

УДК 612.825.1:[612.821.1-2]

## **ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА С ЭЭГ-ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЕГО ИСХОДНОГО СОСТОЯНИЯ ПОКОЯ**

*Крижановский С. А., Зима И. Г., Тукаев С. В., Чернинский А. А.*

Проведен поиск ЭЭГ-характеристик состояния покоя человека, по которым можно было бы делать предположения об эффективности и особенностях его дальнейшей адаптации к различным когнитивным нагрузкам. Показано, что при выполнении как мнемонических, так и сенсомоторных заданий результативность деятельности находилась в обратной зависимости от мощности колебаний ЭЭГ-диапазона 9,5-10,5 Гц в левом лобном отведении в состоянии покоя.

**Ключевые слова:** ЭЭГ, состояние покоя, память, сенсомоторная реакция.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Любая деятельность человека разворачивается на фоне определенного функционального состояния его нервной системы, которое может быть оценено по параметрам ЭЭГ. Показано, что ряд индивидуальных ЭЭГ-характеристик может обеспечивать прогноз особенностей ответа на последующие изменения в окружающей среде [1, 2]. Однако в исследованиях различных типов мозговой активности человека чаще всего применяется сопоставление спектрально-мощностных характеристик ЭЭГ во время выполнения различных заданий с характеристиками исходного состояния [3 – 5]. Как правило, типологические и ситуативные особенности самого исходного состояния при этом не используются, что может приводить к «маскировке» некоторых реакций, имеющих противоположную направленность у разных испытуемых. Так, показано, что при выполнении заданий на комплексную обработку информации интроверты демонстрируют реакцию синхронизации, тогда как для экстравертов характерна десинхронизация ЭЭГ [6]. В таких ситуациях целесообразным, на наш взгляд, представляется использование критериев, которые позволили бы учесть индивидуальные особенности мозгового обеспечения различных видов деятельности.

В связи с этим целью нашего исследования было выявление универсальных ЭЭГ-характеристик состояния покоя человека, по которым можно было бы судить об эффективности и особенностях его последующей адаптации к различным когнитивным нагрузкам. В данной работе анализ связи результативности деятельности обследуемых с ЭЭГ-характеристиками их исходного функционального состояния (ФС) проводили в двух сериях тестов – с выполнением простой сенсомоторной реакции на звуковой раздражитель и с тестом на определение объема кратковременной памяти. В первом случае обследуемыми выполнялась деятельность автоматизированного типа, требующая привлечения сознательного контроля (т.е. определенной концентрации внимания) [3], однако не включающая переключения внимания, вербального анализа и запоминания

сенсорной информации, поскольку отсутствовала вариабельность стимульного материала. В то же время, как известно, выполнение мнемонического теста базируется на использовании названных когнитивных функций [4]. Кроме того, как указывает Дж. Канеман, задача, которая вызывает интенсивную нагрузку на кратковременную память, обязательно задает жесткий временной дефицит [7]. Таким образом, вторая серия тестов была более сложной нагрузкой, поскольку характеризовалась одновременно и более высокими требованиями к ресурсам нервной системы, и большим информационным насыщением задачи.

### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

В исследовании в качестве испытуемых приняли участие 48 добровольцев – студентов Киевского национального университета возрастом от 18 до 22 лет, обоих полов. Во время обследования они находились в затемненной звукоизолированной камере, в кресле в удобном положении полулежа с закрытыми глазами. В двух отдельных группах были проведены обследования с регистрацией ЭЭГ при выполнении простой сенсомоторной реакции на звуковой раздражитель (СМР, n=21) и во время тестирования объема кратковременной памяти (n=27). Во всех сериях обследований запись ЭЭГ осуществляли каждую минуту в виде отдельных 20-секундных проб.

В начале каждого опыта на протяжении трех минут записывали ЭЭГ в состоянии покоя.

Затем испытуемые первой группы получали инструкцию: “В ответ на звуковой сигнал как можно быстрее нажимайте на клавишу большим пальцем правой руки”, после чего начиналось выполнение теста. В качестве сигнала использовали звуковой тон (1000 Гц, 60 Дб), интервалы между стимулами составляли  $3 \pm 1$  с, в случайном порядке. Выполнение аудиомоторной реакции длилось 10 минут. Регистрацию латентных периодов (ЛП) СМР проводили при помощи измерителя последовательных реакций ИПР-01.

Во второй группе после записи ЭЭГ в состоянии покоя испытуемому давалась инструкция: “Вы должны запоминать продиктованные слова и повторять их вслух после соответствующей команды”, после чего начиналось тестирование. Все использованные в тесте слова имели малое количество слогов (один или два), были существительными в именительном падеже единственного числа и обозначали конкретные предметы. В каждой пробе предъявлялось 10 слов в темпе 1 слово за 2 с, слова в разных пробах не повторялись. Тест на объем кратковременной памяти выполнялся пять раз и состоял из последовательных этапов: запоминание слов (этап “запоминание”, 20 с), удержание слов в памяти (этап “удержание”, 20 с), воспроизведение слов, которые удалось запомнить (7-15 с). Между отдельными выполнениями теста делалась пауза продолжительностью 20 с (этап “пауза”). Во время повторения обследуемым слов ЭЭГ не записывали из-за многочисленных артефактов, на всех других этапах регистрировали ЭЭГ в виде отдельных 20-секундных проб.

Регистрацию и первичный анализ ЭЭГ проводили с помощью электроэнцефалографического комплекса НейроКом (ХАИ-Медика, Украина). ЭЭГ регистрировали от симметричных лобных (F3, F4), теменных (P3, P4), затылочных

(O1, O2) и височных (T3, T4) отведений по международной схеме 10-20 %. В качестве референтного использовали объединенный ушной электрод. Частота дискретизации сигнала составляла 100 Гц. После удаления артефактных фрагментов анализ спектрального состава отдельных реализаций ЭЭГ проводили с помощью быстрого преобразования Фурье (эпоха анализа 5.12 с, перекрытие эпох – 87.5 %, количество эпох в отдельной реализации – не менее 20). Полученные спектрограммы усредняли для однотипных реализаций ЭЭГ. Определяли значения спектральной плотности мощности (СПМ, мкв<sup>2</sup>/Гц) [4] всех частот от 0,2 Гц до 25 Гц с шагом 0,2 Гц. Корреляционный анализ осуществляли с использованием рангового критерия Спирмена. Для сравнения данных в независимых выборках применялся критерий Манна-Уитни. В качестве значимых рассматривались отличия и коэффициенты корреляций, для которых  $p < 0,05$ .

### **РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

В опытах с СМР показателем результативности деятельности было среднее значение ЛП за все 10 мин. Нами был проведен корреляционный анализ взаимосвязей этого показателя с СПМ каждой из частот спектрограммы ЭЭГ исходного состояния покоя в диапазоне 0,2-25 Гц. Общее количество проанализированных пар показателей для восьми отведений составило 1000, в связи с чем привести их в рамках данной статьи не представлялось возможным, и мы ограничились только достоверными связями. Оказалось, что лишь 24 пары показателей характеризовались уровнем значимости взаимосвязи  $p < 0,05$  (таблица 1.1). Следует обратить внимание на тот факт, что зависимости этих показателей были довольно высоким – значения коэффициентов корреляции колебались от 0,52 до 0,68. Наибольшее количество связей было обнаружено для левого лобного отведения (F3), и большинство из них касались  $\beta$ -диапазона. Это дает нам возможность предположить, что функциональное состояние данного участка неокортекса могло иметь решающее значение для эффективности перехода от состояния покоя к выполнению СМР.

Общая же картина взаимосвязей указывает на то, что минимальная величина ЛП (а значит, наилучшая результативность) наблюдалась у испытуемых, для которых были характерны низкие значения мощности ряда частот  $\beta$ -диапазона в левом лобном отведении и высокий уровень  $\alpha$ -активности в левом теменном и правых теменном, затылочном и височном отведениях.

Интересно, что взаимосвязи скорости сенсомоторной реакции с мощностью  $\alpha$ -активности ограничивались диапазоном 11,52-12,11 Гц, причем наибольшее их количество отмечалось в областях, примыкающих к сенсомоторным зонам неокортекса. Не исключено, что именно исходным функциональным состоянием последних и обуславливалась обнаруженная связь. Аргументом в пользу такого предположения могут служить данные о том, что стимуляция при помощи биологической обратной связи так называемого  $\mu$ -ритма («сенсомоторного ритма» – колебаний частотой 12-15 Гц), уменьшала у страдающих эпилепсией пациентов не только количество и длительность припадков, но и проявления гиперактивности [8].

**ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА**

Показано также, что аналогичная процедура у здоровых детей повышала эффективность прохождения коррективных тестов [9].

И наконец, существуют данные о том, что сознательное подавление приобретенной моторной активности сопровождается достоверным приростом мощности колебаний 11-13 Гц, что позволило авторам рассматривать данную ритмическую активность в качестве проявления тормозных механизмов моторной системы [10]. Таким образом, основываясь на этих данных и результатах наших исследований, можно предположить, что средняя величина латентного периода СМР определенным образом зависит от исходного состояния сенсомоторных зон коры, которая может быть оценена по уровню СПМ ЭЭГ-частот 11,52-12,11 Гц.

**Таблица 1.**

**Значимые коэффициенты корреляций по ранговому критерию Спирмена между средним уровнем ЛП СМР и значением СПМ ЭЭГ-частот в исходном состоянии покоя (n=27)**

А: лобные и теменные отведения							
F3		F4		P3		P4	
У, Гц	k (p)	υ, Гц	k (p)	υ, Гц	K (p)	υ, Гц	k (p)
0.98	-0.56 (0.03)	0.39	-0.53 (0.038)	3.71	-0.55 (0.032)	11.33	-0.55 (0.034)
9.77	0.52 (0.042)	0.78	-0.58 (0.025)	11.52	-0.58 (0.025)	11.52	-0.57 (0.027)
18.75	0.56 (0.032)	18.95	0.68 (0.008)	11.72	-0.55 (0.033)	11.72	-0.57 (0.027)
18.95	0.54 (0.035)	-	-	11.91	-0.57 (0.027)	11.91	-0.59 (0.023)
21.29	0.53 (0.042)	-	-	-	-	12.11	-0.63 (0.014)
21.68	0.66 (0.011)	-	-	-	-	-	-
22.27	0.63 (0.014)	-	-	-	-	-	-
Б: затылочные и височные отведения							
O1		O2		T3		T4	
У, Гц	k (p)	υ, Гц	k (p)	υ, Гц	k (p)	υ, Гц	k (p)
0.98	-0.54 (0.035)	0.98	-0.56 (0.03)	-	-	11.52	-0.52 (0.045)
-	-	12.11	-0.56 (0.029)	-	-	-	-
-	-	23.44	-0.52 (0.043)	-	-	-	-

Во второй группе испытуемых, с которой проводилось тестирование объема кратковременной памяти, мы не могли применить корреляционный анализ, так как показатель результативности (среднее количество слов, которое человек запоминал) носил дискретный характер. В связи с этим, опираясь на среднее по выборке значение данного показателя, а именно 6 слов из 10, было выделено две подгруппы испытуемых – с высокой (запоминали более 6 слов) и низкой (6 и менее слов) результативностью выполнения данного теста. У представителей выделенных таким образом подгрупп мы при помощи критерия Манна-Уитни сопоставили величины СПМ частот ЭЭГ, записанной в исходном состоянии покоя.

Выяснилось, что для данного типа деятельности общее количество факторов состояния покоя, которые влияли на результативность деятельности, ещё меньше, чем в предыдущей группе. В частности, не было обнаружено никаких значимых отличий для симметричных теменных и затылочных зон неокортекса, тогда как для сенсомоторной деятельности их исходное состояние имело, очевидно, решающее значение (см. табл. 1). Достоверная разница в СПМ некоторых частот была выявлена лишь для симметричных лобных и височных отведений (рис. 1).

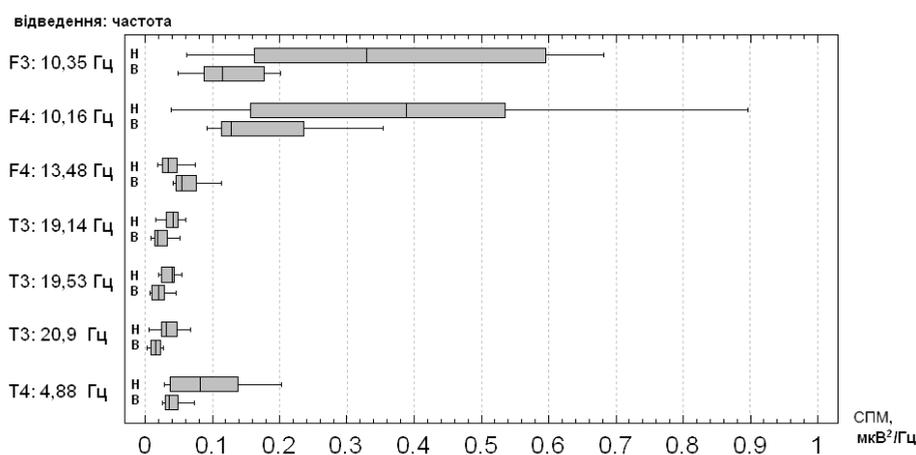


Рис. 1. Спектральная плотность мощности (СПМ) ЭЭГ-частот в исходном состоянии покоя в подгруппах с низкой (Н) и высокой (В) результативностью прохождения теста на объем кратковременной памяти.

Примечание:

- 1) на рисунке представлены медианы, верхние и нижние квартили, минимумы и максимумы;
- 2) показаны только пары, для которых  $p < 0,05$ .

Обращает на себя внимание значительное отличие между представителями подгрупп с высоким и низким показателем запоминания по исходному уровню СПМ в левой височной области коры сразу нескольких частот  $\beta$ -диапазона. Как видно из рис. 1, у людей запоминавший 6 и менее слов, регистрировалась более выраженная  $\beta$ -активность в отведении Т3 в исходном состоянии покоя. Принимая это во внимание, интересно вспомнить, что снижение активности в височных

слуховых областях неокортекса интерпретируется как отражение слухового прайминга [11]. Таким образом, не исключено, что продемонстрированные нами отличия характеризуют специфику функционального состояния центральных звеньев слухового анализатора, связанную с готовностью к дальнейшему направленному восприятию и запоминанию информации. Такая закономерность, по нашему мнению, позволяет определенным образом прогнозировать эффективность перехода к деятельности, однако необходимо учитывать тот факт, что в таком случае данный показатель является сенсорно-специфическим и не может использоваться для задач, не связанных с анализом слуховой информации.

Если сопоставить данные по тесту на объем кратковременной памяти (рис. 1) с результатами корреляционного анализа, проведенного для серии исследований с СМР (табл. 1), становится очевидным, что большинство связей результативности и показателей исходного функционального состояния мозга не совпадают для этих двух типов деятельности.

Можно констатировать, что более простая, легкая нагрузка (в данном случае – сенсомоторная) в большей степени зависит от исходного состояния мозговых систем, чем более сложная. Другими словами, возрастание информационной насыщенности задания и его требований к ресурсам нервной системы уменьшают возможность прогнозирования эффективности его выполнения по параметрам исходного функционального состояния мозга.

С другой стороны, среди проанализированных показателей был найден и такой, для которого выявлялись схожие взаимосвязи в обоих тестах. Им оказался исходный уровень СПМ «среднечастотных»  $\alpha$ -колебаний в левом лобном отведении. В исследованиях с СМР было показано, что у людей с более высокими фоновыми значениями СПМ 9,77 Гц ЛП СМР был более длительным. Напомним, что высокие значения латентного периода реакции говорят о низкой эффективности деятельности. Подобные результаты были получены и для теста на объем кратковременной памяти: у лиц с низкими показателями запоминания были зарегистрированы достоверно более высокие значения СПМ для частоты 10,35 Гц.

По нашему мнению, в основе обеих выявленных связей могут лежать одни и те же механизмы. Показано, что узкая полоса ЭЭГ-частот 9,5-10,5 Гц может рассматриваться как среднечастотный  $\alpha$ -диапазон, мощность которого определенным образом обуславливается индивидуально-типологическими характеристиками человека [12]. С другой стороны, динамические характеристики колебаний данного диапазона отражает активационное обеспечение мозга в принципиально различных функциональных состояниях – активного бодрствования [13], стадии сонных веретен и REM-фазы сна [5].

Таким образом, среди всех проанализированных ЭЭГ-характеристик исходного состояния покоя только мощность колебаний 9,5-10,5 в левой лобной зоне коры влияла на эффективность дальнейшей деятельности независимо от степени информационной насыщенности задания. Топография этой связи является, в определенной степени, весьма ожидаемой, принимая во внимание общую интегративную функцию фронтальной коры. Так, описано участие этой области в формировании моторных ответов на релевантные события (“top-down control”) [14].

Кроме того, было показано, что поражение лобных зон ведет к снижению интенсивности мозговых реакций на неожиданные и нестандартные стимулы [15], т.е. данная область является также ключевой в системе восходящего (“bottom-up”) контроля и имеет решающее значение для реализации функции внимания. Что же до специфических функций собственно левой лобной доли, то в данном случае необходимо вспомнить о её участии в оценке аффективных составляющих сенсорной информации – опять-таки, в рамках системы внимания [16].

Известно, что пациенты с поражениями лобных долей сохраняют способность двигаться, общаться, распознавать сложные объекты и запоминать новую информацию. В то же время у них наблюдаются различные расстройства восприятия и структуры личности – например, нарушение «образа Я», мания величия, конфабуляция [17]. По данным fMRI, среди функциональных нейронных комплексов состояния покоя выделяется в частности один, связанный с медиально-вентральной префронтальной корой и гиппокампом, который обеспечивает процессы самоидентификации [18]. Как отмечает Э. Голдберг, фронтальная кора играет центральную роль в формировании цели и задач, а также «отбирает» и координирует необходимые для их достижения когнитивные функции, и она же отвечает за оценку успешности поведения. Таким образом, все системные реакции, связанные с сознательной деятельностью, протекают у здорового человека под обязательным контролем этой части неокортекса, и потому её функциональное состояние действительно может сказываться на эффективности различных типов деятельности, отличающихся по интенсивности нагрузки, модальности, степени вовлечения различных функций мозга и т.д.

Из приведенных выше данных следует, что базисом обнаруженной нами связи может быть системообразующая, интегративная роль лобной коры в сенсорной, аналитической и мотивационно-эмоциональной деятельности мозга. Именно такой универсальностью функций может объясняться тот факт, что особенности исходного состояния левой фронтальной коры обуславливают, по крайней мере частично, специфику мозгового обеспечения дальнейшей поведенческой активности независимо от её типа.

### **ВЫВОДЫ**

1. Величина латентного периода аудиомоторной реакции находится в обратной зависимости от исходной мощности ЭЭГ-диапазона 11,52-12,11 Гц в теменных зонах правого полушария.
2. Эффективность запоминания слов выше у индивидов, для которых в исходном состоянии покоя характерен меньший уровень  $\beta$ -активности в левом височном отведении на частотах 19-21 Гц.
3. Качество выполнения и сенсомоторного и мнемонического тестов связано с исходным состоянием левой лобной зоны неокортекса, которое может быть оценено по мощности колебаний ЭЭГ-диапазона 9,5-10,5 Гц.

Список литературы

1. Кирой В. Н. Механизмы формирования функционального состояния мозга человека / Кирой В. Н. – Ростов-н/Д : Изд-во Ростовского ун-та, 1991. – 192 с.
2. Шукин Т. Н. ЭЭГ прогноз успешности выполнения психомоторного теста при снижении уровня бодрствования: анализ результатов исследования / Т. Н. Шукин, В. Б. Дорохов, А. Н. Лебедев, Е. В. Луценко // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ. – 2004. – Т. 6, № 4. – 5 с. – Режим доступа к журн. : <http://ej.kubagro.ru/2004/04/22/p22.asp>
3. Данилова Н. Н. Частотная специфичность осцилляторов гамма-ритма. / Данилова В. Н. // Российский психологический журнал. – 2006. – Т. 3, № 2. – С. 35-60.
4. Niedermeyer E. Electroencephalography / Niedermeyer, Ernst; da Silva, Fernando Lopes. – Lippincott Williams & Wilkins, 2005. – 1256 p.
5. Esposito M. J. Reduced Alpha power associated with the recall of mentation from Stage 2 and Stage REM sleep / Esposito M. J, Nielsen T. A., Paquette T. // Psychophysiology. – 2004. – V. 41, № 2. – P. 288-297.
6. Fink A. Extraversion and cortical activation: effects of task complexity / Fink A., Neubauer A. C. // Personality and Individual Differences. – 2004. – V. 36. – P. 333-347.
7. Канеман Д. Внимание и усилие / Дэниэл Канеман – М. : Смысл, 2006. – 287 с.
8. Sterman M. B. Sensorimotor EEG operant conditioning: Experimental and clinical effects / M. B. Sterman // Pavlov. J. Biol. Sci. – 1977. – V. 12, № 2. – P. 63-92.
9. Луцок Н. В. Модуляция внимания у здоровых детей с помощью сеансов обратной связи по характеристикам ЭЭГ / Н. В. Луцок, Е. В. Эйсмонт, В. Б. Павленко // Нейрофизиология. – 2006. – Т. 38, №5/6. – С. 458-465.
10. Knyazev G. G. Motivation, emotion, and their inhibitory control mirrored in brain oscillations / Knyazev G. G. // Neuroscience and biobehavioral reviews. – 2007. – V. 31, № 3. – P. 377-395.
11. Nakamura K. Task-specific change of unconscious neural priming in the cerebral language network / Nakamura K., Dehaene S., Jobert A., Le Bihan D., Kouider S. // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2007. – V. 104, № 49. – P. 19643-19648.
12. Мішук Т. Е. Залежність індивідуально-типологічних властивостей та ефективності розумової діяльності від рівня активації мозку (електроенцефалографічне обстеження) : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. біол. наук : спец. 03.00.13 “Фізіологія людини і тварин” / Мішук Тетяна Едуардовна. – Київ, 1995. – 16 с.
13. Зима І. Г. Реорганізація електричної активності головного мозку людини за умов активації дистантної хеморецепторної системи : матеріали IV Міжнар. наук. конф. [“Психофізіологічні та вісцеральні функції в нормі і патології”] / Київ. нац. унів. ім. Т. Шевченка. – К. : Знання України, 2008 – С. 84-85.
14. Delorme A. Medial Prefrontal Theta Bursts Precede Rapid Motor Responses during Visual Selective Attention / Arnaud Delorme, Marissa Westerfield, and Scott Makeig // The Journal of Neuroscience. – 2007. – V. 27, № 44. – P. 11949–11959.
15. Daffner K. R. Disruption of attention to novel events after frontal lobe injury in humans / Kirk R Daffner, M Marsel Mesulam, Philip J Holcomb [et al.] // J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry. – 2000. – № 68. – P. 18–24.
16. Hagemann D. Frontal brain asymmetry and affective style: A conceptual replication / Dirk Hagemann, Ewald Naumann, Gabriele Becker [et al.] // Psychophysiology. – 1998. – № 35. – P. 372–388.
17. Тонконогий И. Клиническая нейропсихология / Тонконогий И., Пуанкаре А. – СПб. : Питер, 2007. – 528 с. – (Серия «Мастера психологии»).
18. D'argembeau A. Self-referential reflective activity and its relationship with rest: a PET study. / D'argembeau A., Collette F, Van Der Linden M [et al.] // Neuroimage, 2005. – V. 25, № 2. – P. 616-624.
19. Голдберг Э. Управляющий мозг: Лобные доли, лидерство и цивилизация / Голдберг Э. ; [пер. с англ. Д. Бугакова]. – М. : Смысл, 2003. – 335 с.

*Крижановський С.А., Зима І.Г., Тукаєв С.В., Чернінський А.О. Взаємозв'язок ефективності діяльності людини з ЕЕГ-характеристиками її вихідного стану спокою // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія „Біологія, хімія”. – 2009. – Т. 22 (61). – № 1. – С. 50-58.*

Проведено пошук ЕЕГ-характеристик стану спокою людини, за якими можна було б робити припущення про ефективність та особливості її подальшої адаптації до різних когнітивних навантажень. Показано, що при виконанні і мнемонічних, і сенсомоторних завдань результативність діяльності обернено залежала від потужності коливань ЕЕГ-діапазону 9,5-10,5 Гц лівої лобної ділянки у стані спокою.

**Ключевые слова:** ЕЕГ, стан спокою, пам'ять, сенсомоторна реакція

*Kryzhanovskii S.A., Zyma I.G., Tukaev S.V., Cherninsky A.O.* **The Correlation between resting state EEG-characteristics and human working efficiency** // Uchenye zapiski Tavricheskogo Natsionalnogo Universiteta im. V. I. Vernadskogo. Series «Biology, chemistry». – 2009. – V.22 (61). – № 1. – P. 50-58.

The aim of the work was to find the human rest EEG-characteristics, which can enable us to make assumptions about the efficiency and the features of further adaptation to various types of the cognition activity. Our findings suggest that results of both mnemonic and sensomotor tasks depends on the 9,5-10,5 Hz EEG-band power in the left frontal cortex at the previous human resting state.

**Keywords:** EEG, resting state, memory, sensomotor task.

*Поступила в редакцію 16.04.2009 з.*