

Влияние музыки с эффектом бинауральных биений на параметры сердечного ритма человека в процессе дневного сна

© З.В. БАКАЕВА¹, Д.Е. ШУМОВ², Е.Б. ЯКУНИНА¹, Ю.П. СТАРШИНОВ¹, Д.С. СВЕШНИКОВ¹, В.И. ТОРШИН¹, В.Б. ДОРОХОВ², В.И. КАРПОВ¹

¹Медицинский институт ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», Москва, Россия;

²ФБГУ «Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН», Москва, Россия

Резюме

Цель исследования. Проверка гипотезы о том, что музыка с эффектом бинауральных биений (ББ) способна усиливать активацию парасимпатического отдела вегетативной нервной системы (ПОВНС) по мере углубления дневного сна.

Материал и методы. Параметром сравнения была мощность высокочастотной составляющей спектра variability сердечного ритма испытуемых, вычисляемая на последовательных 2-минутных интервалах в течение 20-минутного дневного сна. Параметр сравнивали при засыпании на фоне музыки с эффектом ББ (стимул) и при засыпании в тишине (контроль).

Результаты и заключение. Статистическое сравнение показало более высокую активацию ПОВНС по мере засыпания на фоне стимула по сравнению с контролем. Это согласуется с выводами других публикаций о положительном влиянии звуковых стимулов с эффектом ББ на ПОВНС.

Ключевые слова: бинауральные биения, засыпание, инсомния, вариабельность сердечного ритма.

Информация об авторах:

Бакаева З.В. — <https://orcid.org/0000-0001-7795-0897>

Шумов Д.Е. — <https://orcid.org/0000-0002-5755-5563>

Якунина Е.Б. — <https://orcid.org/0000-0002-7962-1971>

Старшинов Ю.П. — <https://orcid.org/0000-0002-1836-6209>

Свешников Д.С. — <https://orcid.org/0000-0002-1050-7871>

Торшин В.И. — <https://orcid.org/0000-0002-3950-8296>

Дорохов В.Б. — <https://orcid.org/0000-0003-3533-9496>

Карпов В.И. — <https://orcid.org/0000-0003-2511-6264>

Автор, ответственный за переписку: Шумов Дмитрий Ефимович — e-mail: dmitry-shumov@yandex.ru

Как цитировать:

Бакаева З.В., Шумов Д.Е., Якунина Е.Б., Старшинов Ю.П., Свешников Д.С., Торшин В.И., Дорохов В.Б., Карпов В.И. Влияние музыки с эффектом бинауральных биений на параметры сердечного ритма человека в процессе дневного сна. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2021;121(4 вып. 2):31–35. <https://doi.org/10.17116/jnevro202112104231>

The effect of music embedded with binaural beats on heart rate parameters during nap

© Z.V. BAKAEVA¹, D.E. SHUMOV², E.B. YAKUNINA¹, YU.P. STARSHINOV¹, D.S. SVESHNIKOV¹, V.I. TORSHIN¹, V.B. DOROKHOV², V.I. KARPOV¹

¹Medical Institute of Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia;

²Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

Objective. To test hypothesis that music embedded with binaural beats can boost activity of parasympathetic part of autonomic nervous system (PPANS) with the development of nap.

Material and methods. The power of high-frequency component of heart rate variability spectrum computed on successive 2-minute intervals during 20-minute nap was a comparison criterion. The criterion was compared during nap accompanied by music with embedded binaural beats (stimulus condition) and nap in silence (control condition).

Results and conclusion. Statistical comparison revealed the increase of PPANS activity during nap in stimulus condition vs. control condition. It is consistent with conclusions of other papers about positive effect of sound stimuli embedded with binaural beats on PPANS.

Keywords: binaural beats, falling asleep, insomnia, heart rate variability.

Information about the authors:

Bakaeva Z.V. — <https://orcid.org/0000-0001-7795-0897>

Shumov D.E. — <https://orcid.org/0000-0002-5755-5563>

Yakunina E.B. — <https://orcid.org/0000-0002-7962-1971>

Starshinov Yu.P. — <https://orcid.org/0000-0002-1836-6209>

Sveshnikov D.S. — <https://orcid.org/0000-0002-1050-7871>

Torshin V.I. — <https://orcid.org/0000-0002-3950-8296>

Dorokhov V.B. — <https://orcid.org/0000-0003-3533-9496>

Karpov V.I. — <https://orcid.org/0000-0003-2511-6264>

Corresponding author: Shumov D.E. — e-mail: dmitry-shumov@yandex.ru

To cite this article:

Bakaeva ZV, Shumov DE, Yakunina EB, Starshinov YuP, Sveshnikov DS, Torshin VI, Dorokhov VB, Karpov VI. The effect of music embedded with binaural beats on heart rate parameters during nap. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry = Zhurnal nevrologii i psikiatrii imeni S.S. Korsakova*. 2021;121(4 vyp 2):31–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.17116/jnevro202112104231>

Биения — это объективное физическое явление, возникающее при наложении двух колебательных процессов близкой частоты. В психоакустике различают «бинауральные» и «монауральные», или акустические, биения. Акустические низкочастотные биения проще всего услышать, если 2 электрических сигнала постоянной, но немного отличающейся частоты (например, 248 и 252 Гц), наложить и подать в звуковой преобразователь (динамик), — в результате мы услышим периодическое нарастание и снижение (пульсацию) громкости звука на разностной частоте, в данном случае 4 Гц. Эти сигналы можно также одновременно подать на 2 близко расположенных динамика и услышать идентичные биения. В данном случае место сложения сигналов не влияет на конечный результат, поскольку до уха он доходит в одном и том же виде — колебаний промежуточной среды-носителя — воздуха. Имеется еще один вариант наложения этих сигналов — непосредственно в головном мозге слушателя. Для этого надо подать те же сигналы 248 и 252 Гц раздельно — один в правое, а другой в левое ухо (например, с использованием стереонаушников). В этом случае также ощущаются биения и с той же частотой 4 Гц, но иметь они будут уже иную природу, связанную с физиологическими механизмами пространственной локализации источника звука. Такие биения называются бинауральными (ББ). В отличие от монауральных биений (МБ) они не имеют промежуточного физического носителя в виде воздуха или иной среды. Впервые ББ были открыты немецким исследователем Н. Dove [1] и в дальнейшем описаны S. Thompson [2].

Следует отметить, что словосочетания «ББ в звуке» или «звук с ББ» не совсем корректны, поскольку, во-первых, речь идет не об 1, а о 2 звуках, во-вторых, нельзя сказать, что данное явление объективно: человек ощущает ББ не слуховой сенсорной системой, а ЦНС. Кроме того, степень восприимчивости к ББ зависит от уровня внимания к ним слушателя [3], а некоторые люди, например страдающие болезнью Паркинсона, вообще не способны их ощутить [4]. В этом состоит интерес к данному явлению, размыывающему границу между «объективным» и «субъективным».

Самая очевидная разница между ББ и МБ состоит в том, что ББ слышимы только в случае низких производящих, или «несущих», частот. Лучше всего они воспринимаются в случае несущей частоты в районе 440 Гц; с ее повышением различимость биений падает. Оптимальным для восприятия считается диапазон от 200 до 900 Гц. По данным последних исследований, отчетливо различаются человеком ББ с несущей частотой вплоть до 1400 Гц, при этом уровень различимости спадает линейно с ростом несущей от 700 до 1400 Гц [5]. Что касается частоты самих ББ, то они ощу-

щаются в диапазоне от 2 до 35 Гц [6]. При меньшей разнице частот между каналами ощущается просто изменение пространственной локализации звука (стереопанорамы), при большей — каждое ухо слышит свой отдельный тон.

Еще одним отличительным качеством ББ является их низкая амплитуда. Например, обычные акустические биения, полученные наложением двух звуков одинаковой громкости, будут иметь громкость от нуля до 4-кратной громкости каждого из звуков. ББ же ощущаются только как слабая модуляция по громкости одиночного звука. Оценка глубины этой модуляции дает результат около 3 дБ, или примерно десятую долю от громкости шепота [4].

Привлекательность данного эффекта для улучшения сна заключается в том, что человек способен ощутить его воздействие при очень малой громкости, граничащей с порогом восприятия [4], т.е. такой стимул создает мало помех процессу расслабления. Несмотря на то что в настоящее время имеется ряд исследований, показывающих улучшение характеристик человеческого сна под влиянием звуковых стимулов на основе ББ, воздействие ББ на сон изучено недостаточно. Особенно это касается объективных исследований, выполненных на основе анализа электрофизиологических параметров, например электроэнцефалограммы (ЭЭГ) или электрокардиограммы (ЭКГ). На данный момент можно найти небольшое количество работ, удовлетворяющее этим требованиям [7–10].

С другой стороны, имеются исследования, демонстрирующие эффективность музыки для терапии инсомнии. Этот метод набирает популярность в последние годы благодаря отсутствию побочных эффектов [11–13]. Согласно опросам [14], примерно 25% людей используют музыку в качестве средства, облегчающего засыпание. Влиянию музыки на процесс сна посвящены научные обзоры [13, 15–18]. Поэтому логично предположить, что сочетание музыки и правильно подобранных ББ также должно улучшать сон, что и было показано в работе [10]. В этой работе для анализа эффективности звукового стимула использован параметр консолидации сна, определяемый вероятностью нахождения испытуемого в состоянии медленного сна. Но в качестве такого параметра можно использовать и вариабельность сердечного ритма (ВСР). Более того, в ряде случаев, когда полноценный мониторинг сна невозможен, именно анализ ВСР позволяет сделать простую оценку функционального состояния человека.

Высокочастотная компонента ВСР (HF-компонента) соответствует активности парасимпатического отдела вегетативной нервной системы (ПОВНС), в то время как роль низкочастотной (LF) компоненты до сих пор не выяснена [19–21]. Возможно, она отражает как симпатическую, так

и парасимпатическую активность. Относительный вклад этих ветвей описывается отношением соответствующих спектральных мощностей ВСП (так называемый индекс вегетативного баланса, $ИВБ = P_{LF}/P_{HF}$), а также нормализованными значениями спектральной мощности:

$$HF_{н.у.} = P_{HF}/(P_{LF} + P_{HF}) \text{ и } LF_{н.у.} = P_{LF}/(P_{LF} + P_{HF}) \text{ [22].}$$

Таким образом, LF- и HF-компоненты спектра ВСП можно использовать как количественную меру симпатической и парасимпатической реакции на тот или иной стимул. Во всяком случае, этот подход уместен для анализа активности ПОВНС, поскольку HF-компонента ВСП определяется исключительно ею [23].

Интересно, что в то время, как активность ВНС во время ночного сна более-менее изучена [24], ее профиль в дневном сне до сих пор исследован недостаточно. В том числе мало изучена кратковременная устойчивость спектральных компонент ВСП в течение дневного сна, что ограничивает надежность данных единичных исследований. Тем не менее было показано, что в процессе медленного сна (как дневного, так и ночного) в ВНС человека преобладает парасимпатическая активация. Количественно это выражается в росте мощности HF-компоненты спектра ВСП [25, 26]. То же самое наблюдается в процессе отдыха после физической нагрузки [27, 28].

Цель данного исследования — проверка гипотезы, что музыка на основе ББ с частотами тета- и дельта-диапазона ЭЭГ способна усиливать активацию ПОВНС по мере углубления дневного сна. Тем более, что подобное качество было обнаружено у монотонных звуковых стимулов на основе ББ тета-диапазона ЭЭГ при восстановлении после дозированной физической нагрузки [29].

Материал и методы

А. Испытуемые

Экспериментальная группа состояла из 22 студентов медицинского университета (12 мужчин; возраст от 18 до 22 лет, средний — $19,8 \pm 0,8$ года). С каждым участником было подписано информированное согласие на участие в эксперименте. Испытуемый должен был участвовать в 2 опытах, в одном из которых он засыпал под музыку, а в другом — без нее (контроль). Порядок опытов был контрбалансирован по выборке; при этом в результате случайного выбора у 13 человек из 22 первым по порядку шел «контроль». Эксперимент с каждым участником проводили в дневное время, с 13 до 16 ч, с промежутком между двумя опытами от 1 до 15 дней. Из 22 испытуемых для сравнительного анализа ВСП были использованы данные 20. Данные оставшихся 2 испытуемых оказались непригодны для анализа вследствие большого количества артефактов на записи ЭКГ.

Б. Оборудование и процедура эксперимента

Звуковой стимул представлял собой электронную музыкальную композицию длительностью 20 мин 16 с, с наложенными ББ 4 и 2 Гц. Из этого времени звучания первые 19 мин были «запрограммированы» для засыпания, а оставшееся время — для постепенного пробуждения. Стимул предъявляли через полноразмерные стереонаушники Bose QC-25 (чувствительность 97 дБ, сопротивление 32 Ом, с отключенной системой активного шумоподавления). Громкость подбирали индивидуально, с тем, чтобы

музыка хорошо прослушивалась, но в то же время не мешала засыпанию, она составляла от 55 до 57 дБ уровня звукового давления.

Испытуемый находился в звукоизолированном светозащищенном помещении, при стабильной температуре 24 °С. В течение опыта вели запись полисомнограммы (ПСГ) с частотой дискретизации 500 Гц, которая состояла из 16 каналов ЭЭГ, подключенных по монополярной схеме 10-20, а также одного канала ЭКГ и одного канала электрокулограммы (ЭОГ), при помощи беспроводного аппаратно-программного комплекса Нейрополиграф 24 (ПО «Нейротех», Таганрог).

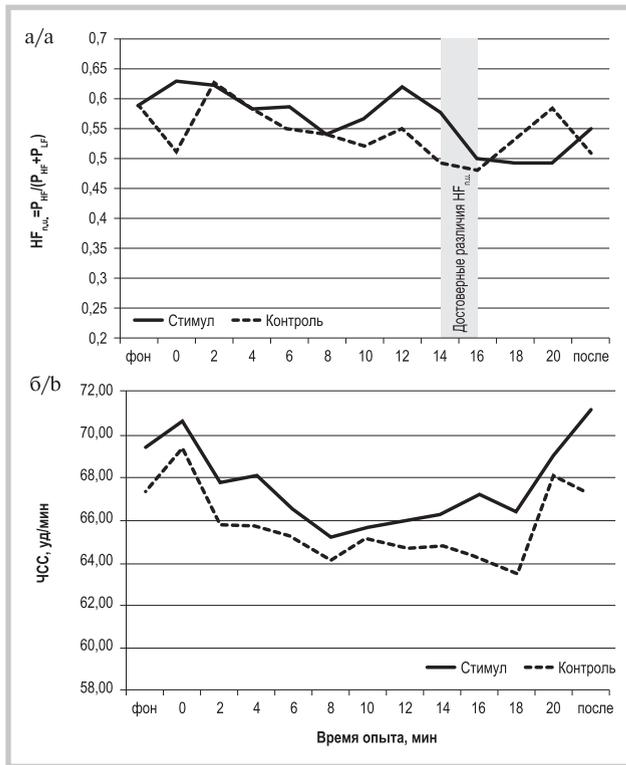
После наложения электродов испытуемый располагался на кушетке и первые 15 мин находился в горизонтальном положении для стабилизации сердечного ритма. При этом следили, чтобы он не засыпал. Затем давали команду закрыть глаза, и 3 мин вели фоновую регистрацию ПСГ. Далее включали музыку, а спустя 21 мин, по окончании музыки, испытуемого будили (если он заснул) и записывали еще 3 мин фоновой ПСГ с закрытыми глазами. В контрольных опытах схема была такой же, за исключением того, что стимул не предъявляли, а просто ставили стартовую метку на записи.

В. Обработка данных

Для анализа ВСП из общей ПСГ выделяли в отдельный файл сигнал ЭКГ, который затем загружали в пакет обработки Kubios HRV 2.1 [30], где из него в свою очередь выделяли и анализировали последовательность R-R интервалов (далее — «сигнал»). Средствами вышеупомянутого пакета сигнал предварительно подвергали детрендингу с использованием параметра сглаживания $\lambda=500$ (с оценочной частотой среза фильтра $f_c=0,035$ Гц). Данная процедура устраняет медленный тренд, в том числе нелинейный, который иначе приводит к искажению сигнала. Затем ЭКГ визуально исследовали на предмет артефактов, и с их учетом выполняли сначала ручную коррекцию выделенного сигнала, а затем интерполяционную средствами встроенного в Kubios HRV алгоритма уровня «medium» [30]. Границы частотных диапазонов ВСП задавали следующим образом: HF — 0,15—0,6 Гц; LF — 0,04—0,15 Гц. Сами частотные диапазоны вычисляли с использованием быстрого преобразования Фурье (FFT), основанного на методе периодограммы Уэлша [30] с шириной окна 256 с и перекрытием 50%. В качестве частоты интерполяции использовали стандартное значение 4 Гц.

После детрендинга и коррекции артефактов сигнал разделили на тринадцать 2-минутных интервалов, обеспечивающих адекватную длительность для анализа частотных диапазонов ВСП согласно [23]: 1 — фон, 2 — эпоха 1, 3 — эпоха 2, ... 12 — эпоха 11, 13 — последствие. Для анализа парасимпатической активности средствами пакета Kubios HRV 2.1 на выделенных 13 интервалах вычисляли нормализованную спектральную плотность мощности ВСП в диапазоне высоких частот $HF_{н.у.}$. Анализ ИВБ в данной работе не приводится ввиду его взаимно однозначной связи с $HF_{н.у.}$ и, следовательно, избыточности: $ИВБ = 1/(1+HF_{н.у.})$.

Статистическая обработка данных. Ввиду значительного отклонения распределения данных от нормального для описания данных использовались медианные значения, а не средние. Сравнение было произведено с помощью двух парных непараметрических критериев: критерия знаков и критерия Уилкоксона. Уровень значимости был принят $p < 0,05$.



Изменения медианных по выборке значений показателей в ходе опыта.

а — изменения медианных по выборке испытуемых значений высокочастотной компоненты спектра ВСП (HF_{n.u.}, ось ординат) в ходе опыта. Полосой выделена 2-минутная эпоха, на которой наблюдались достоверные различия HF_{n.u.} в условиях стимуляции и контроля (критерий Уилкоксона $p=0,021$; критерий знаков $p=0,0037$); б — изменения медианных по выборке значений ЧСС (ось ординат) в ходе опыта. Статистически значимых отличий ЧСС испытуемых в условиях стимуляции и контроля не наблюдалось.

Median values rather than medium ones are depicted on the Figure for the statistical distribution of values cannot be considered normal.

a — how does the median sample value of high-frequency HRV spectrum component (HF_{n.u.}, ordinate axis) change through the trial. 2-minute epoch of significant difference observed in HF_{n.u.} between stimulus condition and control condition is marked by the stripe (Wilcoxon Matched Pairs Test $p=0.021$; Sign Test $p=0.0037$); b — how does the median sample value of HR (ordinate axis) change through the trial. There is no statistically significant difference in HR values observed for stimulus condition and control condition.

Результаты

Ниже приводятся результаты проверки сформулированного в обзорной части статьи предположения, что музыка на основе ББ с частотами тета- и дельта-диапазонов ЭЭГ способна усиливать активацию ПОВНС по мере углубления дневного сна. Также была проверена гипотеза о влиянии указанной музыки на частоту сердечного ритма испытуемых (ЧСС).

Для каждой из 13 2-минутных эпох (включая фон и последствие) нулевая гипотеза состояла в отсутствии на этой эпохе значимых различий между контрольной и опытной выборками значений HF_{n.u.}. Аналогичным образом нулевые гипотезы были сформулированы для ЧСС.

Различия HF_{n.u.} оказались достоверны на 9-й эпохе, т.е. с 14-й по 16-ю минуту: $p<0,05$ по критерию связанных пар Уилкоксона, $p<0,01$ по критерию знаков. На остальных эпохах, включая фон и последствие, различия не были достоверными (см. рисунок, а). Также на указанных 13 эпохах произведено сравнение ЧСС. Достоверных различий

между условиями стимула и контроля здесь не обнаружено ни на одной из эпох (см. рисунок, б).

Обсуждение

Таким образом, нулевая гипотеза относительно HF_{n.u.} была опровергнута на 1 эпохе сравнения из 13, что свидетельствует о значимых различиях активации ПОВНС на этой эпохе, обусловленных предъявлением музыкального стимула на основе ББ. Следует отметить, что однозначного тренда повышения активности ПОВНС, отражаемой параметром HF_{n.u.}, в течение времени опыта не наблюдалось в условиях как стимула, так и контроле (см. рисунок, а). Хотя такой тренд ожидаем в силу доказанного роста активности ПОВНС при углублении сна [25]. Очевидно, его отсутствие связано с наличием кратковременных пробуждений испытуемых, которых в контроле было значительно больше, чем в условиях стимуляции, что и обусловило значительно более высокую консолидацию сна в последнем случае [10]. Что же касается активности ПОВНС, то ее значения (HF_{n.u.}) в течение большей части опыта были выше в условиях стимуляции, чем в контроле; при этом достоверные различия HF_{n.u.} наблюдались ближе к концу опыта, с 14-й по 16-ю минуту (см. рисунок, а). Отсутствие значимых различий HF_{n.u.} на первой 2-минутной эпохе сравнения закономерно, поскольку свидетельствует об отсутствии различий параметров сердечного ритма испытуемых перед началом опыта.

Спорным остается вопрос об изменении ЧСС под влиянием эффекта ББ (см. рисунок, б). В данном исследовании значимых отличий между опытной и контрольной сериями выявлено не было. Не зафиксировано их и в работах [29, 31]. С другой стороны, значимые изменения ЧСС под влиянием музыки с эффектом тета-ББ наблюдались в работе [32].

Причина наблюдаемых противоречий может заключаться в разных экспериментальных протоколах, в том числе разной длительности стимулов, разным наборе использованных биений и их несущих частот, разным уровне внимания испытуемых по отношению к стимулу [3], а также сильных отличиях индивидуальной реакции на этот стимул [33]. Кроме того, в ряде случаев доверие к результатам снижается из-за недостаточного контроля условий эксперимента, недостаточно полного описания экспериментального протокола, а также отсутствия данных о параметрах ЭЭГ и других автономных функций (ЭКГ, дыхания, оксиметрии и т.п.).

Заключение

Таким образом, данное исследование показывает, что анализ ВСП можно применять при оценке консолидации дневного сна у человека; использованный метод является критерием активности вегетативной нервной системы. Результаты данной работы согласуются с результатами [10] о положительном влиянии музыки с эффектом ББ на консолидацию дневного сна, а также с выводами [29] о положительном влиянии ББ тета-диапазона на активацию ПОВНС в процессе расслабления после физической нагрузки.

Работа выполнена в рамках проекта №19-013-00747а Российского фонда фундаментальных исследований.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflicts of interest.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Dove HW. Über die Kombination der Eindrücke beider Ohren und beider Augen zu einem Eindruck. *Monatsberichte der Berliner preussische Akademie der Wissenschaften*. 1841;41:251-252.
2. Thompson SP. XXXVI. On binaural audition. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1877;4(25):274-276. <https://doi.org/10.1080/14786447708639338>
3. Schwarz DWF, Taylor P. Human auditory steady state responses to binaural and monaural beats. *Clin Neurophysiol*. 2005;116(3):658-668. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2004.09.014>
4. Oster G. Auditory beats in the brain. *Sci Am*. 1973;229(4):94-103. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican1073-94>
5. Pasqual AM, Yehia HC, Vieira MN. A Psychoacoustical Evaluation of the Frequency Influence on the Human Binaural-Beat Perception. *Acta Acustica United With Acustica*. 2017;103(5):892-895. <https://doi.org/10.3813/AAA.919117>
6. Licklider JCR, Webster JC, Hedlun JM. On the frequency limits of binaural beats. *J Acoust Soc Am*. 1950;22(4):468-473. <https://doi.org/10.1121/1.1906629>
7. Shumov DE, Arsen'ev GN, Sveshnikov DS, Dorokhov VB. Comparative analysis of the effect of the stimulation with binaural beat and similar kinds of sound on falling asleep process: a brief note. *Moscow Univ Biol Sci Bull*. 2017;72(1):33-36. <https://doi.org/10.3103/s0096392517010047>
8. Jirakitayakorn N, Wongsawat Y. A novel insight of effects of a 3-Hz binaural beat on sleep stages during sleep. *Front Human Neurosci*. 2018;12:387. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00387>
9. Shumov DE, Yakovenko IA, Dorokhov VB, et al. Napping between Scylla and Charybdis of N1 and N3: latency to N2 in a brief afternoon nap can be reduced by binaural beating. *Biological Rhythm Res*. 2019;52(2):227-236. <https://doi.org/10.1080/09291016.2019.1587839>
10. Шумов Д.Е., Яковенко И.А., Алипов Н.Н., и др. Влияние музыки, содержащей бинауральные биения, на динамику дневного засыпания. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2020;120(2):39-44. Shumov DE, Yakovenko IA, Alipov NN, et al. The effect of music containing binaural beats on daytime fall-asleep dynamics. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry = Zhurnal nevrologii i psikiatrii imeni S.S. Korsakova*. 2020;120(2):39-44. (In Russ.). <https://doi.org/10.17116/jnevro202012002139>
11. Trahan T, Durrant SJ, Müllensiefen D, Williamson VJ. The music that helps people sleep and the reasons they believe it works: A mixed methods analysis of online survey reports. *PLoS One*. 2018;13(11):e0206531. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206531>
12. Picard LM, Bartel LR, Gordon AS, et al. Music as a sleep aid in fibromyalgia. *Pain Res Manag*. 2014;19:272108. <https://doi.org/10.1155/2014/272108>
13. Jespersen KV, Koenig J, Jennum P, Vuust P. Music for insomnia in adults. *Cochrane Database Syst Rev*. 2015;8:CD010459. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD010459.pub2>
14. Morin CM, LeBlanc M, Daley M, et al. Epidemiology of insomnia: prevalence, self-help treatments, consultations, and determinants of help-seeking behaviors. *Sleep Med*. 2006;7(2):123-130. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2005.08.008>
15. De Niet G, Tiemens B, Lendemeijer B, Hutschemaekers G. Music-assisted relaxation to improve sleep quality: meta-analysis. *J Adv Nurs*. 2009;65(7):1356-1364. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2009.04982.x>
16. Feng F, Zhang Y, Hou J, et al. Can music improve sleep quality in adults with primary insomnia? A systematic review and network meta-analysis. *Int J Nurs Stud*. 2018;77:189-196. <https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2017.10.011>
17. Wang C-F, Sun Y-L, Zang H-X. Music therapy improves sleep quality in acute and chronic sleep disorders: a meta-analysis of 10 randomized studies. *Int J Nurs Stud*. 2014;51(1):51-62. <https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2013.03.008>
18. Dickson GT, Schubert E. How does music aid sleep? Literature review. *Sleep Med*. 2019;63:142-150. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2019.05.016>
19. Berntson GG, Bigger TJJr, Eckberg DL, et al. Heart rate variability: origins, methods, and interpretive caveats. *Psychophysiology*. 1997;34(6):623-648. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1997.tb02140.x>
20. Billman GE. The LF/HF ratio does not accurately measure cardiac sympatho-vagal balance. *Front Physiol*. 2013;4:26. <https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00026>
21. Montano N, Porta A, Cogliati C, et al. Heart rate variability explored in the frequency domain: a tool to investigate the link between heart and behavior. *Neurosci Biobehav Rev*. 2009;33(2):71-80. <https://dx.doi.org/10.1016/j.neubiorev.2008.07.006>
22. Parekh A, Lee CM. Heart rate variability after isocaloric exercise bouts of different intensities. *Med Sci Sports Exerc*. 2005;37(4):599-605. <https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000159139.29220.9A>
23. Malik M, Camm JA, Bigger TJ, et al. Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. *Circulation*. 1996;93(5):1043-1065. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.93.5.1043>
24. Tobaldini E, Nobili L, Strada S, et al. Heart rate variability in normal and pathological sleep. *Front Physiol*. 2013;4:294. <https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00294>
25. Cellini N, Whitehurst LN, McDevitt EA, Mednick SC. Heart rate variability during daytime naps in healthy adults: Autonomic profile and short-term reliability. *Psychophysiol*. 2016;53(4):473-481. <https://doi.org/10.1111/psyp.12595>
26. de Zambotti M, Cellini N, Baker FC, et al. Nocturnal cardiac autonomic profile in young primary insomniacs and good sleepers. *Int J Psychophysiol*. 2014;93(3):332-339. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2014.06.014>
27. Terziotti P, Schena F, Gulli G, Cevese A. Post-exercise recovery of autonomic cardiovascular control: a study by spectrum and cross-spectrum analysis in humans. *Eur J Appl Physiol*. 2001;84(3):187-194. <https://doi.org/10.1007/s004210170003>
28. Gladwell VF, Sandercock GRH, Birch SL. Cardiac vagal activity following three intensities of exercise in humans. *Clin Physiol Funct Imaging*. 2010;30(1):17-22. <https://doi.org/10.1111/j.1475-097X.2009.00899.x>
29. McConnell PA, Froeliger B, Garland EL, et al. Auditory driving of the autonomic nervous system: Listening to theta-frequency binaural beats post-exercise increases parasympathetic activation and sympathetic withdrawal. *Front Psychol*. 2014;5:1248. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01248>
30. Tarvainen MP, Niskanen JP; Biosignal Analysis and Medical Imaging Group (BSAMIG), University of Kuopio. *Kubios HRV analysis: User's guide*. Finland; 2008.
31. Carter C. Healthcare performance and the effects of the binaural beats on human blood pressure and heart rate. *J Hosp Mark Public Relations*. 2008;18(2):213-219. <https://doi.org/10.1080/15390940802234263>
32. Hill EM, Frederick CM. Physiological Effects of Binaural Beats and Meditative Musical Stimulation. *Undergraduate Research Journal for the Human Sciences*. 2016;15(1). Accessed Mar 30, 2021. <https://www.kon.org/urc/v15/hill.html>
33. Reedijk SA, Bolders A, Colzato LS, Hommel B. Eliminating the attentional blink through binaural beats: a case for tailored cognitive enhancement. *Front Psychiatry*. 2015;6:82. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00082>

Поступила 28.01.2021

Received 28.01.2021

Принята к печати 05.02.2021

Accepted 05.02.2021