rd generation subjects showed an optimal and stable balance between the links of autonomic regulation, both at rest and during functional exercise with rebreathing, which is reflected in the parameters of arterial pressure and gas exchange. Interestingly, the most informative indicators of adaptation are not the absolute values of the studied indicators but the difference between their background and testing values, which to a greater extent hold information on the body functional reserves of those born in the North in different generations constantly living in the extreme conditions of the North. It was found that the increase in parasympathetic activity and its influence on the cardiac rhythm both at rest and in response to a breathing test was most pronounced in the group of natives of the 3rd generation, which reflects a deeper degree of their adaptation to the northern conditions. Apparently, this is a manifestation of the general strategy of functional restructuring of the body's regulatory systems aimed at the formation of optimal compensatory-adaptive restructuring of gas homeostasis during an increased period of residence in the North.

Key words: North, rebreathing, heart rate variability, generations.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Financing. The work has been fulfilled with Arktika Scientific Research Center, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, under the financial support of the Russian Federation budget within the framework of the project "Study of intersystem and intrasystem mechanisms involved in developing functional and adaptive reserves of the northern type man at different stages of ontogenesis under discomfort and extreme conditions of residence with the determination of health integral informative indices" (reg. № AAAA-A21-121010690002-2).

Correspondence author: Averyanova I.V., e-mail: Inessa1382@mail.ru

Citation: Averyanova I.V., Maksimov A.L. The adaptive features of cardiohemodynamic and gas exchange readjustment under test load in young northern natives of different generations. *Sibirskij nauchnyj medicinskij zhurnal = Siberian Scientific Medical Journal.* 2023;43(4):55–64. [In Russian]. doi: 10.18699/SSMJ20230405

Введение

Вегетативная нервная система состоит из двух основных ветвей: симпатической системы, связанной с мобилизацией энергии, и парасимпатической системы, связанной с вегетативными и восстановительными функциями [1]. Обычно эти две ветви действуют в динамическом балансе и могут быстро модулироваться в ответ на меняющиеся требования окружающей среды. Напротив, вегетативный дисбаланс, характеризующийся гиперактивацией симпатической системы и/или притуплением тонуса блуждающего нерва, связан с повышенной заболеваемостью и смертностью от множества состояний и заболеваний, включая сердечно-сосудистые заболевания [2].

В целом применение метода оценки вариабельности сердечного ритма (ВСР) позволяет регистрировать количественное изменение веге-

тативного баланса в сторону преобладания симпатических либо парасимпатических влияний на сердечно-сосудистую систему, а также прогнозировать и оценивать степень ее адаптационных возможностей и организма в целом [3, 4]. Практическое применение ВСР в настоящее время хорошо зарекомендовало себя, учитывая, что показатели ВСР используются в качестве индикатора стресса, а также для оценки регуляторных механизмов и функциональных резервов сердечно-сосудистой системы при воздействии различных экзогенных и эндогенных факторов, включая особые условия среды проживания [5].

В медицинской практике, ориентированной по большей части на профилактику, ВСР рассматривается как возможный показатель здоровья [6]. По выражению уровня регулирующих механизмов можно судить о функциональных резервах сердечно-сосудистой системы и возможностях адаптации всего организма [7]. В условиях относительного покоя экономичность функций организма и биоэнергетических процессов связана с повышением парасимпатической регуляции и наоборот, чем выше исходный уровень симпатикотонии, тем в более напряженном состоянии находится система, тем меньший адаптационный диапазон реакций возможен при действии возмущающих факторов [8]. Показано, что более высокие значения ВСР указывают на оптимальное функционирование вегетативного контроля сердца, а также на высокую способность к саморегуляции, адаптивности и жизнестойкости [9] и в целом являются признаками эффективных вегетативных механизмов [6]. В то же время известно, что наиболее информативные результаты по оценке функциональных резервов организма и особенности адаптивных перестроек можно получить не в состоянии покоя, а при использовании различных нагрузочных проб и тестов [10–12].

Учитывая, что в условиях Севера у человека развивается тканевая гипоксия, играющая значительную роль в синдроме полярного напряжения [13, 14], одним из проявлений которого является одышка, снижение физической работоспособности, формирование гипертензии малого круга [15–17], нами проанализирован ряд системных адаптивных перестроек укорененных уроженцев – европеоидов, постоянных жителей Севера, на фоне нагрузки в виде пробы с респирацией [18, 19].

Целью настоящего исследования явилось изучение перестроек показателей гемодинамики, газообмена и ВСР в ответ на нагрузочную пробу с дыханием в замкнутом пространстве (респирация) у различных поколений молодых уроженцев – европеоидов, постоянно проживающих в Магаданской области.

Материал и методы

В исследовании приняли участие 200 уроженцев – европеоидов Магаданской области в возрасте 18–21 лет, при этом 31, 63, 76 и 30 обследуемых представляли соответственно 0-е (мигранты), 1-е, 2-е и 3-е поколение (табл. 1). Мигранты прибывали на Северо-Восток России во второй половине XX столетия, где у них родились дети (1-е поколение), которые, в свою очередь, дали начало следующим поколениям, обозначаемым нами как укорененные жители относительно популяции аборигенов [18–20].

Ограничением настоящего исследования является возрастной диапазон обследуемых (от 17 до 21 года, юношеский период онтогенеза).

Для оценки устойчивости к сочетанному действию гипоксии и гиперкапнии в качестве нагрузочного теста использовалась проба с возвратным дыханием (респирация) без поглощения CO_2 с одинаковым временем ее выполнения и объемом воздуха, равным трем жизненным емкостям легких. Непосредственно перед проведением пробы у обследуемых с использованием портативного газоанализатора производства ООО НПК «Карбоник» определялось содержание CO_2 и O_2 в выдыхаемом ими воздухе. Для проведения пробы обследуемому необходимо было сделать три глубоких выдоха в пластиковый герметичный мешок (типа Дугласа), каждый выдох должен быть не менее жизненной емкости легких обследуемого. В дальнейшем дыхание, общая продолжительность которого составляла 3 мин, проводилось только из мешка, при этом нос закрывался зажимом. После завершения пробы с возвратным дыханием в оставшейся в герметичном мешке газовой смеси с помощью того же прибора определяли содержание CO_2 и O_2 [18, 20].

В состоянии покоя сидя в течение 5 мин перед выполнением пробы (фон) и в процессе трехминутной респирации производилась запись кардиоритмограммы на основе методических рекомендаций группы российских и иностранных экспертов с использованием прибора «Варикард» с дальнейшим анализом ВСР на основе программного обеспечения VARICARD-KARDi [21, 22]. Исследовали следующие показатели: Mo (мс) – мода, AMo (%) – амплитуда моды, MxDMn (мс) – вариационный размах, RMSSD (мс) – квадратный корень из среднего значения квадратов разностей величин последовательных интервалов R–R, SDNN (мс) – стандартное отклонение R–R-интервалов, SI ($1/с^2$) – стресс-индекс, IC – индекс централизации, TP ($мс^2$) – общая спектральная мощность, составляющие спектра ($мс^2$) (HF – высокочастотная, VLF – очень низкочастотная, LF – низкочастотная).

Таблица 1. *Антропометрические показатели, показатели сердечно-сосудистой системы, газообмена и оксигенации крови в состоянии покоя и при выполнении пробы с переспирацией у юношей различных поколений Магаданской области*

Table 1. *Anthropometric characteristics, indicators of the cardiovascular system, gas exchange and blood oxygenation at rest and when performing a re-respiration test in young men of different generations of the Magadan region, M ± m*

Показатель	Поколение			
	0-е	1-е	2-е	3-е
Возраст, лет	18,2 ± 0,16	18,1 ± 0,04	18,0 ± 0,05	18,2 ± 0,14
Длина тела, см	179,4 ± 0,8	178,8 ± 0,4	178,5 ± 0,3	180,8 ± 0,9
Масса тела, кг	69,1 ± 1,3	68,1 ± 0,4	67,7 ± 0,4	70,1 ± 0,5
Фон				
САД, мм рт. ст.	125,5 ± 0,6	124,3 ± 0,8	123,7 ± 0,8$^{\#}$	121,3 ± 0,9$^{\#\#}$
ДАД, мм рт. ст.	76,1 ± 0,7	74,3 ± 0,9	74,1 ± 0,8$^{\#}$	72,5 ± 1,3$^{\#\#,\wedge}$
ЧСС, уд./мин	73,2 ± 0,8	73,1 ± 0,7	71,8 ± 0,8	68,1 ± 1,3$^{\#\#\#,\$}$
Концентрация CO_2 в выдыхаемом воздухе, %	3,65 ± 0,06	3,72 ± 0,05	3,77 ± 0,05	3,96 ± 0,06$^{\#\#\#,\$}$
Концентрация O_2 в выдыхаемом воздухе, %	16,43 ± 0,07	16,37 ± 0,05	16,29 ± 0,05	16,14 ± 0,06$^{\#\#,\$}$
Содержание HbO_2, %	98,52 ± 0,06	98,42 ± 0,06	98,55 ± 0,05	98,69 ± 0,06$^{\#}$
Переспирация				
САД, мм рт. ст.	132,1 ± 1,4*	131,6 ± 1,3*	130,0 ± 0,9*	126,2 ± 0,5$^{\#\#\#,\$\$}$
ДАД, мм рт. ст.	90,1 ± 1,3*	88,6 ± 1,4*	86,1 ± 1,2*$^{,\#}$	83,4 ± 1,3$^{\#\#\#,\wedge,\$}$
ЧСС, уд./мин	80,5 ± 0,8*	77,8 ± 0,9*$^{,\#}$	75,3 ± 0,8*$^{,\#\#\#,\wedge\wedge}$	71,4 ± 0,5$^{\#\#\#,\wedge\wedge\wedge,\$\$\$}$
Концентрация CO_2 в выдыхаемом воздухе, %	7,05 ± 0,07*	7,14 ± 0,08*	7,09 ± 0,07*	6,91 ± 0,05$^{\#,\wedge\wedge,\$}$
Концентрация O_2 в выдыхаемом воздухе, %	12,47 ± 0,09*	12,35 ± 0,09*	12,42 ± 0,08*	12,59 ± 0,06$^{\wedge\wedge}$
Содержание HbO_2, %	96,30 ± 0,14*	96,35 ± 0,16*	96,41 ± 0,14*	96,69 ± 0,14$^{\#}$

Примечание: Обозначены статистически значимые отличия от величин фонового значения (* – при $p < 0,05$) соответствующих показателей 0-го поколения ($^{\#}$ – при $p < 0,05$, $^{\#\#}$ – при $p < 0,01$, $^{\#\#\#}$ – при $p < 0,001$), 1-го поколения ($\wedge$ – при $p < 0,05$, $\wedge\wedge$ – при $p < 0,01$, $\wedge\wedge\wedge$ – при $p < 0,001$), 2-го поколения ($^{\$}$ – при $p < 0,05$, $^{\$\$}$ – при $p < 0,01$, $^{\$\$\$}$ – при $p < 0,001$).

Систолическое (САД) и диастолическое (ДАД) артериальное давление определяли с использованием автоматического тонометра Nissei DS-1862 (Nihon Seimitsu Sokki Co, Япония) как в состоянии покоя (фон), так и на пике нагрузочной пробы (конец 3-й минуты), с одновременной регистрацией в эти же периоды уровня оксигемоглобина (HbO_2, %) с помощью пульсоксиметра Nellcor NPB 40 (Soma Tech Intl, США).

Обследования проводились в осенние периоды с 2015 по 2020 г. на занятиях физической культурой до проведения нагрузок, что подразумевает наличие медицинского допуска и отсутствие хронических заболеваний в стадии обострения и жалоб на состояние здоровья. Все обследования выполнялись в помещении с комфортной температурой 19–21 °С в первой половине дня. Критерии включения в исследование: мужской пол; возраст от 17 лет до 21 года включительно; I–II группа здоровья с рекомендациями приказов в соответствии со справками 086/у; отсутствие острых (в течение 1 мес. до начала этапа эксперимента) заболеваний; обычный режим двигательной активности, подразумевающий занятие физической культурой лишь в рамках образовательной программы; жизненная емкость легких не менее 3200 мл. Исследование выполнено в соответствии с принципами Хельсинкской декларации, протокол его проведения одобрен комиссией по биоэтике ФГБУН Институт биологических проблем Севера ДВО РАН (№ 001/019 от 29.03.2019 г.), у всех обследуемых получено письменное информированное согласие на участие в исследованиях.

Проверка на нормальность распределения измеренных переменных осуществлялась на основе теста Шапиро – Уилка. Переменные представлены при нормальном распределении в виде среднего арифметического и ошибки среднего ($M \pm m$), при распределении, отличном от нормального, – в виде медианы и межквартильных интервалов (Me [25 %; 75 %]), для оценки различий применяли соответственно t-критерий Стьюдента и критерий Уилкоксона. При множественном сравнении для выборок с нормальным распределением использовали параметрический однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA), для выявления

статистически значимых различий между отдельными группами применяли апостериорный анализ (тест для множественных сравнений Шеффе). При множественном сравнении выборок с распределением, отличающимся от нормального, использовали ранговый дисперсионный анализ Краскела – Уоллиса. Критический уровень значимости (p) принимали равным 0,05, 0,01 и 0,001 [23].

Результаты

В приведенных в табл. 1 данных видно, что в ряду от 0-го поколения к группе представителей 3-го поколения отмечается значимое уменьшение ЧСС и показателей артериального давления в состоянии покоя. Так, у молодых людей – представителей 0-го и 1-го поколения северян, концентрация CO_2 в выдыхаемом воздухе и сатурация артериальной крови кислородом были статистически значимо меньше, а содержание O_2 – достоверно больше, чем в выборке лиц 3-го поколения.

В ответ на респирацию у представителей всех анализируемых групп отмечено значимое увеличение RMSSD, SDNN с одновременным уменьшением Mo, AMo на фоне отсутствия статистически значимой динамики относительно показателей MxDMn и SI (табл. 2), а также повышение TP и HF во всех группах обследуемых и уменьшение VLF и LF во всех группах, кроме юношей 3-го поколения. Анализ фоновых ве-

Таблица 2. *Показатели ВСР в состоянии покоя и при респирации у юношей Магаданской области – уроженцев различных поколений, Me [25 %; 75 %]*

Table 2. *Indicators of heart rate variability at rest and during respiration in young men of the Magadan region natives of different generations, Me [25 %; 75 %]*

Показатель	Поколение			
	0-е	1-е	2-е	3-е
Фон				
MxDMn, мс	322,0 [268,5; 416,3]	358,0 [297,0; 439,0]	368,5 [303,1; 449,5] #	368,2 [316,5; 482,9] #
RMSSD, мс	41,2 [32,4; 52,4]	44,6 [34,1; 66,4]	44,0 [36,5; 68,9]	42,2 [33,6; 64,5]
SDNN, мс	59,1 [46,1; 79,8]	67,7 [53,8; 84,4]	67,3 [54,2; 82,0]	66,3 [54,2; 93,3]
Mo, мс	822,3 [724,1; 900,3]	823,8 [727,1; 923,6]	823,1 [726,2; 954,2]	926,2 [774,4; 979,3] #,^,$
AMo, мс	34,4 [28,5; 45,0]	31,1 [26,1; 39,6]	30,1 [24,5; 38,1]	29,6 [27,3; 41,6]
SI, усл. ед.	67,7 [34,9; 95,1]	49,3 [31,1; 90,0]	48,2 [30,4; 79,2] #	52,2 [35,4; 68,8]
TP, мс^2	2401,2 [1546,7; 3982,4]	2798,9 [1694,3; 4012,4]	2902,4 [1724,2; 3988,4] #	2980,2 [1958,2; 4212,1] #
HF, мс^2	674,6 [345,1; 1016,3]	827,5 [476,9; 1676,8]	858,1 [492,1; 1738,2] #	995,6 [839,5; 3147,2] #,^
LF, мс^2	1178,0 [747,8; 2884,0]	1341,9 [926,8; 1628,3]	1341,7 [945,2; 1688,1]	1295,3 [822,9; 1557,1]
VLF, мс^2	522,5 [315,5; 691,4]	594,7 [378,4; 874,3]	646,8 [409,2; 932,3]	650,2 [440,5; 613,7] #
LF/HF, усл. ед.	2,5 [1,2; 3,8]	1,6 [1,0; 2,6]	1,5 [0,9; 2,6] #	1,3 [0,8; 1,9] #,^
IC, усл. ед.	3,0 [1,9; 5,4]	2,3 [1,6; 4,1]	2,2 [1,4; 3,8] #	1,9 [1,3; 2,3] #,^
Респирация				
MxDMn, мс	367,0 [297,4; 409,1]	347,0 [287,2; 514,5]	366,1 [291,2; 525,1]	342,3 [281,3; 522,1]
RMSSD, мс	52,5 [43,5; 66,7] *	57,9 [39,9; 78,3] *	60,4 [42,4; 87,2] *	67,2 [40,5; 76,7] *,#,^
SDNN, мс	72.2 [61.0; 85.7] *	71,2 [55,6; 97,6] *	75,2 [58,3; 104,5] *,#	75,5 [60,7; 99,1] *
Mo, мс	728,9 [628,7; 849,2] *	732,4 [678,2; 824,3] *	774,2 [711,3; 875,0] *	827,12 [776,1; 920,3] *,#,^,$
AMo, мс	29,2 [22,6; 32,8] *	28,7 [23,7; 33,8] *	27,9 [22,4; 32,5] *	25,9 [21,7; 35,9] *
SI, усл. ед	50,8 [37,5; 73,0]	48,3 [32,1; 83,5]	47,2 [27,5; 80,4] #	52,3 [22,8; 77,2] *
TP, мс^2	2780,1 [1556,2; 3146,4] *	3597,6 [2325,6; 5386,7] *	3780,9 [2206,2; 5217,5] *	3958,5 [2970,2; 6132,5] *,#
HF, мс^2	1313,5 [757,5; 2607,8] *	2060,2 [1008,9; 3629,2] *,#	2180,3 [1035,6; 3772,5] *,#	2336,8 [878,5; 3475,4] *,#
LF, мс^2	1003,4 [749,9; 1652,8] *	1111,5 [548,5; 1673,1] *	1062,0 [562,2; 1782,5] *	1162,3 [822,3; 1557,1]
VLF, мс^2	413,5 [264,9; 661,2] *	426,5 [170,2; 748,3] *	446,2 [205,6; 724,2] *	548,4 [403,0; 608,5] *,#,^
LF/HF, усл. ед.	0,8 [0,4; 1,7] *	0,5 [0,3; 0,8] *,#	0,5 [0,3; 0,9] *,#	0,5 [0,3; 1,3] *,#
IC, усл. ед.	1,4 [0,6; 2,3] *	0,7 [0,4; 1,3] *,#	0,7 [0,4; 1,2] *,#	0,7 [0,4; 1,7] #,^

Примечание. Обозначены статистически значимые ($p < 0,05$) отличия от величин фонового значения (*) соответствующих показателей 0-го поколения (#), 1-го поколения (^), 2-го поколения ($).

личин показателей ВСР выявил значимо более низкую величину MxDMn и TP в группе 0-го поколения, что отражает уменьшение активации парасимпатической составляющей. Значимо более высокие показателей VLF в состоянии покоя были характерны для юношей 3-го поколения. Необходимо отметить, что наиболее высокие показатели ІС отмечены у представителей 0-го поколения, свидетельствуя о преобладании центрального контура управления над автономным и в определенной степени указывая на централизацию управления ритмом сердца, что отличает группу мигрантов от уроженцев-северян 1–3-го поколения. Наименьшие показатели HF-волн в состоянии покоя зафиксированы у представителей этой же группы.

Обсуждение

Из приведенных данных видно, что в ряду от 0-го поколения к группе представителей 3-го поколения отмечается значимое уменьшение ЧСС и АД в состоянии покоя, что свидетельствует об оптимизации и экономизации в работе системы кровообращения при увеличении срока проживания в условиях Севера. Также отметим динамику содержания кислорода и углекислого газа в выдыхаемом воздухе в состоянии покоя в зависимости от обследованных поколений, при этом установлено значимое повышение уровня CO_2 на фоне значимого снижения концентрации O_2 в выдыхаемом воздухе у юношей в ряду от 0-го к 3-му поколению. Полученные результаты подтверждают ранее полученные нами и рядом других исследователей данные об уменьшении чувствительности дыхательного центра к высокому содержанию CO_2 при адаптации к условиям Севера [24], а также о более эффективном использовании кислорода из вдыхаемого воздуха [25].

Проведенный нами сравнительный анализ ряда характеристик сердечно-сосудистой системы, сатурации артериальной крови и концентрации CO_2 и O_2 в выдыхаемом воздухе в ответ на переспирацию показал разнонаправленность наблюдаемых перестроек и межгрупповых особенностей. Так, в ответ на пробу мы не выявили различий САД и ДАД у юношей 0-го, 1-го и 2-го поколений, тогда как в группе юношей 3-го поколения после переспирации отмечены статистически значимо более низкие величины как САД, так и ДАД. В ответ на пробу с переспирацией мы отметили значимое увеличение ЧСС у обследуемых всех групп, при этом самые высокие значения зафиксированы в группе представителей 0-го поколения со снижением в каждой последующей группе. Отметим, что увеличение ЧСС и АД в ответ на возмущающий фактор – это, несомненно, типичные приспособительные реакции организма, при этом степень их реактивности имела ряд особенностей в зависимости от обследуемых поколений. Так, в группе юношей 0-го поколения в ответ на пробу с переспирацией САД увеличивалась на 5 %, ДАД – на 18 %, ЧСС – на 10 %, что в целом составило 33 % реактивности сердечно-сосудистой системы. В группе представителей 1-го

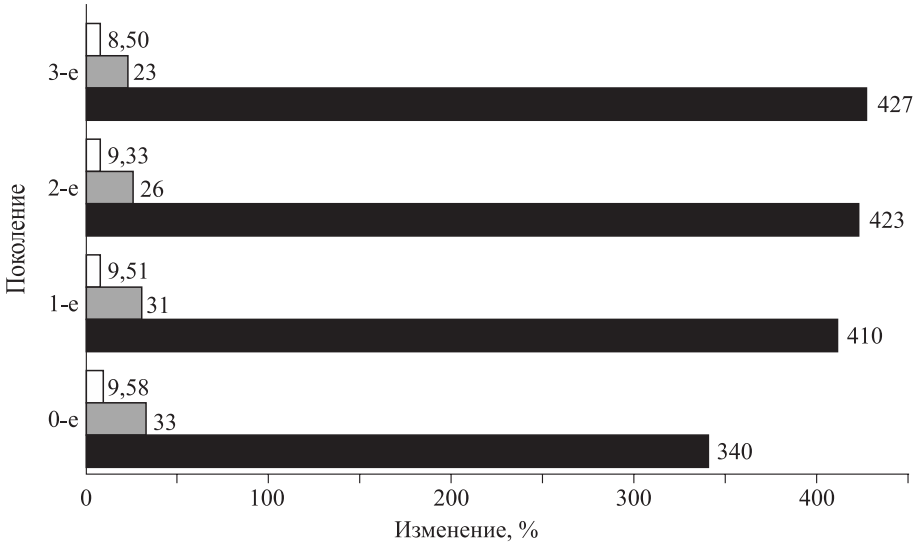

Рис. 1. *Изменение основных показателей газообмена (белые столбики), сердечно-сосудистой системы (серые столбики) и характеристик ВСР (черные столбики) в ответ на пробу с переспирацией относительно фоновых значений у юношей различных поколений*

Fig. 1. *Change of the main indicators of gas exchange (white bars), cardiovascular system (grey bars) and heart rate variability characteristics (black bars) in response to a sample with respiration relative to background values in young men of different generations*

поколения величины соответствующих показателей повышались на 6, 19, 6 и 31 %, в группе обследуемых 2-го поколения – на 5, 16, 5 и 26 %, у юношей 3-го поколения – на 4, 15, 4 и 23 % (рис. 1).

Естественно, что в ответ на пробу с возвратным дыханием в мешке происходит значимое увеличение содержания CO_2 с одновременным снижением уровня O_2, при этом максимальные изменения отмечалось у обследуемых 0-го поколения (рис. 2).

Представленные результаты по содержанию в выдыхаемом воздухе O_2, CO_2 и сатурации крови кислородом указывают, что различия между величинами данных показателей пробы и фона могут выступать достаточно информативным маркером метаболических процессов при длительном проживании человека на Севере и характеризовать степень его адаптированности к условиям окружающей среды. Отметим, что использование пробы с переспирацией позволяет наряду с адаптивными перестройками гемодинамики и газообмена оценить у юношей различных поколений и состояние вегетативной нервной регуляции на основе анализа вариабельности кардиоритма (см. табл. 2). Оказалось, что в состоянии фона статистически значимых различий между значениями ВСР у юношей 0-го и 1-го, 1-го и 2-го, 2-го и 3-го поколений нет, и только у 3-го поколения относительно 0-го и 1-го наблюдаются отличия как по статистическим, так и по спектрально-волновым показателям структуры кардиоритма. Практически аналогичная картина значимости различий по показателям вариабельности кардиоритма наблюдается между поколениями и при выполнении пробы с переспирацией. Однако как в состоянии покоя, так и при переспирации активность автономного контура в ряду от 0-го к 3-му поколению нарастает при неизменной активности центрального контура. На это указывает статистически значимое увеличение значений высокочастотной составляющей HF при отсутствии значимости по низкочастотному компоненту LF. Так, в состоянии покоя величина HF у лиц 3-го поколения на 47 % больше, чем у представителей 0-го поколения, а при переспирации – на 77 %, но при этом значимой динамики LF не отмечалось.

Имеются литературные данные, что HF с учетом частоты и структуры сердечных сокращений связан с показателями оптимального обеспечения перфузии и концентрации газов в крови в процессе газообмена при дыхании [26, 27]. Исходя из этого, мы полагаем, что столь выраженное увеличение высокочастотного компонента спектра ВСР у обследуемых лиц в ряду от 0-го к 3-му поколению

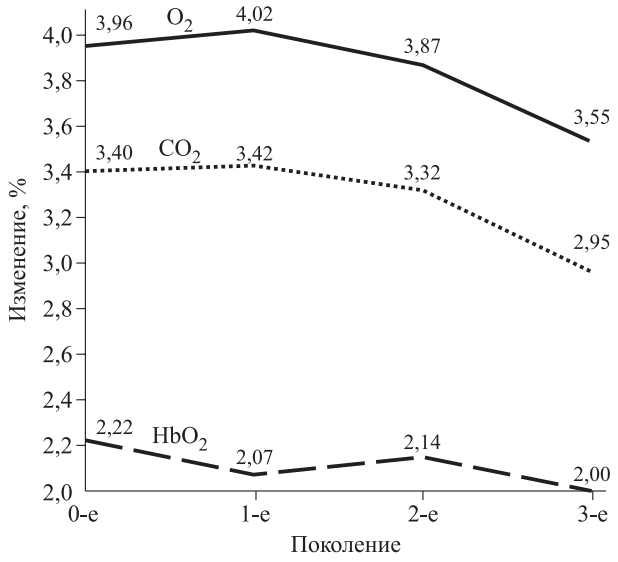

Рис. 2. *Изменение содержания кислорода, углекислого газа, сатурации артериальной крови на пике выполнения пробы относительно фоновых значений у юношей различных поколений*

Fig. 2. *Change of oxygen, carbon dioxide content, arterial blood saturation at the peak of the test relative to background values in young men of different generations*

направлено на повышение скорости газообмена в альвеолах и может свидетельствовать о более эффективном использования кислорода, что подтверждается динамикой значений разницы величин проба-фон показателей ΔO_2, ΔCO_2, ΔHbO_2.

Относительно динамики VLF у обследуемых юношей отметим тенденцию к увеличению его величины, достигающему статистической значимости при сравнении показателей 0-го и 3-го поколения. Показано, что VLF характеризует церебральные эрготропные влияния на нижележащие уровни управления кардиоритмом, отражая взаимосвязь сегментарных структур регуляции кровоснабжения с надсегментарными, включая гипофизарно-гипоталамические и корковый уровень, и в этой связи может выступать индикатором управления метаболическими процессами [28–31]. С учетом этих литературных данных можно полагать, что в нашем случае статистически значимое увеличение VLF у лиц 3-го поколения отражает хороший баланс взаимосвязей всех регуляторных уровней вегетативной и центральной нервной системы. На это указывает и изменение реактивности показателей ВСР при выполнении переспирации: так, в целом, просуммировав выраженность ответных реакций ВСР при выполнении переспирации (без учета знака снижения или повышения), мы установили, что для группы 0-го поколения она составила 340 %, а для юношей 1-го и 3-го поколений достигала 427 % (см. рис. 1).

Заключение

Анализ перестройки показателей кардиоритма, гемодинамики и газообмена у различных поколений молодых укорененных уроженцев Магаданской области как в состоянии покоя, так и в ответ на гипоксически-гиперкапническую пробу свидетельствует о нарастающей активации парасимпатического звена вегетативной регуляции и формировании более устойчивого баланса между автономным и центральным контурами регуляции кардиогемодинамики. Это отражается в увеличении не только прямых статистических значений показателей размаха длительности кардиоинтервалов (MxDMn) и значения моды (Mo), но и высокочастотной составляющей спектра (HF). В целом проведенный анализ показателей вариабельности кардиоритма как в состоянии покоя, так и в ответ на переспирацию вывил более низкие значения показателей ВСР в группе юношей-мигрантов (0-е поколение), что указывает не только на снижение активности автономного контура регуляции, но и на дисбаланс симпатической и парасимпатической регуляции кардиогемодинамики. Подчеркнем, что у лиц 3-го поколения как в состоянии покоя, так и при функциональной нагрузочной пробе с дыханием в замкнутом пространстве отмечается достаточно оптимальный и устойчивый баланс между звеньями вегетативной регуляции, что отражается в показателях артериального давления и газообмена. При этом наиболее информативными показателями адаптации выступают не абсолютные величины изучаемых параметров, а разница между их фоновыми и нагрузочными значениями, которые в большей степени отражают состояние функциональных резервов систем организма уроженцев различных поколений лиц, постоянно проживающих в экстремальных условиях Севера.

Список литературы

1. Ноздрачев А.Д. Физиология вегетативной нервной системы. Л.: Медицина, 1983. 296 с.

2. Thayer J.F., Yamamoto S.S., Brosschot J.F. The relationship of autonomic imbalance, heart rate variability and cardiovascular disease risk factors. *Int. J. Cardiol*. 2010;141(2):122–131. doi: 10.1016/j.ijcard.2009.09.543

3. Баевский Р.М., Берсенева А.П. Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний. М.: Медицина, 1997. 256 с.

4. Santos M.A.A., Sousa A.C.S., Reis F.P., Santos T.R., Lima S.O., Barreto-Filho J.A. Does the aging process significantly modify the Mean Heart Rate? *Arquivos Brasileiros de Cardiologia.* 2013;101(5):388–398. doi: 10.5935/abc.20130188

5. Баевский Р.М., Максимов А.Л., Берсенева А.П. Основы экологической валеологии человека. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2001. 267 с.

6. Sammito S., Böckelmann I. New reference values of heart rate variability during ordinary daily activity. *Heart Rhythm.* 2017;14(2): 304–307. doi: 10.1016/j.hrthm.2016.12.016

7. Ziemssen T., Siepmann T. The investigation of the cardiovascular and sudomotor autonomic nervous system review. *Front. Neurol.* 2019;10:53. doi: 10.3389/fneur.2019.00053

8. Шлык Н.И., Сапожникова Е.Н., Кириллова Т.Г., Семенов В.Г. Типологические особенности функционального состояния регуляторных систем у школьников и юных спортсменов (по данным анализа вариабельности сердечного ритма). *Физиол. человека*. 2009;35(6):85–93.

9. Reyes del Paso G.A., Langewitz W., Mulder L.J.M., van Roon A., Duschek S. The utility of low frequency heart rate variability as an index of sympathetic cardiac tone: a review with emphasis on a reanalysis of previous studies. *Psychophysiology.* 2013;50(5):477–487. doi: 10.1111/psyp.12027

10. Сергиенко И.В., Ежов М.В., Аншелес А.А., Попова А.Б., Чубыкина У.В. Функциональные нагрузочные пробы в кардиологии. Москва: ФГБУ «НМИЦК», 2021. 54 с.

11. Бектешева А.Л., Рылова Н.В., Самойлов А.С. Применение кардиореспираторного нагрузочного теста в спортивной медицине. *Практ. мед.* 2014;79(3):50–53.

12. Astrorino T.A., Whlte A.C. Assessment of anaerobic power to verify VO_2max attainment. *Clin. Physiol. Funct. Imading*. 2010;30(4);294–300. doi: 10.1111/j.1475-097x.2010.00940.x

13. Казначеев В.П. Современные аспекты адаптации. Новосибирск: Наука, 1980. 192 с.

14. Хаснулин В.И., Вильгельм В.Д., Воевода М.И., Зырянов Б.Н., Селятицкая В.Г., Куликов В.Ю., Хаснулин П.В., Егорова Г.М. Медико-экологические основы формирования, лечения и профилактики заболеваний у коренного населения Ханты-Мансийского автономного округа. Новосибирск: СО РАН, 2004. 316 с.

15. Милованов А.П. Адаптация малого круга кровообращения человека в условиях севера. Новосибирск: Наука, 1981. 170 с.

16. Авцын А.П., Жаворонков А.А., Марачев А.Г., Милованов А.П. Патология человека на Севере. М.: Медицина, 1985. 415 с.

17. Тимофеев Д.С., Тимофеева А.Н. Холодовая гипертензия в малом кругу кровообращения в организме человека в природных условиях Якутии. *Междунар. ж. эксперим. образ.* 2015;(5-1):13–15.

18. Максимов А.Л. Современные эколого-социальные аспекты биомедицинских исследований по адаптации человека на Северо-Востоке России. *В кн. Север: арктический вектор социально-*

экологических исследований. Сыктывкар: Коми науч. центр УрО РАН, 2008. С. 109–118.

19. Суханова И.В., Максимов А.Л., Вдовенко С.И. Особенности адаптации у юношей Магаданской области: морфофункциональные перестройки (сообщение 1). *Экол. человека*. 2013;(8):3–10.

20. Максимов А.Л., Аверьянова И.В. Перестройки вариабельности кардиоритма у лиц с различными исходными типами вегетативной регуляции в процессе переспирации. *Рос. физиол. ж.* 2016;102(5):606–617.

21. Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Чирейкин Л.В., Гаврилушкин А.П., Довгалевский П.Я., Кукушкин Ю.А., Миронова Т.Ф., Прилуцкий Д.А., Семенов А.В., Федоров В.Ф., Флейшман А.Н., Медведев М.М. Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (методические рекомендации). *Вестн. аритмол.* 2001;(24):65–83.

22. Malliani A., Pagani M., Lombardi F. Importance of appropriate spectral methodology to assess heart rate variability in the frequency domain. *Hypertension.* 1994;24(1):140–141. doi: 10.1161/01.hyp.24.1.140

23. Боровиков В.П. Statistica. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов (2-е изд.). СПб.: Питер, 2003. 688 с.

24. Якименко М.А., Симонова Т.Г., Пичкуров А.М., Татауров Ю.А. Влияние адаптации к холоду на показатели внешнего дыхания при гиперкапнии. *Физиол. человека*. 1989;15(5):148–155.

25. Куликов В.Ю., Ким Л.Б. Кислородный режим при адаптации человека на Крайнем Севере. Новосибирск: Наука, 1987. 160 с.

26. Grossman P., Taylor E.W. Toward understanding respiratory sinus arrhythmia: relations to cardiac vagal tone, evolution and biobehavioral functions. *Biol. Psychol*. 2007;74(2):263–285. doi: 10.1016/j.biopsycho.2005.11.014

27. Shamailov B.T., Paton J. Evaluating the physiological significance ofrespiratory sinus arrhythmia: looking beyond ventilation-perfusionefficiency. *J. Physiol*. 2012;590(8):1989–2008. doi: 10.1113/jphysiol.2011.222422

28. Fallen E.L., Kamath M.V., Chista D.N., Fitchelt D. Spectral analysis of heart rate variability following human of heart transplantation: evidence for functional enenervation. *J. Auton. Nerv. Syst*. 1988;23(3):199–206. doi: 10.1016/0165-1838 (88)90094-x

29. Karemaker J.M. Analysis of blood pressure and heart rate variability: theoretical consideration and clinical applicability. *In: Clinical autonomic disorders.* Boston: Little, Brown and Company, 1993. P. 315–329.

30. Stein P.K., Bosner M., Kleiger R.E., Conger E.M. Heart rate variability: a measure of cardiac autonomic tone. *Am. Heart. J.* 1994;127(5):1376–1381. doi: 10.1016/0002-8703 (94)90059-0

31. Takabatake N., Nakamura H., Abe S., Inage M., Inoue S., Kagaya S.A. Novel pathophysiological phenomenon in cachexic patients with chronic obstructive pulmonary disease: the relationship between the circadian rhythm of circulation leptin and very low frequency component of heart rate variability. *Am. J. Respir. Crit. Care Med*. 2001; 163(6):1314–1319. doi: 10.1164/ajrccm.163.6.2004175

References

1. Nozdrachev A.D. Physiology of the autonomic nervous system. Leningrad: Medicine, 1983. 296 p. [In Russian].

2. Thayer J.F., Yamamoto S.S., Brosschot J.F. The relationship of autonomic imbalance, heart rate variability and cardiovascular disease risk factors. *Int. J. Cardiol*. 2010;141(2):122–131. doi: 10.1016/j.ijcard.2009.09.543

3. Baevsky P.M., Berseneva A.P. Assessment of the adaptive capabilities of the body and the risk of developing diseases. Moscow: Medicine, 1997. 256 p. [In Russian].

4. Santos M.A.A., Sousa A.C.S., Reis F.P., Santos T.R., Lima S.O., Barreto-Filho J.A. Does the aging process significantly modify the Mean Heart Rate? *Arquivos Brasileiros de Cardiologia.* 2013;101(5):388–398. doi: 10.5935/abc.20130188

5. Baevsky R.M., Maksimov A.L., Berseneva A.P. Fundamentals of human ecological valeology. Magadan: SVNTS FEB RAS, 2001. 267 p. [In Russian].

6. Sammito S., Böckelmann I. New reference values of heart rate variability during ordinary daily activity. *Heart Rhythm.* 2017;14(2): 304–307. doi: 10.1016/j.hrthm.2016.12.016

7. Ziemssen T., Siepmann T. The investigation of the cardiovascular and sudomotor autonomic nervous system review. *Front. Neurol.* 2019;10:53. doi: 10.3389/fneur.2019.00053

8. Shlyk N.I., Sapozhnikova E.N., Kirillova T.G., Semenov V.G Typoloagical characteristics of the functional state of regulatory systems in schoolchildren and young athletes (according to heart rate variability data). *Fiziologiya cheloveka = Human Physiology.* 2009;35:330–338. In Russian]. doi: 10.1134/S0362119709060103

9. Reyes del Paso G.A., Langewitz W., Mulder L.J.M., van Roon A., Duschek S. The utility of low frequency heart rate variability as an index of sympathetic cardiac tone: a review with emphasis on a reanalysis of previous studies. *Psychophysiology.* 2013;50(5):477–487. doi: 10.1111/psyp.12027

10. Sergienko I.V., Yezhov M.V., Ansheles A.A., Popova A.B., Chubykina U.V. Functional stress tests in cardiology. Moscow: NMITSK, 2021. 54 c. [In Russian].

11. Bektesheva A.L., Rylova N.V., Samoilov A.S. Application of cardiorespiratory exercise testing in sports medicine. *Prakticheskaya meditsina = Practical Medicine*. 2014;79(3):50–53. [In Russian].

12. Astrorino T.A., Whlte A.C. Assessment of anaerobic power to verify VO_2max attainment. *Clin. Physiol. Funct. Imading*. 2010;30(4);294–300. doi: 10.1111/j.1475-097x.2010.00940.x

13. Kaznacheev V.P. Modern aspects of adaptation. Novosibirsk: Nauka, 1980. 192 p. [In Russian].

14. Khasnulin V.I., Wilhelm V.D., Voevoda M.I., Zyryanov B.N., Selyatitskaya V.G., Kulikov V.Yu., Khasnulin P.V., Egorova G.M. Medical and ecological foundations of the formation, treatment and prevention of diseases in the indigenous population of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug. Novosibirsk: SB RAS, 2004. 316 p. [In Russian].

15. Milovanov A.P. Adaptation of the small circle of human circulation in the conditions of the North. Novosibirsk: Nauka, 1981. 170 p. [In Russian].

16. Avtsyn A.P., Zhavoronkov A.A., Marachev A.G., Milovanov A.P. Human pathology in the North. Moscow: Medicine, 1985. 415 p. [In Russian].

17. Timofeev D.S., Timofeeva A.N. Cold hypertension in the small circle of blood circulation in the human body in the natural conditions of Yakutia. *Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya = International Journal of Experiential Education*. 2015;(5-1):13–15. [In Russian].

18. Maksimov A.L. Modern ecological and social aspects of biomedical research on human adaptation in the North-East of Russia. *In: North: the Arctic vector of socio-ecological research.* Syktyvkar: Komi Scientific Center of UB of RAS, 2008. P. 109–118 [In Russian].

19. Sukhanova I.V., Maksimov A.L., Vdovenko S.I. Peculiarities of adaptation observed in young male residents of magadan region: morphofunctional changes (report 1). *Ekologiya cheloveka = Human Ecology*. 2013;(8):3–10. [In Russian].

20. Maximov A.L., Averyanova I.V. Heart rate variability changes demonstrated by individuals with different vegetative regulation types in origin under rerespiration session. *Rossiyskiy fiziologicheskiy zhurnal imeni Ivana Mikhaylovicha Sechenova = Russian Journal of Physiology*. 2016;102(5):606–617. [In Russian].

21. Baevskiy R.M., Ivanov G.G., Chireykin L.V., Gavrilushkin A.P., Dovgalevskij P.Ja., Kukushkin Ju.A., Mironova T.F., Priluckij D.A., Semenov A.V., Fedorov V.F., Flejshman A.N., Medvedev M.M. Heart rate variability analysis at using different electrocardiographic systems (methodical recommendations). *Vestnik aritmologii = Journal of Arrhythmology.* 2001;(24):65–83. [In Russian].

22. Malliani A., Pagani M., Lombardi F. Importance of appropriate spectral methodology to assess heart rate variability in the frequency domain. *Hypertension.* 1994;24(1):140–141. doi: 10.1161/01.hyp.24.1.140

23. Borovikov V.P. Statistica. The art of analyzing data on a computer: for professionals. Saint Petersburg: Piter, 2003. 688 p. [In Russian].

24. Yakimenko M.A., Simonova T.G., Pichkurov A.M., Tataurov Yu.A. The effect of adaptation to cold on the indicators of external respiration during hypercapnia. *Fiziologiya cheloveka = Human Physiology.* 1989;15(5):148–155. [In Russian].

25. Kulikov V.Yu., Kim L.B. Oxygen regime during human adaptation in the Far North. Novosibirsk: Nauka, 1987. 160 p. [In Russian].

26. Grossman P., Taylor E.W. Toward understanding respiratory sinus arrhythmia: relations to cardiac vagal tone, evolution and biobehavioral functions. *Biol. Psychol*. 2007;74(2):263–285. doi: 10.1016/j.biopsycho.2005.11.014

27. Shamailov B.T., Paton J. Evaluating the physiological significance ofrespiratory sinus arrhythmia: looking beyond ventilation-perfusionefficiency. *J. Physiol*. 2012;590(8):1989–2008. doi: 10.1113/jphysiol.2011.222422

28. Fallen E.L., Kamath M.V., Chista D.N., Fitchelt D. Spectral analysis of heart rate variability following human of heart transplantation: evidence for functional enenervation. *J. Auton. Nerv. Syst*. 1988;23(3):199–206. doi: 10.1016/0165-1838 (88)90094-x

29. Karemaker J.M. Analysis of blood pressure and heart rate variability: theoretical consideration and clinical applicability. *In: Clinical autonomic disorders.* Boston: Little, Brown and Company, 1993. P. 315–329.

30. Stein P.K., Bosner M., Kleiger R.E., Conger E.M. Heart rate variability: a measure of cardiac autonomic tone. *Am. Heart J.* 1994;127(5):1376–1381. doi: 10.1016/0002-8703 (94)90059-0

31. Takabatake N., Nakamura H., Abe S., Inage M., Inoue S., Kagaya S.A. Novel pathophysiological phenomenon in cachexic patients with chronic obstructive pulmonary disease: the relationship between the circadian rhythm of circulation leptin and very low frequency component of heart rate variability. *Am. J. Respir. Crit. Care Med*. 2001;163(6):1314–1319. doi: 10.1164/ajrccm.163.6.2004175

Сведения об авторах:

Аверьянова Инесса Владиславовна, д.б.н., ORCID: 0000-0002-4511-6782, e-mail: Inessa1382@mail.ru
Максимов Аркадий Леонидович, чл.-корр. РАН, ORCID: 0000-0003-1089-4266, e-mail: arktika@online.magadan.su

Information about the authors:

Inessa V. Averyanova, doctor of biological sciences, ORCID: 0000-0002-4511-6782, e-mail: Inessa1382@mail.ru
Arkady L. Maksimov, corresponding member of RAS, ORCID: 0000-0003-1089-4266, e-mail: arktika@online.magadan.su

Поступила в редакцию 10.02.2023
После доработки 30.03.2023
Принята к публикации 14.04.2023

Received 10.02.2023
Revision received 30.03.2023
Accepted 14.04.2023