

ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МИКРОВИБРАЦИЙ ГОЛОВЫ ЧЕЛОВЕКА С РИТМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТЬЮ ЦЕНТРАЛЬНОЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ, ВЫЗВАННОЙ ФОТОСТИМУЛЯЦИЕЙ

Шабанов Г.А.¹, Рыбченко А.А.¹, Лебедев Ю.А.¹, Припатинская Е.А.¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-исследовательский центр «Арктика» Дальневосточного отделения Российской академии наук, Магадан, e-mail: neurokib@mail.ru

В работе представлен анализ исследований по микровибрациям головного мозга человека. Поставлена цель изучения и доказательства тесной взаимосвязи механических микровибраций головы и тела человека с ритмической активностью центральной нервной системы. Для регистрации микровибраций использованы пьезоэлектрические датчики и спектральный анализ с разрешением 8400 спектральных гармоник в диапазоне частот от 0,13 до 27 Гц с временем интегрирования 160 сек. Приведен пример спектрального анализа 160 кадров информации микровибраций головы при фотостимуляции зрительного анализатора у 20 здоровых добровольцев. Получено, что на частоте фотостимуляции длительностью 10 минут происходит торможение основной спектральной гармоники, которое наиболее выражено на 15-20-й минуте после фотостимуляции и сохраняется до конца исследования ($p=0,89$). В результате такого воздействия возникает 4-5 спектральных гармоник с чередованием возбуждения и торможения. Частотные гармоники относятся к основной гармонике как отношение целочисленных дробей натурального цифрового ряда. С наибольшей частотой появлялись гармоники с отношением 16/15, 10/9, 6/5, 25/24 ($p=0,78$). Такое поведение характерно для системы связанных многочастотных осцилляторов ретикулярной активирующей системы мозга. Акустоэнцефалограмма (АЭГ) коррелирует с электроэнцефалограммой (ЭЭГ), отражает ритмическую активность и нейрорефлекторную деятельность головного мозга.

Ключевые слова: микровибрации головного мозга человека, активирующая система мозга, частотная матрица множества функциональных состояний, фотостимуляция.

STUDYING THE RELATIONSHIP OF HUMAN HEAD MICROVIBRATIONS WITH RHYTHMIC ACTIVITY OF THE CENTRAL NERVOUS SYSTEM INDUCED BY PHOTOSTIMULATION

Shabanov G.A.¹, Rybchenko A.A.¹, Lebedev Yu.A.¹, Pripatinskaya E.A.¹

¹Scientific Research Center "Arktika" Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Magadan, e-mail: neurokib@mail.ru

The article presents research analysis of the mechanical microvibrations of the brain and human body. The purpose is to study and prove close relationships of the mechanical microvibrations of the brain and human body with the central nervous system rhythmical activity in terms of support and regulation of the different organism functions. For the first time, in order to register the microvibrations there were used speed motion sensors and 8400 spectral harmonic format spectral analysis of 0.1 to 27 Hz range and integration time 160 sec. An example of spectral analysis of 160 frames of head microvibration information during photostimulation of the visual analyzer in 20 healthy volunteers is given. It was found that at the frequency of photostimulation lasting 10 minutes, the inhibition of the fundamental spectral harmonic occurs, which is most pronounced at 15-20 minutes after photostimulation and persists until the end of the study ($p=0,89$). As a result of this effect, 4-5 spectral harmonics arise with alternating excitation and inhibition. Frequency harmonics are related to the fundamental one as the ratio of integer fractions of the natural series. Harmonics with the ratio 16/15, 10/9, 6/5, 25/24 appeared with the highest frequency ($p=0,78$). This behavior is typical for a system of coupled multifrequency oscillators of the activating system of the brain. The acoustoencephalogram (AEG) correlates with the EEG and reflects the rhythmic activity and neuroreflex activity of the brain.

Keywords: human brain microvibration, brain activation system, frequency matrix of functional conditions variety, photo-stimulation.

Системный анализ сложных биологических систем возможен только при получении и обработке максимального объема информации. Большие массивы были получены при изучении гуморальной, гормональной, микробиологической, нервной, молекулярно-

генетической информации. Однако незаслуженно мало внимания уделяется механическим микровибрациям живых организмов, возможно, одному из самых важных и самых неизученных информационных каналов. Любая живая система от клеточных органелл (ядро, хромосомы, клеточная мембрана) до клеток и тканей (эритроциты, капилляры, сосуды, мышцы и пр.) является источником механических колебаний (от инфранизких до ультравысоких частот). Это позволяет считать колебательные процессы одним из основных проявлений жизни. Вибрационная чувствительность принадлежит к самым древним видам чувствительности. Очевидно, что слуховые и тактильные ощущения эволюционно выделились на основе анализа организмами механических микровибраций. Вибрационная чувствительность является одной из наиболее всеобъемлющих форм отражения связей человеческого организма с самыми разнообразными воздействиями внешней среды [1]. Важно, что как отдельные нервные клетки, нервные ганглии, их скопления, эффекторные клетки эпителиальной и соединительной ткани, разнообразные мышечные волокна - способны непосредственно, без участия чувствительных органов и рецепторов, воспринимать механические микровибрации [2]. Значительную часть спектра микровибраций занимают миофибриллы скелетной мускулатуры. Они перекрывают диапазон частот от 30 до 320 Гц в зависимости от функционального состояния мышц [3]. Источником вибраций в висцеральной сфере организма является гладкая мускулатура, спонтанные авторитмические режимы, свойственные большинству внутренних органов в диапазоне частот от единиц до сотых долей герца [4]. В физиологическом покое организма и в условиях фиксации головы наиболее сильным излучателем механических микровибраций является головной мозг. Оценка уровня напряжения механизмов стресса организма посредством регистрации микровибраций головы и лица была осуществлена с помощью анализа спектральных гармоник при скоростной киносъемке. Авторы рассматривают это явление как нейрорефлекторный феномен и проявление вестибулярного рефлекса [5]. В работе [6] с помощью пьезокерамических датчиков были исследованы сигналы механических микровибраций с поверхности кожи головы человека, и по схожести с обычной электроэнцефалограммой (ЭЭГ) они были названы акустоэнцефалограммой (АЭГ). В работе [7] была исследована зависимость частотных составляющих механических вибраций головного мозга от артериального и атмосферного давления.

В наших последних, более детальных исследованиях взаимосвязи ЭЭГ и АЭГ с получением корреляции огибающих спектра, выполнением функциональных проб с закрытыми и открытыми глазами показана тесная связь механических микровибраций головы с фоновой ритмической активностью головного мозга. Была предложена модель механизма генерации микровибраций в центральной нервной системе как результат

взаимодействия процессов нейроглиального метаболизма с механическими колебаниями мышечных стенок окружающих микрососудов – нейроваскулярного рефлекса [8; 9]. Наличие в составе эффекторов нейроваскулярного рефлекса как гладких мышц внутримозговых сосудов, так и достаточно «высокочастотных» прекапиллярных сфинктеров [9] делает возможным механические микровибрации сосудистой системы головного мозга в диапазоне частот от 0,1 до 27 Гц и фактически позволяет повторять ритмическую активность нервных клеток. Полученные фундаментальные результаты требуют дальнейшей разработки темы механических микровибраций головного мозга как надежного канала связи центральной нервной системы (ЦНС) со всеми без исключения периферическими эффекторами для поддержания и регуляции их функционального состояния. Отклик центральной нервной системы на зрительную фотостимуляцию хорошо изучен с помощью ЭЭГ, как нейрорефлекторный процесс [10]. Было изучено «навязывание» мозгу основной частоты фотостимуляции и образование спектральных гармоник. Поэтому было важно повторить эти исследования, но с регистрацией АЭГ механических микровибраций головного мозга.

Цель работы – изучение взаимосвязи механических микровибраций головы человека с ритмической активностью центральной нервной системы, вызванной фотостимуляцией зрительного анализатора.

Материал и методы исследования

Дизайн исследования был сформирован на основании требований к «учебному» проекту – исследование для оценки технологии, выявления новых научных фактов, подготовки проекта для более масштабных исследований и выделения в дальнейшем статистически значимых закономерностей. Для исследования спектра механических микровибраций головы нами был использован экспериментальный образец аппарата «Регистратор спектра микровибраций головного мозга человека РС АЭГ-01» [11-13]. Указанный аппарат посредством двух пьезоэлектрических датчиков механических микровибраций регистрировал суммарную «глобальную» ритмическую активность головы человека отдельно для правого и левого полушария и производил её спектральный анализ. Вибросенсоры располагались в височно-теменных областях левого и правого полушария. Такая схема расположения датчиков позволяла надежно снимать вибрационную активность левого и правого полушария головы в диапазоне частот от 27 до 0,13 Гц. Отдельно по той же схеме регистрировалась информация стандартными ЭЭГ-электродами. Вид сигналов, регистрируемых синхронно с датчика ЭЭГ в височно-теменном отведении слева (верхний график) и АЭГ с датчика механических микровибраций головы справа (нижний график), приведен на рисунке 1. Спектральный анализ полученных сигналов имел свои особенности.

Весь диапазон изучаемого сигнала от 0,13 до 27 Гц был разбит на 4200 полос, центральные частоты которых образуют геометрическую прогрессию с $q=2^{1/24}$ с опорной частотой 27,005 Гц. При этом спектральные гармоники, попавшие в одну из 4200 полос, интегрировались по амплитуде. Полученные с левого и правого полушария 8400 центральных частот с амплитудами спектральной оценки сворачивались в две спектральные матрицы размером 24 x 175 частотных ячеек. Исходя из характеристик пластичности активирующей системы мозга, время суммации сигнала по каждой спектральной ячейке было выбрано 160 секунд, как среднее время смены функциональных состояний при мозговой деятельности [14]. Частота квантования сигнала 256 Гц [11; 13].

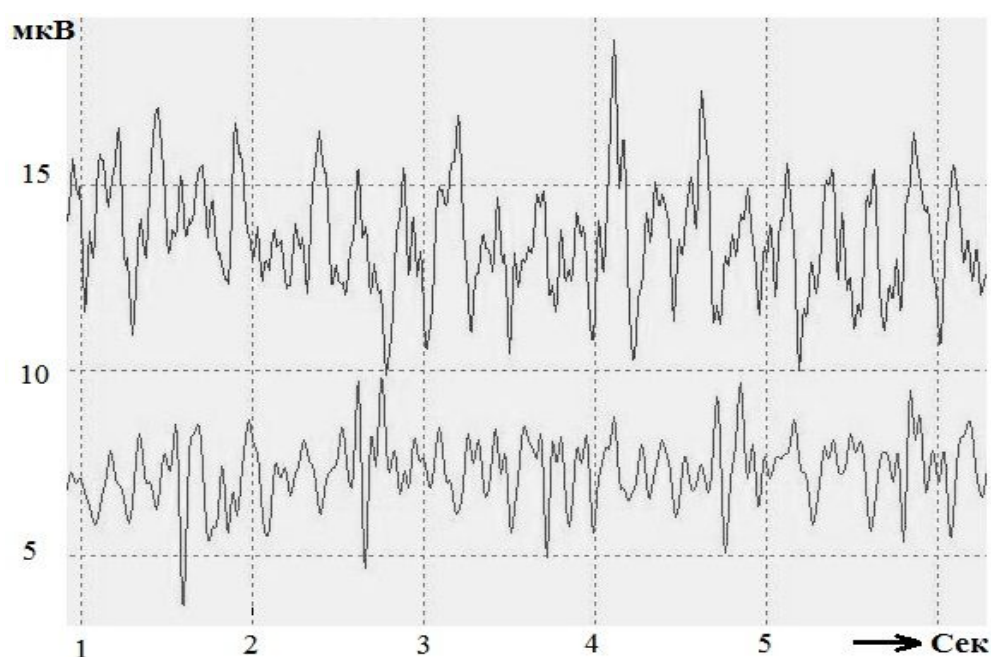


Рис. 1. Вид сигналов при синхронной регистрации ЭЭГ в височно-теменном отведении левого полушария (верхний график) и АЭГ с пьезоэлектрического датчика микровибраций с правого полушария (нижний график). По оси ординат - напряжение сигнала на выходе датчиков в мкВ, по оси абсцисс – время регистрации сигнала в секундах

Для изучения влияния навязывания ритма центральной нервной системе с помощью фотостимуляции и регистрации этого процесса с помощью датчиков ЭЭГ, датчиков АЭГ были использованы светодиодные очки, которые были подключены к генератору сигналов Rigol DG4162. Метрология исследования поддерживалась опорной частотой 10 мГц с рубидиевого стандарта частоты Ч1-103, которая использовалась как тактовая частота для генератора DG4162 и спектрального анализатора РС АЭГ-01. Это позволило выставлять частоту стимуляции в герцах с точностью не хуже пятого знака после запятой.

Для детального анализа фотостимуляции с регистрацией реакции АЭГ было изучено 160 кадров информации, полученных с 20 здоровых добровольцев, мужчин, в возрасте от 30 до 60 лет. Каждый информационный кадр – 160 сек. был получен с пьезоэлектрических датчиков АЭГ, установленных симметрично в височно-теменной области левого и правого полушария головного мозга. Для сравнения точно по такой же схеме проводилась фотостимуляция с регистрацией реакции спектра с классическими ЭЭГ-электродами. В полном покое испытуемому снимались фоновые три кадра по 160 сек. каждый. После регистрации первых трех кадров съем информации прекращался. Испытуемому осуществлялась ФС на оба глаза длительностью 10 минут. Частота экспозиции в приведенном примере составляла 5,13834 Гц, форма импульсов – меандр. Контрольные кадры по 160 сек. брались сразу после фотостимуляции, через 10, 15, 20, 30 минут после ФС.

Результаты исследования и их обсуждение. На рисунке 2 показан график разностной функции спектрального рельефа (1 кадр контроль минус среднее из 3 кадров фон) в области частоты фотостимуляции 5,13834 Гц. Контроль в данном примере на 20-й минуте после фотостимуляции. Контрольные кадры регистрировались сразу после фотостимуляции, через 10, 15, 20, 30 минут после ФС. Максимальная реакция обычно наблюдалась на 15-20-й минуте после ФС и регистрировалась до конца исследования. На графике рисунка 2 видно, что после окончания процедуры ФС в спектре акустоэнцефалограммы выявлялась депрессия основного тона 5,13834 Гц. Головной мозг за 10 минут ФС с высокой точностью «запомнил» и хранил следы информации достаточно длительное время, не менее 30 минут после окончания ФС. Обычно в вызванных осцилляциях ретикулярной активирующей системы мозга депрессия ритма может сохраняться значительно дольше, чем активация, носящая, как правило, кратковременный характер. На контрольных кадрах через 20 минут после фотостимуляции наблюдалось подавление основной спектральной гармоники преимущественно в левом полушарии. В окрестности центральной частоты фотостимуляции F_i (ниже и выше по частотной оси) наблюдалось появление 3-5 спектральных гармоник активации и торможения амплитуды. Отношение частот спектральных гармоник к основной или центральной частоте фотостимуляции соответствовало законам натурального звукоряда (81/80, 25/24, 16/15, 27/25, 10/9, 9/8, 75/64, 6/5, 5/4 и т.п.).

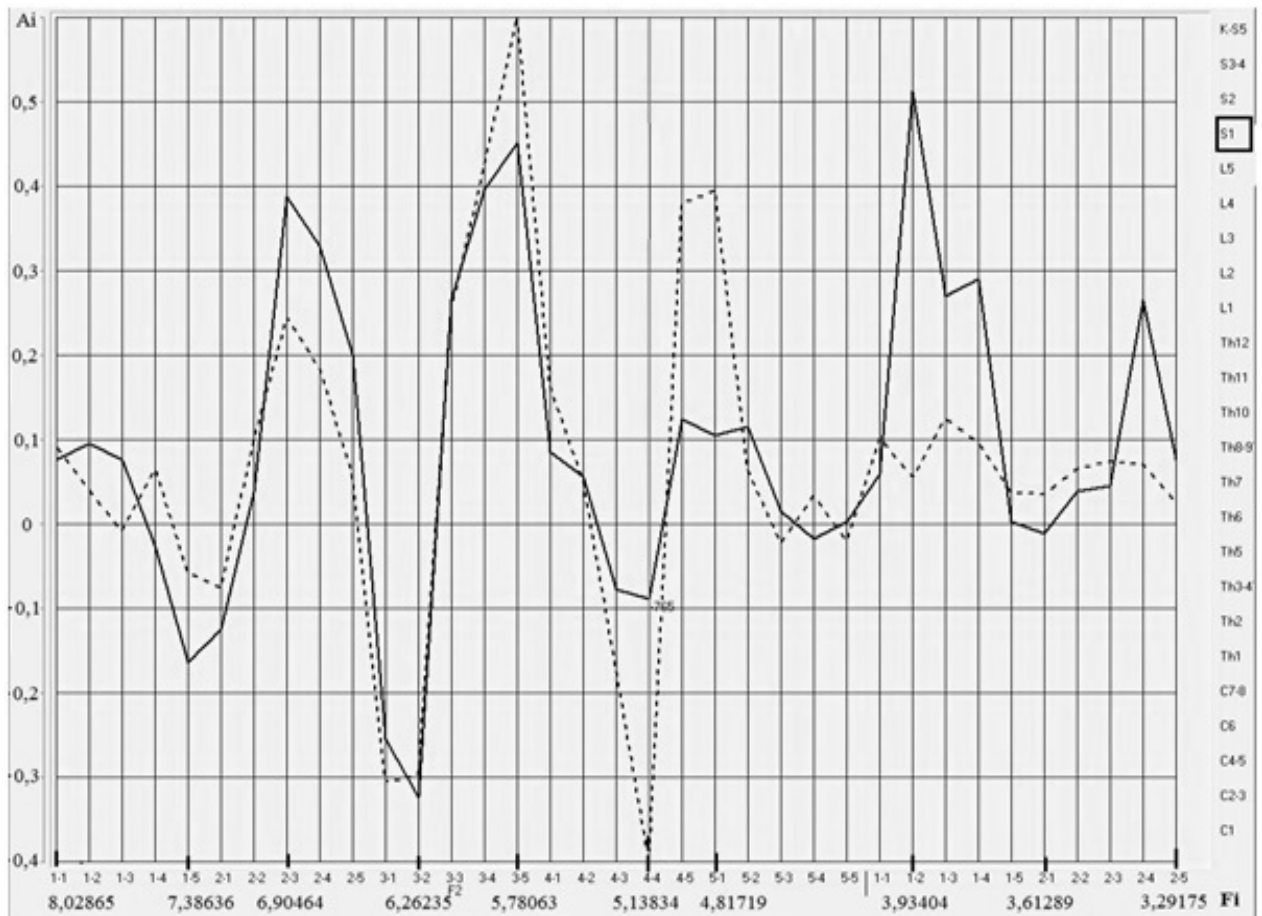


Рис. 2. График огибающей спектра разностной функции «контроль минус усредненный фон» после фотостимуляции зрительного анализатора на частоте 5,13834 Гц. Контроль на 20-й минуте после фотостимуляции. По оси ординат слева - амплитуда A_i разностной функции в относительных единицах. По оси абсцисс частота в Гц F_i

На рисунке 3 показано, что помимо основной частоты ФС – «Унисон» (выделено серым цветом) возникает ряд частотных гармоник, отличающихся от основной как дробные числа. Здесь представлены отношения $9/8$, $6/5$, $16/15$, $96/25$, которые являются элементами натурального звукоряда. Фактически появление любой гармоники основного тона можно предсказать с высокой точностью. На основании изучения 160 кадров информации с 20 добровольцев было получено, что наиболее часто (0,4) встречалась гармоника $16/15$ (хроматический полутон), с частотой (0,2-0,3) встречались гармоники $10/9$ (малый целый тон), $9/8$ (большой целый тон) и $6/5$ (малая терция). Частотные гармоники активации и торможения после фотостимуляции могут отличаться на три десятых герца, что накладывает высокие метрологические требования к проведению подобных исследований. Вероятность того, что после фотостимуляции боковые спектральные гармоники попадут в расчетные

коридоры, подобно отношениям в натуральном целочисленном звукоряде, из 640 реализаций составила $p = 0,78$. Вероятность того, что центральная частота фотостимуляции будет представлена в частотной матрице торможением составила $p_i = 0,89$. Такие явления могут быть свойственны только для системы спонтанно активных многочастотных и связанных между собой осциллирующих элементов.

Совершенно очевидно, что акустоэнцефалограмма (АЭГ) в данном случае регистрирует нейрорефлекторный процесс – память ритма навязанного ФС зрительного анализатора в осцилляторной системе головного мозга человека.

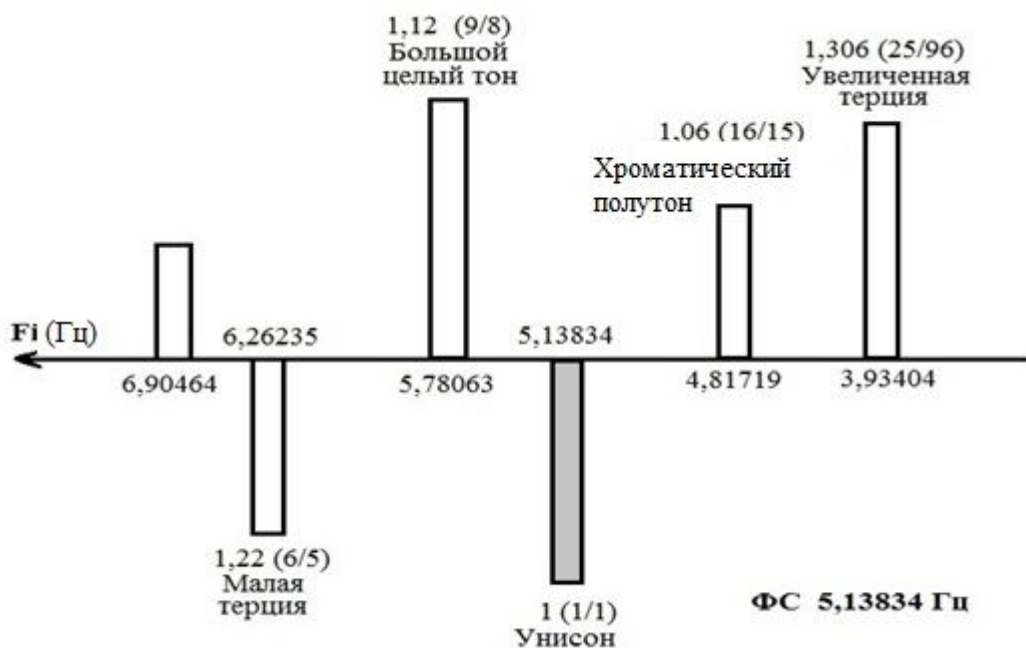


Рис. 3. Спектральные гармоники, возникшие при ФС частотой 5,13834 Гц (выделено серым), их отношение к частоте фотостимуляции – унисону. Названия гармоник в системе натурального звукоряда

Выводы. В работах [8; 12] нами было показано, что ЭЭГ и АЭГ коррелируют между собой по отдельным спектральным полосам с коэффициентом корреляции от 0,6 до 0,8. Между сигналом ЭЭГ и механическими микровибрациями головы (АЭГ) регистрируются закономерные связи. В настоящем исследовании мы показали, что при фотостимуляции зрительного анализатора в ЦНС происходит «навязывание» частоты фотостимуляции многочастотным осцилляторам активирующей системы мозга. Регистрация велась как с помощью ЭЭГ-, так и АЭГ-датчиков. При этом на частоте фотостимуляции закономерно возникает торможение амплитуды соответствующей гармонии (вероятность $p_i = 0,89$). При этом сигналы ЭЭГ и АЭГ ведут себя с одинаковыми эффектами. Помимо торможения основной гармонии на частоте фотостимуляции, возникает 4-5 спектральных

гармоник с чередующимися возбуждением и торможением активности. Основная частота фотостимуляции и частоты спектральных гармоник находятся в дробных целочисленных отношениях подобно натуральному частотному звукоряду (вероятность $p=0,78$). Такое явление может быть свойственно только для системы спонтанно активных многочастотных и связанных между собой осциллирующих элементов. Совершенно очевидно, что акустоэнцефалограмма (АЭГ) в данном случае регистрирует нейрорефлекторный процесс – память ритма навязанного ФС зрительного анализатора в осцилляторной системе головного мозга. Акустоэнцефалограмма (АЭГ) коррелирует с ЭЭГ и отражает ритмическую активность и нейрорефлекторную деятельность головного мозга.

Список литературы

1. Волчек О.Д., Алексина Л.А. Использование вибрации и виброакустики в медицине // Ученые записки СПбГМУ им. академика И.П. Павлова. 2011. Т. 18. № 1. С. 12–21.
2. Насонов Д.Н., Равдоник К.С. Прямое влияние слышимых звуков на нервные клетки изолированных спинномозговых ганглиев // ДАН СССР. 1950. Т. 71. № 5. С. 985–987.
3. Бувеч В.А., Янин В.А. Некоторые закономерности в распределении частот автоколебаний нервно-мышечной системы // Биофизика. 1994. Т. 39. Вып. 3. С. 548–553.
4. Бурсиан А.В. Пейсмекеры висцеральных систем // Успехи физиологических наук. 2008. Т. 39. № 4. С. 3–13.
5. Минкин В.А. Виброизображение. СПб. : Реноме, 2007. 108 с.
6. Миргородский В.И., Герасимов В.В., Пешин С.В. Обнаружение новых акустических сигналов // Акустический журнал. 2014. Т. 60. № 4. С. 437–442.
7. Алексеева И.И., Исаков Р.В. Исследование зависимости спектральных составляющих микровибраций головного мозга от артериального и атмосферного давления // Материалы XIII Международной научной конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии». Секция 8. Экология и здоровье человека (г. Суздаль, 3-5 июля 2018). 2018. С. 374-377.
8. Шабанов Г.А., Лебедев Ю.А., Рыбченко А.А., Максимов А.Л., Короченцев В.И. Исследование спектра акустического поля головного мозга человека // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2017. № 3. С. 115–121.
9. Grubb, S., Cai, C., Hald, B.O. Precapillary sphincters maintain perfusion in the cerebral cortex. Nature Communications. 2020. V.11. P. 395. DOI: 10.1038/s41467-020-14330-z.

10. Bondar Alexandr, Shubina Liubov. Nonlinear reaction of limbic structure electrical activity in response to rhythmical photostimulation in guinea pigs. Brain Research Bulletin. 2018. Vol. 143. P. 73-82. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2018.10.002>
11. Шабанов Г.А., Максимов А.Л., Рыбченко А.А. Функционально-топическая диагностика организма человека на основе анализа ритмической активности головного мозга. Владивосток: Дальнаука, 2011. 206 с.
12. Пегова Е.В., Меркулова Г.А., Лебедев Ю.А., Шабанов Г.А., Рыбченко А.А. Новый класс лечебно-диагностических комплексов на основе спектрального анализа биоакустической активности головного мозга человека// Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2020. N2. С. 114–122. DOI: 10.34078/1814-0998-2020-2-114-122
13. Шабанов Г.А., Лебедев Ю.А., Рыбченко А.А., Фейгин С.А., Зубков И.А. Регистратор спектра ритмической активности головного мозга // Патент на полезную модель № 180056 РФ. Патентообладатель НИЦ «Арктика» ДВО РАН. 2018. Бюл. № 16.
14. Илюхина В.А. Нейрофизиология функциональных состояний. Л.: Наука, 1986. 171с.