

**На правах рукописи**

**Шумов Дмитрий Ефимович**

**Влияние эффекта бинауральных биений  
на процесс засыпания**

**03.03.01 - физиология**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук**

Москва, 2020

Работа выполнена в Лаборатории нейробиологии сна и бодрствования (заведующий лабораторией – доктор биологических наук Владимир Борисович Дорохов) Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт Высшей Нервной Деятельности и Нейрофизиологии РАН».

**Научный руководитель:**

Доктор биологических наук Владимир Борисович Дорохов.

**Официальные оппоненты:**

**Ковальзон Владимир Матвеевич**, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник ФБГУ науки «Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН».

**Полуэктов Михаил Гурьевич**, кандидат медицинских наук, доцент кафедры нервных болезней и нейрохирургии Института клинической медицины им. Н.В. Склифосовского ФГАОУ высшего образования «Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова» Министерства здравоохранения Российской Федерации.

**Ведущая организация**

ФБГУ «Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации

**Защита состоится 3 декабря 2020 г., в 14.00 на заседании Диссертационного совета Д 002.044.02 при Институте Высшей Нервной Деятельности и Нейрофизиологии РАН по адресу: 117485, Москва, ул. Бутлерова 5А.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт Высшей Нервной Деятельности и Нейрофизиологии РАН», а также на сайте ИВНД: <https://ihna.ru>

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, д.б.н. Иерусалимский В.Н.



### ***Использованные сокращения***

ББ – бинауральные биения

BCP – вариабельность сердечного ритма

ИББ – индекс вегетативного баланса (параметр, вычисляемый при анализе BCP)

ЛС – латентность сна

ПСГ – полисомнограмма

ЭКГ – электрокардиограмма

ЭОГ – электроокулограмма

ЭЭГ – электроэнцефалограмма

AASM – Американская академия медицины сна; аббр. от «American Academy of Sleep Medicine»

ANOVA – дисперсионный статистический анализ; аббр. от «ANalysis Of VAriance»

ASSR – стационарный слуховой ответ; аббр. от «Auditory Steady State Response»

### ***Общая характеристика работы***

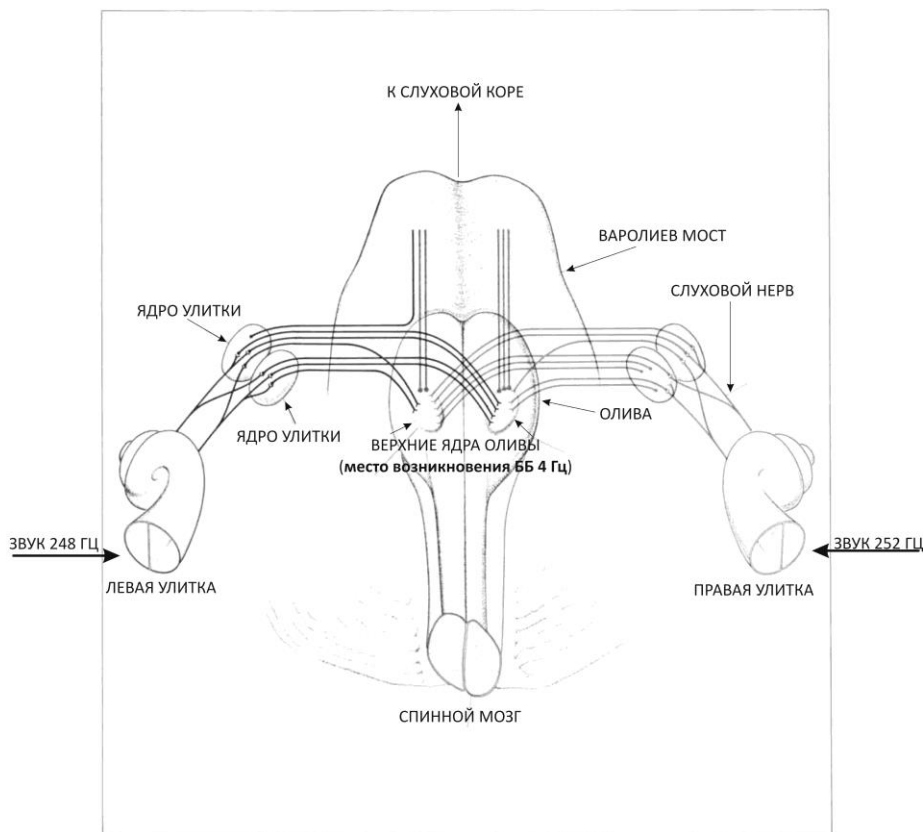
Известно, что от 10% до 40% взрослого населения периодически испытывают нарушения сна, а 15% страдают хронической бессонницей, связанной, в свою очередь, с рядом заболеваний. В современной неврологии существует несколько направлений лечения расстройств сна, одно из которых – неинвазивная стимуляция мозга (Non-Invasive Brain Stimulation, NIBS ), как альтернатива фармакологическому подходу.

Одним из наиболее эффективных методов неинвазивного воздействия на сон является акустическая стимуляция. В настоящее время этот метод реализован в некоторых потребительских устройствах с обратной связью, из которых можно выделить французский аппарат «Rhythm Dreem<sup>TM</sup>».

Разновидностью акустической стимуляции является т.н. «эффект бинауральных биений», то есть, психоакустическая иллюзия, возникающая в ответ на предъявление отдельно в правое и левое ухо двух монотонных, слегка отличающихся по высоте, звуков. В отличие от *монауральных*, или акустических, биений, которые изначально присутствуют в звуке, *бинауральные*

биения (ББ) появляются только в момент прослушивания, за счет взаимодействия порожденных звуком нервных сигналов от правого и левого уха (рисунок 1).

Привлекательность бинауральных биений для воздействия на сон заключается в том, что человек может ощутить их при очень малой громкости звука, по сути, граничащей с порогом слуха, т.е. такой стимул создает очень мало помех для засыпания. Тем не менее, влияние ББ на сон до сих пор мало изучено в научном плане. Что касается их влияния на процесс засыпания, то оно вообще не изучено, хотя глубокий сон нельзя рассматривать отдельно от засыпания: при наличии проблем засыпания, попытки повлиять на дальнейший процесс теряют смысл.



**Рисунок 1.** Механизм возникновения в мозге бинауральных биений. Их частота равна разности частот, предъявляемых в правое и левое ухо. В данном случае это  $252 - 248 = 4$  (Гц).

Такая слабая научная разработанность темы контрастирует с высоким пользовательским интересом к ней. Ритмические звуковые сигналы с эффектом бинауральных биений используются в потребительских устройствах

светозвуковой стимуляции (Mind Machines), некоторых компьютерных программах, аудио- и видеозаписях психотерапевтической направленности. Для значительной части подобных продуктов рекомендации по использованию опираются не на статистические данные их проверки на испытуемых, а на т.н. «гипотезу захвата мозговых волн». В англоязычной литературе эта гипотеза формулируется кратким словосочетанием «Brainwave Entrainment» (BWE). Хотя это словосочетание и можно сопоставить такому термину как «реакция навязывания ритма», но это не одно и то же, поскольку BWE-гипотеза включает в себя дополнительное предположение, что частота усвоенного ритма (от любого сенсорного стимула) влияет на состояние сознания человека. В частности, BWE-гипотеза предполагает, что эффект ББ способствует формированию у слушателя уровня бодрствования в зависимости от диапазона (альфа, бета, тета, дельта), которому принадлежит частота ББ. В соответствии с данной гипотезой, например, ББ с частотой 3 Гц должны способствовать поддержанию сна, а ББ 16 Гц – поддержанию бодрствования.

Результаты диссертационной работы проверяют применимость данной гипотезы на практике, а также выясняют другие закономерности воздействия ББ на процесс засыпания, что важно при разработке нефармакологических методов улучшения сна, как у здоровых людей, так и у людей и с разнообразными его нарушениями.

### ***Цель исследования.***

Цель работы заключалась в исследовании воздействия эффекта бинауральных биений на процесс засыпания. В том числе, она включала в себя поиск частот биений, их сочетаний и видов порождающего их фонового звука, способных облегчить процесс засыпания человека, а также исследование применимости к процессу засыпания теоретических предположений, используемых для прогнозирования воздействия бинауральных биений.

### ***Задачи исследования.***

1. Сравнить объективными методами (по данным полисомнограммы) воздействие комбинации бинауральных биений на процесс засыпания с воздействием монауральных биений, а также с воздействием монотонного звука.
2. Сравнить характеристики дневного сна под воздействием бинауральных биений в составе музыки с характеристиками дневного сна в отсутствие стимула (контроль).
3. Сравнить воздействие на короткий дневной сон бинауральных биений 3-х разных частот: 4 Гц, 8 Гц, 16 Гц.
4. Получить доказательства наличия слуховых вызванных потенциалов **во сне**, в ответ на звуковые стимулы с эффектом бинауральных биений.
5. Исследовать влияние музыки с эффектом бинауральных биений на вегетативную нервную активность в процессе дневного сна, по показателям variability сердечного ритма (ВСР).

### ***Научная новизна исследования.***

В данной диссертационной работе впервые проведено объективное аппаратное исследование влияния эффекта бинауральных биений (ББ) на дневной сон, в том числе, в комбинации с музыкой. В том числе, впервые исследовано влияние эффекта ББ на характеристики дневного сна. Впервые показаны различия латентности сна при засыпании под воздействием монотонного звука, аналогичного звука с ББ и аналогичного звука с монауральными биениями. Впервые показано влияние ББ на активность парасимпатического отдела вегетативной нервной системы в процессе дневного сна, по показателям ВСР. Впервые проведено сравнительное полисомнографическое (ПСГ) исследование воздействия на дневной сон ББ 3-х разных частот (4, 8 и 16 Гц), совместно с регистрацией слуховых вызванных потенциалов (СВП) от ББ вышеуказанных частот. Впервые продемонстрирован

стационарный слуховой ответ (Auditory Steady State Response, ASSR) на предъявление ББ частоты бета-диапазона ЭЭГ (16 Гц).

### ***Теоретическая и практическая значимость работы.***

Научно-теоретическое значение работы состоит в оценке, объективными полисомнографическими методами, влияния различного вида звуковых стимулов с эффектом бинауральных биений на процесс засыпания человека, а также в проверке теоретических предположений, используемых для прогнозирования воздействия бинауральных биений (гипотезы «захвата мозговых волн», см. выше). Практическое значение состоит в разработке новых методов звуковой стимуляции, которые можно использовать при разработке нефармакологических средств ускорения процесса засыпания и улучшения качества сна.

### ***Положения, выносимые на защиту.***

1. Гипотеза «захвата мозговых волн» не подходит для прогнозирования воздействия звуковых стимулов с эффектом бинауральных биений на процесс засыпания.
2. Звуковые стимулы, содержащие бинауральные биения с частотами тета- и дельта-диапазона ЭЭГ, снижают латентность дневного сна, а также повышают его консолидированность.

### ***Апробация работы.***

Результаты диссертационных исследований доложены на следующих научных конференциях:

- XI Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы сомнологии», Москва, 15–16 ноября 2018 г.
- VIII Международная конференция по когнитивной науке, Светлогорск, 18–21 октября 2018 г.
- IV Международный форум «СОН – 2017», Москва, 16–18 марта 2017 г.

- X Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы сомнологии», Москва, 16–17 ноября 2016 г.
- V Международная конференция «Психология человека в условиях здоровья и болезни», Тамбов, 5–6 июня 2015 г.
- II Международная научно-практическая конференция «Нейронауки и благополучие общества: технологические, экономические, биомедицинские и гуманитарные аспекты», Москва, 28–29 мая 2015 г.

**По теме диссертации опубликовано 6 работ, из них 5 – в журналах, рекомендованных ВАК.**

### ***Объем и структура диссертации.***

Диссертация содержит следующие основные разделы: введение, обзор данных литературы, материалы и методы исследования, главы с описанием и результатами собственных исследований, выводы, обсуждение, приложения и библиографический указатель, включающий работы на русском (16) и английском (140) языках. Диссертация изложена на 132 страницах, содержит 15 таблиц и 22 рисунка.

### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.**

**Испытуемые.** В экспериментах участвовали 83 испытуемых в возрасте от 18 до 32 лет (31 – женского пола, 52 – мужского пола), не страдавшие расстройствами сна и не привыкшие спать днем. С ними было проведено в общей сложности 258 опытов.

**Схема эксперимента.** Было поставлено 4 серии опытов (4 эксперимента), первые два из которых имели практически идентичный дизайн, а 3-й и 4-й – отличались по структуре.

Цель каждого из 4-х экспериментов заключалась в последовательном выполнении задач, сформулированных в разделе «Задачи исследования».

*1-й эксперимент* – целью было сравнить влияние на процесс засыпания эффекта ББ с воздействием МБ (монауральных, или акустических, биений), а



также монотонного звука без биений; а именно, следующих звуковых стимулов:

а. Монотонного звука с эффектом ББ 0,5 Гц, 2 Гц и 4 Гц, и с наложенным «розовым шумом»;

б. Монотонного звука, содержащего МБ тех же частот и «розовый шум» того же спектра;

в. Монотонного звука той же тональности, что и в первых двух сериях, с наложением «розового шума» того же спектра, но не содержащего биений (т.н. «имитация»).

В эксперименте приняли участие 14 испытуемых, с которым было проведено 42 опыта.

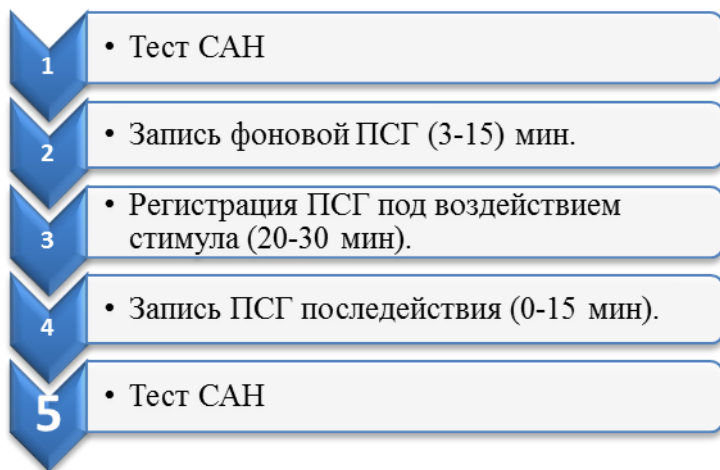
*2-й эксперимент* – целью было повысить уровень достоверности выводов, для чего был увеличен объем выборки испытуемых. Были проведены 2 серии опытов со стимулами, идентичными использованным в предыдущем эксперименте. 1-я серия – монотонный звук с эффектом бинауральных биений (ББ) 0,5 Гц, 2 Гц и 4 Гц; 2-я серия (контрольная) – монотонный звук той же тональности, но не содержащий биений. В эксперименте участвовали 23 испытуемых, с которыми проведены 46 опытов.

*3-й эксперимент* – целью было сравнить процесс засыпания в сопровождении расслабляющей музыки, содержащей ББ низкой частоты 4 и 2 Гц (т.е. из диапазона тета- и дельта-ритмов ЭЭГ), – с контрольным засыпанием в отсутствие стимулов. Было проведено 42 опыта, с 21-м испытуемым.

*4-й эксперимент* – целью было исследовать зависимость латентности сна от частоты ББ, а также исследовать стационарный слуховой отклик ЭЭГ на стимуляцию звуком с эффектом ББ разных частот, в процессе засыпания. В рамках эксперимента проведено четыре серии опытов. В первых трех сериях исследовали воздействие на испытуемых ББ с частотами 4 Гц, 8 Гц и 16 Гц, которые предъявляли по контрбалансированной схеме. Данные частоты биений были выбраны потому, что они принадлежат разным спектральным диапазонам ЭЭГ (дельта /тета, тета /альфа и бета- соответственно); поэтому предполагалось,

что усвоение их ритма будет по-разному влиять на скорость засыпания. В четвертой (контрольной) серии предъявляли монотонный звук без биений. Участвовали 39 испытуемых, с которыми проведено 156 опытов.

Процедура каждого опыта была следующей (с небольшими вариациями в 4-х экспериментах):



**Оборудование.** Для регистрации ПСГ использовали отечественные полисомнографы, описание которых, наряду с параметрами регистрации ПСГ, можно найти в тексте диссертации.

**Обработка данных.** Записи ПСГ были стадированы слепым методом двумя независимыми сомнологами, по стандартным критериям Американской академии медицины сна (AASM). По итогам стадирования строилась коллективная гипнограмма. При визуальном анализе устанавливались программные полосовые фильтры: для ЭЭГ — 0,5–30 Гц, для ЭОГ — 0,2–3 Гц. Для определения латентности сна в качестве маркера засыпания была выбрана первая эпоха, с наличием не менее одного сонного веретена длительностью не менее 0,5 сек, что является критерием наступления 2-й стадии сна.

**Анализ данных.** Для статистического анализа экспериментальных данных был использован пакет Statsoft Statistica 6.0; различия считали достоверными при уровне значимости  $p < 0,05$ .

В рамках этого пакета для проверки гипотез применялся дисперсионный анализ с повторными измерениями (rANOVA, аббр. от «Repeated measures

ANalysis Of VAriance») и его непараметрический аналог – критерий Фридмана; для анализа консолидированности сна – нелинейный регрессионный анализ. Также, для сравнения средних значений параметров, полученных в экспериментах, схема которых предусматривала 2 последовательных опыта с каждым испытуемым, применялся t-критерий Стьюдента для зависимых выборок и его непараметрические аналоги – критерий Уилкоксона и критерий знаков. В качестве альтернативного подхода использовался анализ выживаемости.

Вычисления и визуализация вызванной активности ЭЭГ проводились с использованием пакета обработки биологических сигналов "AcqKnowledge 4.2", а также специальных скриптов (последовательностей команд) в среде Matlab.

Для анализа вариабельности сердечного ритма (BCP) был использован стандартный пакет обработки Kubios HRV 2.1.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ.**

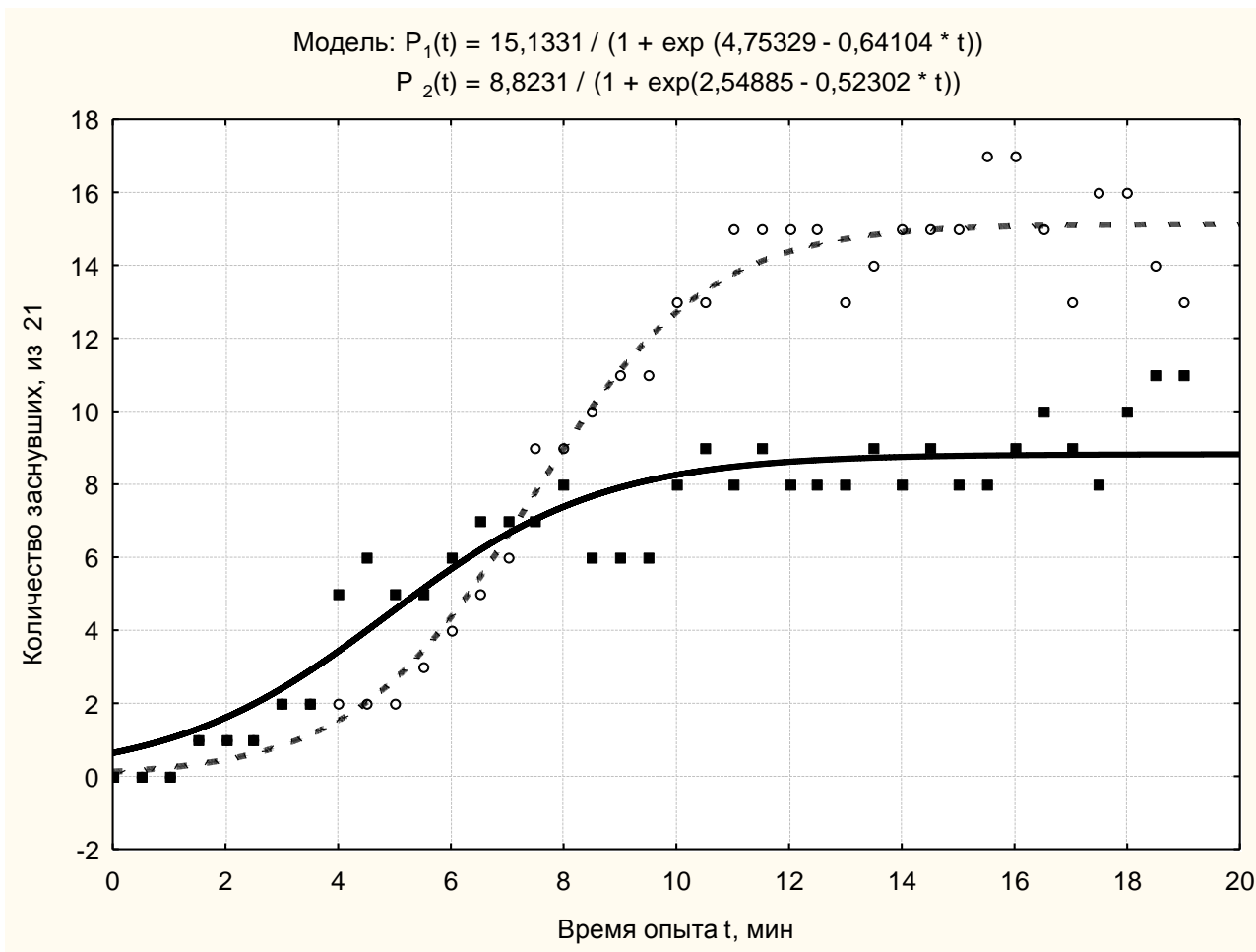
Результаты **первого эксперимента** показали достоверное ( $p = 0,027$  по результатам дисперсионного анализа) влияние эффекта бинауральных биений (ББ) на латентность сна (ЛС), определяемую по наступлению 2-й его стадии. Тем не менее, достоверные различия по результатам апостериорных тестов присутствовали только между воздействием стимула с ББ (0,5 Гц + 2 Гц + 4 Гц, стимул «а»,  $p = 0,03$ ) и моноуральными биениями тех же частот (стимул «б»). С контрольным стимулом («в», без биений) достоверного уровня значимости достигнуто не было ( $p = 0,14$ ). Поэтому была проведена дополнительная серия опытов, для проверки предположения об уменьшении латентности сна под влиянием звука с эффектом ББ, относительно контрольного стимула, на увеличенном объёме выборки.

**Второй эксперимент** подтвердил гипотезу о снижении латентности 2-й стадии дневного сна (ЛС) под влиянием монотонного звука в виде комбинации бинауральных биений с частотами 0,5 Гц, 2 Гц, 4 Гц, предъявляемых на фоне 4-

звучного аккорда и «розового шума» (стимул «а»), по сравнению с контрольным стимулом – монотонным звуком без биений (стимул «в»). Уровень значимости одностороннего критерия Стьюдента для зависимых выборок составил  $p = 0,013$ . Также, данный эксперимент показал бóльшую степень консолидации дневного сна под влиянием стимула с ББ, по сравнению с контрольным стимулом.

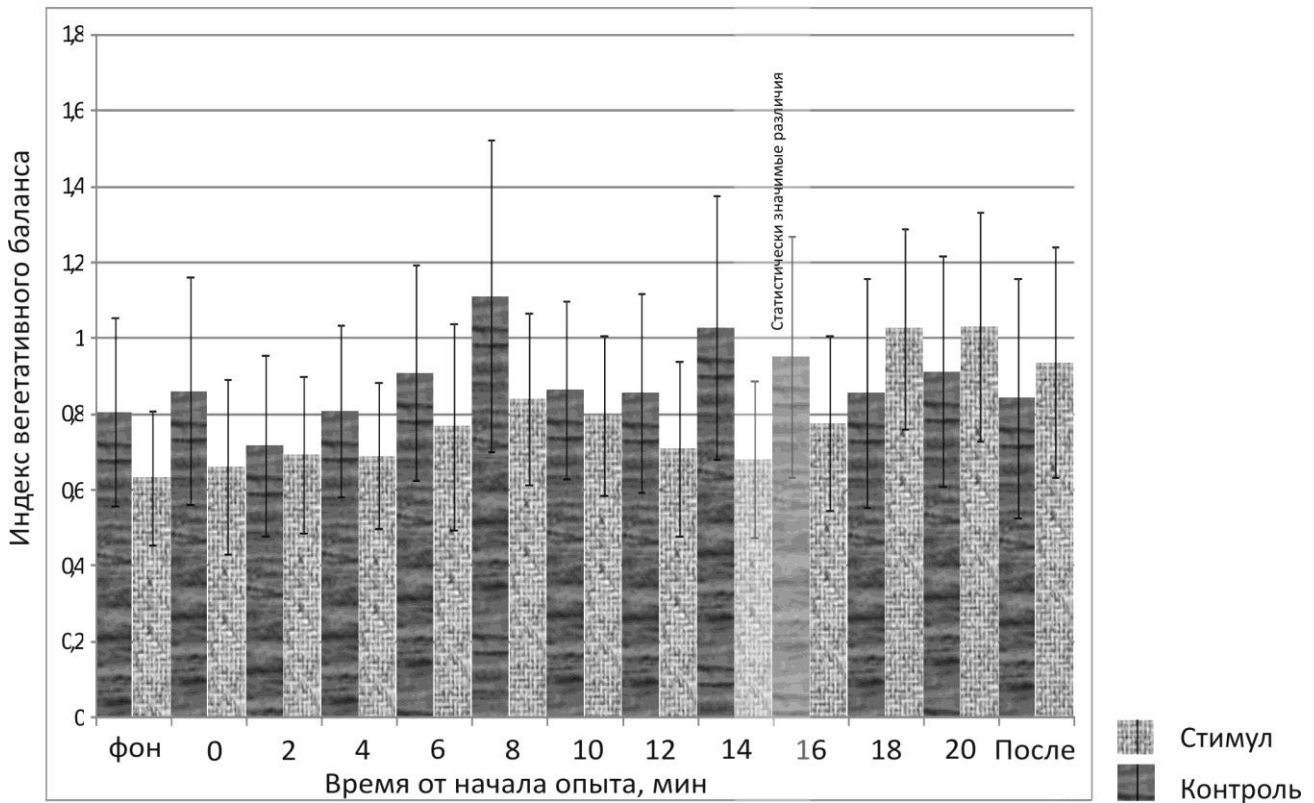
Что касается **третьего эксперимента**, то гипотеза об уменьшении ЛС под воздействием музыки с эффектом ББ, в данном эксперименте подтвердилась на уровне тенденции: уровень значимости одностороннего критерия Стьюдента для зависимых выборок  $p = 0,063$ . Этот факт подчеркивает заметно меньшая средняя величина ЛС в опытах с музыкой, по сравнению с контролем: 10,2 мин против 12,6 мин. Возможно, расхождение с результатами предыдущего эксперимента обусловлено разными экспериментальными протоколами, в том числе, отличиями звукового стимула. Также, результаты статистического анализа показали отсутствие значимого влияния музыки на субъективную оценку испытуемыми своего состояния по тесту САН.

Значительные различия в **третьем эксперименте** были выявлены при нелинейном регрессионном анализе *консолидации* сна (рисунок 4). А именно, во время дневного сна под воздействием музыки с эффектом ББ 2 Гц и 4 Гц испытуемые, во второй половине опыта, с достоверно большей вероятностью ( $p < 10^{-25}$ ) пребывали на 2-й и 3-й стадиях медленного сна, чем при «контрольном» засыпании в тишине. Использованный при этом математический аппарат моделирования уравнением Ферхюльста (см. легенду к рис. 4) интересен также в теоретическом плане анализа консолидации дневного сна.



**Рисунок 4.** 3-й эксперимент: зависимость от времени с начала опыта количества испытуемых, находившихся на 2-й и 3-й стадиях сна, в опытах со стимуляцией (разброс данных – кружки, модель –  $P_1$ , пунктир) и в контроле (разброс данных – квадраты, модель –  $P_2$ , сплошная линия). Более высокое «плато» на регрессионной кривой соответствует более высокой консолидированности сна.

Анализ ЭКГ (рисунок 5) показал значимые различия спектральных параметров ВСП ( $HF_{n.u.}$  и ИВБ) на одной 2-минутной эпохе из 11 проанализированных, что свидетельствует об усилении активности парасимпатического отдела вегетативной нервной системы под воздействием музыки с эффектом ББ. В данном случае, оценка эффективности стимуляции путем анализа ВСП оказалась малопродуктивной, по сравнению с анализом гипнограмм, что обусловлено сильным межиндивидуальным разбросом вычисленных значений  $HF_{n.u.}$  и ИВБ.



**Рисунок 5.** Динамика индекса вегетативного баланса (ИВБ), показателя активации парасимпатического отдела ВНС, усредненного по 21 испытуемому по результатам эксперимента 3. По оси ординат отложено среднее геометрическое по выборке значение ИВБ для каждой из 13 эпох анализа. Полосой выделен период статистически значимых различий между стимулом и контролем (Wilcoxon Matched Pairs Test  $p = 0,021$ ; Sign Test  $p = 0,004$ ).

По итогам **четвертого эксперимента**, было установлено достоверное влияние частоты ББ-стимула на латентность сна

Friedman ANOVA Chi Sqr. (N = 39, df = 2) = 6,283465 $p = 0,043$ *				
Параметр	Ср. ранг	Сумма рангов	Ср. знач., мин	Ст. откл., мин
ЛС (4hz)	1,72	67,00	13,72	6,32
ЛС (8hz)	2,22	86,50	16,10	5,10
ЛС (16hz)	2,06	80,50	15,06	5,92

**Таблица 2.** Результаты непараметрического теста Фридмана для проверки гипотезы о влиянии частоты стимула на латентность сна (ЛС). Звездочкой показаны достоверные различия.

Стимуляция с частотой ББ 4 Гц дала наилучшие результаты по латентности

сна, по сравнению с частотами 8 Гц и 16 Гц (таблица 3).

	стимул	среднее ЛС, мин	Ст. ошибка ЛС, мин	{1}	{2}	{3}
1	ББ 16hz	15,1	0,948		0,367	0,548
2	ББ 4hz	13,7	1,012	0,367		<b>0,048*</b>
3	ББ 8hz	16,1	0,817	0,548	<b>0,048*</b>	

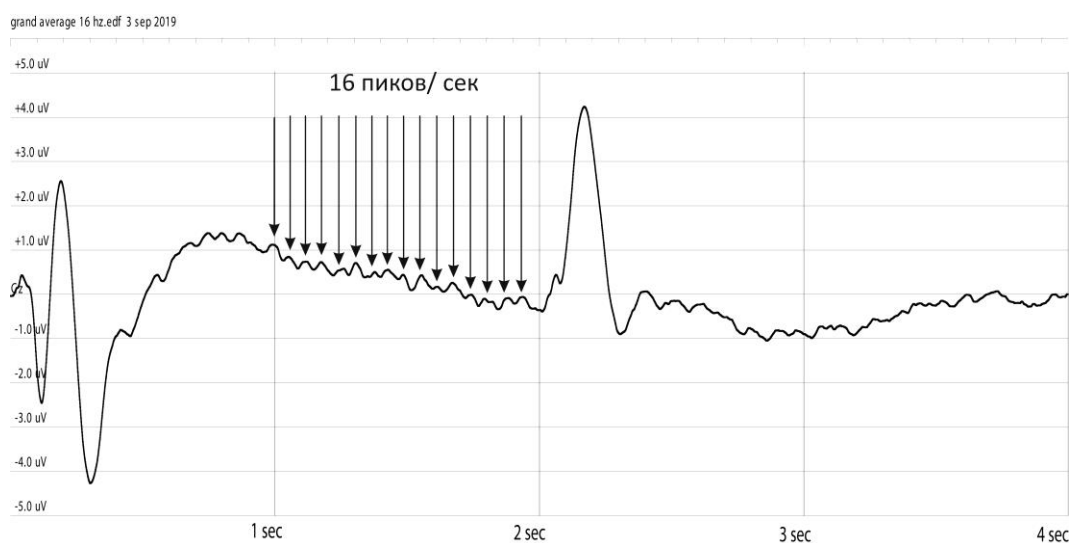
**Таблица 3.** Средние значения латентности 2-й стадии сна (ЛС) в 4-м эксперименте для исследованных 3-х частот ББ, а также достоверность отсутствия различий между их парами, согласно апостериорному критерию Тьюки. Звездочкой(\*) выделены достоверные различия.

Также, статистический анализ (2x3 rANOVA) показал *отсутствие* влияния частоты стимула и пола испытуемых на субъективную оценку ими своего состояния по тесту САН (самочувствие – активность – настроение).

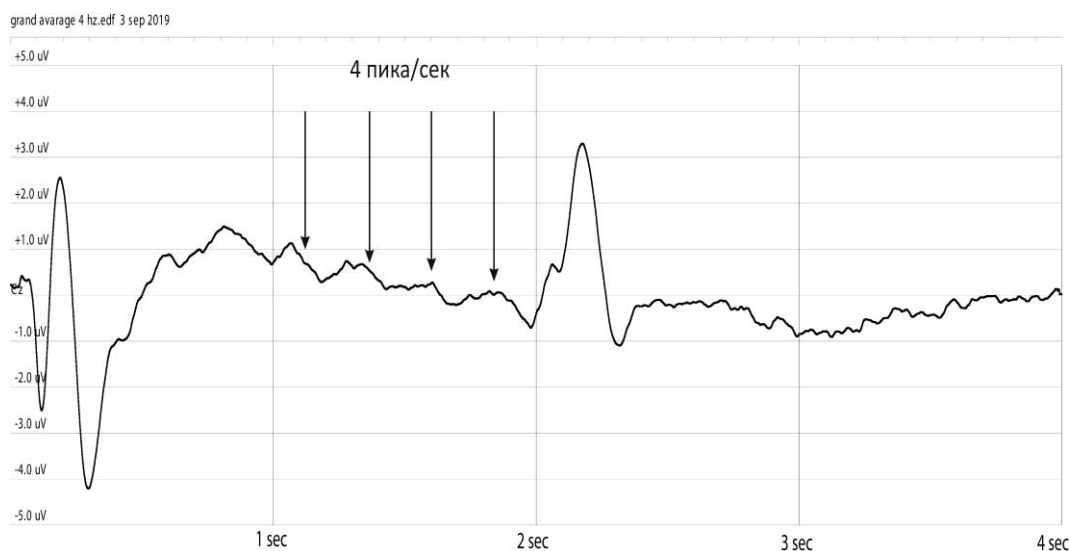
Анализ консолидации сна показал достоверную ее зависимость от вида использованного звукового стимула. Наилучшая консолидированность, по сравнению со всеми остальными видами стимула наблюдалась для звука с эффектом ББ 4 Гц. Этому соответствовала наибольшая вероятность нахождения испытуемых на 2-й или 3-й стадиях медленного сна.

В четвертом эксперименте удалось также зафиксировать вызванную активность (СВП и стационарный слуховой ответ, ASSR) на ББ-стимулы с частотами 4 Гц, 8 Гц и 16 Гц (рис. 7, 8). Навязывание ритма ЭЭГ с помощью ББ частотой 16 Гц (вообще, любой частотой, принадлежащей бета-диапазону ЭЭГ) ранее не было показано в научных публикациях.

А.

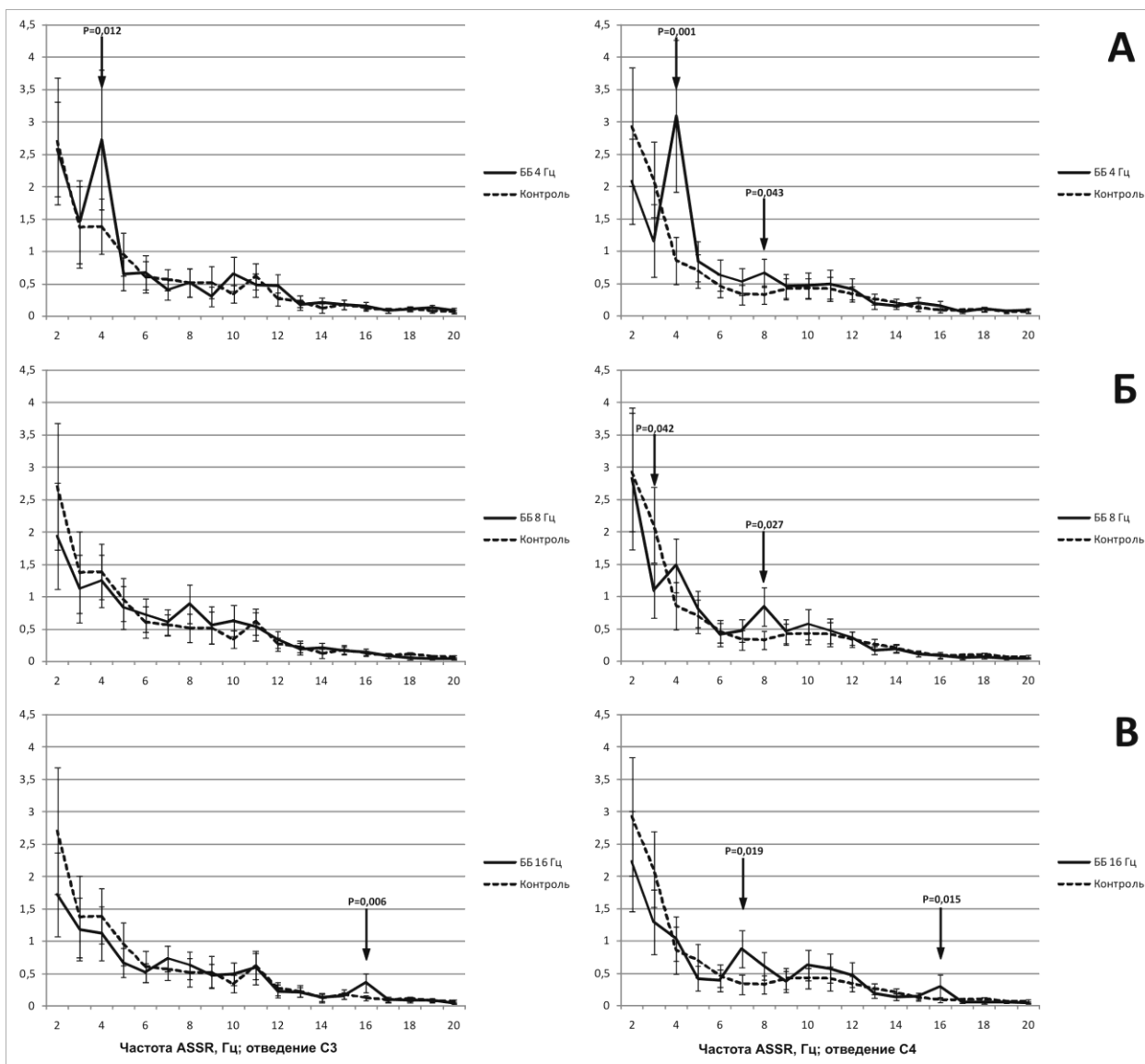


Б.



**Рисунок 7.** Слуховой вызванный потенциал (СВП) ЭЭГ в отведении Cz на стимуляцию 2-сек отрезками монотонного звука с эффектом ББ. Усреднение по 39 испытуемым, участвовавшим в 4-м эксперименте. Около 300 усреднений на каждого испытуемого. А – ББ 16 Гц; Б – ББ 4 Гц. На 2-й секунде окон усреднения стрелками показаны пики ASSR, количество которых совпадает с частотой стимуляции. Это отклик ASSR на частоте стимуляции.





**Рисунок 8.** Средние геометрические по всем испытуемым значения относительной мощности частот ASSR в диапазоне от 2 до 20 Гц, для отведений C3 и C4, по сравнению с контролем (монотонный звук без биений). По оси абсцисс отложена частота  $f$  спектра ASSR, в диапазоне от 2 до 20 Гц; по оси ординат – относительная мощность  $P_{\text{отн}}(f)$  спектра ASSR. Планки погрешностей соответствуют доверительному интервалу 95% ( $p = 0,05$ ). Стрелками показаны частоты, на которых наблюдались достоверные отличия между стимулом и контролем. Для остальных частот различия не достоверны. А – стимул ББ 4 Гц; Б – стимул ББ 8 Гц; В – стимул ББ 16 Гц.

## Обсуждение.

Главный вывод данной работы состоит в том, что стимул, содержащий бинауральные биения 0,5 Гц + 2 Гц + 4 Гц, уменьшает латентность дневного

сна, по сравнению со звуком без биений, такого же спектра. Такие стимулы можно рекомендовать в качестве средства, способствующего засыпанию. Также, было показано, что стимул в виде чистых периодических тонов с эффектом ББ 4 Гц уменьшает латентность дневного сна, по сравнению с аналогичным стимулом 8 Гц (эксперимент 4). Здесь следует отметить чисто математическую проблему статистического сравнения времени засыпания в условиях кратковременного дневного сна. А именно, за 20 или даже 30 минут опыта не всем испытуемым удастся заснуть, что приводит к неоднозначности оценки латентности сна. Для подобных случаев разработан аппарат т.н. «анализа выживания», или «теории надежности», однако автору не известны алгоритмы применения этого аппарата в случае повторных измерений. Использование же стандартных алгоритмов теории надежности либо снижает достоверность выводов, либо требует увеличения количества испытуемых, что не всегда возможно.

Также было показано, что в процессе дневного сна под влиянием музыки с эффектом ББ усиливается активность парасимпатического отдела вегетативной нервной системы, по сравнению со сном без звука в контрольных опытах. Об этом свидетельствуют различия спектральных параметров ВСР. Скорее всего, данный эффект обусловлен более глубоким сном под воздействием музыки, поскольку он наблюдался и просто по мере углубления сна, как для стимула, так и для контроля. Это подтверждает полученные аналогичными методами результаты работы (Cellini et al. 2016). В целом, определение эффективности звуковой стимуляции путем анализа ВСР оказалось малопродуктивным, по сравнению с анализом гипнограмм, из-за сильного внутривыборочного разброса параметров спектра ВСР.

Отсутствие статистически значимой разницы между результатами теста САН до и после опыта, который проводили в 3-м и в 4-м экспериментах, свидетельствует об отсутствии достоверного влияния использованных звуков с эффектом ББ на функциональное состояние испытуемых, по их субъективной

оценке. Это не согласуется с результатами некоторых других исследований (Abeln et al., 2014), хотя расхождение объяснимо различием условий эксперимента.

Также, в случае ББ, порождаемых чистыми периодическими тонами постоянной высоты (эксперимент 4), неожиданным было уменьшение латентности сна (и увеличение длительности 2-й и 3-й его стадий) от стимула с ББ 16 Гц, по сравнению со стимулом 8 Гц, хотя, исходя из гипотезы «захвата мозговых волн», ожидалось обратное, поскольку частота 16 Гц соответствует бета-ритму ЭЭГ, ассоциируемому с состоянием бодрствования. Возможно, это обусловлено тем, что частота 16 Гц принадлежит диапазону «сонных веретен», появление которых как раз является маркером 2-й стадии сна, использованным в эксперименте для определения его латентности. В пользу такого объяснения свидетельствуют результаты работы (Antony & Paller, 2016), в которой показано увеличение у испытуемых количества «сонных веретен» при акустической стимуляции с близкой частотой 15 Гц, во время дневного сна. Еще одним результатом, ставящим под сомнение адекватность гипотезы «захвата мозговых волн» в отношении процесса засыпания, стала меньшая латентность сна при засыпании в сопровождении звука с ББ частот тета- и дельта-диапазона ЭЭГ, по сравнению со звуком, содержащим идентичные моноауральные биения. Противоречие состоит в том, что ASSR (навязанный ритм) от ББ как минимум не превышает по силе ASSR от моноауральных биений. А значит, в соответствии с вышеупомянутой гипотезой, физиологический эффект, обусловленный навязыванием ритма, не может быть сильнее. Таким образом, гипотеза «захвата мозговых волн» имеет ограниченную применимость в отношении воздействия стимулов с ББ на процесс засыпания, и для адекватного прогнозирования их эффекта в практических приложениях, связанных со сном, требуются дополнительные теоретические предположения.

Также, было выяснено, что некоторые виды стимулов с ББ повышают консолидированность дневного сна (рисунок 4). Это выражается в большей

вероятности нахождения человека, засыпающего в сопровождении такого звукового стимула, на 2-й и 3-й стадиях сна, чем при засыпании в тишине или под звук, не содержащий биений. Данный эффект наблюдался во 2-м эксперименте – для монотонного звука в виде комбинации бинауральных биений с частотами 0,5 Гц, 2 Гц, 4 Гц, предъявляемых на фоне 4-звучного аккорда и «розового шума»; в 3-м эксперименте – для музыки с эффектом ББ 2 Гц и 4 Гц; в 4-м эксперименте – для монотонного звука с эффектом ББ 4 Гц.

### **Выводы:**

1. Используемый в первом и втором экспериментах звуковой стимул с эффектом бинауральных биений имеет преимущество в виде снижения латентности сна, по сравнению со стимулом без биений, а также со стимулом, содержащим моноуральные биения.
2. Латентность сна в сопровождении монотонного стимула с эффектом ББ зависит от частоты ББ. При этом частота 4 Гц более эффективна (дает меньшую латентность), чем 8 Гц.
3. Прослушивание при засыпании в процессе дневного сна музыки с эффектом ББ (в третьем эксперименте) повысило консолидированность сна, по сравнению с засыпанием в отсутствие стимула. При этом снижение латентности сна проявилось только на уровне тенденции.
4. Регистрация слуховых вызванных потенциалов от стимулов в виде монотонных звуков с ББ 4, 8 и 16 Гц, предъявляемых в процессе засыпания, показала усвоение ритма (ASSR) на ЭЭГ.
5. Прослушивание при засыпании в процессе дневного сна музыки с эффектом ББ (в третьем эксперименте) усилило активность парасимпатического отдела вегетативной нервной системы по показателям ВСР, по сравнению с засыпанием в отсутствие стимула.

## Список опубликованных по теме диссертации работ

1. Шумов Д. Е., Яковенко И. А., Алипов Н. Н., Бакаева З. В., Якунина Е. Б., Минюк А. Н., Винокуров А. В., Дорохов В. Б. Влияние музыки, содержащей бинауральные биения, на динамику дневного засыпания //Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. – 2020, - Т. 120. - № 2. - С. 39-44. <https://doi.org/10.17116/jnevro202012002139>.
2. Шумов Д.Е., Дорохов В.Б., Яковенко И.А., Алипов Н.Н. Влияние бинауральных биений в музыке на вегетативные показатели автономной нервной системы и ЭЭГ человека в процессе дневного сна //Успехи современной нейробиологии: Достижения, закономерности, проблемы. – Коллективная монография. – Москва. – Квант Медиа. – 2019. – С. 385-411.
3. Яковенко И.А., Шумов Д.Е., Петренко Н.Е., Козлов М.К., Дорохов В.Б. Изучение взаимодействия ритмических компонентов ЭЭГ на первой стадии дневного сна // Вестн. Моск. Ун-та. СЕР. 16. БИОЛОГИЯ. – 2019. – Т. 74. – №. 2. – С. 123-128. <https://doi.org/10.3103/S0096392519020111>
4. Shumov D.E., Yakovenko I.A., Dorokhov V.B., Sveshnikov D.S., Yakunina E.B., Bakaeva Z.V., Vinokurov V.A., Putilov A.A. 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 Research. – 2019. – pp. 1-10. <https://doi.org/10.1080/09291016.2019.1587839>
5. 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. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35908.73605>
6. Шумов Д.Е., Арсеньев Г.Н., Свешников Д.С., Дорохов В.Б. Сравнительный анализ влияния бинауральных биений и сходных видов звуковой стимуляции на процесс засыпания: короткое сообщение // Вестн. Моск. Ун-та. Серия 16. Биология. – 2017. – №. 1. – С. 39-43. <https://doi.org/10.3103/S0096392517010047>