

УДК 612.821.7 + 613.79

ПРОЦЕСС ЗАСЫПАНИЯ У ЛЮДЕЙ ПРИ ПРОСЛУШИВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ МОНОТОННОГО ЗВУКА: ПИЛОТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

© 2018 г. ¹Д. Е. Шумов, ²Д. С. Свешников, ²В. И. Торшин, ¹В. Б. Дорохов¹ФБГУ «Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН», г. Москва;²Медицинский институт ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», г. Москва

При разработке неинвазивных средств улучшения сна человека необходимо уделять внимание методам уменьшения и стабилизации времени засыпания, иначе попытки воздействовать на дальнейший сон теряют смысл. *Целью* данного исследования было сравнение эффективности, в качестве такого метода, прослушивания через стереонаушники трёх видов монотонного звука, а именно: звука, порождающего так называемые «бинауральные» биения (ББ), звука, содержащего обычные («монауральные») биения (МБ), и звука, состоящего из чистых тонов без биений (имитации, ИМ). *Методы.* Производился анализ полисомнографических данных (ЭЭГ и движений глаз), полученных в процессе засыпания 14 испытуемых при прослушивании этих трёх видов звука, и сравнивалось соответствующее каждому виду время засыпания. *Результаты.* При ББ-стимуляции время засыпания по сравнению с ИМ было меньше у 10 испытуемых из 14; при МБ-стимуляции – у 5 испытуемых из 14. Время засыпания в серии с ББ-стимуляцией статистически значимо ($p < 0,05$) меньше, чем в ИМ-серии. Значимых отличий времени засыпания в серии с МБ-стимуляцией по сравнению с ИМ нет. *Вывод.* Стимуляция бинауральными биениями даёт наименьшее время засыпания как по сравнению со звуком, содержащим обычные акустические (монауральные) биения, так и по сравнению с монотонным звуком без биений.

Ключевые слова: бинауральные биения, засыпание, инсомния, ЭЭГ

FALLING ASLEEP PROCESS IN HUMAN LISTENING TO DIFFERENT TYPES OF MONOTONOUS SOUND: A PILOT STUDY

¹D. E. Shumov, ²D. S. Sveshnikov, ²V. I. Torshin, ¹V. B. Dorokhov¹Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of the Russian Academy of Sciences, Moscow;²Medical Institute of Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

Development of non-invasive sleep-aid tools requires paying attention to techniques reducing and stabilizing fall-asleep time. Otherwise, all attempts to affect posterior sleep make no sense. *The aim* of current study was to compare effectiveness of listening through stereo earphones to three types of monotonous sound as one of those techniques. Namely, the sound engendering so-called "binaural beats" (BB), the sound containing ordinary ("monaural") beats (MB) and the sound containing pure tones without beats (imitation, IM) were applied. *Methods.* Data collected by polysomnographic record (EEG and eye movements) of falling asleep process of 14 subjects during listening to those three sound types then were analyzed to compare the fall-asleep time corresponding to each type. *Results.* The fall-asleep time during BB-stimulation was less than during IM in 10 subjects from 14; during MB-stimulation – in 5 subjects from 14. The fall-asleep time in BB-stimulation series was significantly ($p < 0.05$) less than in IM-series. MB-stimulation series contained no significant differences in fall-asleep time from IM-series. *Conclusion.* Binaural beat stimulation gives rise to the least fall-asleep time beside the sound containing ordinary (monaural) beats as well as monotonous beatless sound.

Key words: binaural beats, falling asleep, insomnia, EEG

Библиографическая ссылка:

Шумов Д. Е., Свешников Д. С., Торшин В. И., Дорохов В. Б. Процесс засыпания у людей при прослушивании различных видов монотонного звука: пилотное исследование // Экология человека. 2018. № 5. С. 47–51.

Shumov D. E., Sveshnikov D. S., Torshin V. I., Dorokhov V. B. Falling Asleep Process in Human Listening to Different Types of Monotonous Sound: a Pilot Study. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2018, 5, pp. 47–51.

Различные виды биений и их воздействие на человека. 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 электрические сигналы немного отличающейся частоты (например, 440 и 434 Гц) с выходов двух генераторов смешать и подать в источник звука (динамик), — мы услышим периодическое нарастание и спад громкости звука на разностной частоте, в данном случае 6 Гц. Эти же сигналы можно одновременно подать в два различных

динамика и услышать такие же биения. Здесь место смешивания сигналов — на этапе электрических колебаний или акустических — не влияет на конечный результат.

Совсем другое явление наблюдается в случае подачи тех же сигналов отдельно в каждое ухо (с использованием стереонаушников). В этом случае, если одно ухо будет слышать тон с частотой 440 Гц, а другое — тон с частотой 434 Гц, тоже можно ощутить биения с той же частотой 6 Гц, имеющие, однако, иную, внутреннюю природу, связанную с тонкостями слухового восприятия человека. Такие биения называются бинауральными. Человек ощущает их не

ушами, а «внутри головы». Бинауральные биения хорошо воспринимаются в диапазоне от 2 до 30 Гц. При меньшей разнице частот между каналами ощущается просто изменение пространственной локализации звука (стереопанорамы), при большей — каждое ухо слышит свой отдельный тон. Что касается несущей частоты (тона, на фоне которого ощущаются биения), то оптимальным для восприятия считается диапазон от 200 до 900 Гц. Наиболее подробно физиология и эффекты бинауральных биений рассмотрены в обзорной статье [8].

Сравнительно редко встречающиеся в природе, биения, однако, свойственны многим технологическим процессам, оказывая таким образом непосредственное влияние на экологическую ситуацию и здоровье человека, в том числе на регуляцию сна и бодрствования. Например, две турбины самолёта, вращающиеся со слегка отличными скоростями, могут вызвать медленные биения, распознаваемые по неприятному ощущению «под ложечкой». Жителям многоквартирных домов могут мешать биения, например, от двух вентиляторов, работающих одновременно, при этом локализовать источник неудобства очень сложно. Но биения приносят пользу, например, в случае точного определения частоты колебаний в электронике или акустике.

Предпринимаются также попытки использования этого эффекта для улучшения сна человека. Эффект звуковых биений применяется в различных устройствах светозвуковой стимуляции [11], некоторых программных продуктах, устройствах биологической обратной связи и аудиозаписях психотерапевтической направленности. Несмотря на отдельные обнадеживающие публикации [1, 2, 9], использование звуковых биений для помощи при инсомнии (бессоннице) до сих пор мало изучено в научном плане. Главная трудность здесь — это приборная регистрация физиологических изменений. Вызываемый биениями, особенно бинауральными, физиологический отклик весьма слаб [12], поэтому существуют закономерные разногласия по поводу эффективности этой технологии. Да и сами результаты исследований порой противоречивы.

Процесс засыпания человека. Общепринятым подходом к лечению инсомнии является сокращение времени засыпания и увеличение времени глубокого сна. При этом первостепенное внимание уделяется именно стадии глубокого (медленноволнового) сна, в связи с его доказанной важностью для восстановления организма. Но воздействие на стадию засыпания является не менее важной задачей, поскольку при наличии проблем с засыпанием попытки скорректировать дальнейший процесс теряют смысл.

Процесс засыпания по своей природе многообразен и неустойчив. По современным представлениям, это связано с необходимостью согласования работы разных регуляторных систем мозга. Важным моментом является также циклический характер перехода от бодрствования ко сну, проявляющийся на протяжении всей 1-й стадии сна и заканчивающийся только на

2-й стадии. Гипотеза [4] объясняет эту цикличность наличием двух отдельных подсистем, регулирующих процессы сна/бодрствования, одна из которых связана с ретикулярной активирующей системой и пробуждает мозг, а вторая, наоборот, тормозит активацию. Для исследования механизмов засыпания существуют общепринятые физиологические показатели сонного торможения: электрическая активность мозга (ЭЭГ, вызванные потенциалы) и электроокулограмма (для анализа движения глаз).

При развитии сонного торможения обычно происходит снижение энергии всего спектра ЭЭГ. Ряд авторов выделяют в этом процессе ещё дремоту, как отдельное состояние, отличное от бодрствования и сна, и определяют в ней до 7 последовательных стадий. По электрофизиологическим показателям это состояние почти полностью соответствует первой стадии сна. Некоторые авторы на основе показателей ЭЭГ делят первую стадию сна ещё на две подстадии (1-альфа и 1-тета), отличающиеся выраженностью на ЭЭГ альфа- и тета-ритмов.

Дальнейшее углубление сна с переходом на 2-ю стадию сопровождается усилением одновременно альфа/бета активности, что соответствует появлению так называемых «сонных веретен» с частотами в диапазоне 12–15 Гц. Поэтому латентность появления «сонных веретен» можно использовать в качестве показателя времени засыпания.

Методы

На основе анализа предыдущих исследований была поставлена задача сравнить влияние следующих видов стимуляции на процесс засыпания: а) монотонный звук (имитация); б) бинауральные биения; в) моноуральные биения.

В исследовании приняли участие 14 здоровых испытуемых (12 мужчин и 2 женщины) в возрасте от 20 до 32 лет, не страдающие расстройствами сна и нарушениями слуха. С каждым из них было проведено по три опыта во второй половине дня (с 15 до 18 часов). В ходе опыта испытуемый лежал на комфортной кровати в экспериментальной камере с подключенным оборудованием для дистантной регистрации ЭЭГ и движений глаз. Для записи полисомнограммы использовался миниатюрный 8-канальный беспроводной усилитель биопотенциалов (конструкции А. Г. Трощенко). ЭЭГ регистрировалась монополярно с помощью позолоченных чашечковых электродов, фиксируемых клеем фирмы Natus (США), в отведениях Т3, Т4, Сз и Оз (согласно международной системе 10–20); электроокулограмма — в двух отведениях с частотой дискретизации 200 Гц. Ещё на двух каналах с частотой дискретизации 1 000 Гц велась параллельная регистрация звука, подававшегося испытуемому в каждое ухо через вакуумные стереонаушники Sennheiser CX-200. Громкость звука подбиралась индивидуально, для обеспечения комфортного прослушивания с возможностью уснуть, и находилась в диапазоне 50–53 дБ звукового давления, при пороге

слышимости около 40 дБ. Длительность эксперимента составляла 32 минуты: 1) первая минута — фон; 2) затем 15,5 минуты — воспроизводилась одна из трёх фонограмм (выбранная случайным образом); 3) последующие 15,5 минуты — фон, последствие.

Каждая из трёх фонограмм представляла собой 10-секундный зацикленный фрагмент монотонного звука с наложенным «розовым шумом» (частота среза 100 Гц, крутизна — 9 Дб на октаву), воспринимаемого как 4-звучный аккорд.

В фонограмме 1 применялись бинауральные биения (ББ), для чего использовалась небольшая расстройка тонов аккорда по каналам: левое ухо (L) — 1) 47,89 Гц; 2) 95,74 Гц; 3) 191,48 Гц; 4) 239,87 Гц; правое ухо (R) — 1) 48,39 Гц; 2) 97,74 Гц; 3) 195,48 Гц; 4) 243,87 Гц, что давало в итоге спектр из четырех ББ: 0,5 Гц; 2 Гц; 4 Гц; 4 Гц (рис. 1А).

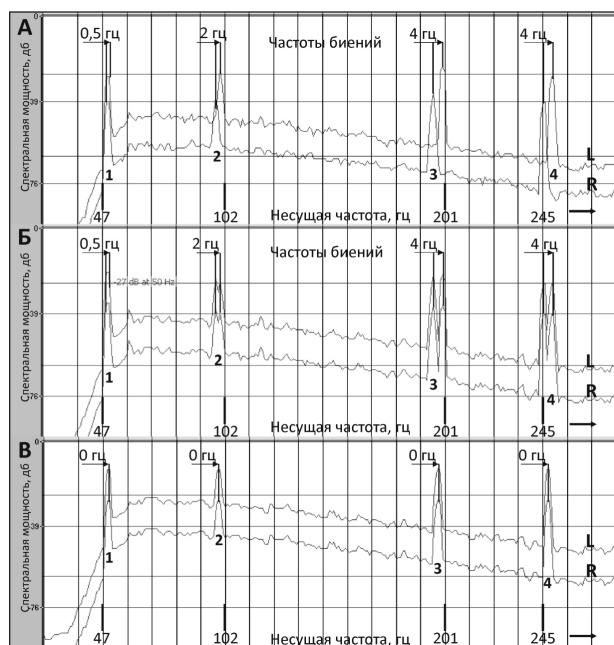


Рис. 1. А, Б, В — спектрограммы для звука с бинауральными биениями, моноуральными биениями, имитации. Ордината — спектральная мощность звука в децибеллах (дБ), абсцисса — частота (Гц). L — для левого уха, R — для правого уха. 1, 2, 3, 4 — номера тонов в аккорде, с указанием расстройки в спектральных пиках — (0,5; 2, 4, 4) Гц, для А, Б и 0 Гц для В (см. текст).

Такая комбинация частот, как несущих, так и биений, была выбрана потому, что она близка к применяемой в аудиозаписях компании Mongro Products, на которые опираются в своих исследованиях некоторые авторы [3, 7, 9] как на средство улучшения сна и когнитивных функций.

В фонограмме 2 использовались моноуральные биения (МБ), полученные объединением звуков из этих 2 стереоканалов в один моноканал, включая розовый шум. Частоты биений были те же, что и в фонограмме 1, т. е. 0,5 Гц; 2 Гц; 4 Гц; 4 Гц (рис. 1Б).

Левое ухо (L) — 1) 47,89 + 48,39 Гц; 2) 95,74 + 97,74 Гц; 3) 191,48 + 195,48 Гц; 4) 239,87 + 243,87 Гц.

Правое ухо (R) — 1) 47,89 + 48,39 Гц; 2) 95,74 + 97,74 Гц; 3) 191,48 + 195,48 Гц; 4) 239,87 + 243,87 Гц.

В фонограмме 3 в оба уха (и правое R, и левое L) подавался монофонический звук, не содержащий биений, который состоял из розового шума, идентичного шуму фонограммы 2, и чистых тонов с вышеупомянутыми частотами: 1) 48,39 Гц; 2) 96,77 Гц; 3) 193,55 Гц; 4) 241,93 Гц (рис. 1В). Опыты с данным видом звука служили контрольной серией, или имитацией (ИМ).

На слух фонограммы всех трех видов были очень похожи, особенно при воспроизведении на небольшой громкости, использовавшейся в опытах, хотя тренированный человек вполне мог их различить. Поэтому некоторые из испытуемых сообщали об отличиях звука в разных опытах, а некоторые — нет.

Результаты

Все 42 записи, полученные на 14 испытуемых, были стадированы визуально согласно критериям Американской Академии Медицины Сна [6] с эпохой анализа 20 с. При визуальном анализе стадий сна устанавливались программные полосовые фильтры: для ЭЭГ 0,5–30 Гц, для ЭОГ — 0,2–3 Гц. Для определения момента засыпания в качестве критерия была выбрана первая 20-секундная эпоха, с наличием одного или более сонного веретена (рис. 2), что является основным критерием наступления 2-й стадии сна [6]. Этот показатель далее использовался для сравнения скорости засыпания при предъявлении трех разных фонограмм.

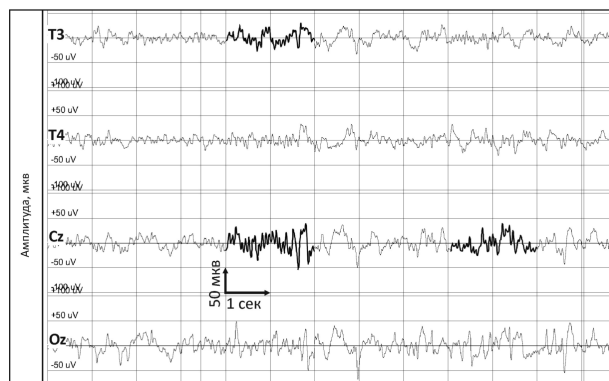


Рис. 2. Пример первой 20-секундной эпохи 2-й стадии сна с сонными веретенами в отведениях T3 и Cz (выделены жирной линией)

Полученные данные для каждого испытуемого отображены в таблице. В случаях, когда 2-я стадия не наступала за время опыта, её латентность (время засыпания) приравнивалась ко времени регистрации, то есть 1 860 с. Видно, что при стимуляции ББ время засыпания по сравнению с ИМ было меньше у 10 испытуемых из 14; при стимуляции МБ — у 5 испытуемых из 14. Сонных веретён не наблюдалось (2-я стадия сна не наступила) — в опытах с ББ — у одного испытуемого, в опытах с МБ — у четырёх, в опытах с ИМ — у трёх (см. таблицу).

Сравнение времени засыпания, определяемого по латентности первого сонного веретена, при трёх видах звуковой стимуляции: имитация (ИМ), бинауральные биения (ББ), моноауральные биения (МБ)

Испытуемый	Латентность первого веретена, с			Время засыпания меньше, чем при имитации	
	ИМ	ББ	МБ	ББ	МБ
1	1860	729	1860	Да	Нет
2	1860	887	1860	Да	Нет
3	1173	414	1176	Да	Нет
4	816	559	1860	Да	Нет
5	582	363	376	Да	Да
6	571	415	285	Да	Да
7	589	435	1263	Да	Нет
8	225	136	78	Да	Да
9	227	173	167	Да	Да
10	187	175	339	Да	Нет
11	1860	1860	1860	Нет	Нет
12	637	640	562	Нет	Да
13	69	244	80	Нет	Нет
14	241	457	284	Нет	Нет

Достоверность различий времени засыпания испытуемых при ББ и ИМ для всей группы из 14 человек составила 0,957 ($p = 0,043$) по критерию знаковых рангов Уилкоксона, между выборками ББ и МБ – 0,87 ($p = 0,13$; достоверных различий нет), между МБ и ИМ – 0,04 ($p = 0,96$; достоверных различий нет).

Для 10 «успешных» испытуемых, у которых время засыпания при стимуляции ББ было меньше, чем при ИМ, средние значения составили: время засыпания при ББ – 429 с; время засыпания при ИМ – 809 с; время засыпания при МБ – 926 с.

Обсуждение результатов

На основе приведенных цифр можно сделать следующие выводы.

1. Пассивное прослушивание фонограммы, содержащей ББ на частотах 0,5; 2 и 4 Гц, достоверно уменьшает время засыпания (определяемое по наступлению 2-й стадии сна) по сравнению с фонограммой-имитацией аналогичной структуры и громкости, не содержащей биений (с достоверностью 0,957). Время засыпания при прослушивании фонограммы с ББ было меньше у 10 из 14 испытуемых по сравнению с имитацией. В этом случае имело место также наименьшее среднее время засыпания по сравнению с ИМ и МБ.

2. Фонограмма аналогичной структуры и громкости, содержащая МБ тех же частот 0,5; 2 и 4 Гц, оказалась менее эффективной, поскольку только у 5 из 14 испытуемых наблюдалось уменьшение времени засыпания по сравнению с фонограммой-имитацией, а статистически достоверных различий между последними двумя выборками (МБ и ИМ) нет.

На рис. 3, где показаны распределения по времени засыпания для каждого из трех видов фонового звука (ББ, МБ и ИМ), можно также отметить некоторые закономерности. А именно, время засыпания примерно до 240 с во всех трех случаях, видимо, соответствует сильной исходной сонливости. В этой части распределений оно практически не зависит от фонового звука.

Следующая часть графиков, «плато», в случаях ББ и ИМ соответствует реакции выпавшего человека. В случае МБ «плато» в данной серии опытов отсутствует.

Третья часть, восходящая ветвь, соответствует отсутствию давления сна либо аномальной реакции испытуемого на подаваемый звук. Характерно, что в этой части латентность 2-й стадии сна иногда превышает длительность звукового стимула (930 с), то есть очевидно, что звук мог только препятствовать засыпанию.

Статистический анализ полученных экспериментальных данных затруднён в силу очень большого их разброса, математически выражающегося в большой

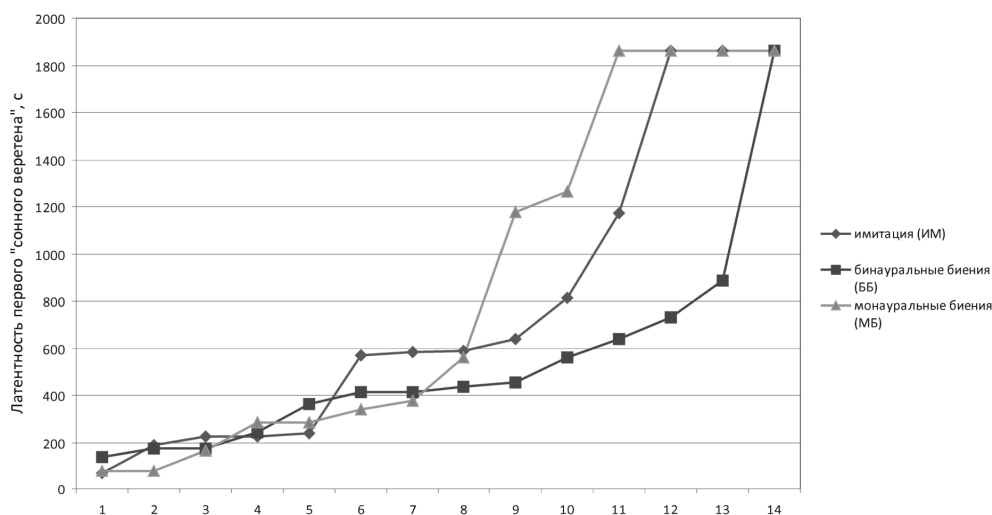


Рис. 3. Распределение времени засыпания по выборке 14 испытуемых для трех предъявляемых фонограмм

величине стандартного отклонения, а также неоднозначности математической интерпретации случаев, когда испытуемый вообще не засыпал за время опыта (мы считали в этих случаях время засыпания равным времени опыта; пробное дальнейшее его увеличение мало влияло на статистическую значимость различий). Всё это вполне объяснимо большой естественной вариативностью и неустойчивостью параметров процесса засыпания [5, 10].

Работа выполнена при поддержке Российского гуманитарного научного фонда, проект № 16-06-01054a.

Список литературы

1. Дорохов В. Б., Иваницкий Г. Е., Шумов Д. Е., Щукин Т. Н. Регуляция уровня бодрствования методом бинауральной аудиостимуляции // Сон — окно в мир бодрствования: материалы школы-конференции. Москва, 3–5 окт. 2001 г. М.: ИВНД и НФ РАН, 2001. С. 832.
2. Abeln V., Kleinert J., Strüder H. K., Schneider S. Brainwave entrainment for better sleep and post-sleep state of young elite soccer players - A pilot study // *European Journal of Sport Science*. 2014. Vol. 14, N 5. P. 393–402.
3. Carter C. Healthcare performance and the effects of the binaural beats on human blood pressure and heart rate // *Journal of Hospital Marketing & Public Relations*. 2008. Vol. 18, N 2. P. 213–219.
4. Evans B. M. What does brain damage tell us about the mechanisms of sleep? // *J R Soc Med*. 2002. Vol. 95, N 12. P. 591–597.
5. Hobson J. A., Stickgold R. Dreaming and the brain: toward a cognitive neuroscience of conscious states // *Behavioral and Brain Sciences*. 2000. Vol. 23, N 6. P. 793–842.
6. Iber C. The AASM Manual for the Scoring of Sleep and Associated Events // Westchester, IL: American Academy of Sleep Medicine, 2007.
7. Kennerly R. An empirical investigation into the effect of beta frequency binaural beat audio signals on four measures of human memory // *Hemi-Sync Journal*. 1996. Vol. 14, N 3. P. 1–4.
8. Oster G. Auditory beats in the brain // *Scientific American*. 1973. Vol. 229, N 4. P. 94–102.
9. Rhodes L. Use of the Hemi-Sync super sleep tape with a preschool-aged child // *Hemi-Sync Journal*. 1993. Vol. 11, N 4.
10. Santamaria J., Chiappa K. H. The EEG of drowsiness. Demos Publications, 1987.
11. Tang H. Y., Vitiello M. V., Perlis M., Riegel B. Open-Loop Neurofeedback Audiovisual Stimulation: A Pilot Study of Its Potential for Sleep Induction in Older Adults // *Appl Psychophysiol Biofeedback*. 2015. Vol. 40, N 3. P. 183–188.
12. Vernon D., Peryerb G., Loucha J., Shawa M. Tracking EEG changes in response to alpha and beta binaural beats

// *International Journal of Psychophysiology*. 2014. Vol. 93, N 1, P. 134–139.

References

1. Dorokhov V. B., Ivanitsky G. E., Shumov D. E., Shchukin T. N. Regulatsiya urovnya boдрstvovaniya metodom binaural'noi audiostimulyatsii [Regulation of arousal level by binaural beat audio stimulation]. In: *Materialy shkoly-konferentsii "Son - okno v mir boдрstvovaniya"*, Moskva, 3-5 okt. 2001 g. [Proceedings of International Youth Workshop "Sleep: a Window to the World of wakefulness". Moscow, 3-5 okt. 2001. P. 832.
2. Abeln V., Kleinert J., Strüder H. K., Schneider S. Brainwave entrainment for better sleep and post-sleep state of young elite soccer players - A pilot study. *European Journal of Sport Science*. 2014, 14 (5), p. 393-402.
3. Carter C. Healthcare performance and the effects of the binaural beats on human blood pressure and heart rate. *Journal of Hospital Marketing & Public Relations*. 2008, 18 (2), pp. 213-219.
4. Evans B. M. What does brain damage tell us about the mechanisms of sleep? *J R Soc Med*. 2002, 95 (12), pp. 591-597.
5. Hobson J. A., Stickgold R. Dreaming and the brain: toward a cognitive neuroscience of conscious states. *Behavioral and Brain Sciences*. 2000, 23 (6), pp. 793-842.
6. Iber C. The AASM Manual for the Scoring of Sleep and Associated Events. Westchester, IL, American Academy of Sleep Medicine, 2007.
7. Kennerly R. An empirical investigation into the effect of beta frequency binaural beat audio signals on four measures of human memory. *Hemi-Sync Journal*. 1996, 14 (3), pp. 1-4.
8. Oster G. Auditory beats in the brain. *Scientific American*. 1973, 229 (4), pp. 94-102.
9. Rhodes L. Use of the Hemi-Sync super sleep tape with a preschool-aged child. *Hemi-Sync Journal*. 1993, 11 (4).
10. Santamaria J., Chiappa K. H. The EEG of drowsiness. *Demos Publications*, 1987.
11. Tang H. Y., Vitiello M. V., Perlis M., Riegel B. Open-Loop Neurofeedback Audiovisual Stimulation: A Pilot Study of Its Potential for Sleep Induction in Older Adults. *Appl Psychophysiol Biofeedback*. 2015, 40 (3), pp. 183-188.
12. Vernon D., Peryerb G., Loucha J., Shawa M. Tracking EEG changes in response to alpha and beta binaural beats. *International Journal of Psychophysiology*. 2014, 93 (1), pp. 134-139.

Контактная информация:

Шумов Дмитрий Ефимович — инженер Лаборатории нейробиологии сна и бодрствования ФБГУ «Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН»

Адрес: 117485, г. Москва, ул. Бутлерова, д. 5а

E-mail: dmitry-shumov@yandex.ru