

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ УСТОЙЧИВЫХ ЗРИТЕЛЬНЫХ ВЫЗВАННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ПРИ РАЗНЫХ ЧАСТОТАХ ФОТОСТИМУЛЯЦИИ

© 2019 г. Я.А. Туровский* **, С.В. Борзунов*, А.С. Суровцев*,
С.А. Зайцев*, А.С. Коновской*

*Воронежский государственный университет, 394018, Воронеж, Университетская пл., 1

**Институт проблем управления РАН им. В.А. Трапезникова, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65

E-mail: yaroslav_turovsk@mail.ru

Поступила в редакцию 14.08.18 г.

После доработки 02.12.18 г.

Принята к публикации 11.02.19 г.

Проведен анализ формирования устойчивых зрительных вызванных потенциалов на основе зрительных вызванных потенциалов. При использовании регрессионной модели показано, что локализация по времени зрительных вызванных потенциалов при накоплении устойчивых зрительных вызванных потенциалов играет определенную роль, заключающуюся в разных значениях регрессионных коэффициентов, задаваемых для зрительных вызванных потенциалов с разным фазовым сдвигом в отношении друг друга. Линейная регрессионная модель для частоты фотостимуляции 14 Гц лучше описывает значения устойчивых зрительных вызванных потенциалов при циклическом повторении зрительных вызванных потенциалов, чем для частоты 8 Гц. В подавляющем большинстве случаев число выявленных на спектрах в частотно-временной области групп частотных пиков (цепочек локальных максимумов), больше для сигналов с частотой 8 Гц, чем для сигналов с частотой 14 Гц. Данная зависимость сохраняется для устойчивого зрительного вызванного потенциала, полученного непосредственно с пользователя, в отличие от «искусственно синтезированного» из зрительного вызванного потенциала. В случае фотостимуляции частотой в 14 Гц частотные компоненты сигнала как увеличивающиеся, так и уменьшающиеся свой период встречаются одинаково часто, а в случае частоты 8 Гц наблюдается увеличение числа цепочек локальных максимумов, частота которых уменьшается. Продемонстрировано наличие группы пользователей, которые реагируют на высокочастотную фотостимуляцию в виде снижения числа выраженных частотных компонент, участвующих в формировании вызванного потенциала. При этом модуляция частотных компонент в нативном устойчивом зрительном вызванном потенциале носит, преимущественно, характер снижения частоты в сигнале, чего не наблюдается при модельном воспроизведении в виде конструирования сигнала из последовательности зрительных вызванных потенциалов этого же пользователя.

Ключевые слова: электроэнцефалограмма, вейвлет-анализ, локальные спектры, вызванные потенциалы, устойчивые зрительные вызванные потенциалы.

DOI: 10.1134/S0006302919020145

Устойчивые зрительные вызванные потенциалы (SSVEP) являются одним из феноменов электрической активности мозга, лежащим в основе синхронных интерфейсов «мозг–компьютер» [1–3], где под «синхронностью» подразумевается то, что в ходе работы темп и характер взаимодействия во многом задается программно-аппаратным комплексом интерфейса.

Сокращения: SSVEP – steady state visually evoked potentials (устойчивые зрительные вызванные потенциалы), ЗВП – зрительный вызванный потенциал, ЦЛМ – цепочки локальных максимумов.

SSVEP возникает в затылочных областях мозга при периодической фотостимуляции, значительно увеличивая амплитуду при концентрации внимания пользователя на источнике воздействия. Однако более известен классический зрительный вызванный потенциал (ЗВП), неоднократно описанный в литературе и хорошо изученный как для нормы, так и для целого ряда патологий [4]. Таким образом, в ответ на периодическую фотостимуляцию формируются два феномена: потенциалов ЗВП (рис. 1а), традиционно регистрируемых при низких частотах порядка 1–4 Гц, и SSVEP, традиционно реги-

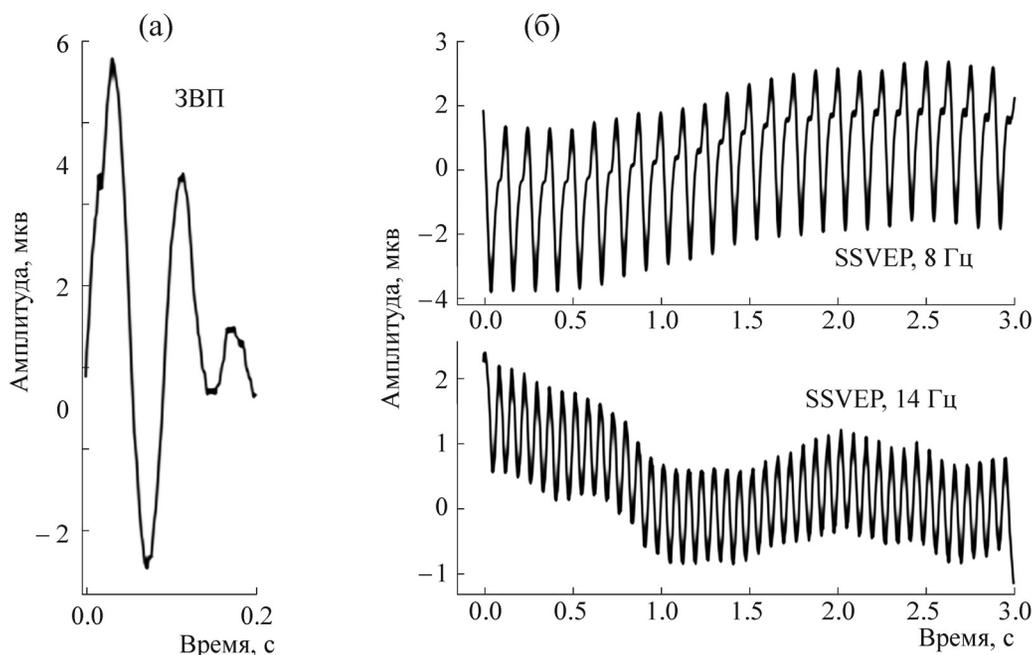


Рис. 1. Примеры зрительного вызванного потенциала и устойчивого зрительного вызванного потенциала с разными частотами фотостимуляции.

стрируемых при более высоких частотах фотостимуляции, преимущественно в диапазоне α - и β -ритмов. Предположим, что SSVEP имеет две составляющих: первая является следствием линейной или нелинейной суммации более низкочастотных ЗВП, а вторая – отображает процессы, не связанные с ЗВП и являющиеся «эндогенными» для SSVEP в том смысле, что представляют собой процессы, характерные только для SSVEP и не характерные для ЗВП.

Целью данной работы является: моделирование формирования устойчивых зрительных вызванных потенциалов (SSVEP) в условиях фотостимуляции различной частоты.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании приняли участие 30 человек обоего пола (12 девушек и 18 юношей) в возрасте от 18 до 22 лет. Все испытуемые имели нормальное или скорректированное до нормального зрение. В ходе эксперимента испытуемый располагался в кресле, заняв удобную для себя позу перед фотостимулятором из четырех диодов белого цвета (мощностью 0,5 Вт каждый) на расстоянии от 0,5 до 0,75 м. Регистрацию электроэнцефалографической активности проводили во второй половине дня, начиная с 14.00, с помощью прибора «Нейрон-Спектр-4 ВП» производства ООО «Нейрософт» (Россия) с включенным режекторным фильтром и вы-

ключенными фильтрами высоких и низких частот на частоте дискретизации 5 кГц. Регистрация электроэнцефалографической активности осуществлялась электродами в позициях O1, O2, Oz, P3, P4, Pz, индифферентным электродом служил объединенный ушной электрод. Фотостимуляцию осуществляли на одной частоте всеми диодами без сдвига по фазе. Частоты фотостимуляции составляли 1 Гц для получения эталонного ЗВП, 8 и 14 Гц – для получения SSVEP. Число суммирований для каждого вида вызванного потенциала равнялось 100.

В качестве метода спектральной обработки применяли преобразование Фурье и непрерывное вейвлет-преобразование с действительной частью вейвлета Морлет ($\omega_0 = 2\pi$). Каждый из сигналов перед дальнейшей обработкой подвергали фильтрации в виде прямого, а затем обратного преобразования Фурье с сохранением коэффициентов в диапазоне от 3 до 20 Гц. Результатом непрерывного вейвлет-преобразования являлась матрица коэффициентов вейвлет-преобразования, каждый элемент которой в дальнейшем возводили в квадрат: $W^2(a, b)$. Полученные значения $W^2(a, b)$ отражают «энергию» сигнала в окрестности значения масштаба (или частоты) a в момент времени b [5]. Таким образом, были получены локальные энергетические спектры сигнала, отражающие амплитуду формирующих его разночастотных элементов. Анализ поверхности W^2 в координатах a, b проводили с использованием локальных спек-

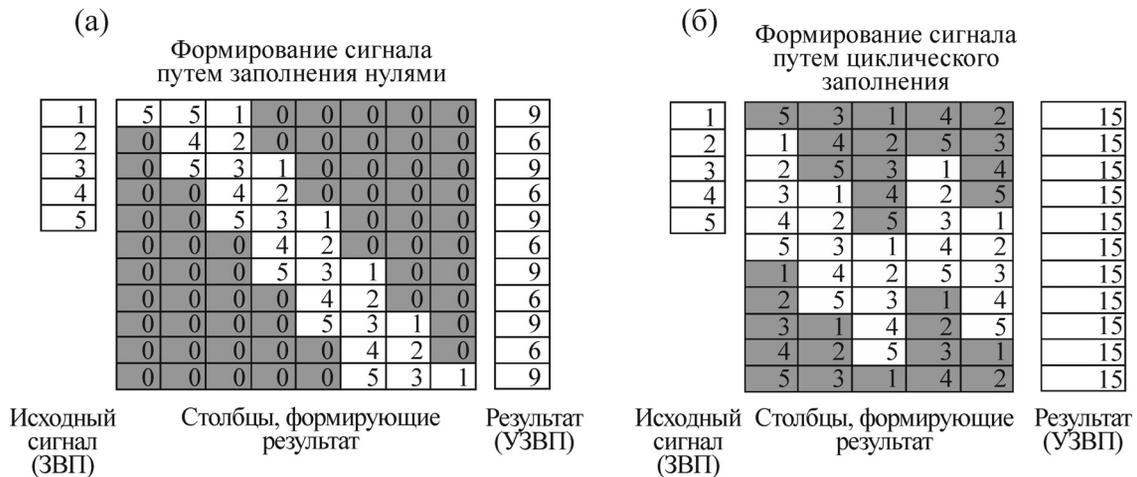


Рис. 2. Варианты построения устойчивых зрительных вызванных потенциалов на основе зрительных вызванных потенциалов.

тров, когда строится набор скейлограмм (локальных спектров), что позволяет сформировать изменяющиеся во времени цепочки локальных максимумов (ЦЛМ). Выявляются пять специфических типов динамики ЦЛМ [6]: стабильно растущая по частоте ЦЛМ (тип 1); стабильно убывающая по частоте ЦЛМ (тип 2); ЦЛМ, практически не изменяющаяся в частотном пространстве (тип 3); ЦЛМ, демонстрирующая сначала рост частоты локальных максимумов, а потом ее уменьшение (тип 4); ЦЛМ, в которой частота локальных максимумов первоначально уменьшается при последующем ее росте (тип 5).

В статистическом анализе полученных результатов использовали методы дескриптивной статистики. Учитывая, что распределения большинства показателей не являются нормальными, применяли критерии непараметрической статистики – критерии Краскела–Уоллеса, Манна–Уитни, Фридмана и Вилкоксона для парных случаев [7,8], при этом параметр α принимали равным 5%. Для выявления индивидуальных и групповых особенностей исследуемых показателей применяли кластерный анализ (метод K -средних). Учитывали эффект множественных сравнений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе рассмотрим возможные варианты комбинации ЗВП для получения линейной регрессионной модели. Варианты представлены на рис 1. Как видно из рисунка, первый вариант подразумевает построение серии ЗВП с занулением сигнала за пределами эпохи накопления ВП (рис. 2а). При этом воз-

можно как использование полученной матрицы мгновенных амплитуд ЗВП (независимые переменные) для попытки предсказать значения SSVEP (зависимая переменная), так и получение одной независимой переменной как суммы ЗВП, что необходимо для исключения влияния нулей, которыми дополняли ЗВП, на регрессионные коэффициенты. Однако при этом, очевидно, вес каждого из ЗВП принимается равным для всей серии. Второй вариант (рис. 2б) основан на циклическом заполнении для каждого ЗВП серии. Иными словами, после завершения одного ЗВП этот же сигнал продолжался дальше до конца эпохи анализа SSVEP. При этом, как и в предыдущем случае, используется еще один вариант с получением одного общего сигнала (независимая переменная) за счет сложения мгновенных амплитуд ЗВП, приходящихся на один момент времени. Результаты в виде значений так называемого «скорректированного» R^2 представлены в табл. 1. Как известно, данный показатель отражает, насколько успешно независимые переменные могут описать зависимую переменную [9]. Из табл. 1 видно, что во всех случаях, кроме циклического заполнения исходных значений для частоты в 8 Гц, один сформированный из ЗВП сигнал показывал гораздо более низкие значения R^2 , чем в случае, когда значения мгновенных амплитуд каждого из ЗВП анализировались отдельно. Из этого можно сделать вывод, что локализация по времени ЗВП при формировании SSVEP играет определенную роль, выражающуюся в разных значениях коэффициентов регрессии, задаваемых ЗВП с разным фазовым сдвигом в отношении друг друга. Следует обратить внимание, что во всех случаях для каждого пользователя применяли его индивидуальный ЗВП,

Таблица 1. Значения «улучшенного» R^2 ($M \pm m$) при регрессионном анализе ЗВП, формирующих SSVEP ($M \pm m$)

Формирование сигнала	Отведения	8 Гц		14 Гц	
		Заполнение нулями**	Циклическое заполнение	Заполнение нулями**	Циклическое заполнение**
Сумма ЗВП с равными весами мгновенных амплитуд (вариант А)	P3	0,28 ± 0,04	0,28 ± 0,04	0,25 ± 0,04	0,25 ± 0,04
	O1	0,24 ± 0,04	0,24 ± 0,04	0,25 ± 0,04	0,25 ± 0,04
	P4	0,30 ± 0,05	0,30 ± 0,05	0,22 ± 0,03	0,21 ± 0,03
	O2	0,25 ± 0,04	0,25 ± 0,04	0,19 ± 0,04	0,19 ± 0,04
	Pz	0,30 ± 0,05	0,30 ± 0,05	0,21 ± 0,04	0,21 ± 0,04
	Oz	0,30 ± 0,05	0,30 ± 0,05	0,20 ± 0,04	0,20 ± 0,04
Сумма ЗВП с разными весами равными регрессионным коэффициентам (вариант Б)	P3	0,36 ± 0,04	0,28 ± 0,04♦♦	0,40 ± 0,03	0,83 ± 0,03♦
	O1	0,31 ± 0,04	0,24 ± 0,04♦♦	0,44 ± 0,04	0,76 ± 0,04♦
	P4	0,37 ± 0,04	0,30 ± 0,05♦♦	0,38 ± 0,03	0,87 ± 0,02♦
	O2	0,34 ± 0,04	0,25 ± 0,04♦♦	0,35 ± 0,04	0,85 ± 0,02♦
	Pz	0,38 ± 0,04	0,30 ± 0,05♦♦	0,41 ± 0,04	0,82 ± 0,03♦
	Oz	0,37 ± 0,04	0,30 ± 0,05♦♦	0,39 ± 0,04	0,82 ± 0,03♦

Примечание. ** $p < 0,001$ – сравнение сигналов в варианте А с сигналами в варианте Б; ♦ $p < 0,05$ – сравнение различных частот при одном и том же условии заполнения; ♦♦ $p < 0,001$ при разных вариантах заполнения данных в независимых переменных.

Таблица 2. Максимальные значения коэффициента корреляции ЗВП и SSVEP и латентное время их выявления ($M \pm m$)

Отведения	Максимальные значения коэффициента корреляции		Латентное время, с	
	8 Гц	14 Гц	8 Гц	14 Гц
P3	0,26 ± 0,01	0,23 ± 0,02	0,59 ± 0,06	0,50 ± 0,06
O1	0,23 ± 0,01	0,25 ± 0,02	0,54 ± 0,07	0,52 ± 0,05
P4	0,25 ± 0,02	0,23 ± 0,02	0,63 ± 0,06	0,50 ± 0,06
O2	0,24 ± 0,02	0,25 ± 0,02	0,56 ± 0,07	0,56 ± 0,06
Pz	0,26 ± 0,02	0,22 ± 0,02	0,62 ± 0,06	0,55 ± 0,06
Oz	0,25 ± 0,02	0,24 ± 0,02	0,61 ± 0,07	0,50 ± 0,06

следовательно, для каждого пользователя получены индивидуальные особенности описания одного вызванного потенциала через мгновенные амплитуды другого. При этом усредненная закономерность позволяет отметить, что для 14 Гц регрессионная модель гораздо лучше предсказывала значения SSVEP при циклическом заполнении, чем при таком же случае для 8 Гц. Тем не менее значительная часть вариативности SSVEP не может быть предсказана и/или описана в рамках линейной регрессионной модели, при которой независимые переменные являются ЗВП с дискретным шагом, соответствующим частоте фотостимуляции.

Рассмотрим вариант линейной корреляции при условии непрерывной, по аналогии с непрерывным вейвлет-преобразованием, свертки SSVEP, полученным с этого же пользователя ЗВП. Результаты представлены в табл. 2. Из таблицы следует, что максимальные значения коэффициента корреляции для всех отведений достоверно не различались и находились в ~0,5 с от начала накопленного SSVEP. Корреляционный анализ показал, что все отведения формируют корреляции ($r \sim 0,39-0,85$; $p < 0,05$) для каждой частоты и каждого из исследуемых показателей: коэффициента корреляции либо же латентного времени. Таким образом, связь локализации во времени фрагмента SSVEP,

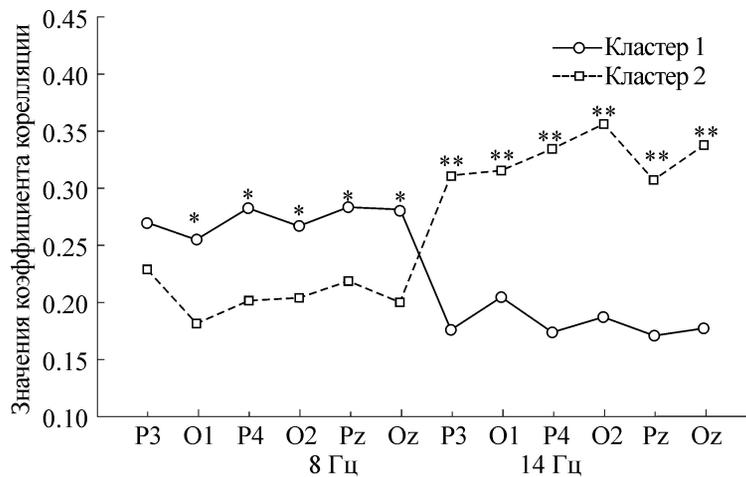


Рис. 3. Кластерный анализ максимальных значений коэффициентов корреляции «скользящего» зрительного вызванного потенциала и устойчивого зрительного вызванного потенциала.

имеющего максимальную корреляцию с формирующим его ЗВП, не установлено. Тем не менее и в этом случае коэффициент детерминации показал низкие значения, что подтверждает гипотезу о формировании SSVEP дополнительными сигналами, либо не связанными с ЗВП, либо являющимися результатом их нелинейного взаимодействия. Применение кластерного анализа (метод *K*-средних) при разделении на два кластера выявило группы, различающиеся по типам реакции (рис. 3). Кластер 1 представленный 19-ю случаями, демонстрировал относительно высокие коэффициенты корреляции для частоты 8 Гц, значимо для всех отведений кроме P3, превосходя кластер 2 (11 случаев). Для частоты в 14 Гц ситуация была обратной. Таким образом, можно утверждать, что в случае линейной зависимости существует пул людей, у которых ЗВП по-разному формируют разночастотные SSVEP, имея преимущество для той или иной частоты.

Рассмотрим цепочки локальных максимумов, полученные на основе вейвлет-преобразования (табл. 4). Из таблицы следует, что в подавляющем большинстве случаев число ЦЛМ, т.е. число выявленных на спектрах в частотно-временной области частотных пиков, больше для сигналов с частотой 8 Гц, чем для сигналов с частотой 14 Гц. При этом данная зависимость сохраняется и для «нативного» SSVEP, т.е. для SSVEP, полученного непосредственно с пользователя, и для «искусственно синтезированного» из ЗВП. Таким образом, можно утверждать, что для более высокочастотных SSVEP число локальных максимумов на спектрограмме значимо ниже, чем для потенциалов, полученных при более низкочастотной стимуляции. Следует указать, что хотя раз-

решение вейвлет-преобразования и различается в зависимости от частоты, но при указанной частоте дискретизации и базисной функции составляет 0,04 Гц для 14 Гц и 0,013 Гц для 8 Гц. Таким образом, с учетом особенностей сглаживания спектра сигнала при вейвлет-преобразовании можно утверждать, что различия в числе ЦЛМ и, следовательно, локальных экстремумов спектров определяются в значительной степени самими свойствами исследуемых сигналов.

Сравнение близких пар типов ЦЛМ (типы 1 и 2 имеют похожую динамику в частотном пространстве, при этом типы 3 и 4, по сути, являются составными из первого и второго типов) показало следующие результаты. ЦЛМ второго типа (убывающие по частоте) встречались значимо чаще, чем ЦЛМ первого типа для всех отведений, но только для SSVEP, полученного для частоты 8 Гц, тем временем как для частоты 14 Гц такой зависимости выявлено не было. Таким образом, в случае фотостимуляции частотой в 14 Гц частотные компоненты сигнала как увеличивающиеся, так и уменьшающие свой период встречаются одинаково часто, то в случае частоты 8 Гц наблюдается дрейф в сторону увеличения периода компонентов, формирующих сигнал. В случае если сигнал был сконструирован из ЗВП, зависимость была иной, различия наблюдались только в отведении O1 для частоты 14 Гц и для ограниченного числа типов ЦЛМ. При этом сравнение частот встречаемости различных типов ЦЛМ для SSVEP и для сигналов, сконструированных на основе ЗВП этих же пользователей, выявило единичные различия.

Таблица 3. Средние значения числа ЦЛМ ($M \pm m$), наблюдаемые для различных типов сигналов, отведений и частот

Тип данных	Отведение	Класс ЦЛМ	Частота	
			8 Гц	14 Гц
SSVEP	O1	3	43,67 ± 13,64◊◊	35,67 ± 9,25◊◊*
		1	202,8 ± 28,22◊	183,4 ± 40,36*
		2	215,8 ± 26,81	177,0 ± 43,44**●
		4	60,10 ± 10,49	41,87 ± 8,50**●●
	O2	3	43,77 ± 16,73◊◊	35,77 ± 8,92◊◊*
		1	204,7 ± 28,46◊	171,1 ± 33,29**
		2	218,3 ± 26,89●	173,7 ± 37,54**
		4	62,00 ± 8,85	45,03 ± 9,87**
	Oz	3	38,67 ± 12,04◊◊	36,20 ± 9,05◊◊
		1	202,4 ± 33,88◊	173,6 ± 35,08**
		2	217,8 ± 27,17	171,1 ± 40,11**
		4	63,10 ± 10,07	43,87 ± 9,37**
Остатки результатов регрессионного анализа	O1	3	40,27 ± 10,89◊◊	30,07 ± 4,46◊◊**
		1	212,2 ± 29,89	203,0 ± 34,23
		2	218,8 ± 24,89	207,1 ± 31,61
		4	60,90 ± 10,53	37,87 ± 4,90**
	O2	3	39,77 ± 13,03◊◊	30,23 ± 4,70◊◊**
		1	212,3 ± 29,31	207,6 ± 38,14
		2	216,1 ± 25,69	213,0 ± 39,07
		4	60,63 ± 9,71	38,13 ± 5,28**
	Oz	3	41,57 ± 15,67◊◊	30,83 ± 3,79◊◊**
		1	211,9 ± 29,81	215,0 ± 40,82
		2	218,5 ± 34,25	220,1 ± 34,25
		4	61,60 ± 10,94	39,37 ± 6,18**
Сигнал, сконструированный на основе ЗВП	O1	3	43,23 ± 14,67◊◊	37,70 ± 9,06◊◊*
		1	214,3 ± 28,98	173,0 ± 33,39◊◊**
		2	222,7 ± 31,34	157,1 ± 31,73**
		4	64,97 ± 10,43	46,63 ± 8,20**
	O2	3	40,77 ± 12,29◊◊	37,90 ± 8,98◊◊
		1	217,8 ± 30,84	169,2 ± 45,51**
		2	229,9 ± 32,68	166,9 ± 38,31**
		4	64,63 ± 11,84	48,93 ± 6,78**
	Oz	3	40,13 ± 12,60◊◊	38,90 ± 6,81◊◊
		1	211,4 ± 35,16	177,8 ± 50,52*
		2	222,1 ± 26,22	169,4 ± 38,48**
		4	64,37 ± 12,21	45,80 ± 9,09**

Примечание. * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$ – критерий Вилкоксона при сравнении частот 8 и 14 Гц; ◊ $p < 0,05$, ◊◊ $p < 0,01$ – критерий Вилкоксона при сравнении пар классов 3 и 4 и 1 и 2; ● $p < 0,05$, ●● $p < 0,01$ – критерий Вилкоксона при сравнения SSVEP и сигнала, сконструированного на основе ЗВП.

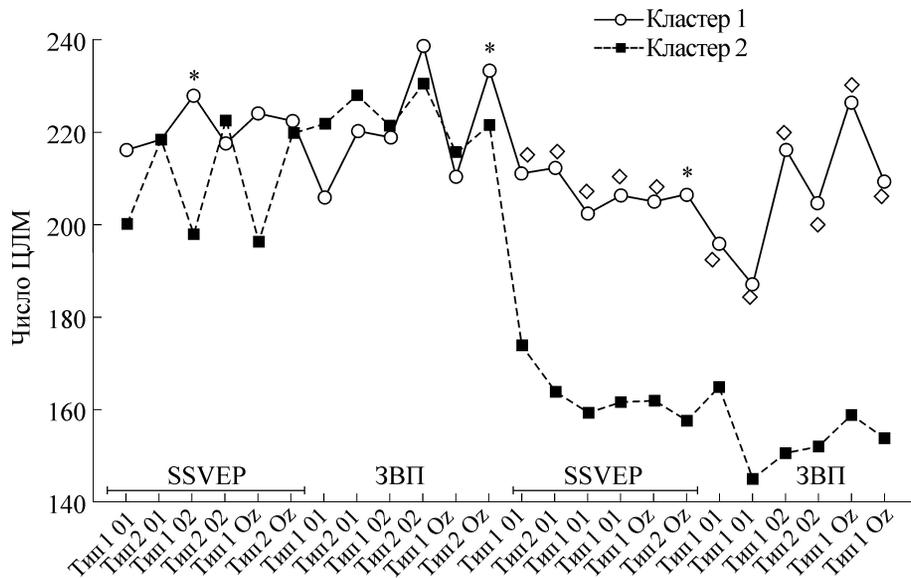


Рис. 4. Кластерный анализ числа цепочек локальных максимумов первого и второго типов в зависимости от типа обрабатываемого сигнала, частоты стимуляции и отведения. Различия между кластерами: * – $p < 0,05$, \diamond – $p < 0,01$.

Рассмотрим результаты кластеризации числа ЦЛМ первого и второго типов для SSVEP и сигналов, сконструированных на основе ЗВП. Разделение осуществлено на два кластера, т.к. при выделении большего числа групп, результаты дробления выборки занимали промежуточные значения по сравнению с двумя начальными. Полученные результаты представлены на рис. 4. Как видно, различия по числу ЦЛМ первого и второго типов при частоте стимуляции в 8 Гц не значимы как для нативного SSVEP, так и для его аналога, синтезированного из ЗВП. При этом кластер № 2 (21 испытуемый) демонстрировал снижение при фотостимуляции с частотой 14 Гц числа ЦЛМ обоих типов, тогда как кластер № 1 (9 испытуемых) данную динамику не демонстрировал. Иными словами, имеется группа пользователей, которые реагируют на высокочастотную фотостимуляцию в виде снижения числа выраженных частотных компонент, участвующих в формировании сигнала. При этом, вероятно, речь может идти как о динамике числа активно функционирующих осцилляторов нервной ткани, так и о формировании иной картины модулирующих воздействий на уже функционирующие системы электрогенеза.

Анализ структуры ЦЛМ остатков, полученных в результате регрессионного анализа, продемонстрировал ту же динамику, что указана выше: на частоте стимуляции 8 Гц различий между выявленными в рамках кластерного анализа группами выявлено не было. Также не была выявлена зависимость и от канала, по

которому осуществлялась регистрация сигнала. При этом на частоте 14 Гц вновь были выделены два значимо ($p < 0,01$) различающихся кластера: с большим (9 наблюдений) и меньшим (21 наблюдение) числом ЦЛМ. При этом пользователи, сформировавшие кластеры при сравнении SSVEP, и пользователи, сформировавшие кластеры при анализе остатков, полученные в результате регрессионного анализа, были одни и те же.

Таким образом, можно утверждать, что существуют типологические различия в числе и динамике пиков на спектрограммах SSVEP в зависимости от частоты фотостимуляции. При этом модуляция частотных компонент в нативном SSVEP носит характер снижения частоты в сигнале, что не наблюдается при модельном воспроизведении в виде конструирования сигнала из последовательности ЗВП этого же пользователя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ возможности формирования SSVEP на основе ЗВП. Показано, что локализация по времени ЗВП при накоплении SSVEP играет определенную роль, выражающуюся в разных значениях коэффициентов регрессионной модели, задаваемых для ЗВП с разным фазовым сдвигом в отношении друг друга. В подавляющем большинстве случаев число ЦЛМ, т.е. число выявленных на спектрах в частотно-временной области частотных пиков, больше для сигналов с частотой 8 Гц, чем

для сигналов с частотой 14 Гц. Данная зависимость сохраняется и для SSVEP, полученного непосредственно с пользователя, и для «искусственно синтезированного» из ЗВП. В случае фотостимуляции частотой в 14 Гц частотные компоненты сигнала как увеличивающиеся, так и уменьшающие свой период встречаются одинаково часто, то в случае частоты в 8 Гц наблюдается дрейф в сторону увеличения периода компонентов, формирующих сигнал. Продемонстрировано наличие группы пользователей, которые реагируют на высокочастотную фотостимуляцию в виде снижения числа выраженных частотных компонент, участвующих в формировании сигнала. При этом модуляция частотных компонент в нативном SSVEP носит характер уменьшения частоты в сигнале, чего не наблюдается при модельном воспроизведении в виде конструирования сигнала из последовательности ЗВП этого же пользователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L. F. Nicolas-Alonso and J. Gomez-Gil, *Sensors (Basel)* **12** (2), 1211 (2012).
2. J. Zhao, W. Li, and M. Li, *PLoS One* **10** (11), e0142168 (2015).
3. G. Garcia, In *Computer-Human Interaction* (Florence, Italy, 2008).
4. В. В. Гнездицкий, *Вызванные потенциалы мозга в клинической практике* (МЕДПресс-информ, М., 2003).
5. Н. М. Астафьева, *Успехи физ. наук* **166** (11), 1145 (1996).
6. Я. А. Туровский, С. Д. Кургалин и А. Г. Семёнов, *Биофизика* **59** (1), 185 (2014).
7. С. Гланц, *Медико-биологическая статистика* (Практика, М., 1998).
8. Р. Рунион, *Справочник по непараметрической статистике. Современный подход* (Финансы и статистика, М., 1982).
9. Я. Р. Магнус, П. К. Катышев и А. А. Пересецкий, *Эконометрика. Начальный курс* (Дело, М., 2004).

Modelling the Formation of Stable Visual Evoked Potentials at Different Frequencies of Photostimulation

Ya.A. Turovsky* **, S.V. Borzunov*, A.S. Surovtsev*, S.A. Zaitsev*, and A.S. Konovskoy*

*Voronezh State University, Universitetskaya pl. 1, Voronezh, 394018 Russia

**Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya ul. 65, Moscow, 117997 Russia

We analyzed the formation of steady state visually evoked potentials on the basis of visual evoked potentials. Using the regression model it has been shown that the time localisation of visual evoked potentials in the accumulation of steady state visually evoked potentials should be taken into account since different values of regression coefficients are set for visual evoked potentials with different phase shift in relation to each other. With the linear regression model it is possible to describe better the values of steady state visually evoked potentials in the cyclic repetition of visual evoked potentials at the photostimulation frequency of 14 Hz than at the frequency of 8 Hz. In the vast majority of cases, the number of groups of frequency peaks (chains of local maxima) detected on the spectra in the frequency-time region is greater for signals with a frequency of 8 Hz than for signals with a frequency of 14 Hz. This relationship is maintained for stable visual evoked potential obtained directly from the user, as opposed to “artificially synthesized” from visual evoked potential. Using the photostimulation frequency at 14 Hz, the frequency components of the signal, which increase and decrease their period, are equally common, and at 8 Hz the number of chains of local maxima increases and their frequency decreases. The presence of a group of users who react to the high-frequency photostimulation in the form of reducing the number of expressed frequency components involved in the formation of the induced potential is demonstrated. At the same time, modulation of frequency components in the native steady state visually evoked potentials is predominantly characterized by reduction in the signal frequency, and it is not observed in the model reproduction in the form of signal construction out of the sequence of visual evoked potentials of the same user.

Keywords: electroencephalogram, wavelet analysis, local spectrum, event related potential, SSVEP