

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАбельНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА БЕЛУХИ (*DELPHINAPTERUS LEUCAS*) ВО ВРЕМЯ ДЕЙСТВИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА

© А. В. Бахчина,¹ Л. М. Мухаметов,^{2,3} В. В. Рожнов,² О. И. Лямин²⁻⁴

¹Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

²Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН, Москва, Россия

³ООО «Утришский дельфинарий», Москва, Россия

⁴Калифорнийский университет, Лос-Анджелес, США

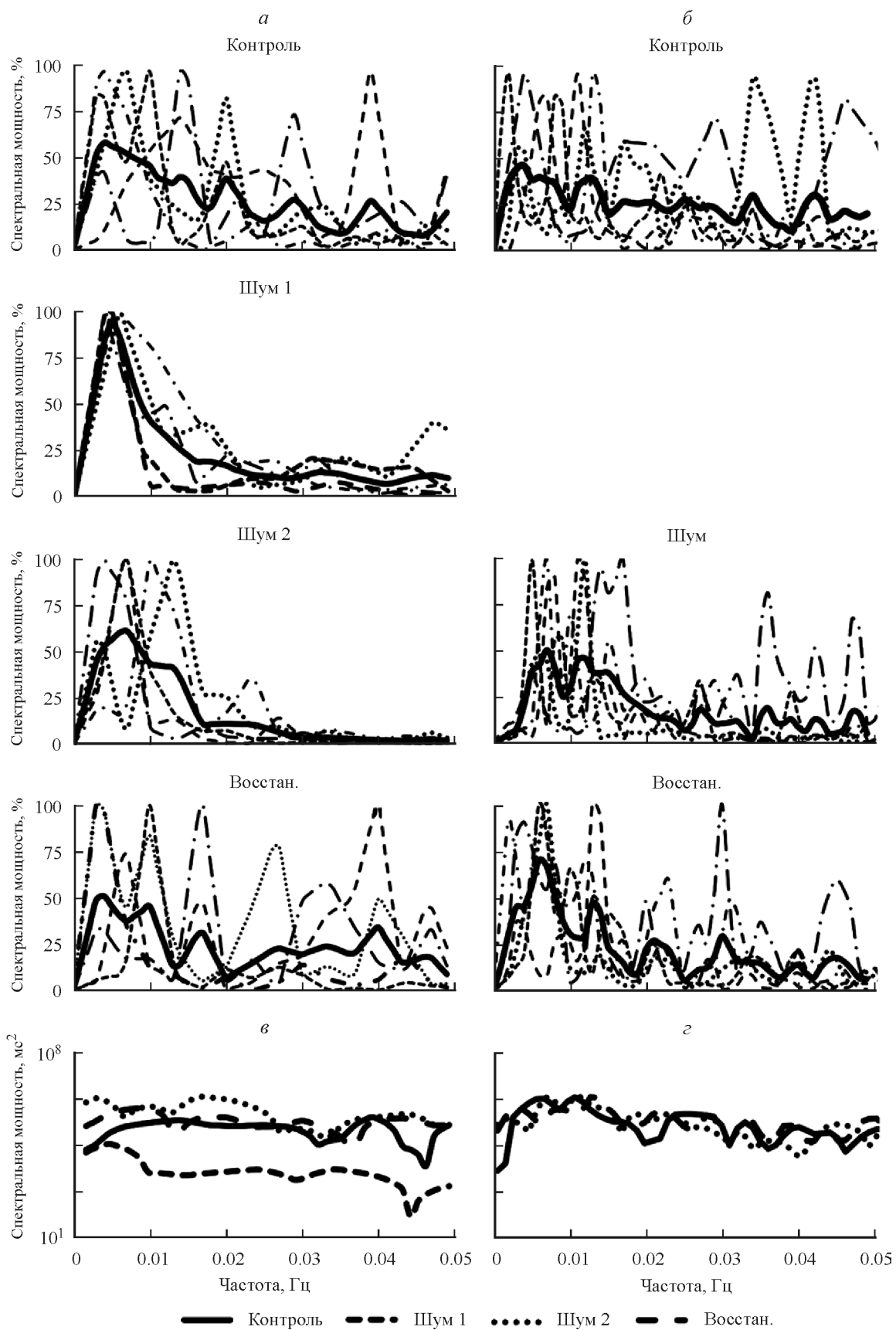
E-mail: oilyamin@yahoo.com

Вариабельность сердечного ритма (СР) отражает работу механизмов регуляции сердечно-сосудистой деятельности со стороны нервной и эндокринной систем. Спектральный анализ СР — это один из методов оценки его вариабельности. Он основан на применении к ряду последовательных RR-интервалов (кардиоинтервалов) преобразования Фурье и вычислении спектра их колебаний. Спектральный анализ дает информацию о выраженности разных периодических составляющих СР, которые формируют его вариабельность. По соотношению мощностей спектральных составляющих СР можно судить о доминировании того или иного механизма регуляции работы сердца. Спектральные показатели СР чувствительны к изменениям состояния животных и человека и коррелируют с такими индикаторами стресса как уровень кортизола и катехоламинов в крови [1, 2]. Заболевания, воздействие эмоционально негативных и стресс-факторов вызывают у животных и человека изменения в соотношении мощностей спектра СР в низко- и высокочастотном диапазонах в сторону доминирования первых [3]. Ортостатический стресс у человека (резкое изменение положения тела с горизонтального на вертикальное) приводит к тому, что спектральная картина редуцируется от трех пиковых частот (в диапазонах 0.015—0.04, 0.04—0.15, 0.15—0.5 Гц) до одной, расположенной в низкочастотном диапазоне (0.04—0.15 Гц) [4]. В настоящее время анализ динамики СР у морских млекопитающих проводят, как правило, с использованием статистических методов, оценивая изменения значений ЧСС и гистограммы распределения мгновенной ЧСС, концентрируя внимание на синусовой дыхательной аритмии [5] или же для исследования паттерна дыхания [6]. Задача данной работы состояла в том, чтобы выяснить, может ли спектральный анализ СР китообразных быть использован для неинвазивной оценки их физиологических адаптационных реакций. Для этого были проанализированы изменения спек-

тральных показателей СР белухи (*Delphinapterus leucas*) при воздействии акустического шума.

Исследование выполнено на молодой белухе (самец, масса 195 кг, длина 240 см) на Утришской морской станции Института проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН. Животное было отловлено за 2 мес до начала исследований. На время эксперимента раз в день белуху помещали в ванну с морской водой размером 4 × 0.8 × 0.8 м. С помощью излучателя животному предъявляли полосовые акустические шумы. Особенности реакций белухи на шум разной интенсивности, частоты и длительности были описаны ранее [5]. Для спектрального анализа СР были выбраны 10 шумов длительностью 10 мин: по 5 шумов в каждый год. В первый год интенсивности шумов были 150 (4 шума) и 160 дБ (1 шум), частоты — 19—27 кГц (2 шума) и 27—38 кГц (3 шума). Через год белухе предъявляли шумы интенсивностью 165 дБ и частотой 19—27 кГц.

Регистрацию электрокардиограммы (ЭКГ) проводили с помощью усилителя (А-М System) и аналого-цифрового преобразователя (CED 1401), используя дисковые электроды, залитые в силиконовые присоски [5]. Мгновенные значения ЧСС рассчитывали как величины, обратные RR-интервалам, до предъявления шума (контроль, 5 мин), во время действия шума (10 мин), после окончания шума (отмена, 10 мин), после чего рассчитывали спектрограммы (периодограммный метод Ломба-Скаргла). Анализировали значения мощности в диапазоне частот от 0.001 до 0.05 Гц, т. е. процессы длительностью от 20 до 1000 с. Частотный диапазон спектров СР был разделен на 2 составляющие: высокочастотную (ВЧ) — от 0.01 до 0.05 Гц и низкочастотную (НЧ) — от 0.001 до 0.01 Гц. В каждом спектре вычисляли общую плотность мощности (ОМ, мс²), плотность мощности в диапазоне низких частот, высоких частот и соотношение мощности в диапазонах НЧ и ВЧ. Статистический анализ включал сравне-



Средние значения и ошибки средних спектральных показателей сердечного ритма (RR-интервалов) белухи в разные периоды эксперимента

Серия	Период	НЧ ($\text{мс}^2 \times 10^{-5}$)	ВЧ ($\text{мс}^2 \times 10^{-5}$)	ОМ ($\text{мс}^2 \times 10^{-5}$)	НЧ/ВЧ
		Ср \pm ош.ср.			
1 год	Контроль	225.33 \pm 108.76	96.93 \pm 14.62	112.98 \pm 18.34	2.41 \pm 1.23
	Шум 1 (тахикардия)	25.22 \pm 22.97 ^{#, ##}	4.93 \pm 4.56 ^{*, **}	7.47 \pm 6.86 ^{#, ##}	4.6 \pm 1.24
	Шум 2	1314.33 \pm 419.25 ^{*, **, &}	214.11 \pm 15.61 ^{*, **, &}	351.64 \pm 59.84 ^{*, **, &}	6.02 \pm 1.88
	Восстановление	210.99 \pm 107.11	120.08 \pm 34.36	131.44 \pm 29.41	2.52 \pm 1.48
2 года	Контроль	190.84 \pm 47.97	108.04 \pm 17.09	118.39 \pm 19.76	1.74 \pm 0.29
	Шум	136.65 \pm 50.41	116.51 \pm 266.98	119.03 \pm 26.91	1.26 \pm 0.39
	Восстановление	195.58 \pm 5.96	99.85 \pm 14.84	111.81 \pm 13.31	2.09 \pm 0.26

Примечание. Контроль — 5 мин период до предъявления шума. Шум — период действия шума. Восстановление — 10 мин период после отмены шума. ОМ — общая плотность мощности спектра колебаний сердечного ритма, НЧ — плотность мощности спектра колебаний сердечного ритма в диапазоне низких частот (0.001—0.01 Гц), ВЧ — в диапазоне высоких частот (0.01—0.05 Гц). Шум 1 — первая стадия реакции белухи на предъявление шума (тахикардия), Шум 2 — вторая стадия реакции белухи на предъявление шума (средняя частота сердечных сокращений не отличается от частоты в контрольный период). *, **, & — $p < 0.05$, попарное сравнение с контролем, с периодом отмены шума, с периодом тахикардии соответственно; # и ## — $p < 0.05$, критерий Уилкоксона для связанных выборок по сравнению с контролем и с периодом отмены шума.

ние значений спектральных показателей СР за периоды контроля, шума и отмены. Использовали ANOVA для повторных измерений и непараметрический критерий Уилкоксона.

Спектры СР белухи в контрольных условиях включают колебания во всем частотном диапазоне от 0 до 0.05 Гц (см. рисунок, а, б). Каждый спектр содержит несколько пиковых частот. Так, в диапазоне ВЧ (0.01 до 0.05 Гц, индикатор активности парасимпатической системы) в каждом спектре наблюдаются 2 пиковые частоты, которые характеризуют особенности прерывистого дыхательного цикла белухи: периоды колебаний с длительностью 20—100 с отображают задержки дыхания длительностью более 60 с и интервалы между периодами гипервентиляции со средней длительностью 30 с. В частотном диапазоне НЧ (0.001 до 0.01 Гц) наблюдается одна пиковая частота (≈ 0.005 Гц). Такие колебания (с периодом примерно 200 с) не связаны с процессами дыхания, потому что таких длинных задержек дыхания у белухи не было. Полученная амплитудно-частотная картина спектров СР белухи соответствует таковой у наземных млекопитающих, у которых в спектре колебаний СР обычно также выделяют 3 пиковые частоты [2]. Мы предполагаем, что, как и у наземных млекопитающих, колебания СР белухи в НЧ диапазоне с периодом в 200 с и более отражают медленные модуляции со стороны симпатической нервной системы, которые «настраиваются» над дыхательной аритмией и формируют сложную картину периодических колебаний СР. Эти медленные модуляции являются важным компонентом вегетативной регуляции сердечного ритма.

Реакция на шумы во всех экспериментах первого года включала две стадии. Первая стадия (средняя длительность 257.3 ± 33.7 с) — выраженное повышение ЧСС в начале действия шума. Среднее значение RR-интервалов в стадии тахикардии было почти вдвое меньше, чем в контроле (контроль: 1388.4 ± 55.8 мс; шум: 736.4 ± 31.5 мс; или мгновенная ЧСС: 43.2 ± 1.7 и 81.5 ± 3.3 уд/мин соответственно; $p < 0.05$, критерий Уилкоксона). Вторая стадия реакции на шум (длительность 303.6 ± 4.6 с) — снижение ЧСС. Средние значения RR-интервалов во второй стадии реакции не отличались от контрольных (контроль: 1388.4 ± 55.8 мс; шум: 1600.4 ± 159.1 мс; или мгновенная ЧСС: 43.2 ± 1.7 уд/мин и 37.5 ± 3.4 уд/мин соответственно; $p > 0.05$). Так как тахикардия вносит нестационарность в 10-минутные последовательности RR-интервалов, анализ для каждой стадии реакции делался отдельно.

В период тахикардии у белухи происходило сужение амплитудно-частотного распределения в нормированных спектрах СР (см. рисунок, а; Шум 1). Колебания СР, связанные с дыханием, исчезали, хотя дыхание белухи было более частым и регулярным [5]. В спектрах осталась фактически только одна частота в низкочастотном диапазоне (≈ 0.005 Гц). Это означает, что многообразие нервных и гормональных процессов, регулирующих СР, свелось к одному, реализующему начало защитной реакции — активации симпатoadrenalовой системы. После периода тахикардии, во второй фазе реакции, дыхательная аритмия восстанавливалась, происходило расширение диапазона доминирующих частот СР в спектре до 0.02 Гц (см. рисунок, а; Шум 2), но число выраженных пиков было меньше,

Спектры мощности сердечного ритма (RR-интервалов) белухи в контрольных условиях (Контроль — 5 мин) во время действия 10-минутного шума (Шум) и после отмены шума (Восстан. — восстановление, 10 мин).

а, б — мощность спектров RR-интервалов, нормированная по амплитуде к максимальному значению, принятому за 100 % в первой и второй сериях экспериментов (возраст белухи 1 и 2 года соответственно). Тонкие линии — разные эксперименты, толстая линия — усредненная кривая. Шум 1 (период тахикардии) и Шум 2 — две стадии реакции на шум (150 и 160 дБ, частота — 19—27 и 27—38 кГц); а, б — примеры спектров RR-интервалов белухи, не нормированных по амплитуде (мс^2), в двух экспериментах (возраст белухи 1 и 2 года соответственно). Шум — весь 10-минутный период действия шума (165 дБ, частота 19—27 кГц).

чем в контроле. Полное восстановление амплитудно-частотного распределения в спектрах СР до контрольного уровня происходило после отмены шума (см. рисунок, а; Восстан.).

Предъявление шума достоверно влияло на спектральные плотности мощности в НЧ и ВЧ диапазонах, а также во всем частотном диапазоне спектров СР (ANOVA, НЧ: $p < 0.05$, $F[3.9] = 4.3$; ВЧ: $p < 0.01$, $F[3.9] = 14.9$; ОМ: $p < 0.01$, $F[3.9] = 11.15$; см. таблицу). Результаты post-hoc анализа показали, что в фазе тахикардии абсолютные значения мощностей НЧ, ВЧ и ОМ были достоверно ниже, чем в контроле, в фазе последующего предъявления шума и после отмены шума. Во второй стадии реакции абсолютные значения мощностей НЧ, ВЧ и ОМ на шум были достоверно выше по сравнению с контролем, периодом тахикардии при шуме и после отмены шума (см. рисунок, в). Периоды контроля и отмены шума не отличались ни по одному из показателей СР. Коэффициент НЧ/ВЧ в период действия шума имел тенденцию к увеличению ($p = 0.06$).

У той же белухи во всех 5 экспериментах второго года реакции на шум по показателям ЧСС не было (средняя длина RR-интервала, контроль: 1288.6 ± 24.4 с; шум: 1245.8 ± 28.7 с; ЧСС: 46.6 ± 0.9 уд/мин и 48.2 ± 1.1 уд/мин соответственно; $p > 0.05$). Вариативность распределения амплитуд колебаний по частотам за весь период действия шума практически не менялась (см. рисунок, б). Статистический анализ не выявил значимых отличий между спектральными показателями СР белухи в контроле и в период действия шума (см. таблицу).

Как показывает наше исследование, предъявление белухе акустических шумов вскоре после отлова, на начальной стадии адаптации к условиям дельфинария, приводило к сужению частотного диапазона колебаний СР и концентрации его в низкочастотной области (до 0.01 Гц в период тахикардии и до 0.02 Гц в последующий период предъявления шума). Мощность колебаний СР снижалась по сравнению с контролем в период тахикардии и возрастала в период последующего предъявления шума. Такие изменения спектральных показателей СР напоминают изменения у наземных млекопитающих и у людей при стрессовых или эмоционально негативных внешних воздействиях. Они характерны для реализации защитной реакции организма — стресса. Постепенное возрастание мощности колебаний СР в диапазонах НЧ и ВЧ во второй фазе реакции следует рассматривать как результат активации защитных компенсаторных механизмов — стадии домини-

рования активности гипоталамо-гипофизарно-адреналовой системы по Г. Селье [7]. После года пребывания белухи в дельфинарии подобной реакции не наблюдалось, как не наблюдалось и значимых изменений ЧСС. Таким образом, спектральные характеристики колебаний СР белухи чувствительны к изменениям внешнего контекста и являются количественным показателем реакции животного на акустический шум как стресс-фактор. Динамика их изменений во время действия шума и после его отмены, а также в процессе адаптации к условиям содержания сходна с таковой у наземных млекопитающих и человека.

Исследование выполнено в рамках Программы изучения распространения и миграции белух Постоянно действующей экспедиции РАН при финансовой поддержке Русского географического общества и РФФИ (проект 16-04-01306).

Список литературы

- [1] Chandola T., Heraclides A., Kumari M. Psychophysiological biomarkers of workplace stressors // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2010. V. 35. P. 51—57.
- [2] Borell E., Langbein J., Després G., Hansen S., Leterrier C., Marchant-Forde J., Marchant-Forde R., Minero M., Mohr E., Prunier A., Valance D., Veissier I. Heart rate variability as a measure of autonomic regulation of cardiac activity for assessing stress and welfare in farm animals — A review // *Physiol. Behav.* 2007. V. 92. P. 293—316.
- [3] Montano N., Porta A., Cogliati C., Costantino G., Tobaldini E., Casali K. R., Iellamo F. Heart rate variability explored in the frequency domain: A tool to investigate the link between heart and behavior // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2009. V. 33. P. 71—80.
- [4] Vlcek M., Radikova Z., Penesova A., Kvetnansky R., Imrich R. Heart rate variability and catecholamines during hypoglycemia and orthostasis // *Auton. Neurosci.* 2008. V. 143. P. 53—57.
- [5] Лямин О. И., Корнева С. М., Рожнов В. В., Мухаметов Л. М. Изменение сердечного ритма и дыхания белухи во время действия акустического шума // *Докл. РАН.* 2011. Т. 440. С. 704—707.
- [6] Andrews R. D., Costa D. P., Le Boeuf B. J., Jones D. R. Breathing frequencies of northern elephant seals at sea and on land revealed by heart rate spectral analysis // *Respiration Physiology.* 2000. V. 123. P. 71—85.
- [7] Селье Г. Очерки об адапционном синдроме. М., Медгиз, 1960.

Поступила 1 XII 2015

SPECTRAL ANALYSIS OF HEART RATE VARIABILITY IN THE BELUGA *DELPHINAPTERUS LEUCAS* DURING EXPOSURE TO ACOUSTIC NOISE

A. V. Bakhchina,¹ L. M. Mukhametov,^{2,3} V. V. Rozhnov,² and O. I. Lyamin²⁻⁴

¹ Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

² A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³ Utrish Dolphinarium Ltd., Moscow, Russia

⁴ University of California, Los Angeles, CA, USA