

ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ ПРИМАТОВ НА РИТМИЧЕСКУЮ ФОТОСТИМУЛЯЦИЮ

М. А. Климук* (1), Л. Е. Иванова (2), И. А. Варовин (2), Д. Н. Подвигина (1, 2),
А. К. Хараузов (2)

mnklimuk@gmail.com

1 – СПбГУ, Санкт-Петербург; 2 – Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН,
Санкт-Петербург

Аннотация. Для обработки зрительной информации необходима синхронизация ритмической активности нейронных ансамблей, выполняющих одну и ту же задачу. Это подразумевает существование у областей, выполняющих одну и ту же задачу, схожих доминантных частот. Предполагается, что ритмическая фотостимуляция на доминантных частотах может вызывать резонансный эффект за счет того, что частота внешнего раздражителя совпадает с доминантной частотой работы головного мозга. Более подробные исследования резонансного феномена на человеке затруднены. Зрительная система примата *Macaca mulatta* схожа со зрительной системой человека. Кроме того, примат данного вида обладает близким филогенетическим родством к человеку. Целью исследования было выявление резонансных реакций и их сравнение с доминантными частотами биоэлектрической активности головного мозга примата *Macaca mulatta*. Было исследовано три примата. Осуществлялась фотостимуляция с частотами от 2 до 46 Гц с шагом в 2 Гц. Было выявлено существование резонансных реакций для частот около 10, 20 и 40 Гц, что схоже с данными о резонансных реакциях головного мозга человека. Было также отмечено частичное совпадение резонансных и доминантных частот. Полученные данные свидетельствуют в пользу того, что примат данного вида может быть рассмотрен в качестве модельного организма для более подробного изучения резонансного феномена головного мозга человека.

Ключевые слова: фотостимуляция, *Macaca mulatta*, резонансный феномен, ЭЭГ, ритмическая активность

Для обеспечения как относительно простых, так и более сложных психических процессов, например когнитивных, нейронные ансамбли синхронизируют свою ритмическую активность (Gray et al., 1989; Herrmann, 2001). Если для нейронных ансамблей характерны определенные частоты синхронизации, логично предположить, что такие частоты являются для них доминантными. Ритмический раздражитель, колеблющийся с частотой, доминантной для нейронного ансамбля, должен вызывать резонансный эффект, так как резонанс — это отклик колебательной системы на периодический внешний раздражитель, частота колебаний которого совпадает с частотой, характерной для колебательной системы (Прохоров, 1994).

В исследованиях электрофизиологических реакций головного мозга человека в ответ на фотостимуляцию было выявлено существование резонансного феномена для частот около 10, 20, 40 и 80 Гц (Herrmann, 2001). Однако ряд вопросов остался без ответа. Например, неизвестно, где находится источник генерации резонансной реакции – это корковые или более низшие структуры, почему резонансный феномен наблюдается на кратных частотах, свойствен ли резонансный феномен и другим живым организмам.

Более подробное изучение резонансного феномена, например, с использованием инвазивных методов, на человеке затруднено. Кроме того, для исследований с участием человека применяют непродолжительную стимуляцию, так как продолжительная может вызвать эпилептический припадок. Если примат *Macaca mulatta* обладает схожими резонансными частотами, можно будет предположить, что примат данного вида является хорошей моделью для более подробного изучения резонансного феномена у человека.

Цели исследования – выявление резонансных частот мозга приматов *Macaca mulatta* и сравнение резонансных частот с доминантными частотами биоэлектрической активности головного мозга примата данного вида.

Таким образом, в исследовании проверялось два предположения:

1. Примат *Macaca mulatta* обладает схожими с человеческими резонансными частотами биоэлектрической активности головного мозга.
2. Резонансные и доминантные частоты головного мозга *Macaca mulatta* совпадают.

Методика

Было исследовано три примата Н9, Л9 и Ю8 вида *Macaca mulatta* мужского пола, средний возраст которых составлял 8 лет.

В качестве методики была выбрана 12-канальная ЭЭГ. Электроды были установлены аналогично стандартной системе постановки электродов 10–20 у человека. Для регистрации биоэлектрических сигналов мозга использовались титановые микровинты для краниопластики, закрепленные в черепной кости животного в непосредственной близости от коры, однако не контактирующие с ней.

Фотостимуляция осуществлялась частотами от 2 до 46 Гц с шагом в 2 Гц. Длительность стимуляции каждой частотой составляла 3 минуты. Эксперимент повторяли от 13 до 35 дней. Таким образом, количество записей для одного животного варьировалось от 13 до 35 штук.

Для каждой записи проводилось удаление артефактов, после чего для каждого участка записи, соответствующего определенной частоте, применялся спектральный анализ. Анализировали мощность первой гармоники в спектре, совпадающей с частотой стимуляции. Данные накапливались и усреднялись. По усредненным данным происходило построение графиков.

Спектры живых систем представляют из себя 1/f-шум: чем выше частота, выраженная по оси X, тем меньше амплитуда, выраженная по оси Y. Следовательно, на графиках каждая последующая точка должна располагаться ниже предыдущей. Если последующая точка располагается выше предыдущей,

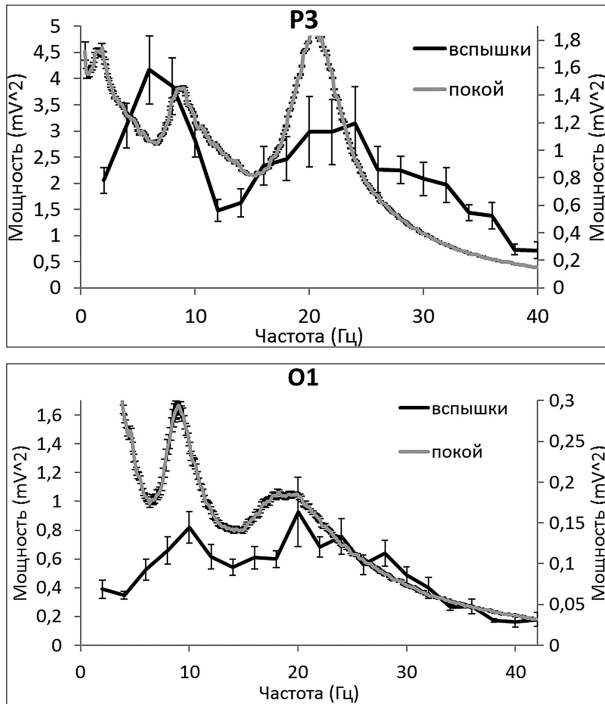


Рисунок 1. Сравнение резонансных и доминантных частот. Примат Н9

то есть кривая не идет на спад, а, наоборот, возрастает, значит, фотостимуляция в данной точке (то есть на данной частоте стимуляции) вызвала резонансный эффект. Значимость различий между точками проверялась при помощи парного непараметрического критерия В.

Доминантные частоты вычислялись по спектрам ЭЭГ, регистрируемым в состоянии покоя.

Частота дискретизации кривых «вспышки» — 2 Гц, а кривой «покой» — 0,245 Гц.

Результаты

Наиболее выраженные резонансные реакции наблюдались в теменной коре. У примата Н9 в затылочных отведениях резонансная реакция прослеживалась для частот 6–8 Гц ($p < .05$), 20–24 Гц ($p < .05$) (рис. 1). В затылочном отведении — 10 Гц ($p < .05$) и 20 Гц (незначима) (рис. 1) наблюдается совпадение резонансных и доминантных частот головного мозга около 10 и 20 Гц в теменных отведениях и в затылочных для частоты около 10 Гц (рис. 1).

У примата Л9 в теменном отведении (рис. 2, рис. 3) наблюдается резонансная реакция для частот 8 Гц ($p < .05$), 16–18 Гц ($p < .05$), 38 Гц ($p < .05$).

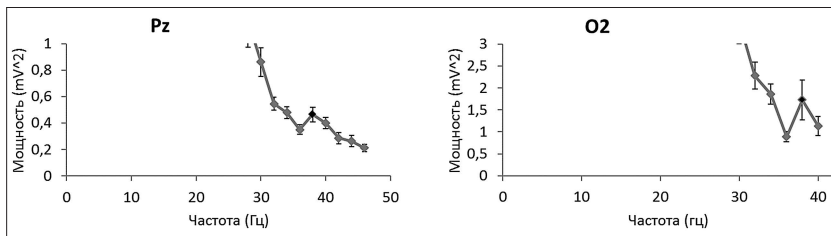


Рисунок 2. Резонансные реакции в отведении Pz, Oz и O2. Примат L9

В затылочных отведениях (рис. 2, рис. 3) – 6–8 Гц ($p < .05$), 16–18 Гц ($p < .05$), 38 Гц ($p < .05$). Масштаб на графиках, отражающих резонансную реакцию для 38 Гц, увеличен. Наблюдается совпадение резонансных и доминантных частот в затылочных и теменных отведениях в диапазоне частот около 10 Гц (рис. 3).

У примата Ю8 в теменном отведении (рис. 4) прослеживается резонансная реакция для частот 8 Гц ($p < .05$), 20 Гц (незначима), в затылочном (рис. 4) – для частоты 12 Гц ($p < .05$). Наблюдалось совпадение резонансных и доминантных частот состояния покоя около 10 Гц (рис. 4). Совпадение доминантных

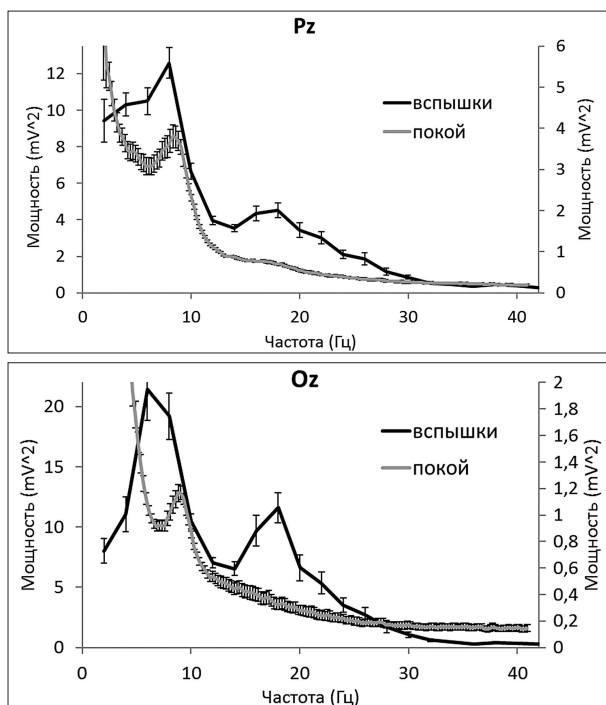


Рисунок 3. Сравнение резонансных и доминантных частот. Примат L9

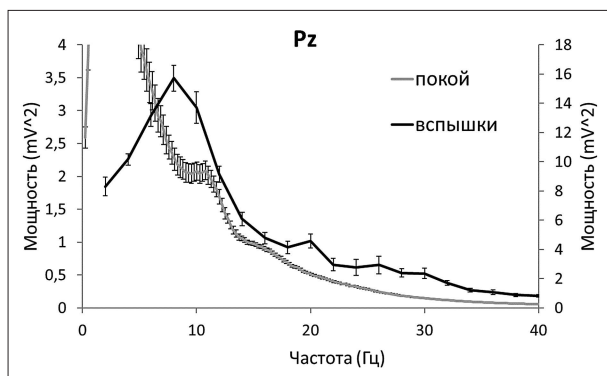


Рисунок 4. Сравнение резонансных и доминантных частот. Примат Ю8

и резонансных частот прослеживалось лишь в теменных отведениях для частоты около 10 Гц.

Обсуждение и выводы

Резонансные реакции мозга примата *Macaca mulatta* прослеживаются для частот около 10, 20 и 40 Гц, что сходится с данными, полученными в аналогичном исследовании работы мозга человека. Это дает возможность предположить, что примат данного вида может рассматриваться в качестве модельного организма для изучения резонансного феномена. Следует отметить, что чем выше была частота стимуляции, тем реже для нее прослеживались резонансные реакции, что может быть вызвано тем, что более низкочастотные ритмы связаны с более простыми функциями, свойственными большинству живых организмов, в то время как более высокочастотные ритмы чаще связываются с более сложными когнитивными процессами.

Наблюдается частичное совпадение доминантных и резонансных частот биоэлектрической активности головного мозга примата *Macaca mulatta*. Такое совпадение может быть неслучайно. Кроме того, в данном исследовании при фотостимуляции появлялись не только те частоты, которые прослеживались в состоянии покоя (например, 40 Гц). Вероятно, такие частоты являются доминантными в других состояниях. Следовательно, можно предположить, что фотостимуляция может быть использована как метод, позволяющий выявить доминантные частоты разных состояний. Схожее предположение также выдвигалось в других исследованиях (Lazarev et al., 2001; Walker et al., 1944), однако этот вопрос требует дальнейшего изучения.

Литература

Резонанс // Физическая энциклопедия. Большая Российская энциклопедия / Под ред. А. М. Прохорова. Москва: Советская энциклопедия, 1994. Т. 4. С. 308 – 308.

Gray C. M., König P., Engel A. K., Singer W. Oscillatory responses in cat visual cortex exhibit inter-columnar synchronization which reflects global stimulus properties // *Nature*. 1989. Vol. 338. No. 6213. P. 334 – 337. [doi:10.1038/338334a0](https://doi.org/10.1038/338334a0)

Herrmann C. S. Human EEG responses to 1–100 Hz flicker: Resonance phenomena in visual cortex and their potential correlation to cognitive phenomena // *Experimental Brain Research*. 2001. Vol. 137. No. 3 – 4. P. 346 – 353. [doi:10.1007/s002210100682](https://doi.org/10.1007/s002210100682)

Lazarev V., Simpson D., Schubsky B., deAzevedo null L. Photic driving in the electroencephalogram of children and adolescents: Harmonic structure and relation to the resting state // *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*. 2001. Vol. 34. No. 12. P. 1573 – 1584. [doi:10.1590/s0100-879x2001001200010](https://doi.org/10.1590/s0100-879x2001001200010)

Walker A. E. Photic driving // *Archives of Neurology And Psychiatry*. 1944. Vol. 52. No. 2. P. 117 – 125. [doi:10.1001/archneurpsyc.1944.02290320032004](https://doi.org/10.1001/archneurpsyc.1944.02290320032004)

ELECTROPHYSIOLOGICAL REACTIONS OF PRIMATES TO RHYTHMIC PHOTOSTIMULATION

М. А. Климуk* (1), Л. Е. Иванова (2), И. А. Варовин (2), Д. Н. Подвигина (1, 2), А. К. Харauзов (2)

mnklimuk@gmail.com

1 – Saint Petersburg University, Saint Petersburg; 2 – I. P. Pavlov Institute of Physiology RAS, Saint Petersburg

Abstract. The processing of visual information requires synchronization of the rhythmic activity of neural ensembles performing the same task. This implies the existence of similar dominant frequencies in areas that perform the same task. It is assumed that rhythmic photostimulation at dominant frequencies may cause a resonant effect, due to the fact that the frequency of an external stimulus coincides with the dominant frequency of the brain. More detailed studies of the resonance phenomenon in humans are difficult. The visual system of the macaque primate is similar to the human visual system. In addition, the primate of this species has a close phylogenetic relationship to humans. The aim of the study was to identify the resonance reactions of the macaque brain and to compare them with the dominant frequencies. Three primates were investigated. The photostimulation was carried out with frequencies from 2 to 46 Hz with a step of 2 Hz. The existence of resonance reactions for frequencies of 10, 20, and 40 Hz, which is similar to the data on the resonance reactions of the human brain, was elucidated. A partial coincidence of the resonant and dominant frequencies was noted. The data obtained suggest that the macaque can be considered as a model organism for a more detailed study of the resonant phenomenon of the human brain.

Keywords: photostimulation, *Macaca mulatta*, resonance phenomenon, EEG, rhythmic activity