

**ОЦЕНКА ТРЕБУЕМОЙ ТОЧНОСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ЭЭГ-ЭЛЕКТРОДОВ
ДЛЯ СИСТЕМ ИНТЕРФЕЙСА МОЗГ-КОМПЬЮТЕР**

Я.А. ТУРОВСКИЙ

Воронежский государственный университет, Университетская пл. д.1, г. Воронеж, 394006, Россия

Аннотация. В работе рассмотрен вопрос о характере возможного влияния электрофизиологических процессов регистрируемых в рамках ЭЭГ для электродов разной взаимной локализации. Мостиковые хлор-серебряные электроды располагались с максимально возможной пространственной плотностью, учитывая их конструктивные особенности. Анализировались параметры корреляции ЭЭГ сигналов, зарегистрированных со всего пула электродов по отношению к опорному, за который принимался электродов позиции Pz и корреляции между межэлектродным расстоянием коэффициентами кросскорреляции ЭЭГ. Полученные результаты продемонстрировали, что кросскорреляционные коэффициенты сигналов ЭЭГ практически не зависят от взаимного расположения электродов. Таким образом, даже смещение электрода на расстояние в 2 см может приводить к существенному изменению ЭЭГ-паттерна и сказываться на точности работы нейро-компьютерных интерфейсов. Дополнительные эргономические исследования показали, что пользователь, в подавляющем большинстве случаев, не в состоянии самостоятельно, без посторонней помощи, точно, с погрешностью менее 2 см, расположить электроды вне зависимости от типа применяемого ЭЭГ-шлема. Таким образом, указана и обоснована одна из возможных проблем недостаточно эффективной работы нейро-компьютерных интерфейсов. В качестве возможного решения предложен подход на основе пространственной селекции электродов, когда после их фиксирования на скальпе пользователь решает ряд типовых задач с известным ЭЭГ-ответом. В этом случае программно-аппаратная часть НКИ проводит отбор электродов, оставляя для дальнейшей работы только те, с которых был зарегистрирован необходимый сигнал.

Ключевые слова: биологическая обратная связь, электроэнцефалограмма, корреляция, электроды.

**ESTIMATION OF THE REQUIRED ACCURACY OF LOCALIZATION OF EEG ELECTRODES
FOR INTERFACE SYSTEMS OF THE BRAIN-COMPUTER**

Ya.A. TUROVSKY

Voronezh State University, University sq., 1, Voronezh, 394006, Russia

Abstract. The paper considers the question of the nature of the possible effect of electrophysiological processes recorded in the EEG for electrodes of different mutual localization. Bridged chlorine-silver electrodes were located with the maximum possible spatial density, taking into account their design features. The correlation parameters of the EEG signals recorded from the entire electrode pool with respect to the reference signal were analyzed. The reference electrode was the position electrode Pz and the correlation between the interelectrode distances by the EEG cross-correlation coefficients. The obtained results have demonstrated that cross-correlation coefficients of EEG signals are practically independent of the mutual arrangement of the electrodes. Thus, even a displacement of the electrode by a distance of 2 cm can lead to a significant change in the EEG pattern and affect the accuracy of the NCI. Additional ergonomic studies have shown that in most cases the user can not independently, without outside help, accurately, with an error of less than 2 cm, arrange the electrodes regardless of the type of used EEG-helmet. Thus, one of the possible problems of insufficiently effective operation of NCI is indicated and justified. As a possible solution, an approach based on spatial selection of electrodes is proposed, when after fixing them on the scalp the user solves a number of typical problems with the known EEG response. In this case, the hardware and software part of the NCI selects the electrodes, leaving for future work only those from which the required signal was registered.

Key words: biological feedback, electroencephalogram, correlation, electrodes.

Введение. Современный уровень развития нейрофизиологии, развитие систем биологической обратной связи, конвергируя с достижениями в области информационных технологий привело к созданию систем и технологий нейро-компьютерных интерфейсов (интерфейсов мозг-компьютер) [5, 7]. Согласно базовым принципам этой технологии сигналы различной природы (как правило электрические или оптические), зарегистрированные с головного мозга, путём математической обработки превращаются в команды для различных устройств, к которым относится, как правило, компьютер и управляемые на его

основе самоходные шасси, дроны, протезы конечностей и т.д.. Очевидной перспективой этой методики является не только появление нового канала коммуникации для людей с ограниченными возможностями, но высокая, превосходящая существующую, скорость управления широким спектром современных электронных изделий и устройств на их основе. Однако, несмотря на значительный потенциал, текущие реализации *нейро-компьютерного интерфейса* (НКИ) существенно уступают в скорости, точности и эргономичности даже существующим интерфейсам человек-компьютер в виде клавиатуры, джойстика, мыши. Существует ряд причин данного положения дел. К ним можно отнести и недостаточный в настоящее время уровень знаний в области нейрофизиологии, недостаточно совершенные алгоритмы обработки получаемых с мозга сигналов, недостатки аппаратной части устройств, регистрирующих эти сигналы. Тем не менее, даже устранение указанных недостатков по-прежнему не снимет ряд проблем использования НКИ именно в повседневной практике, а не в стенах лабораторий и клиник. Действительно, поскольку подавляющее большинство работ в области НКИ связано с анализом именно электроэнцефалографических сигналов, то одним из ключевых моментов для функционирования интерфейсов на основе ЭЭГ является характер расположения электродов на поверхности скальпа пользователя (пациента). Поскольку помимо лабораторных решений, целью разработчиков НКИ является создание программно-аппаратных решений для компьютерных игр и реабилитации, требования к простоте, эффективности и воспроизводимости расположения электродов на скальпе становятся существенно более жесткими, чем при классической системе расположения электродов 10-20 или иных схемах. Причина в первую очередь кроется в том, что тонкие и индивидуальные настройки алгоритмов, обрабатывающих ЭЭГ активность в итоге настраиваются на конкретные паттерны, которые в значительной мере связаны с локализацией тех или иных областей мозга. Особенно актуальна эта задача для т.н. асинхронных НКИ т.е. НКИ использующих фоновую активность мозга, без стимуляции какая, например, применяется в НКИ основанные на вызванных потенциалах *P300* и *SSVEP* [5, 7]. Однако, и для синхронных интерфейсов важна точная и воспроизводимая локализация электродов на скальпе. Таким образом, значительный интерес представляет задача оценки зависимости расстояния между электродами и характеристик ЭЭГ сигнала, зарегистрированного с них, что позволит оценить требуемую пространственную плотность расположения электродов и точность их локализации для задач конструирования НКИ.

Цель исследования – оценка взаимосвязи электрических процессов ЭЭГ в зависимости от расстояния между регистрирующими процессы электродами.

Материалы и методы исследования. В исследовании приняли участие 20 здоровых добровольцев мужского пола в возрасте от 18 до 20 лет (медиана 19 лет). Испытуемые не имели отягощённого неврологического и психиатрического анамнеза, не принимали психотропные препараты.

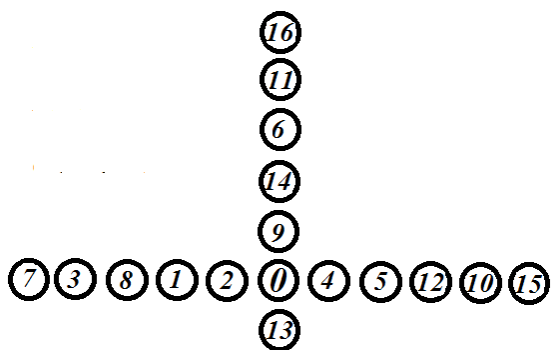


Рис. 1. Схема расположения электродов в эксперименте. За позицию «0» выбран электрод в позиции *Pz*

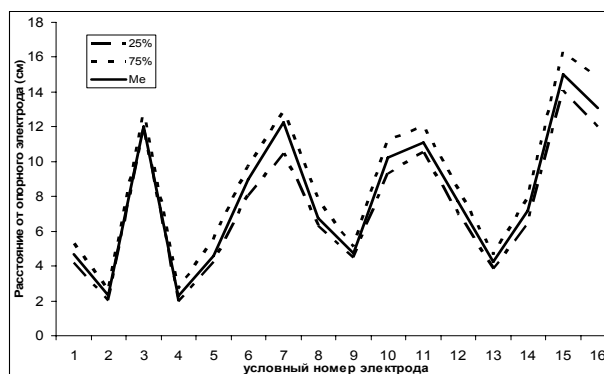


Рис. 2. Медиана и квантильный размах расстояния от электрода соответствующего номера до опорного электрода

Регистрация ЭЭГ осуществлялась электроэнцефалографом «Нейрон-Спектр-4ВП» производства ООО «Нейрософт» во второй половине дня с 15-00 до 18-00, с частотой дискретизации 5 кГц, и включенным режекторным фильтром, отключенным фильтрами высоких и низких частот. 17 мостиковых электродов располагались в теменной области пациента крестообразно на минимально возможном, учитывая конструкцию электрода расстоянии (рис.1). Импеданс электродов был ниже 30 КОм. Помимо этого проводилась оценка импеданса для пар соседних электродов для оценки появления токопроводящих электролитных мостиков. В случае их обнаружения установка электродов на скальп проводилась повторно. Длительность регистрации оставляла одну минуту. Испытуемых находилась с открытыми глазами в затемнённой, звукозаглушающей комнате сидя в кресле в удобной для него позы. Фотостимуляция, равно как и другие виды стимуляции не проводились. Из полученных данных отбирались не менее 30

односекундных безартефактных отрезков которые подвергались корреляционному анализу с использованием критерия Спирмена [3] с поправкой на эффекты многократного корреляционного исследования. Использование критерия Спирмена снимает требования к нормальности распределения исследуемой выборки мгновенных амплитуд ЭЭГ, и, главное, требование к линейной зависимости исследуемых электрофизиологических процессов. В качестве опорного электрода был выбран электрод *Pz* (позиция «0» на рис. 1) по сравнению с которым и оценивались корреляции сигналов с других электродов. Выбор области скальпа связан прежде всего с отсутствием в этом регионе выраженных мышечных образований, активность которых, как в случае с лобной, затылочной или височной областями может привести к появлению артефактов мышечной активности и, следовательно, исказить результаты наблюдения [1, 2].

Результаты и их обсуждение. На первом этапе анализировались усреднённые данные коэффициентов кросскорреляции между опорным электродом, находящимся в позиции *Pz* и остальными электродами, находящимися в позициях согласно рис. 1 и расстояниями согласно рис. 2. При этом очевидно, что по мере увеличения расстояния между электродами коэффициент корреляции должен уменьшаться, поскольку уменьшается влияние одного и того же электрофизиологического процесса на оба электрода. При этом коэффициент детерминации (r^2) покажет, насколько расстояние будет влиять на схожесть наблюдаемых ЭЭГ-паттернов, а значение $(1 - r^2)$ можно трактовать как либо электрофизиологический процесс наведённый с других нейроисточников, локализованных под другими электродами, либо же как процесс местный, связанный с нервной тканью под данным электродом.

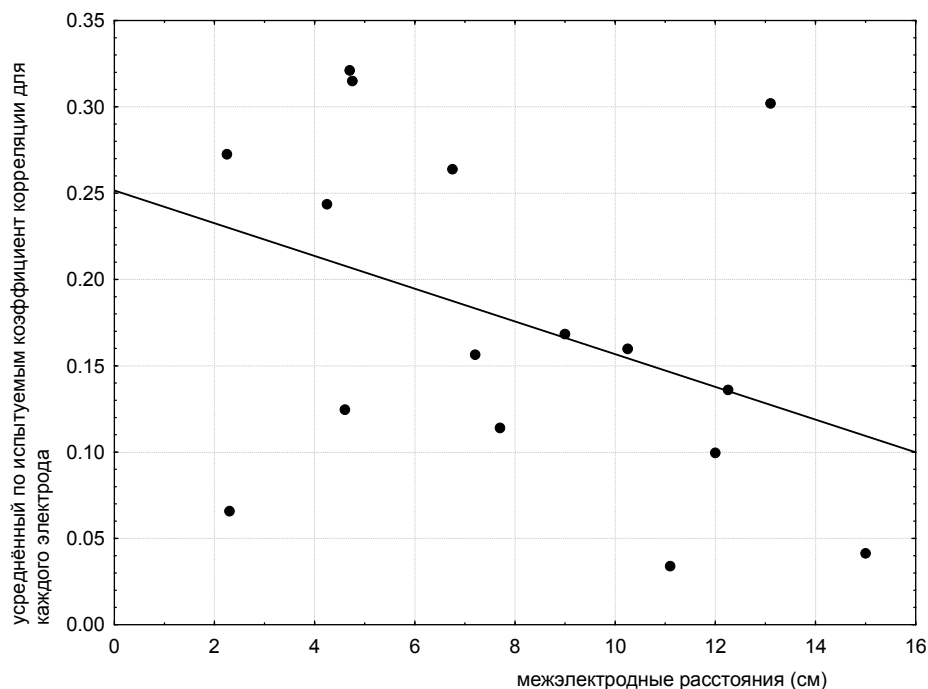


Рис. 3. Зависимость между межэлектродным расстоянием и корреляцией сигналов ЭЭГ с каждого из электродов

Исходя из данных, представленных на рис.3 получено значение коэффициента корреляции $r=-0.380$ ($p=0,1374$, $r^2=0.15$). Таким образом, можно утверждать, что на 1 см межэлектродного расстояния коэффициент корреляции падает на 0.01. Таким образом, усреднённые результаты по выборке демонстрируют, что даже несмотря на максимально близкое расположение электродов (~2 см) фоновые значения ЭЭГ в значительно, на 85%, определяются либо местными электрофизиологическими процессами, либо, процессами наведёнными с других областей мозга.

Однако, представленные на рис.3 являются данными усреднёнными. Иными словами они отображают закономерность, выявленную для всей выборки. Между тем, решая задачи в рамках проектирования и конструирования НКИ важным является вопрос – существуют ли пользователи у которых имеются иные зависимости между межэлектродным расстоянием и корреляцией ЭЭГ-сигнала, зарегистрированного с этих датчиков. Ответ на данный вопрос позволяет оценить, в первом приближении, долю пользователей для которых могут быть эффективны или же наоборот не эффективны те или иные конструкции НКИ. Для ответа на этот вопрос был проведён анализ индивидуальных корреляционных паттернов для каждого испытуемого. При этом коэффициент корреляции учитывался по

абсолютным значениям (рис. 4).

По результатам вычислений только один из испытуемых продемонстрировал значимую ($p < 0.05$) корреляцию. Однако, учитывая эффекты множественных корреляционных тестов и, следовательно, вводя необходимую поправку приходится признать, что и этот испытуемый не показал статистически значимой корреляции между межэлектродным расстоянием и коэффициентом корреляции ЭЭГ-паттернов. Таким образом, и данный подход продемонстрировал высокую независимость ЭЭГ-паттернов регистрируемых на двух соседних близкорасположенных электродах.

Учитывая полученные результаты, была проведена ещё одна серия опытов, рассматривающих технологии НКИ как позиционирующиеся не только как клиническая и лабораторная, но и как технология, применение которой доступно и вне стен специализированных научных и лечебных учреждений. Пять здоровых испытуемых должны были самостоятельно надеть электродные шапочки с закреплёнными на них в теменной области двумя электродами. В качестве маркеров правильной установки на скальпе испытуемых выбирались хорошо заметные образования: шрамы, папилломы. Использовались три варианта электродных систем: шлем для крепления мостиковых электродов, трикотажная шапочка за закреплёнными на ней электродами, консольное решение по типу *Emotiv* [6]. Каждый из вариантов шапочки (шлема) испытуемый надевал по 10 раз. Перед серией эксперимента с соответствующей шапочкой (шлемом) испытуемому надевали необходимые электроды, с тем, чтоб он мог запомнить их расположение. Порядок надевания ЭЭГ-шлемов выбирался случайным образом. Обратная связь не осуществлялась, т.е. испытуемый до окончания серии экспериментов не знал, насколько точно он позиционировал электрод. Так имитировалась ситуация самостоятельной работы пользователя с НКИ. По результатам экспериментов только двое испытуемых смогли добиться позиционирования электродов на скальпе на расстоянии менее двух сантиметров от заданной точки (2 и 3 случая соответственно). Таким образом, проблема точного позиционирования электродов на скальпе пользователя НКИ, в условиях отсутствия профессиональной помощи, и высокой чувствительности ЭЭГ паттернов к расположению датчиков указывает на одну из возможных причин неустойчивости работы НКИ в условиях многократного применения мультиэлектродных систем.

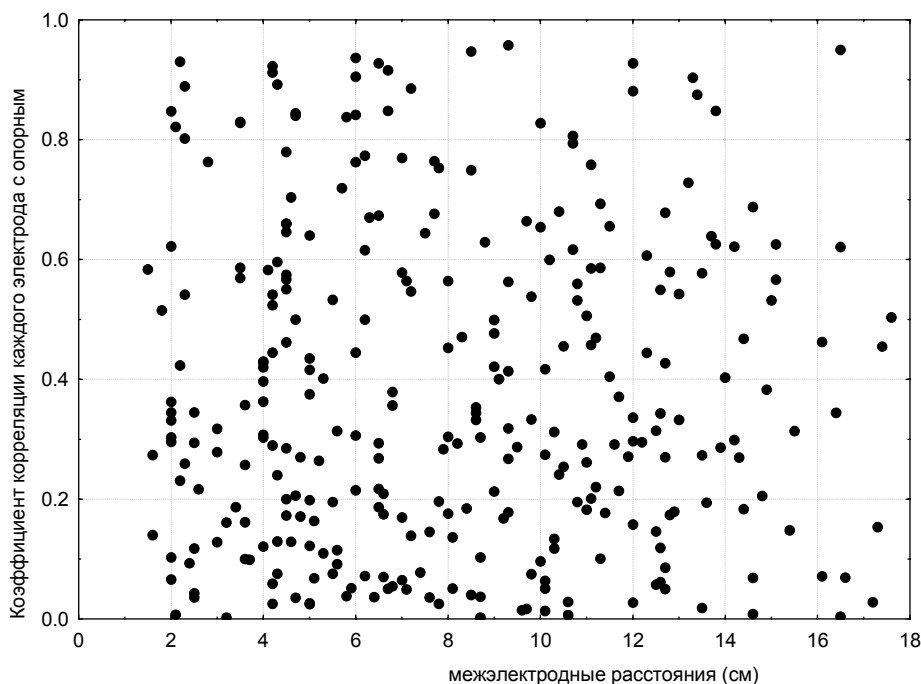


Рис. 4. Распределение индивидуальных коэффициентов корреляции для всех испытуемых и для каждой из позиций электродов

Одним из решений данной задачи является подход на основе пространственной селекции электродов ЭЭГ. Так, в работе [7] представлены методы, обеспечивающие обучение программно-аппаратной части НКИ для проведения выбора из множества электродов подмножества, формирующего наилучшее отношение сигнал/шум для последующего пространственного и временного накопления сигнала. Эти методы предложены для трёх типов синхронных НКИ: основанных на зрительных вызванных потенциалах, устойчивых зрительных вызванных потенциалах и когнитивных вызванных потенциалах с компонентом P300. Предложен алгоритм построения на основе анализа цепочек локальных максимумов и ми-

нимумов в матрице квадратов коэффициентов вейвлет-преобразования специализированного фильтра для оценки вызванных потенциалов. Предложенный подход позволяет существенно упростить обучение систем НКИ в случае изменения положения регистрирующих электродов, и, тем самым, увеличить функциональные возможности синхронных НКИ. Аналогично, может быть решена задача и для синхронных НКИ. Существенным недостатком подобного подхода является необходимость наличия большого числа датчиков, часть из которых в ходе работы не будет использоваться, однако, в силу конструктивных особенностей будет создавать пользователю определённые неудобства.

Выводы:

1. Полученные результаты позволяют утверждать, что фоновые ЭЭГ паттерны существенно различаются даже при относительно близком (~2 см) расположении электродов, что требует, для повышения качества работы НКИ значительно более строгих требований и более точных подходов к многократному и повторному расположению датчиков на скальпе пациента-пользователя НКИ.

2. В качестве паллиативной меры возможно использование алгоритмов предварительной, непосредственно предшествующей работе программной селекции электродов ЭЭГ, при которой, выполняя тестовые задания и известным результатом, определяется, какие именно электроды получили ожидаемый ответ, и, в дальнейшем использовать только их в работе НКИ.

Заключение. В работе рассмотрен вопрос о характере возможного влияния электрофизиологических процессов регистрируемых в рамках ЭЭГ для электродов разной взаимной локализации. Мостиковые хлор-серебряные электроды располагались с максимально возможной пространственной плотностью, учитывая их конструктивные особенности. Анализировались параметры корреляции ЭЭГ сигналов, зарегистрированных со всего пула электродов по отношению к опорному, за который принимался электрод позиции Pz и корреляции между межэлектродным расстоянием коэффициентами кросскорреляции ЭЭГ. Полученные результаты продемонстрировали, что кросскорреляционные коэффициенты сигналов ЭЭГ практически не зависят от взаимного расположения электродов. Таким образом, даже смещение электрода на расстояние в 2 см может приводить к существенному изменению ЭЭГ-паттерна и сказываться на точности работы НКИ. Дополнительные эргономические исследования показали, что пользователь, в подавляющем большинстве случаев, не в состоянии самостоятельно, без посторонней помощи точно, с погрешностью менее 2 см, расположить электроды вне зависимости от типа применяемого ЭЭГ-шлема. Таким образом, указана и обоснована одна из возможных проблем недостаточно эффективной работы НКИ. В качестве возможного решения предложен подход на основе пространственной селекции электродов, когда после их фиксирования на скальпе пользователь решает ряд типовых задач с известным ЭЭГ-ответом. В этом случае программно-аппаратная часть НКИ проводит отбор электродов, оставляя для дальнейшей работы только те, с которых был зарегистрирован необходимый сигнал.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (грант 16-29-08342-офи_м).

Автор выражает признательность Кургалину С.Д.

Литература

1. Бойцова Ю.А., Данько С.Г., Медведев С.В. Динамика мощности ээг в бета- и гамма-диапазонах в условиях нормальной и ослабленной электромиограммы лицевых мышц // Физиология человека. 2016. Т. 42, № 6. С. 5–17.
2. Данько С.Г., Грачёва Л.В., Бойцова Ю.А., Соловьёва М.Л. Электромиограмма перикраниальных мышц в частотных диапазонах бета и гамма при сравнении эмоционально и когнитивно различных состояний // Физиология человека. 2014. Т. 40, № 2. С. 5.
3. Рунион Р. Справочник по непараметрической статистике. Современный подход. Пер. с англ. Демиденко Е.З. М.: Финансы и статистика, 1982. 198 с.
4. Туровский Я.А. Оптимизация работы синхронного нейрокомпьютерного интерфейса на основе селекции каналов электроэнцефалограммы // Программная инженерия. 2014. № 5. С. 26–31.
5. Farwell L.A., Donchin E. Talking off the top of your head: towards mental prosthesis utilizing event-related brain potentials // Electroenceph. Clin. Neurophysiol. 1988. V. 70. P. 510–523.
6. Research finds huge differences in brain activity between Amateur and Professional players [электронный ресурс]. URL: <https://www.emotiv.com/independent-studies/research-finds-huge-differences-brain-activity-amateur-professional-players> (дата обращения 17.02.2017).
7. Gao X., Xu D., Cheng M. A BCI-Based Environmental Controller for the Motion- Disabled // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2003. V.11, № 2. P. 137–140.

References

1. Boytsova YA, Dan'ko SG, Medvedev SV. Dinamika moshchnosti eeg v beta- i gamma-diapazonakh v usloviyakh normal'noy i oslablennoy elektromiogrammy litsevykh myshts [Dynamics of the power of the aeags in the beta and gamma ranges under normal and weakened electromyogram of the facial muscles]. *Fiziologiya cheloveka*. 2016;42(6):5-17. Russian.
2. Dan'ko SG, Gracheva LV, Boytsova YA, Solov'eva ML. Elektromiogramma perikranial'nykh myshts v chastotnykh diapazonakh beta i gamma pri sravnenii emotsional'no i kognitivno razlichnykh sostoyaniy [Electromyogram of pericranial muscles in beta and gamma frequency bands when comparing emotionally and cognitively different states]. *Fiziologiya cheloveka*. 2014;40(2):5. Russian.
3. Runion R. Spravochnik po neparametricheskoy statistike [Handbook of Nonparametric Statistics]. *Sovremennyy podkhod*. Per. s angl. Demidenko EZ. Moscow: Finansy i statistika; 1982. Russian.
4. Turovskiy YA. Optimizatsiya raboty sinkhronnogo neyrokomp'yuternogo interfeysa na osnove selektsii kanalov elektroentsefalogrammy [Optimization of the synchronous neurocomputer interface based on the selection of the electroencephalogram channels]. *Programmnyaya inzheneriya*. 2014;5:26-31. Russian.
5. Farwell LA, Donchin E. Talking off the top of your head: towards mental prosthesis utilizing event-related brain potentials. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.* 1988;70:510-23.
6. Research finds huge differences in brain activity between Amateur and Professional players [elektronnyy resurs]. Available from: <https://www.emotiv.com/independent-studies/research-finds-huge-differences-brain-activity-amateur-professional-players>.
7. Gao X, Xu D, Cheng M. A BCI-Based Environmental Controller for the Motion- Disabled. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2003;11(2):137-40.

Библиографическая ссылка:

Туровский Я.А. Оценка требуемой точности локализации ЭЭГ-электродов для систем интерфейса мозг-компьютер // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2017. №2. Публикация 3-3. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2017-2/3-3.pdf> (дата обращения: 04.05.2017). DOI: 10.12737/article_591562d9df8f70.49718564.