

УДК 612.825.24

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕДЛЕННЫХ ПРЕДВИГАТЕЛЬНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ МОЗГА ЧЕЛОВЕКА (МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ РЕГИСТРАЦИИ ПОТЕНЦИАЛА ГОТОВНОСТИ)**¹Трошина Е.М., ¹Сазонова О.Б., ¹Кроткова О.А., ²Шарова Е.В.,
¹Каверина М.Ю., ¹Суханова А.В.**

¹ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии имени академика Н.Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, e-mail: emt@inbox.ru;
²ФГБУН «Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии» РАН, Москва

В структуре «связанных с движением потенциалов мозга» (СДПМ) выделяется медленное негативное колебание, предшествующее реализации двигательной задачи, так называемый «потенциал готовности» (ПГ). ПГ формируется при совершении произвольного движения без какого-либо внешнего запускающего стимула и является электрографическим эквивалентом процесса формирования моторной программы. Использование классической методики регистрации ПГ оказывается невозможным у пациентов с такой формой нарушения поведения, как аспонтанность, проявляющейся вследствие церебральной патологии, что значительно затрудняет или часто делает невозможным процесс их реабилитации. При выраженной аспонтанности пациент не имеет собственного побудительного механизма для произвольного совершения движения и может выполнить задание только по внешнему «запускающему» сигналу. В связи с этим была разработана и апробирована на группе нормы модифицированная методика регистрации ПГ – выполнение движения (сжатие эспандера) по звуковому сигналу в качестве побудительного стимула. Показано, что при совершении заданного движения по звуковому сигналу регистрируется медленный негативный потенциал (МНП) по физиологическому смыслу сходный с ПГ. МНП может рассматриваться как электрографический эквивалент процесса формирования моторной программы у пациентов с аспонтанностью и использоваться в реабилитационном процессе этих пациентов.

Ключевые слова: произвольные движения, потенциал готовности, медленный негативный потенциал, аспонтанность

STUDY OF SLOW PRELIMINARY POTENTIALS OF THE HUMAN BRAIN (MODIFICATION OF THE METHODOLOGY THE READINESS POTENTIAL)**¹Troshina E.M., ¹Sazonova O.B., ¹Krotkova O.A., ²Sharova E.V.,
¹Kaverina M.Yu., ¹Sukhanova A.V.**

¹Federal State Autonomous Institution «N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery» of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, e-mail: emt@inbox.ru;
²Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of RAS, Moscow

In the structure of the «movement-related brain potentials» (SDPM), a slow oscillation preceding the realization of a motor task is distinguished, the so-called «readiness potential» (PG). PG is formed when performing an arbitrary movement without any external triggering stimulus and is the electrographic equivalent of the process of forming a motor program. The use of the classical method of PG registration is impossible in patients with such a form of behavior disorder as spontaneity, manifested as a result of cerebral pathology, which significantly complicates, or often makes it impossible, the process of their rehabilitation. With pronounced spontaneity, the patient does not have his own incentive mechanism for arbitrary movement and can perform the task only by an external «triggering» signal. In this regard, a modified method for registering PG was developed and tested on the norm group – performing a movement (squeezing the expander) by an audible signal as an incentive stimulus. It is shown that when a given movement is performed by an audible signal, a slow negative potential (MNP) is registered in the physiological sense similar to PG. MNP can be considered as an electrographic equivalent of the process of forming a motor program in patients with spontaneity and used in the rehabilitation process of these patients.

Keywords: voluntary movements, readiness potential, slow negative potential, spontaneity

При различных формах церебральной патологии у пациентов нередко выявляется такая форма нарушения поведения, как аспонтанность. Нейропсихология определяет аспонтанность как невозможность самостоятельного включения больного в выполнение какой-либо деятельности, такие пациенты не пытаются вступить в контакт с окружающими людьми, остаются безучастными в ответ на просьбу выполнить какое-либо действие. Как прави-

ло, симптом аспонтанности проявляется полимодально, однако может проявляться и избирательным нарушением какой-либо отдельной функции: например, выделяют речевую, двигательную аспонтанность.

Снижение спонтанной активности пациентов крайне затрудняет процесс их реабилитации. При выраженной аспонтанности пациент может повторить движение вслед за инструктором или выполнить движение по сигналу (по голосовой команде

врача, по зрительному или звуковому сигналу), однако не имеет собственного побудительного механизма для произвольного совершения движения.

При исследовании произвольных движений показана эффективность использования нейрофизиологических методик в сочетании с нейровизуализационными методами. Это анализ изменений суммарной биоэлектрической активности мозга (ЭЭГ) [1–3] в сопоставлении с параметрами фМРТ в процессе выполнения двигательной задачи [4], электромиографической (ЭМГ) активности [5], а также анализ кратковременных сдвигов биопотенциалов, возникающих в мозге человека за несколько секунд до начала движения [6–8]. Это так называемый «потенциал готовности» (ПГ) – медленная негативная волна, которая выделяется в структуре «связанных с движением потенциалов мозга» (СДПМ) за несколько секунд до начала выполнения произвольного движения с максимальной представленностью в лобных и центральных областях и является электрографическим коррелятом процесса формирования моторной программы [9–11]. По физиологическому смыслу ПГ сходен с другими медленными событийно связанными потенциалами (ССП) мозга (Е-волна, компонент Р300, негативность рассогласования и др.).

Особенностью ССП является то, что их возникновение не связано с каким-то внешним стимулом в обычном понимании, а регистрируются они в ответ на некое эндогенное событие, например ожидание стимула, подготовка к движению, на различия между стимулами и т.д. Сущность данного электрофизиологического феномена заключается в том, что в параметрах ССП отражаются не только реакции в ответ на тот или иной стимул, но и активность мозга, связанная с распознаванием, запоминанием стимула и принятием решения о его значимости.

Нами, совместно с отечественной фирмой МБН, разрабатывалась программа тренинга для реабилитации пациентов со сниженным уровнем спонтанности. В основу программы положена модифицированная методика регистрации ПГ с анализом его амплитудно-временных параметров в качестве электрографических коррелятов спонтанности при выполнении двигательной задачи в произвольном темпе и по заданному («запускающему») звуковому сигналу. Необходимость модификации методики была обусловлена особенностями нарушения поведения пациентов с аспонтанностью.

Целью данной работы является апробация предложенной модифицированной методики регистрации ПГ на группе здоровых людей для оценки физиологической идентичности биоэлектрической активности, зарегистрированной в двух вариантах методики: движение в произвольном темпе и по запускающему сигналу, а также оценить возможность применения модифицированной методики с запускающим сигналом при исследовании пациентов с аспонтанностью.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось на группе из 18 здоровых человек (60–22 года, средний возраст 41 год). В *первой серии* исследуемому предлагалось сжимать эспандер в произвольном темпе, не чаще 1 раза в 5–6 с, последовательно правой (тест 1) и левой (тест 2) рукой, во *второй серии* надо было сжимать эспандер в ответ на короткий звуковой сигнал, который подавался с временным интервалом 6 с (задано программой автоматически),

Активные электроды располагались на скальпе в точках F3, F4, C3, C4, комбинация отведений биопотенциалов монополярная, референтные электроды на мочках ушей – A1 и A2, четные отведения справа, нечетные – слева. Частотная полоса максимально расширена в область медленных частот (до 0,01 Гц), пропускание частых ритмов ограничивалось 25 Гц. Суммировались и усреднялись участки ЭЭГ с эпохой анализа 5 с (3 с до и 2 с после опорного сигнала, которым служил момент замыкания контакта на эспандере), количество усредняемых эпох не менее 30. Для контроля выполнения движения регистрировалась ЭМГ руки, сжимающей эспандер.

Результаты исследования и их обсуждение

В первой серии зарегистрирована медленная негативная волна перед началом движения, представленная в лобных и центральных областях мозга билатерально – потенциал готовности (ПГ), являющийся электрографическим эквивалентом процесса формирования моторной программы. Временные параметры ПГ (длительность в мс) оценивались в интервале от стабильного нарастания восходящего фронта потенциала до момента замыкания контакта эспандера при максимальном сжатии (опорный сигнал для запуска усреднения), амплитуда (в мкВ) – от начала подъема негативной фазы волны до ее максимума (рис. 1).

Длительность ПГ варьировала в диапазоне 1172–726 мс, амплитуда – 8,6–3,4 мкВ.

Существенной межполушарной асимметрии ПГ по длительности и амплитуде при движении правой и левой руки не выявлено, в отдельных случаях отмечалось преобладание амплитуды ответа и меньшая его длительность в полушарии контралатеральном по отношению к «работающей» по сравнению с ипсилатеральным полушарием.

При реализации двигательной задачи «сжатие эспандера в ответ на звуковой стимул» (вторая серия) зарегистрирован медленный негативный потенциал (МНП), аналогичный ПГ по пространственной представленности и параметрам: длительность потенциала в диапазоне 1149–702 мс, амплитуда – 8,3–3,1 мкВ (рис. 2).

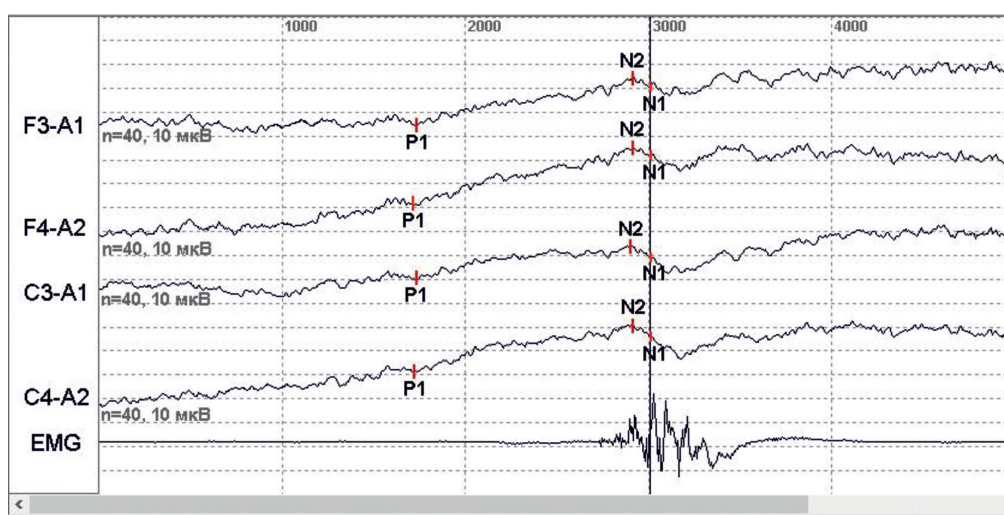


Рис. 1. Потенциал готовности (ПГ), зарегистрированный в лобных (F3, F4) и центральных (C3–C4) отведениях при сжатии эспандера в произвольном темпе, A1 и A2 – референтные электроды на мочках ушей. EMG – электромиограмма «работающей» руки. Маркерами отмечены: P1 – начало стабильного нарастания восходящего фронта негативной волны (начало ПГ), N1 – момент замыкания контакта эспандера (P1–N1 – длительность ПГ), N2 – амплитудный максимум ПГ

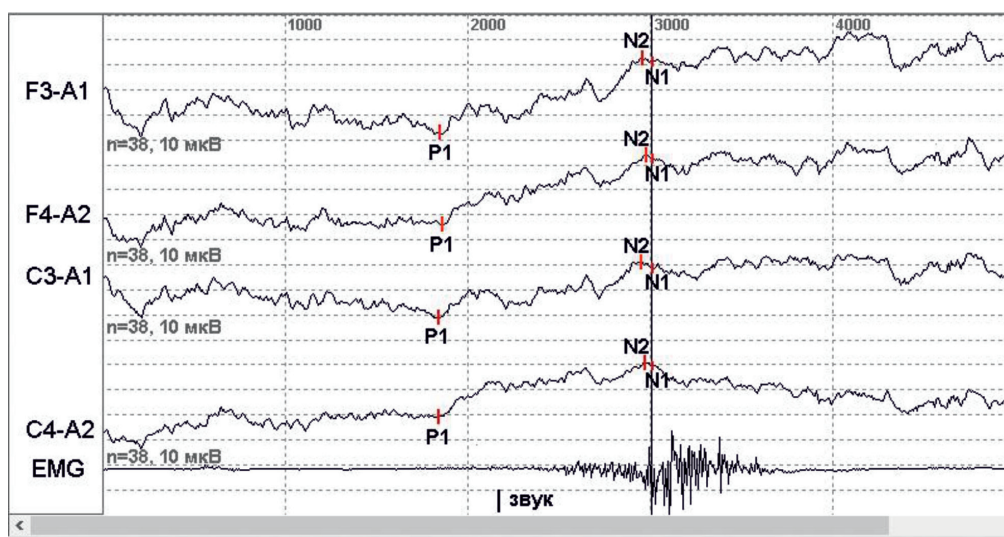


Рис. 2. Медленный негативный потенциал (МНП) (медленная волна P1–N1), зарегистрированный в лобных (F3, F4) и центральных (C3–C4) отведениях при сжатии эспандера по звуковому сигналу, A1 и A2 – референтные электроды на мочках ушей. EMG – электромиограмма «работающей» руки. Маркерами отмечены: P1 – начало стабильного нарастания восходящего фронта негативной волны (начало МНП), N1 – момент замыкания контакта эспандера (P1–N1 – длительность МНП), N2 – амплитудный максимум МНП

При сопоставлении средних показателей абсолютных значений временных параметров этих двух видов медленной активности выявляется меньшая длительность МНП, чем ПГ, что свидетельствует о более коротком периоде формирования моторной программы при реализации движения по звуковому стимулу, чем при совершении движения в произвольном темпе. Существенной разницы амплитудных параметров не отмечено. Выявлялись сходные с ПГ тенденции асимметрии амплитудно-временных параметров МНП в контралатеральном и ипсилатеральном полушарии по отношению к «работающей» руке. Отмечается начало нарастания МНП перед звуковым сигналом, что, по-видимому, свидетельствует о формировании моторной программы не с момента получения звукового сигнала, а в более ранний период, т.е. в период ожидания внешнего стимула.

Схожесть пространственной представленности и значений амплитудно-временных параметров ПГ, зарегистрированного в первой серии исследования, и МНП, зарегистрированного во второй серии исследования, дает основание полагать, что данные электрографические феномены сходны

по физиологическому смыслу и механизмам формирования, и рассматривать МНП, аналогично ПГ, как электрографический эквивалент процесса формирования моторной программы.

Средние значения параметров ПГ по группе здоровых обследуемых при сжатии эспандера в произвольном темпе правой и левой рукой представлены в табл. 1.

Средние значения параметров МНП по группе здоровых обследуемых при сжатии эспандера на звуковой сигнал правой и левой рукой представлены в табл. 2.

Средние по группе нормы значения временных параметров ПГ в сопоставлении с аналогичными показателями МНП, представленные в графическом виде (рис. 3), демонстрируют большую длительность медленного потенциала (ПГ), формирующегося при произвольном движении, чем при движении по звуковому сигналу (МНП). Существенных различий в амплитудных параметрах не выявлено (рис. 4), на диаграммах также можно видеть преобладание амплитуды ответа и меньшую его длительность в полушарии контралатеральном по отношению к «работающей» по сравнению с ипсилатеральным полушарием.

Таблица 1

Временные и амплитудные параметры ПГ при сжатии эспандера в произвольном темпе правой и левой рукой (средние значения по группе здоровых обследуемых)

Отведения ЭЭГ	Длительность (мс)		Амплитуда (мкВ)	
	ПГ правая рука	ПГ левая рука	ПГ правая рука	ПГ левая рука
F3-A1	947,8	949,5	6,5	6,2
F4-A2	950,2	947,9	5,8	6
C3-A1	946,5	951,5	6,2	6
C4-A2	948,8	948,5	6	5,6

Таблица 2

Временные и амплитудные параметры МНП при сжатии эспандера в произвольном темпе правой и левой рукой (средние значения по группе здоровых обследуемых)

Отведения ЭЭГ	Длительность (мс)		Амплитуда (мкВ)	
	МНП правая рука	МНП левая рука	МНП правая рука	МНП левая рука
F3-A1	925,2	927,6	6	5,4
F4-A2	927,4	924,9	5,7	5,8
C3-A1	924,5	929,1	6,1	5,6
C4-A2	927,8	923,2	5,9	5,7

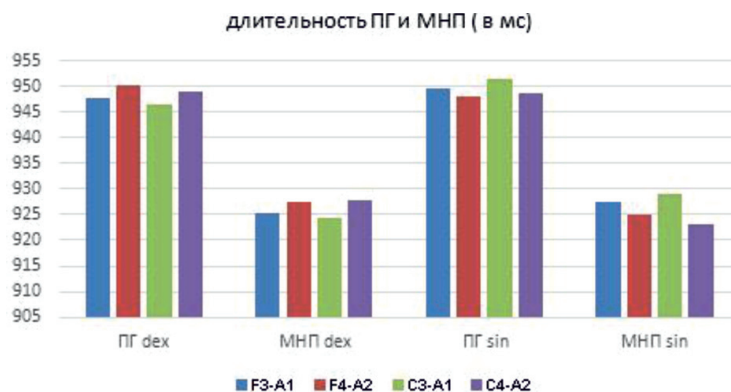


Рис. 3. Соотношение длительности ПГ и МНП при сжатии эспандера правой (ППГ dex, МНП dex) и левой (ППГ sin, МНП sin) рукой (средние значения по группе нормы); F3-A1, C3-A1 – отведения левого полушария, F4-A2, C4-A2 – отведения правого полушария

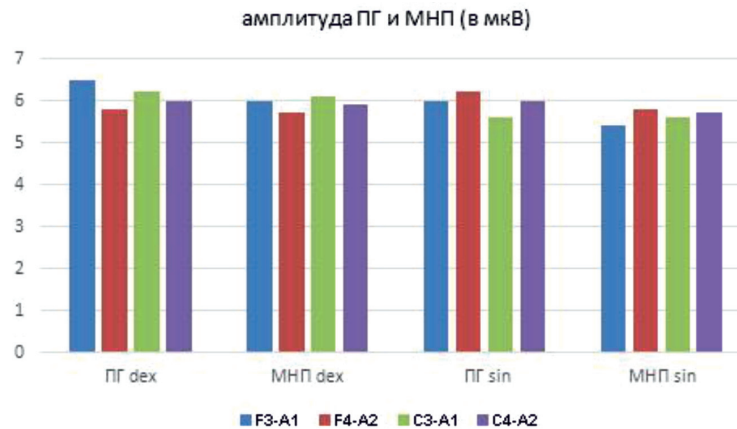


Рис. 4. Соотношение амплитуды ПГ и МНП при сжатии эспандера правой (ППГ dex, МНП dex) и левой (ППГ sin, МНП sin) рукой (средние значения по группе нормы); F3–A1, C3–A1 – отведения левого полушария, F4–A2, C4–A2 – отведения правого полушария

Заключение

На группе нормы апробирована модифицированная методика регистрации ПГ для дальнейшего ее использования в качестве тренинговой программы реабилитации пациентов со сниженным уровнем спонтанности. В первой серии исследования регистрировалась медленная активность, появляющаяся за несколько секунд до начала выполнения произвольного движения (сжатие эспандера в произвольном темпе), с максимальной представленностью в лобных и центральных областях, которая является электрографическим эквивалентом процесса формирования моторной программы. Данный электрофизиологический феномен, по амплитудно-временным параметрам и пространственной представленности, соответствует классическому «потенциалу готовности», описанному в литературе. Как показано в ранее опубликованной нами статье [11], ПГ может рассматриваться в качестве электрографического коррелята спонтанности при совершении произвольного движения.

Учитывая особенности пациентов с выраженной аспонтанностью (отсутствие собственного побудительного механизма для произвольного совершения движения и выполнение движения лишь в ответ на внешний стимул), реализация классического варианта методики регистрации ПГ у них оказывается невозможной. Нами разработана модифицированная методика регистрации ПГ – выполнение заданного движения (сжатие эспандера) по звуковому сигналу. Показано, что при совершении заданного движения по звуковому сигналу регистрируется МНП (вторая серия

исследования), по физиологическому смыслу сходный с ПГ. Данная активность также может рассматриваться как электрографический эквивалент процесса формирования моторной программы и как маркер спонтанности при совершении произвольного движения.

В результате проведенного исследования отмечено, что начало нарастания МНП происходит до получения звукового сигнала, что может свидетельствовать о формировании моторной программы в период ожидания внешнего стимула.

Использование звукового сигнала в качестве побудительного стимула для реализации двигательной задачи, по-видимому, будет эффективным в программе реабилитации пациентов с аспонтанностью, что планируется реализовать в наших дальнейших исследованиях.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-29-01002 мк.

Список литературы

1. Асланян Е.В., Кирой В.Н., Лазуренко Д.М., Бахтин О.М., Миняева Н.Р. Спектральные характеристики ЭЭГ в динамике произвольной двигательной активности // Журнал высшей нервной деятельности. 2014. Т. 64. № 2. С. 147–158. DOI: 10.7868/S0044467714020038.
2. Шарова Е.В., Болдырева Г.Н., Жаворонкова Л.А., Ярец М.Ю., Каверина М.Ю., Трошина Е.М., Кроткова О.А. Поиск ЭЭГ-маркеров произвольного компонента двигательной активности человека // Современные проблемы науки и образования. 2020. № 3. С. 56–65. [Электронный ресурс]. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=29818> (дата обращения: 27.10.2021). DOI: 10.17513/spno.29818.
3. Lew E., Chavarriaga R., Silvoni S., Millán J. del R. Detection of self-paced reaching movement intention from EEG signals. *Frontiers in Neuroengineering*. 2012. Vol. 5. No. 13. P. 1–17. DOI: 10.3389/fnint.2012.00059.
4. Болдырева Г.Н., Шарова Е.В., Жаворонкова Л.А., Челябинина М.В., Дубровская Л.П., Симонова О.А., Смир-

нов А.С., Трошина Е.М., Корниенко В.Н. ФМРТ и ЭЭГ реакции мозга здорового человека при активных и пассивных движениях ведущей рукой // Журнал высшей нервной деятельности. 2014. Т. 64. № 5. С. 388–399. DOI: 10.7868/S0044467714050049.

5. Хорева В.С., Максименко В.А., Пицик Е.Н., Руннова А.Е., Куркин С.А., Храмов А.Е. Анализ двигательной активности с использованием сигналов электромиограмм // Информационно-управляющие системы. 2019. № 3. С. 114–120. DOI: 10.31799/1684-8853-2019-3-114-120.

6. Savić A., Lontis R., Jiang N., Popović M., Farina D., Dremstrup K., Mrachacz-Kersting N. Movement related cortical potentials and sensory motor rhythms during self initiated and cued movements. Replace, Repair, Restore, Relieve—Bridging Clinical and Engineering Solutions in Neurorehabilitation. Springer International Publishing. 2014. P. 701–707. [Electronic resource]. URL: <https://researchgate.net/publication/271909395> (date of access: 29.09.2021). DOI: 10.1007/978-3-319-08072-7_98.

7. Иванова М.П. Корковые механизмы произвольных движений у человека. Отделение физиологии, ВНИИ физической культуры. М.: Наука, 1991. 189 с.

8. Brunia C.H.M., van Boxtel G.J.M., Bocker K.B.E. Negative slow waves as indices of anticipation: the Bereitschaftspotential, the Contingent negative variation, and the stimulus-preceding negativity. The Oxford Handbook of Event-Related Potential Components. Oxford Library of Psychology. Steven J. Luck, Emily S. Kappenman. Oxford University Press. 2011. P. 189–208. DOI: 10.1093/oxfordhb/9780195374148.013.0108.

9. Shibasaki H., Hallett M. What is the Bereitschaftspotential? Clinical Neurophysiology. 2006. Vol. 117. P. 2341–2356. DOI: 10.1016/j.clinph.2006.04.025.

10. Лазуренко Д.М., Киной В.Н., Асланян Е.В., Шепелев И.Е., Бахтин О.М., Миняева Н.Р. Электрографические характеристики связанных с движением потенциалов // Журнал высшей нервной деятельности. 2017. Т. 67. № 4. С. 430–444. DOI: 10.7868/S0044467717040050.

11. Трошина Е.М., Сазонова О.Б., Кроткова О.А., Шарова Е.В., Каверина М.Ю., Болдырева Г.Н., Жаворонкова Л.А. Связанные с движением потенциалы мозга человека как электрографический коррелят подготовки и реализации произвольного двигательного акта // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 5. С. 57–62.