



СРАВНЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ КОМПОНЕНТ ЭЭГ И КОЖНОГО ПОТЕНЦИАЛА (КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ)

НАЗАРОВА А.И.*, Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия,
e-mail: koval39@inbox.ru

В эксперименте регистрировались локальная ЭЭГ (Fr1) и кожный потенциал (КП) при решении испытуемыми анаграмм и выполнении нескольких тестовых заданий. Основная цель заключалась в том, чтобы на основе количественного анализа полученных данных сравнить структуру и динамику частотных компонент локальной ЭЭГ и КП. С помощью частотного анализа были построены профили частотной динамики суммарных ЭЭГ и КП, а также гистограммы распределений их частотных компонент, среди которых выделено 6 типовых паттернов. В серии с одновременной регистрацией ЭЭГ и КП установлена высокая положительная корреляция их суммарных сигналов (минимаксный диапазон от 0,70 до 0,94). Наряду с этим в частотных паттернах ЭЭГ и КП обнаружены некоторые различия во временном распределении частотных компонент со сдвигом разницы ЭЭГ—КП в сторону отрицательных значений. Обсуждается возможная природа общих свойств высокочастотной динамики ЭЭГ и КП. Полученные данные имеют важное значение, в частности, при интерпретации результатов экспериментов с одновременной регистрацией нескольких психофизиологических показателей.

Ключевые слова: кожный потенциал, электроэнцефалограмма, биоритмы, частотный анализ.

Введение

В недавней статье (Назаров, 2017) сообщалось о некоторых наблюдениях, в которых обнаружилось сходство (по крайней мере, топологическое) между высокочастотными компонентами кожного потенциала (КП) и частотными полосами локальной ЭЭГ (Fr1). Регистрация КП производилась по аналогии с регистрацией КГР¹, но с применением широкополосного усилителя биопотенциалов в диапазоне частот 0.05—1000 Гц. В этом заключалось отличие описанного в упомянутой статье способа регистрации КП от традиционного метода измерения электрокожной активности, при котором верхняя граница частоты полезного сигнала не превышает 2 Гц. Анализ более широкополосного спектра частот КП, выполненный с применением современной цифровой техники обработки аналоговых сиг-

Для цитаты:

Назаров А.И. Сравнение частотных компонент ЭЭГ и кожного потенциала (количественный анализ) // Экспериментальная психология. 2018. Т. 11. № 2. С. 95—109. doi:10.17759/exppsy.2018110207

* Назаров А.И. Кандидат психологических наук, доцент, руководитель лаборатории экспериментальной психологии, Государственный университет «Дубна». E-mail: koval39@inbox.ru

¹ КГР и КП — показатели электрокожной активности, которые отличаются способом ее регистрации: в первом случае через межэлектродный участок кожи испытуемого пропускается слабый электрический ток (метод К. Фере), во втором регистрируется «чистый» потенциал между электродами без пропускания тока (метод И. Тарханова).



налов и того же алгоритма, который используется для анализа ЭЭГ, позволил, в частности, установить следующее.

1. В составе суммарного сигнала КП, регистрируемого с поверхности кисти руки, присутствуют те же полосы частот, которые характерны для ритмов ЭЭГ: Альфа (8–13 Гц), Бета (13–30 Гц), Дельта (0.5–4 Гц), Тета (4–8 Гц), Гамма (36–45 Гц). Общие конфигурации этих ритмов в КП и ЭЭГ характеризуются значительным сходством.

2. Различия в указанных ритмах КП и ЭЭГ проявляются в частичном несовпадении их фазовой и амплитудной динамики на протяжении относительно длительного периода регистрации. Соответствующие данные были получены при одновременной регистрации КП и ЭЭГ у немногих, но одних и тех же испытуемых (всего 3 человека).

3. В соотношении низкочастотных (0.05–1 Гц) составляющих в суммарных КТР, КП и ЭЭГ при их одновременной регистрации были обнаружены три типа таких отношений: полная *синфазность* и конгруэнтность амплитудной динамики (у большинства испытуемых); *контрфазность* амплитудной динамики при сохранении ее конгруэнтности (у меньшинства испытуемых); смешанный тип с чередованием синфазности и контрфазности (у некоторых испытуемых).

В данной статье особое внимание уделено второму типу из найденных закономерностей с целью более детального количественного анализа как сходства, так и различий между динамическими характеристиками КП и ЭЭГ в диапазоне частот 5–45 Гц.

Метод

Стимульный материал и задачи для испытуемых. Регистрация КП и локальной ЭЭГ (Fr1) проводилась при выполнении испытуемыми двух типов заданий: 1) решение анаграмм (1-я серия эксперимента); 2) 9 разных по содержанию задач, выбранных из разных интеллектуальных тестов (2-я серия).

Анаграммы состояли из 5, 6, 7, 8, 9, 10 букв. Все анаграммы составлялись из разных по содержанию слов, но одна и та же длина анаграммы повторялась 3 раза. Весь стимульный список состоял из $3 \times 6 = 18$ анаграмм. Они предъявлялись по одной в порядке возрастания сложности² в виде слайдов в формате PowerPoint на экране компьютерного монитора. Экспозиция каждой анаграммы заканчивалась, как только испытуемый давал правильный ответ или, если ответа не было, — по истечении 40 с. Сразу после каждого ответа или по окончании указанного времени на экране показывалось на 5 с слово, которое и было решением анаграммы. Это позволяло снять у испытуемого психическое напряжение, особенно в случае неудачной попытки. Затем следовала очередная проба.

В заданиях с комбинированным тестом время выполнения не ограничивалось, но экспозиция прекращалась через 40 с после ее начала. По окончании экспозиции задания на 5 с показывалось правильное решение.

Описанный стимульный материал применялся не для того, чтобы выяснять относящиеся к нему психологические проблемы («стратегии» решения анаграмм, влияние их сложности на время и стратегию решения, квалификация интеллекта испытуемых и т. п.). Основная цель заключалась в том, чтобы оценить, в чем состоит сходство или различие между КП и локальной ЭЭГ при выполнении испытуемыми различных типовых заданий.

² Учитывался только один из нескольких факторов сложности анаграммы — количество входящих в нее букв.



Регистрация данных. Для регистрации КП и локальной ЭЭГ использовался тот же аппаратно-программный комплекс, который описан в предыдущей статье (Назаров, 2017). Отличие состояло в том, что вся регистрация и обработка проводились только с помощью системы МР-150 (ВЮРАС, США).

В предварительных опытах активный электрод для КП прикреплялся к внешней поверхности кисти левой руки на участке между основаниями указательного и большого пальцев; в этом случае использовался липкий диск ADD208 и гель GEL100 (ВЮРАС, США). Для регистрации локальной ЭЭГ активный электрод закреплялся на позиции Fp1 (т. е. на некотором удалении вверх от брови левого глаза). Референтный электрод (общий для ЭЭГ и КП и соединенный с заземленным входом биоусилителя) закреплялся на левом мастоиде. Соблюдение правила ипсилатерального размещения всех электродов основывалось на ранее установленном факте, что при контралатеральном размещении референтного и активного электродов³ во время регистрации КП в последнем присутствуют артефакты в виде кардиоимпульсов большой амплитуды. Однако оказалось, что в случае одновременной регистрации ЭЭГ и КП при ипсилатеральном размещении электродов кардиоимпульсы отсутствуют в ЭЭГ, но присутствуют в КП! Поэтому в основных опытах 1-й серии было принято решение о раздельной регистрации: в одном сеансе регистрировалась только ЭЭГ (как описано выше), в другом — только КП. В последнем случае референтный электрод находился в ванночке с водой, в которую погружался кончик указательного пальца кисти левой руки испытуемого, а активный электрод закреплялся на внешней поверхности кисти левой руки на участке между основаниями указательного и большого пальцев.

Список анаграмм при регистрации КП (1-й сеанс) отличался от списка для ЭЭГ (2-й сеанс) только по содержанию соответствующих им слов.

После окончания 1-й серии был проведен поиск способа размещения электродов, при котором возможна одновременная регистрация КП и ЭЭГ без наличия кардиоимпульсов в каком-либо из этих показателей. В результате апробации нескольких вариантов оказалось, что активный электрод для КП следует закрепить на контралатеральной (по отношению к электроду для ЭЭГ) кисти руки, что и было сделано во 2-й серии. При этом, электроды для ЭЭГ размещались стандартно: активный — на Fp1, референтный — на левом мастоиде.

Во время записи частота дискретизации выбиралась равной 10 кГц, поскольку кроме КП и ЭЭГ одновременно регистрировались данные еще по трем каналам: сигналы длительности экспозиции, микрофона (для фиксации ответов испытуемого) и внешнего электрического шума (для контроля возможных артефактов, имеющих внешнее происхождение).

Цифровая обработка данных. После эксперимента сигналы КП и ЭЭГ вначале обрабатывались в ПО Acqknowledge 4 с помощью комбинированного заграждающего фильтра, который подавлял частоту 50 Гц и ее первые 6 гармоник на уровне не менее 70 дБ (вкладки Transform → Digital Filters → Comb Band Stop). Затем к сигналам КП и ЭЭГ применялся полосовой фильтр 5–45 Гц для устранения тонической составляющей и высокочастотных компонент, находящихся за пределами выбранного диапазона (вкладки Transform → Digital Filters → Band Pass).

На записях ЭЭГ фиксировались также артефакты, вызванные произвольными морганиями глаз испытуемого. Их относительное количество, однако, было незначительным. Кроме того, как показала специальная проверка, частотный диапазон импульсов, возника-

³ Например, активный электрод — на левой руке, референтный — на правой.



ющих при моргании, ниже 10 Гц, так что их возможное влияние (едва ли существенное) ограничивалось низкочастотной границей спектра ЭЭГ.

После фильтрации суммарные сигналы КП и ЭЭГ обрабатывались в ПО Acqknowledge 4 (вкладка Analysis → Electroencephalography → Derive EEG Frequency Bands) для выделения в них традиционных биоритмов от Дельта до Гамма. Далее эти же суммарные сигналы подвергались частотному анализу (вкладка Analysis → Electroencephalography → EEG Frequency Analysis). Последний выполнялся при ширине временного окна (эпохи) 0,5 с. В результате частотного анализа на графиках отображается временная динамика средней мощности сигнала, среднего, медианного и пикового значений его частоты в пределах выбранного окна, которое непрерывно перемещается по всей длительности пробы. Для каждой пробы по данным динамики пиковой частоты строились гистограммы распределения частот (вкладки Analysis → Histograms).

Испытуемые. В 1-й серии с анаграммами и отдельной регистрацией участвовали 8 человек (3 студента и 5 преподавателей), каждый из которых выполнял задания в двух сеансах (один — с регистрацией КП, другой — с регистрацией локальной ЭЭГ). Во 2-й серии с комбинированным тестом и одновременной регистрацией КП и ЭЭГ участвовала другая группа испытуемых — 4 студента и 2 преподавателя.

Результаты

1-я серия. Типичные для всех испытуемых примеры суммарных сигналов КП и локальной ЭЭГ представлены на рис. 1, где изображены фрагменты обработанных записей решения анаграмм.

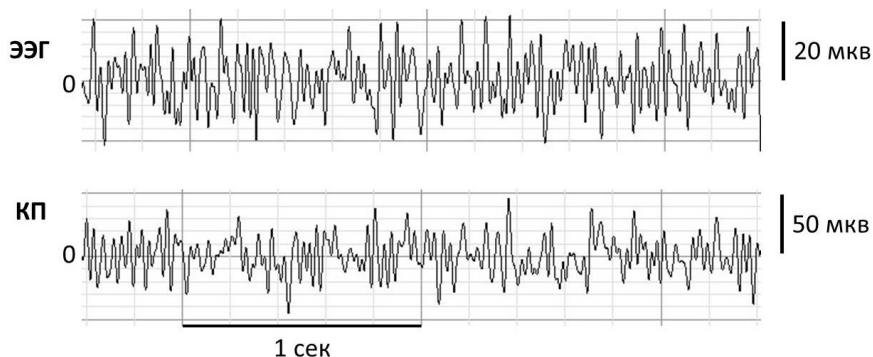


Рис. 1. Фрагменты отдельных записей КП (нижняя кривая, 1-й сеанс) и локальной ЭЭГ (верхняя кривая, 2-й сеанс) во время решения испытуемым анаграмм. Величины амплитуд (мкВ) приведены ко входу

Визуальный анализ 288 записей (18 анаграмм × 8 испытуемых × 2 сеанса) показал, что средние амплитуды КП и ЭЭГ и их соотношение у разных испытуемых не одинаковы. При этом общая картина динамики амплитуд выглядит приблизительно одинаковой для КП и ЭЭГ. Такими же сходными оказались и частотные полосы, соответствующие традиционным ритмам ЭЭГ.

Для более детального количественного сравнения КП и ЭЭГ был проведен частотный анализ их суммарных сигналов. Частотный анализ позволяет представить несколько параметров сигнала (пиковая, средняя и медианная частоты, средняя мощность сигнала, граница спектра) как функцию от времени. На рис.2 приведен пример записи суммарных



ЭЭГ, КП и динамики соответствующих пиковых частот⁴ при решении испытуемым двух анаграмм.

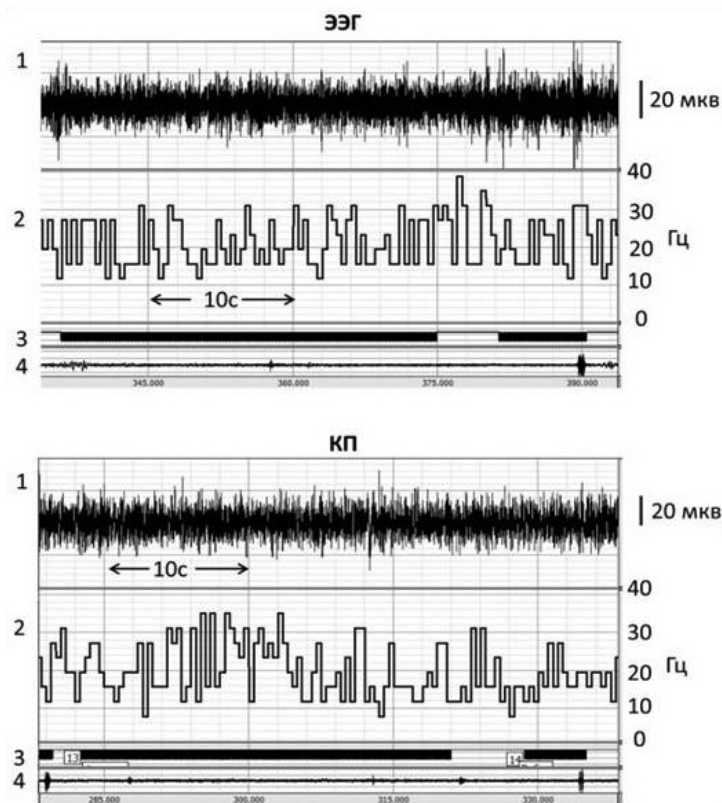


Рис. 2. Пример частотного анализа суммарных ЭЭГ и КП (каналы 1) при решении двух анаграмм.

Время предъявления анаграмм регистрировалось на канале 3 (длинная жирная полоса — нерешенная анаграмма, короткая — решенная). Шкала пиковых частот (канал 2) изображена справа от соответствующего канала. Ширина эпохи анализа (самый узкий прямоугольник на кривой пиковых частот) равна 0,5 с. Канал 4 — микрофонная запись ответов испытуемого.

Напряжения калибровки приведены ко входу

Характерным для всех рассмотренных графиков пиковых частот является быстрое переключение последних с одного поддиапазона на другой. Два наиболее типичных интервала таких переключений — 0,5 и 1 с. Практически не встречались интервалы стабильного удержания одной и той же частоты, равные или превышающие 2 с. Другой особенностью является уникальность каждого паттерна временной динамики не только у каждого испытуемого, но и в каждой из отдельных проб одного и того же испытуемого. Такой паттерн — это своего рода штрих-код, присущий данному испытуемому в данной пробе. Визуальный анализ не позволяет выделить в нем какой-либо закономерности.

⁴ Пиковая частота — это частота, при которой мощность сигнала в пределах эпохи анализа максимальна. Этот параметр был выбран потому, что он более точно отражал диапазон частот, присущих суммарным сигналам. Медианные значения частот преимущественно отражали величины низкочастотной части спектра (10–20 Гц), а средние, напротив, — только высокочастотной части (20–40 Гц).



Но одно дело — случайный характер временного распределения частот в *отдельной* пробе и другое — наличие закономерностей или, по крайней мере, устойчивых соотношений во *множестве* проб. Для решения этой второй задачи необходимо было выделить признаки, общие для сравниваемых элементов множества. Одним из таких признаков, очевидно, является частота: в каждой пробе есть ограниченный набор частот, так или иначе распределенных во времени. Другим признаком является частота встречаемости той или иной частоты в разных пробах. Эти два ортогональных признака могут быть представлены в виде гистограммы. Хотя в гистограммах утрачивается информация о временной динамике, но по характеру их контура можно судить об относительных «весах» того или иного частотного поддиапазона в каждой пробе. Тогда в контексте основной цели данной работы возникает вопрос: есть ли что-нибудь общего в характере гистограмм для ЭЭГ и КП?

Таблица 1

Среднее количество попаданий пиковых частот в интервал гистограммы

Анаграммы	Испытуемые	Центры интервалов частот								%
		9	13	17	21	25	29	33	37	
КП										
Нерешенные	Среднее	0,2	15,1	6,1	7,6	5,6	3,2	1,0	0,0	49
	Ст, откл,	0,1	3,0	0,5	3,1	1,4	0,8	0,2	0,1	12
	№ 8	10,3	25	0,1	0,5	0,2	0,0	0,0	0,0	29
Решенные	Среднее	0,1	6,2	2,4	2,6	2,5	1,6	0,3	0,0	51
	Ст, откл,	0,2	3,0	0,8	0,9	1,4	1,2	0,3	0,0	12
	№ 8,	3,0	6,1	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	71
ЭЭГ										
Нерешенные	Среднее	0,0	14,5	4,6	4,3	10,9	3,9	0,2	0,0	52
	Ст, откл,	0,0	3,1	2,0	1,9	1,8	1,9	0,2	0,1	13
	№ 4,	2,2	5,8	5,5	19,4	6,2	0,0	0,0	0,0	39
	№ 8,	10,5	9,1	2,6	4,6	8,7	6,4	1,6	0,2	32
Решенные	Среднее	0,1	3,7	1,6	2,6	3,3	1,4	0,1	0,0	50
	Ст, откл,	0,2	1,3	0,8	2,2	1,2	1,0	0,3	0,0	13
	№ 8,	0,9	2,0	0,6	0,9	1,2	1,3	0,3	0,1	61

Примечание: В графе % указан процент решенных анаграмм. «Среднее» вычислялось для 7 испытуемых.

Для ответа на поставленный вопрос вначале были построены гистограммы для каждой пробы, которые затем усреднялись по всем испытуемым, решенным и нерешенным анаграммам. При этом усреднение производилось отдельно по каждому частотному интервалу. Результаты представлены в табл. 1 и на рис. 3. Здесь важно отметить характерное для КП постепенное убывание среднего количества попаданий по мере увеличения частоты от младшего (9 Гц) к старшему (37 Гц) поддиапазону. Что касается разницы в абсолютных величинах попаданий для решенных и нерешенных анаграмм, то такая динамика обусловлена прежде всего более коротким временем, затраченным на решенные анаграммы. Иная картина наблюдается в показателях для ЭЭГ: здесь заметна разница в соотношении частотных компонент для решенных и нерешенных анаграмм, а также тенденция к росту числа попаданий по мере увеличения частоты от 17 до 25 Гц в случае решенных анаграмм.



Как видно на рис. 3, наиболее весомой, как для КП, так и для ЭЭГ, оказалась частота 11–15 Гц, что близко к частоте альфа-ритма (8–13 Гц) и немного захватывает начальный участок бета-ритма (13–30 Гц). Частотные компоненты последнего для двух изучаемых показателей характеризуются различным распределением. В случае КП (верхние графики на рис. 3) происходит постепенное снижение веса более высокочастотных компонент бета-ритма, причем как для решенных, так и для нерешенных (т. е. более трудных) анаграмм. В случае ЭЭГ характер распределения компонент бета-ритма имеет существенные различия: для решенных анаграмм частота компонент от 17 до 25 Гц постепенно возрастает (нижний график слева), тогда как для нерешенных анаграмм такой рост отмечается только на крайнем участке с центральной частотой 25 Гц (нижний график справа). Во всех случаях практически отсутствует гамма-ритм (35–45 Гц), который обычно связывают, в частности, с уровнем когнитивной нагрузки при решении мыслительных задач. Однако гамма-ритм присутствовал в средних показателях частотного анализа, которые не вошли в наше рассмотрение

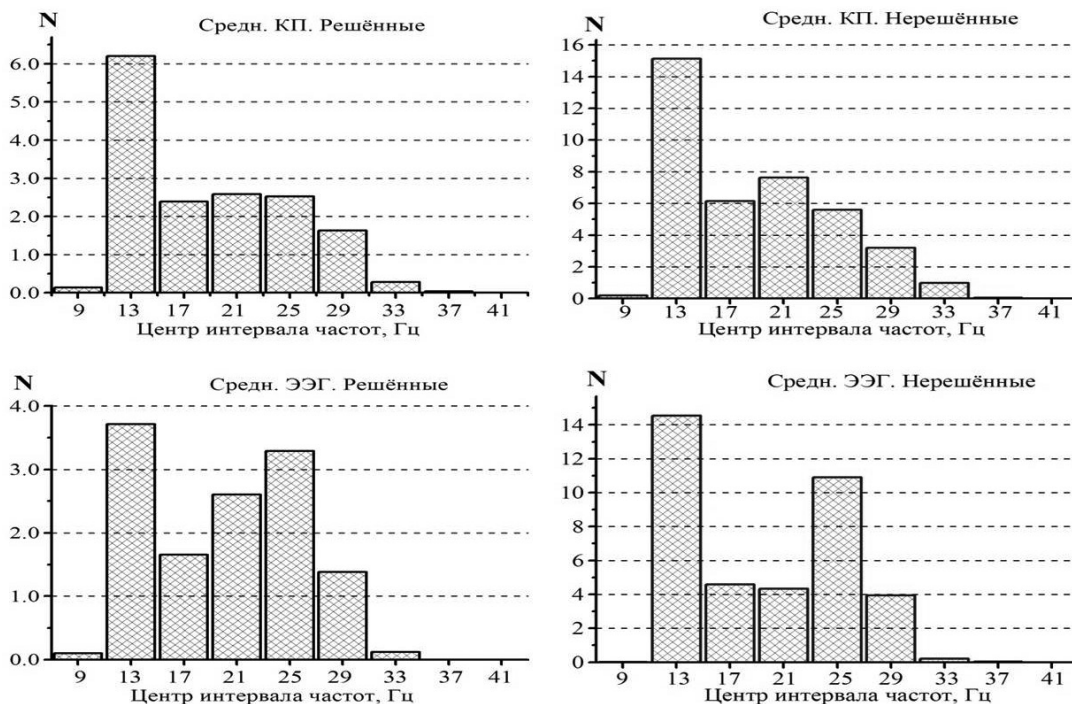


Рис. 3. Гистограммы средних пиковых частот в задачах с анаграммами.

N — количество попаданий пиковых частот в тот или иной поддиапазон, центр которого (Гц) обозначен на горизонтальной оси. При сравнении графиков важно обращать внимание не на абсолютные значения N (они зависят, в частности, от времени решения анаграмм), а на их соотношения для разных интервалов частот

Обращают на себя внимание индивидуальные гистограммы испытуемого № 8, данные которого были исключены из процедуры усреднения и выделены в табл. 1 отдельной строкой. У испытуемого № 8, в отличие от средних и индивидуальных данных других испытуемых, в показателе КП для решенных и нерешенных анаграмм практически отсутствуют частоты выше 15 Гц и довольно хорошо выражены частоты с центрами интервалов 9 и 13 Гц (рис. 4, верхние графики).

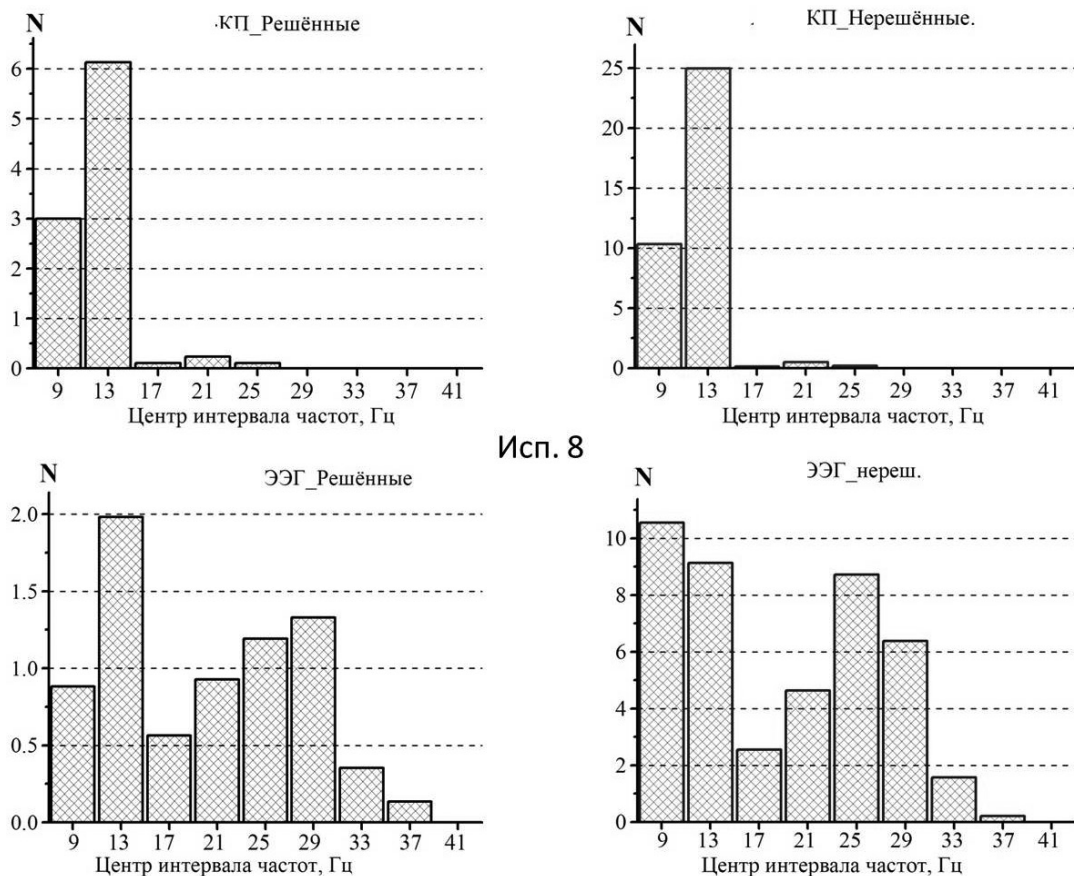


Рис. 4. Распределения средних пиковых частот в задачах с анаграммами у испытуемого № 8. N — среднее количество попаданий частоты в один из интервалов, центры которых обозначены на горизонтальной оси

Преобладание этих же низких частот, относящихся к альфа-диапазону, сохранялось и для показателя ЭЭГ (рис. 4, нижние графики), но здесь присутствовали также и высокочастотные компоненты вплоть до 35 Гц, которые у других испытуемых либо отсутствовали, либо были выражены очень слабо. Следует отметить, что испытуемый № 8 получил наилучшие результаты по числу решенных анаграмм (71% и 61%, табл. 3). Близкие показатели были у испытуемого № 4 (50% и 61%, табл. 3), но здесь преобладание низкочастотной компоненты с центром 9 Гц имело место только для показателя ЭЭГ.

Таким образом, согласно средним данным (табл. 1 и рис. 3):

- 1) профили распределения частотных компонент для показателей КП и ЭЭГ отличаются друг от друга по степени *относительной* выраженности высокочастотных компонент: для ЭЭГ данный показатель характеризуется более высокими значениями; наиболее сильное различие в профилях отмечено у испытуемого № 8 с максимальным показателем количества решенных анаграмм;
- 2) общим для КП и ЭЭГ является преобладание низкочастотной компоненты 13 Гц;
3. Различия в профилях распределений частотных компонент для решенных и нерешенных анаграмм имеют место только в показателе ЭЭГ; наиболее высокими значениями данного показателя также характеризуется испытуемый № 8.



2-я серия. В этой серии КП и ЭЭГ регистрировались одновременно при выполнении испытуемыми нескольких заданий комбинированного теста. Задания состояли из словесного, числового и изобразительного материала. Естественно было ожидать, что при работе с качественно разным стимульным материалом профили распределения частот окажутся разными не только для КП и ЭЭГ, но и внутри каждого из этих показателей. Кроме того, одновременная регистрация позволяла делать более непосредственные сравнения суммарных сигналов КП и ЭЭГ, поскольку при этом исключаются возможные влияния разных функциональных состояний испытуемого и других побочных переменных.

В табл. 2 представлены величины коэффициента кросскорреляции в разных заданиях для суммарных сигналов КП и ЭЭГ. Коэффициенты вычислялись автоматически в программе AcqKnowledge 4 (вкладки Analysis → Correlation coefficient) по стандартной формуле Пирсона. Пример графика с исходными суммарными сигналами (каналы 1, 2), их частотными паттернами (каналы 3, 4) и разностью между последними (канал 5) приведен на рис. 5.

Таблица 2

Коэффициенты кросскорреляций суммарных сигналов КП и ЭЭГ

Испытуемые	Тестовые задания									Среднее	Ст, откл,
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	0,83	0,85	0,84	0,87	0,86	0,88	0,86	0,86	0,88	0,86	0,02
2	0,71	0,77	0,75	0,75	0,70	0,73	0,81	0,81	0,78	0,76	0,04
3	0,93	0,94	0,93	0,86	0,88	0,92	0,93	0,94	0,87	0,91	0,03
4	0,79	0,83	0,85	0,85	0,85	0,86	0,81	0,82	0,81	0,83	0,02

Средние коэффициенты корреляции (выделены жирным шрифтом) находятся в диапазоне от 0,76 до 0,91, что указывает на достаточно высокую степень согласованности суммарных КП и ЭЭГ и незначительный разброс коэффициентов для разных заданий и разных испытуемых (стандартные отклонения не превышают 0,04).

В то же время частотный анализ указывает на существование различий между суммарными КП и ЭЭГ по характеру распределения частотных компонент во времени. Если из показателей канала 4 (распределение частот для ЭЭГ) вычесть показатели канала 3 (распределение для КП), получим разницу, которая изображена на канале 5 (рис. 5). В данном случае эта разница не так значительна, в других же случаях (когда корреляция слабее) она выражена гораздо сильнее. При этом подавляющая часть различий находится в зоне отрицательных значений (рис. 6). Это свидетельствует о том, что частота КП в течение большего промежутка времени выполнения задания превышает частоту ЭЭГ, хотя оба показателя находятся в одном и том же частотном диапазоне 5–45 Гц.

Общая типология частотных гистограмм. Как упоминалось выше, на основе частотного анализа суммарных КП и ЭЭГ для каждой пробы строились гистограммы распределения частотных компонент в диапазоне 5–45 Гц. Всего в обеих сериях было построено 360 гистограмм. В этом множестве были выделены 6 типов гистограмм, демонстрирующих соотношения между частотными компонентами внутри указанного диапазона. На рис. 7 показаны примеры типовых эмпирических гистограмм вместе с их «идеальными» формами. Типы 1 и 2 напоминают параболическую функцию, 4 и 6 — экспоненциальную, 3 — импульсную, 5 — треугольную.

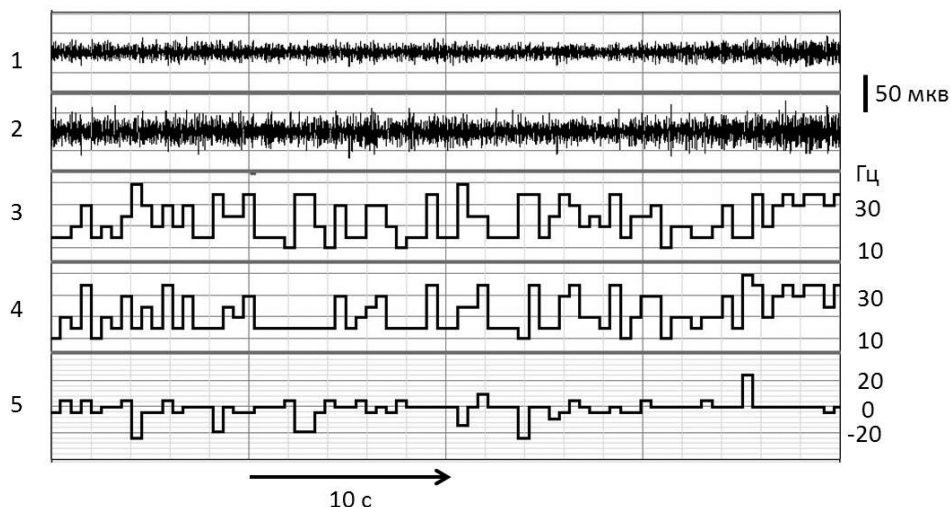


Рис. 5. Суммарные КП (1), ЭЭГ (2), их частотные паттерны (3 и 4, соответственно) и разностная кривая ЭЭГ–КП (5) в задании 9 (испытуемый № 3, решение простого примера).
Коэффициент корреляции для 1–2 = 0,91

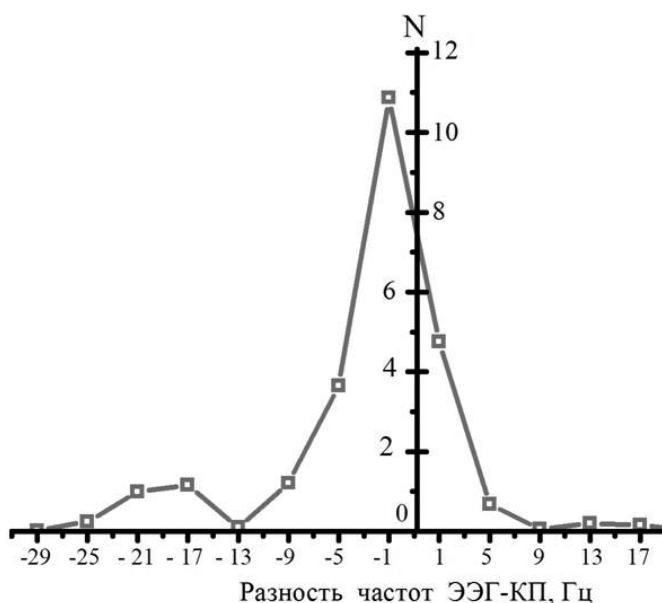


Рис. 6. Распределение разности частот (ЭЭГ–КП) во 2-й серии

Проследим частоту встречаемости того или иного типа гистограммы в рассматриваемом множестве. Соответствующие данные приведены в табл. 3. Из средних данных табл. 3 следует, что к наиболее частым профилям распределения частотных компонент относятся типы 1, 2 и 4 (относительно широкие спектры частот выделены жирным шрифтом). 3-й тип гистограммы (импульсный, узкий спектр) был характерен для испытуемого № 8 (КП, все 18 анаграмм!). 5-й и 6-й типы встречались у двух испытуемых — 4 (ЭЭГ, 6 и 10 анаграмм, соответственно) и 6 (КП, 7 и 1 анаграммы соответственно).

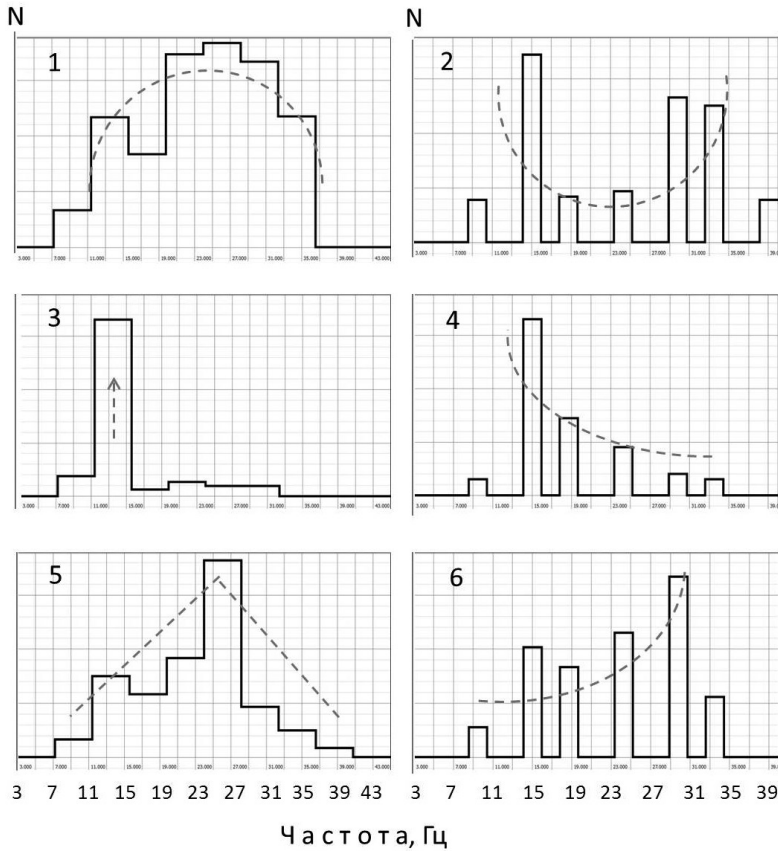


Рис. 7. Эмпирические гистограммы (сплошной контур) и близкие к ним «идеальные» формы (пунктир) соотношений пиковых частот.

N — число попаданий пиковой частоты в интервал распределения. На горизонтальной оси указаны центры интервалов частот

Таблица 3

Частость типов гистограмм

Испытуемые	Суммарный сигнал	Типы частотных гистограмм					
		1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й
1-я серия							
1	ЭЭГ	2	12	1	2	0	1
	КП	3	1	1	13	0	0
2	ЭЭГ	0	17	1	0	0	0
	КП	4	5	2	7	0	0
3	ЭЭГ	8	6	0	4	0	0
	КП	2	0	2	14	0	0
4	ЭЭГ	2	0	0	0	6	10
	КП	6	1	1	10	0	0
5	ЭЭГ	3	10	0	5	0	0
	КП	2	2	4	10	0	0



Испытуемые	Суммарный сигнал	Типы частотных гистограмм					
		1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й
6	ЭЭГ	-	-	-	-	-	-
	КП	6	4	0	0	7	1
7	ЭЭГ	-	-	-	-	-	-
	КП	4	1	1	12	0	0
8	ЭЭГ	4	11	0	3	0	0
	КП	0	0	18	0	0	0
Среднее	ЭЭГ	3,2	9,3	0,3	2,3	1,0	1,8
	КП	3,4	1,8	3,6	8,4	0,9	0,1
2-я серия							
9	ЭЭГ	2	1	0	6	0	0
	КП	4	3	0	1	0	0
10	ЭЭГ	0	1	0	5	3	0
	КП	0	1	0	5	3	0
11	ЭЭГ	1	1	1	2	1	3
	КП	1	4	2	0	1	1
12	ЭЭГ	1	0	0	5	3	0
	КП	2	1	0	2	0	3
Среднее	ЭЭГ	1,0	0,7	0,25	4,5	1,7	0,75
	КП	1,7	2,2	0,5	2,0	1,0	1,0

В целом, тот или иной тип распределения частотных компонент специфичен как для того или иного испытуемого, так и для конкретной пробы. По нему можно определить, насколько широким является набор частотных компонент, который регистрируется у того или иного испытуемого при решении им той или иной задачи, а также — в какой степени устойчивым остается этот набор при переходе от одной задачи к другой.

Заключение

Выбор для данного эксперимента анаграмм и коротких тестовых заданий в качестве стимульного материала позволил активировать (одновременно или последовательно) несколько когнитивных операций, которые типичны для психологической структуры различных действий, — восприятие и опознание, рабочую память, оперирование извлеченными из долговременной памяти фрагментами (комбинаторика), эмоциональные переживания, связанные с самооценкой успешных или неудачных попыток. Данная процедура позволила обеспечить достаточно высокий уровень мотивации испытуемых, о чем свидетельствовали послеэкспериментальные опросы. Следует также отметить, что перечисленные операции выполнялись преимущественно на неосознаваемом уровне; в сознании фиксировались лишь задача и конечный результат. Этим, по-видимому, и можно объяснить достаточно подвижную динамику частотных компонент, выделяемых с помощью частотного анализа.

Сделанный в предыдущей статье (Назаров, 2017) вывод о топологическом сходстве суммарных сигналов локальной ЭЭГ и КП можно теперь дополнить данными о наличии в них как общих, так и отличительных свойств. Общей является частотная динамика: положительная кросскорреляция между суммарными ЭЭГ и КП находится в минимаксном диапазоне 0,70—0,94 (табл. 2). Столь высокие показатели удивительны, если учесть удален-



ность друг от друга участков тела (голова и кисть руки), в которых регистрировалась их электрическая активность.

С другой стороны, обнаруживаются отличия в характере распределения во времени частотных компонентов ЭЭГ и КП. Как видно на рис. 5, описывающем вид разностных кривых, которые были построены путем вычитания из данных частотного анализа ЭЭГ аналогичных данных для КП (рис. 5, канал 5), здесь обнаруживаются как участки с нулевой разностью (т. е. с полным совпадением частот ЭЭГ и КП), так и участки с некоторыми ее отклонениями в большую или меньшую сторону. В среднем наблюдалось смещение нормального распределения разностей частот в сторону отрицательных значений (рис. 6), что говорит о преобладании (у некоторых испытуемых довольно значительном) высокочастотных компонент в составе суммарного КП.

Чем объяснить сходство таких, казалось бы, разных параметров, как КП и ЭЭГ? Ответить на этот вопрос можно, поставив другой вопрос: каковы основания считать, что потенциалы, регистрируемые с различных участков кожного покрова, отражают состояния тех нейромышечных структур, которые находятся в непосредственном контакте с этими участками? Таким основанием, с одной стороны, могут служить многие эмпирические и научные факты из области психофизиологии. Например, при регистрации движений глаз методом окулографии электроды размещаются по краям глазной орбиты; для регистрации поверхностной электромиограммы они ставятся на тот участок кожи, который расположен над соответствующей мышцей; при регистрации ЭЭГ электроды распределяются по различным участкам скальпа, которые, как полагают, являются своего рода проекциями функционально специфичных отделов головного мозга, и т. д. С другой стороны, существует теория локализации психических функций, строгий вариант которой был сравнительно недавно отвергнут, но он продолжает до сих пор неявно направлять мысль многих специалистов в области нейронаук. С точки зрения локализационной теории, размещение отводящего электрода в том месте, где локализована исследуемая функция, кажется истиной, не требующей доказательства.

В данной статье остановимся только на эмпирических основаниях и тех случаях, в которых тот или иной электрический сигнал (ЭЭГ, ЭМГ, ЭОГ, ЭКГ, КГР, КП) отводится с помощью электродов, расположенных на разных участках кожной поверхности. Считается, что каждый из этих участков является независимым источником сигналов, поэтому сигнал, который регистрируется в точке А, и соответствующие ему процессы не зависят от процессов, происходящих в удаленной от нее точке Б. Насколько правомерно данное предположение? Кожа человека не является диэлектриком, она, в силу своего строения, — проводник электричества, поскольку в ней для этого достаточно влаги и других токопроводящих элементов. Следовательно, на любом ее локальном участке в той или иной степени должны найти свое отражение события, происходящие на всей или, по крайней мере, большей части ее поверхности. Таким образом, высказанное предположение о независимости иннервации в разных участках кожного покрова оказывается несостоятельным. К аналогичным выводам мы приходим в результате анализа работы электродов, которые расположены на разных кожных участках (например, как в нашем случае с одновременной регистрацией ЭЭГ и КП): электроды связаны друг с другом через кожу и поэтому не могут считаться независимыми передатчиками сигналов. На вход усилителя, к которому подключен отдельно взятый электрод, в действительности поступает некий суммарный сигнал, образующийся в результате смешения электрической активности самых разных локусов организма — от отдельной живой клетки до массивных мышечных и нервных структур.



Традиционно суммарный сигнал рассматривается как шум (внешний + внутренний), в котором скрыт полезный сигнал. Для извлечения последнего изобретены разные способы, одним из которых является заимствованная из радиотехники фильтрация «ненужных» частот, в результате которой в ЭЭГ, например, выделяются узкополосные биоритмы с известными названиями. При этом остается нерешенным вопрос о том, имеют ли эти ритмы независимые источники происхождения со своей собственной локализацией или же они есть продукт интерференции⁵ множества параллельно протекающих во всем организме активностей. Приведенные выше результаты согласуются скорее со второй альтернативой. Добавим, что не только высокая корреляция суммарных ЭЭГ и КП, но и сходство выделяемых в них частотных полос (от дельта- до гамма- ритмов)⁶, а также быстрая временная динамика их частотных компонент дают еще одно основание согласиться с гипотезой о том, что регистрируемые на поверхности кожи электрические сигналы отражают активность целостного организма, в каком бы участке мы их ни регистрировали. Но для изучения специфических свойств суммарной активности и ее влияния на локальные активности необходимо разрабатывать новые методы описания длительных широкополосных процессов.

Что касается различий в динамике частотных компонент ЭЭГ и КП, то их можно объяснить локальной модификацией суммарного сигнала, которая обусловлена местными процессами, протекающими в околоэлектродном участке; различие — это лишь одна из граней общего, его частный случай функционирования.

В последующих экспериментах исследуемый частотный диапазон ЭЭГ и КП будет расширен с целью определения его верхней границы. Полученные записи дают основания полагать, что верхняя граница будет близка к средней частоте миограммы (150 Гц), которая станет весьма вероятным критерием оценки электрокожной активности и которая обычно устранялась как досадный артефакт.

Литература

1. *Калашиников В.Н.* Электрическое сопротивление кожи как индикатор психофизиологического состояния человека [Электронный ресурс]. URL: http://www.osoznanie.biz/info/concept_n_10.pdf (дата обращения: 15.07.2016).
2. *Назаров А.И.* Сравнение частотных компонент электрокожной активности и ЭЭГ (качественный анализ) // Экспериментальная психология. 2017. Т. 10. №. 2. С. 104–113. doi:10.17759/expsy.2017100209
3. *Nagai Y., Critchley H.D., Featherstone E., Trimble M.R., Dolan R.J.* Activity in ventromedial prefrontal cortex covaries with sympathetic skin conductance level: a physiological account of a “default mode” of brain function // *NeuroImage*. 2004. Vol. 22. № 1. P. 243–251. doi: 10.1016/j.neuroimage.2004.01.019

⁵ Аналогом такой интерференции являются так называемые биения разночастотных гармонических сигналов.

⁶ Об этом говорилось в предыдущей статье.

COMPARISON OF FREQUENCY COMPONENTS OF EEG AND SKIN POTENTIAL (QUANTITATIVE ANALYSIS)

NAZAROV A.I.*, State University of «Dubna», Dubna, Russia,
e-mail: koval39@inbox.ru

In the experiment, a local EEG (Fp1) and a skin potential (SP) were recorded when anagrams were tested and several test tasks were performed. The main goal was to compare the structure and dynamics of the frequency components of the local EEG and SP based on a quantitative analysis of the obtained data. With the help of frequency analysis, profiles of frequency dynamics of the total EEG and SP, as well as histograms of distributions of their frequency components, were constructed, among which six typical patterns were singled out. In the series with simultaneous registration of EEG and SP, a high positive correlation of their total signals is established (the minimax range is from 0.70 to 0.94). Along with this, in the frequency patterns of the EEG and SP, some differences in the temporal distribution of the frequency components are found with a shift in the difference of the EEG-SP towards negative values. The possible nature of the general properties of the high-frequency dynamics of the EEG and SP is discussed. The obtained data are important, in particular, when interpreting the results of experiments with the simultaneous recording of several psychophysiological indices.

Keywords: skin potential, electro-encephalogram, biorhythm, frequency analysis.

References

1. Kalashnikov V.N. Elektricheskoe soprotivlenie kozhi kak indikator psikhofiziologicheskogo sostoyaniya cheloveka [Elektronnyi resurs] [*Electrical skin resistance as indicator of human psychophysiological status*]. Available at: http://www.osoznanie.biz/info/concept_gar.pdf (Accessed: 15.07.2016) (In Russ.).
2. Nagai Y., Critchley H.D., Featherstone E., Trimble M.R., Dolan R.J. Activity in ventromedial prefrontal cortex covaries with sympathetic skin conductance level: a physiological account of a “default mode” of brain function. *NeuroImage*, 2004, vol. 22, no. 1, pp. 243–251. doi: 10.1016/j.neuroimage.2004.01.019
3. Nazarov A.I. Sravnenie chastotnyh komponent ehlektrokozhoj aktivnosti i EEG (kachestvennyy analiz) [Comparing frequency components of EEG (qualitative analysis)]. *Ekspperimental'naya psikhologiya [Experimental Psychology]*, 2017, vol. 10, no. 2, pp. 104–113. (In Russ.). doi:10.17759/exppsy.2017100209.

For citation:

Nazarov A.I. Comparison of frequency components of EEG and skin potential (quantitative analysis). *Ekspperimental'naya psikhologiya = Experimental psychology (Russia)*, 2018, vol. 11, no. 2, pp. 95–109. doi:10.17759/exppsy.2018110207

* Nazarov A.I. Ph.D. in Psychology, Associate Professor, State University of «Dubna». E-mail: koval39@inbox.ru