

УДК 612.821.2

СЛУХОВЫЕ ВЫЗВАННЫЕ ПОТЕНЦИАЛЫ ПРИ СБОЯХ ВНИМАНИЯ

© 2013 г. И. Е. Лазарев^{1,4}, Д. В. Брызгалов^{1,2}, Е. С. Осокина^{1,3},
А. А. Вязовцева¹, А. С. Антоненко¹, Е. А. Архипова¹, Б. В. Чернышев^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский университет "Высшая школа
экономики"*

² *Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова*

³ *Научно-исследовательский институт медицины труда РАМН*

⁴ *Институт медико-биологических проблем РАН*

e-mail: bchernyshev@hse.ru

Поступила в редакцию _____

Принята в печать _____

Для исследования спонтанных сбоев внимания использована экспериментальная задача, создающая умеренно высокую нагрузку на внимание и основанная на выборе ответной реакции по конъюнкции признаков. Испытуемые в среднем выполняли задачу на уровне 85.1% правильных ответов, допуская ошибки в 9.6% реализаций, и пропуски ответа – в 5.4% реализаций. Пик вызванного потенциала N1 отличался постоянством во всех трех ситуациях, в то время как пик P2 был существенно больше по амплитуде перед ошибками или пропусками ответа по сравнению с правильными ответами. Анализ полиграфических показателей не выявил снижения уровня бодрствования перед сбоем внимания. Предлагаемая интерпретация полученных результатов основывается на предположении, что сбои внимания опосредованы подавлением процессов мозговой обработки информации о стимулах из внешней среды под влиянием состояния "ухода в свои мысли".

Ключевые слова: вызванные потенциалы, сбои внимания, ошибки, пропуски ответа, уровень бодрствования, уход в свои мысли

AUDITORY EVOKED POTENTIALS UNDER ATTENTIONAL LAPSES

I. E. Lazarev, D. V. Bryzgalov, E. S. Osokina, A. A. Vyazovtseva,
A. S. Antonenko, E. A. Arkhipova, B. V. Chernyshev

In order to study spontaneous attentional lapses the experimental task was used that created a moderately high attentional load and involved response choice based on stimulus feature conjunction. The participant's average correct response rate was 85.1%; they made errors in 9.6% trials and response omissions in 5.4% trials. Peak N1 of the evoked potential was consistent across all behavioral outcomes, while P2 amplitude was significantly greater before errors and response omissions compared to correct responses. The analysis of polygraphic indexes did not reveal any arousal level reduction before attentional lapses. The proposed interpretation of the results obtained is based on the assumption that attentional lapses are mediated by the suppression of external stimuli information processing caused by the state of mind-wandering.

Keywords: evoked potentials, attentional lapses, errors, response omissions, arousal level, mind-wandering

При выполнении длительной монотонной деятельности, требующей принятия решений, время от времени происходят сбои внимания, выражающиеся в совершении ошибок, задержке или отсутствии требуемой реакции на стимулы, а также в других нарушениях текущей деятельности [1; 5; 8; 19; 22; 28-30].

В случае операторской деятельности, опирающейся на автоматизированные действия (такой, как, например, управление транспортом), критически важным фактором сохранения внимания и правильного выполнения задачи является поддержание высокого уровня бодрствования, т.е. предотвращение засыпания [1]. Для лабораторного моделирования такой деятельности, помимо специализированных тренажеров, имитирующих управление транспортными средствами,

применяют задачи на простую сенсомоторную реакцию либо выбор между двумя сенсомоторными реакциями в ответ на два отчетливо различающихся стимула [1; 5]. В экспериментах на животных показана роль холинергической активации коры больших полушарий в поддержании необходимого уровня обработки информации [6].

Возможны также сбои внимания иной природы, не связанные с засыпанием. Известно, что в норме во многих условиях (особенно при отсутствии высокой нагрузки на внимание и рабочую память в текущей деятельности) возникает состояние "ухода в свои мысли" ("mind-wandering", "daydreaming"), или так называемые "не связанные с задачей мысли" ("task-unrelated thoughts") [8; 19; 28; 22 и др.]. Особенно характерно пребывание в собственных мыслях при выполнении длительной скучной работы [23], при частично или полностью автоматизированной деятельности [30].

В литературе имеются указания на то, что, в отличие от засыпания, "уход в свои мысли" может быть связан с усилением кортикальной активации [16] и повышением общего уровня активации/бодрствования [30].

"Уход в свои мысли" ведет к нарушению концентрации внимания на выполняемой задаче и совершению испытуемыми ошибок [28-30]. Для выявления сбоев внимания при "уходе в свои мысли" требуются задачи, создающие более высокую нагрузку на систему внимания и процессы рабочей памяти, чем упомянутые выше модели для изучения нарушений выполнения задачи при засыпании, поскольку относительно простые автоматизированные сенсомоторные реакции мало страдают при эпизодах "ухода в свои мысли".

Состояние "ухода в свои мысли" имеет ряд электрофизиологических проявлений, указывающих на подавление обработки информации о стимулах, поступающих из внешней среды (как релевантных, так и

нерелевантных). В частности, при ошибочных реакциях, сопровождаемых отчетом испытуемого об "уходе в свои мысли", происходит снижение амплитуды волны P300 на редкий нецелевой стимул в зрительной задаче устойчивого внимания к реакции ("sustained attention to response task", SART) [28]. Также описано подавление зрительного P1 и слухового N1 в тех реализациях, после которых испытуемые сообщали об "уходе в свои мысли" [22].

Целью настоящей работы являлось электрофизиологическое исследование спонтанных сбоев внимания при выполнении монотонной деятельности, создающей умеренно высокую когнитивную нагрузку. Для этого была использована разработанная нами ранее задача на устойчивое внимание [3]. Умеренно высокий уровень сложности задачи обусловлен необходимостью различения стимулов по конъюнкции признаков, что требует активного внимания [32]. Задача создает такое соотношение между степенью автоматизации навыка и нагрузкой на внимание, при котором хорошо выявляются сбои внимания, предположительно связанные с "уходом в свои мысли", но не с засыпанием или утомлением [3].

МЕТОДИКА

В исследовании участвовало 30 человек в возрасте от 19 до 26 лет (20.9 ± 1.3 лет) (19 женщин и 11 мужчин, 25 правшей и 5 левшей). Испытуемые не страдали нарушениями слуха, обладали нормальным или скорректированным до нормального зрением и сообщали об отсутствии каких-либо неврологических или психических нарушений. Все испытуемые подписали информированное согласие перед экспериментом.

Эксперимент проводили в звукоизолированной камере со стандартным потолочным освещением. Электроэнцефалограмму (ЭЭГ) регистрировали с помощью системы NVX-52 с программным обеспечением "Неокортекс Про" (ООО "Нейроботикс", Россия) от 32

отведений в соответствии с международной схемой 10-10% и 1 окулографического электрода, полоса пропускания 0.5-200 Гц, частота оцифровки 1000 Гц. В качестве референтного отведения использовали объединенные ушные электроды. Сопротивление всех каналов составляло не более 10 кОм. Также регистрировали кожно-гальваническую реакцию (КГР) по Фере с помощью хлорсеребряных электродов, закрепляемых с помощью миниатюрных манжеток на указательном и безымянном пальцах неведущей руки, электрокардиограмму (ЭКГ) с помощью одноразовых хлорсеребряных самоклеящихся электродов на запястьях обеих рук (дифференциально), и миограмму (ЭМГ) с помощью одноразовых хлорсеребряных самоклеящихся электродов на задней поверхности шеи в области над трапециевидной и ременной мышцами (дифференциально).

Звуковые стимулы подавали испытуемым при помощи программы E-Prime (Psychology Software Tools Inc., США) через внутриканальные наушники. Отметки стимулов передавали в реальном времени в виде TTL-сигналов на систему NVX-52, что позволяло наложить их с высокой точностью на запись ЭЭГ. Предъявляли четыре типа слуховых стимулов: каждый из них представлял собой синусоидальный сигнал частотой 500 Гц ("низкий") или 2000 Гц ("высокий") и мог быть, в свою очередь, либо чистым тоном ("чистый"), либо совмещаться с наложенным на него широкополосным шумом ("зашумленный") (таблица 1). Амплитуда широкополосного шума составляла 25% от амплитуды синусоидального сигнала. Длительность каждого стимула (независимо от высоты или зашумленности) составляла 40 мс, время нарастания и спада – по 10 мс, громкость – 95 Дб.

Согласно инструкции, зачитываемой испытуемым перед экспериментом, они должны были в ответ на каждый стимул осуществлять ответ, нажимая большим пальцем ведущей руки на одну из двух кнопок миниатюрного геймпада, следуя при этом правилам, приведенным в

таблице 1. Как видно из таблицы, решение задачи требовало конъюнкции двух признаков – "высоты" и "зашумленности"; использование любого из указанных признаков в отдельности не обеспечивало решения задачи.

Перед экспериментом проводили интерактивное ознакомление испытуемых со стимулами и необходимыми реакциями на них вплоть до получения устного подтверждения от него/нее о том, что инструкция полностью понятна и звуки хорошо различаются. Во время интерактивного ознакомления испытуемые имели перед собой распечатку таблицы 1; далее на время эксперимента таблицу убрали.

Эксперимент состоял из 5 или 6 серий, в каждой из которых предъявляли 100 стимулов четырех типов (описанных выше), перемешанных в случайном порядке с равным отношением вероятности предъявления (1:1:1:1). Интервалы между началом предъявления стимулов случайно варьировали в диапазоне 2500 ± 500 мс. Перерывы для отдыха испытуемых между всеми сериями длились 1-3 минуты. В совокупности в ходе эксперимента предъявлялось 500 или 600 стимулов, весь эксперимент длился не более 50 минут.

Все предъявляемые стимулы являлись целевыми. В случае, если испытуемый совершал правильный ответ в интервале 300-1700 мс после начала предъявления стимула, то сразу после реакции испытуемого без задержки на экран монитора на 500 мс выводили "подкрепляющую" зрительную обратную связь (схематическое улыбающееся лицо, которое предъявлялось на сером фоне, не отливавшемся от серого заполнения экрана в остальное время.).

Для каждого испытуемого определяли процент правильных ответов, ошибочных ответов, пропусков, латентные периоды (время реакции) и средние стандартные отклонения латентностей ответов. Анализ поведенческих результатов производили в среде MatLab с помощью авторских скриптов на основе записей ЭЭГ, импортированных совместно с

отметками событий.

ЭЭГ и вызванные потенциалы (ВП) анализировали с использованием программных пакетов EEGLAB [17] и ERPLAB. Эпохи, содержащие артефакты в ЭЭГ, удаляли вручную; электроокулографические артефакты корректировали с использованием рекурсивного метода наименьших квадратов, реализованного в пакете EEGLAB. Для дальнейшего анализа ЭЭГ фильтровали в диапазоне 1-30 Гц. Вызванную активность исследовали методом когерентного усреднения реализаций отдельно для правильных ответов, ошибок и пропусков, причем в усреднение брали не менее 20 безартефактных записей. В случае, если реализаций с данным типом ответа было более 25, усредняли 25 реализаций, выбранных случайным образом согласно заранее заданному алгоритму равномерно по всей длительности эксперимента.

Пики усредненных ВП находили автоматически для каждого отведения с использованием пакета ERPLAB как самые негативные и позитивные отклонения в следующих временных интервалах: N1 – 60-140 мс, P2 – 140-260 мс. Анализ пиков N2 и P3 не проводили в связи с их слабой выраженностью в ВП у большинства испытуемых. Нулевую линию корректировали по предстимульному интервалу длительностью 250 мс, амплитуду пиков измеряли относительно нулевой линии. Анализ ВП проводили на 15 околоцентральных отведениях (F3, Fz, F4, Fc3, Fcz, Fc4, C3, Cz, C4, Cp3, Cpz, Cp4, P3, Pz, P4), выбранных как область, в пределах которой N1 и P2 были отчетливо выражены и допускали однозначное измерение пиковой амплитуды.

Среднюю мощность альфа-ритма анализировали в диапазоне 7-13 Гц с помощью быстрого преобразования Фурье для теменных (P3, Pz, P4) и затылочных (O1, Oz, O2) отведений на интервале 1 с перед предъявлением стимула. Для испытуемых были получены индивидуальные индексы, представлявшие собой усредненные значения мощности по указанным

отведениям для случаев правильных ответов, ошибок и пропусков ответа.

Также для случаев правильных ответов, ошибок и пропусков ответа на интервале длительностью 5 с перед предъявлением стимула для каждого испытуемого определяли средние длительности RR-интервалов ЭКГ, среднюю выраженность КГР в диапазоне 1-5 Гц и среднюю выраженность высокочастотной составляющей ЭМГ в диапазоне 30-200 Гц.

Использовали критерий Стьюдента для парных выборок и дисперсионный анализ (ANOVA) с повторными измерениями, анализ проводили в программе SPSS 17.0 (SPSS Inc.). Учитывали следующие факторы: ОТВЕТ (2 уровня для парных сравнений правильных ответов с неправильными и правильных ответов с пропусками); ОТВЕДЕНИЕ (3x5 уровней, только для ВП).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Чтобы учесть в анализе только тех испытуемых, которые правильно поняли инструкцию и были настроены на сотрудничество с экспериментатором, из анализа были исключены двое испытуемых, у которых процент ошибок (32% и 33%) превосходил среднее значение плюс 2 стандартных отклонения (27.3%), вычисленные по всей популяции.

Поведенческие показатели

Процент правильных ответов, ошибок и пропусков составил 85.1 ± 1.6 , 9.6 ± 1.1 и 5.4 ± 0.7 соответственно (таблица 2). Даже минимальный уровень выполнения задачи (65% правильных ответов) с высокой достоверностью превышал уровень случайного угадывания (25%) (t-тест для долей, $p < 0.001$). Среднее значение латентного периода правильного ответа составляло 905 ± 15 мс и было достоверно меньше, чем среднее значение латентного периода ошибочного ответа (1030 ± 27 мс)

($F(1,25)=33.25, p<0.001$).

Вызванные потенциалы

В каждый анализ ВП включали лишь тех испытуемых, для которых имелось не менее 20 безартефактных реализаций по каждой из сравниваемых ситуаций. Соответственно, анализ показателей ВП проводили для 26 испытуемых, в том числе для 24 испытуемых – при сравнении правильных и ошибочных ответов, и для 16 испытуемых – при сравнении правильных ответов и пропусков.

Усредненные карты ВП для правильных ответов показаны на рисунке 1, суммарные показатели ВП представлены в таблице 3. Как можно видеть на рисунке 1, оба пика – N1 и P2 – характеризовались почти одинаковым симметричным фронтальным распределением по скальпу. Максимум обоих пиков в отведении Cz наблюдался во всех трех ситуациях (правильные ответы, ошибочные ответы и пропуски).

Сравнение для ситуаций правильных ответов и ошибок. Пик N1 не различался между этими ситуациями ни по амплитуде, ни по латентности ($F(1,23)=0,42$, нд, и $F(1,23)=0,21$, нд, соответственно) (рисунок 2А). Амплитуда P2 была достоверно больше для ошибочных ответов в сравнении с правильными ответами ($F(1,23)=10.63, p=0.003$) (рисунок 2А). Латентность P2 не различалась для правильных ответов и ошибок ($F(1,23)=0.11$, нд).

Сравнение для ситуаций правильных ответов и пропусков. Пик N1 не проявил различий между данными ситуациями ни по амплитуде, ни по латентности ($F(1,15)=0,49$, нд, и $F(1,15)=0,73$, нд, соответственно) (рисунок 2Б). Амплитуда P2 в случае пропуска ответа была достоверно выше, чем при правильных ответах ($F(1,15)=9.05, p=0.009$) (рисунок 2Б). Небольшая разница была также обнаружена при сравнении латентностей пика P2: для пропусков она была несколько меньше ($F(1,15)=4.86, p=0.04$).

Мощность альфа-ритма и вегетативные показатели

Сравнение мощности предстимульного альфа-ритма не выявило различий как при сравнении правильных ответов с ошибочными ($t(23)=-0.19$, нд), так и при сравнении правильными ответов с пропусками ($t(15)=-1.33$, нд) (рисунок 3А, 3Б).

Длительности RR-интервалов также не проявили достоверных различий для сопоставления правильных ответов с ошибками и с пропусками, ($t(23)=0.96$, нд, $t(15)=-0.73$, нд, соответственно) (рисунок 3В, 3Г).

Выраженность КГР в диапазоне 1-5 Гц была достоверно выше в предстимульном интервале при неправильных выполнениях задачи (ошибках и пропусках) в сравнении с правильными выполнениями ($t(23)=-2.28$, $p=0.03$ и $t(15)=-2.41$, $p=0.03$ соответственно) (рисунок 3Д, 3Е).

Высокочастотная составляющая ЭМГ также была достоверно выше перед ошибками в сравнении с правильными выполнениями ($t(23)=-2.70$, $p=0.01$). Аналогичная тенденция проявилась также и перед пропусками в сравнении с правильными выполнениями ($t(15)=-1.56$, нд) (рисунок 3Ж, И).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Общие характеристики поведения

Правила выбора ответа (таблица 1) в настоящем исследовании были достаточно просты, и для испытуемых не представляло трудности понять их. Сами стимулы легко различались всеми испытуемыми в ознакомительной серии перед экспериментом; стимулы были достаточно громкими, а эксперимент проводился в условиях полной тишины и с применением внутриканальных наушников, что исключало маскировку стимулов внешними звуками. Таким образом, ошибочные ответы и

пропуски ответа не могли быть связаны с тем, что испытуемые не понимали инструкцию или плохо различали стимулы. При этом даже наихудший уровень выполнения задачи среди испытуемых был заведомо неслучайным на высоком уровне значимости.

В то же время после выполнения задачи испытуемые заявляли, что задача требовала от них значительного усилия для того, чтобы добиться хорошего качества ее выполнения. Все сказанное выше позволяет нам рассматривать неправильные выполнения задачи как проявления некоего состояния, которое подавляет (затрудняет) когнитивную обработку внешних стимулов. Условия проведения эксперимента в целом соответствовали тем, которые описаны в литературе как вызывающие состояние "ухода в свои мысли" [8; 19; 22; 28-30].

Паттерн вызванных потенциалов

Паттерн слуховых ВП, зарегистрированных в настоящем исследовании, состоял преимущественно из выраженного пика N1, за которым следовал выраженный пик P2. Более поздние пики ВП (N2, P3) были выражены слабее. Выявленное распределение пиков N1 и P2 по скальпу и их латентность соответствуют данным литературы [7; 18].

Пик N1

Согласно полученным результатам, N1 оказался нечувствительным к сбоям внимания. Хорошо известно, что N1 подвержен влиянию физических параметров стимуляции, таких как громкость, высота тона, межстимульный интервал [21; 14]. При этом также показано, что внимание может модулировать амплитуду N1. Например, как было продемонстрировано С.Хильярдом с коллегами [20], процессы внимания ведут к наложению медленного негативного отклонения – "разностной негативности", или "негативной разностной волны" ("negative difference

wave", Nd), что, в свою очередь, ведет к увеличению амплитуды N1 и уменьшению P2 (и, соответственно, наоборот, к уменьшению N1 и увеличению P2 в случае невнимания). С.Хильярд с коллегами [20] использовали чрезвычайно короткие межстимульные интервалы (менее 500 мс): в дальнейшем оказалось, что увеличение межстимульных интервалов в целом ведет к более позднему началу эффекта, который в этом случае не влияет на пик N1. Например, в исследовании Р.Наатанена с коллегами [26] межстимульный интервал был немного длиннее (800 мс): это приводило к тому, что разностная волна, названная авторами "процессной негативностью" ("processing negativity", PN), проявлялась позднее и начиналась на фоне нисходящей фазы N1, не затрагивая, таким образом, его пик. Аналогично в экспериментах группы К.Алхо было показано, что принудительная манипуляция селективным вниманием также может не оказывать выраженного влияния на амплитуду пика N1 [15], поскольку ему соответствует лишь самое начало разностной волны. Соответственно, результат настоящего исследования в отношении N1 можно считать ожидаемым с учетом того, что в нем использованы существенно более длительные межстимульные интервалы, чем в упомянутых выше работах [20; 26].

Необходимо упомянуть, что в современных исследованиях состояния "ухода в свои мысли" сбоев внимания также не имеют однозначной связи с изменением амплитуды N1. Так, при использовании зрительной задачи было показано, что под влиянием данного состояния амплитуда N1 в ответ на слуховые стимулы уменьшалась [22]. Важно отметить, что в указанной работе эффект проявился в ответ на нерелевантные стимулы, для которых естественно ожидать снижения амплитуды N1 [20]: сочетание двух однонаправленных воздействий (невнимание к нерелевантной задаче стимулу плюс невнимание к любому внешнему стимулу в силу состояния "ухода в свои мысли") могло давать

кумулятивный эффект. Однако в сходном исследовании, методически более близком к настоящей работе, при использовании одномодальной слуховой стимуляции не было выявлено влияния состояния "ухода в свои мысли" на параметры генерации N1 [28].

Пик P2

В отличие от пика N1, пик P2 существенно зависел от качества выполнения задачи: его амплитуда была существенно выше для обоих видов сбоев внимания – как ошибочных ответов, так и пропусков ответа. Кроме того, небольшой достоверный эффект наблюдался для латентности при пропусках ответа по сравнению с правильными ответами.

Имеются данные о том, что амплитуда P2 может быть повышена при совершении ошибок опознания сложных зрительных стимулов в зрительной модальности [4].

В настоящее время не существует единой точки зрения на функциональное значение пика P2. Как резюмировал в своей работе Тонг с соавторами [31], в зависимости от экспериментальной парадигмы P2 может относиться к: классификации стимулов [27], защите от интерференции нерелевантных стимулов [18], тормозным процессам, модулирующим сознательное восприятие [25], или точности следов кратковременной памяти [9]. P2 также зависит от сложности задачи: при использовании парадигмы одд-болл большая сложность задания ведет к уменьшению амплитуды компонента [13].

Таким образом, существуют "позитивная" и "негативная" интерпретация роли P2 в обработке информации. Согласно "позитивной" интерпретации, P2 отражает стадию классификации, предпосылку для захвата внимания – в этой роли поздний увеличенный P2 для игнорируемых стимулов ("P250") может рассматриваться как аналог P3a и представлять собой коррелят непроизвольного внимания [18]. Если данная

интерпретация верна, то увеличенный P2 при сбоях внимания должен означать интенсификацию процессов классификации релевантных стимулов. Такую интерпретацию трудно примирить с настоящими данными, показывающими, что увеличенная амплитуда P2 сопутствует ухудшению обработки релевантных внешних стимулов. Можно было бы предположить, что за увеличенной амплитудой P2 стоит не усиление обработки само по себе, а, скорее, увеличение усилия по обработке стимула в ситуации невнимания. Однако такое объяснение не кажется правдоподобным, т.к. при увеличении сложности различения стимула наблюдается уменьшение P2 [13]. Более того, латентность P2 в настоящем исследовании (около 200 мс) сильно отличается от латентности P250 в вышеприведенном исследовании [18].

Согласно "негативной" интерпретации пика P2, он отражает некие процессы, связанные с прекращением обработки информации, которая не требует полноценного и детального анализа [25]. Этой интерпретации соответствуют данные об увеличении пика P2 на целевой стимул при автоматизации выполнения задачи после длительной тренировки выполнения задачи [31]. В исследованиях группы К.Алхо [15] был обнаружен компонент, названный "позитивностью подавления" ("rejection positivity"), который наблюдался во время пика P2 и увеличивал его в ответе на стандартные звуковые стимулы, предъявлявшиеся на фоне слуховой или зрительной задачи; предположительно, это происходило, когда требовалась подавить обработку нерелевантной информации в релевантном канале [15].

Таким образом, в свете "негативной" интерпретации P2, можно предположить, что при сбоях внимания развивались некоторые процессы, которые подавляли обработку внешней информации или не допускали ее обработку до более поздних стадий, наступающих после первичного анализа стимула. Мы можем предположить, что в настоящем исследовании

более высокая амплитуда P2, проявлявшаяся как в случае ошибочных ответов, так и при пропусках ответа, была связана именно с неудачей в различении стимулов из-за преждевременно законченной, т.е. неполной обработки внешней информации.

Показатели общего уровня активации/бодрствования

Известно, что N1 подвержен влиянию общей активации [2; 14]. Постоянство пика N1 в настоящем исследовании может косвенно свидетельствовать о том, что наблюдаемые эффекты сбоев внимания не связаны с общим изменением состояния активации испытуемых.

В пользу того, что как в случае совершения ошибок/пропусков, так и в случае правильного выполнения уровень бодрствования оставался относительно постоянным, свидетельствует также и отсутствие различий в мощности предстимульного альфа-ритма, который связан с активацией ЦНС и уровнем бодрствования [5; 10].

Анализ других полиграфических показателей [12] также выявил, что перед проявлениями сбоев внимания уровень активации/бодрствования не снижался (длительность RR интервалов не менялась) или даже повышался (если судить по выраженности КГР и высокочастотной составляющей ЭМГ от мышц, отвечающих за прямое положение головы и спины).

Возможные причины сбоев внимания

Возникает вопрос, чем могут быть вызваны сбои внимания в настоящем исследовании. Как рассмотрено выше, их нельзя объяснить снижением уровня активации/бодрствования. Их также нельзя объяснить утомлением, т.к. при реализации настоящей экспериментальной модели время реакции и процент правильных реакций последовательно улучшаются от серии к серии [3]. Кроме того, утомление ведет к усилению альфа-ритма [11], чего не наблюдалось в настоящем исследовании.

Вероятнее всего, сбои внимания в настоящем исследовании происходили в результате переноса внимания с выполняемой задачи на какой-либо иной процесс и вытекающей из этого конкуренции за ограниченные ресурсы обработки информации, необходимые для сознательного контроля текущей исполнительской деятельности [24]. В условиях описанного в настоящей работе эксперимента наиболее вероятной является конкуренция со стороны процессов обработки информации, хранящейся в памяти, характерных для состояния "ухода в свои мысли"; известно, что данное состояние возникает в сходных условиях и приводит к сходным нарушениям поведенческих показателей выполнения задачи [22; 28; 29].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, испытуемые, хорошо понявшие инструкцию и с легкостью различавшие стимулы, допускали ошибки в условиях отсутствия какого-либо дополнительного отвлекающего задания. Полученные результаты указывают на то, что в процессе выполнения задачи, требующей внимания и создающей умеренно высокую когнитивную нагрузку с возможностью частичной автоматизации, обработка информации может прерываться на относительно ранних стадиях, что ведет к нарушению качества поведенческих ответов. Возникающие сбои внимания, видимо, не обусловлены снижением уровня бодрствования или утомлением. Наиболее вероятной причиной спонтанных нарушений выполнения задачи является конкуренция со стороны процессов обработки информации, хранящейся в памяти, - так называемого "ухода в свои мысли".

Исследование осуществлено в рамках программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2013 году.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дементиенко В.В., Дорохов В.Б. Оценка эффективности систем контроля уровня бодрствования человека-оператора с учетом вероятностной природы возникновения ошибок при засыпании. Журн. высш. нервн. деят. 2013. 63(1): 24–32.
2. Наатанен Р. Внимание и функции мозга. М.: Изд-во МГУ, 1998. 556 с.
3. Осокина Е.С., Чернышев Б.В., Чернышева Е.Г., Иванов М.В. Слуховое внимание при бинарном выборе ответа на основе интеграции признаков стимула и реакции в зависимости от темперамента. Экспериментальная психология. 2012. 5(4): 5–17.
4. Славущкая А.В., Герасименко Н.Ю., Михайлова Е.С., Связанные с полом стратегии решения зрительно-прозрачных задач. Физиологический журнал им. Сеченова. 2012. 98 (11): 1339-1394.
5. Ткаченко О.Н., Лаврова Т.П., Дорохов В.Б., Дементиенко В.В., Силькис И.Г. Микросон: анализ особенностей изменений ЭЭГ при психомоторных нарушениях. Журн. высш. нервн. деят. 2013. 63(1): 141–153.
6. Чернышев Б.В., Панасюк Я.А., Семикопная И.И., Тимофеева Н.О. Активность нейронов базального крупноклеточного ядра при реализации инструментального условного рефлекса. Журн. высш. нервн. деят. 2003. 53(5): 633–645.
7. Anderer P., Semlitsch H.V., Saletu B. Multichannel auditory event-related brain potentials: effects of normal aging on the scalp distribution of N1, P2, N2 and P300 latencies and amplitudes. Electroencephalography and clinical neurophysiology. 1996. 99(5): 458–472.
8. Antrobus J. Information theory and stimulus independent thought. British Journal of Psychology. 1968. 59: 423–430.

9. Atienza M., Cantero J.L., Dominguez-Marin E. The time course of neural changes underlying auditory perceptual learning. *Learning and memory* (Cold Spring Harbor, N.Y.). 2002. 9(3): 138–150.
10. Barry R.J., Clarke A.R., McCarthy R., Selikowitz M., Rushby J.A., Ploskova E. EEG differences in children as a function of resting-state arousal level. *Clinical Neurophysiology*. 2004. 115(2): 402–408.
11. Boksem M.A.S., Meijman T.F., Lorist M.M. Mental fatigue, motivation and action monitoring. *Biological Psychology*. 2006. 72: 123–132.
12. Cacioppo J.T., Tassinary L.G., Berntson G.G. *Handbook of Psychophysiology* (3rd edition). Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 898 p.
13. Cranford J.L., Rothermel A.K., Walker L., Stuart A., Elangovan S. Effects of discrimination task difficulty on N1 and P2 components of late auditory evoked potential. *Journal of the American Academy of Audiology*. 2004. 15(6): 456–461.
14. Crowley K.E., Colrain I.M. A review of the evidence for P2 being an independent component process: age, sleep and modality. *Clinical neurophysiology: official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*. 2004. 115(4): 732–744.
15. Degerman A., Rinne T., Sarkka A. K., Salmi J., Alho K. Selective attention to sound location or pitch studied with event-related brain potentials and magnetic fields. *The European journal of neuroscience*. 2008. 27(12): 3329-3341.
16. Dehaene S., Changeux J.P. Ongoing spontaneous activity controls access to consciousness: a neuronal model for inattention blindness. *PLoS. Biol.* 2005. 3(5): e141.
17. Delorme A., Makeig S. EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods*. 2004. 134(1): 9–21.

18. García-Larrea L., Lukaszewicz A.C., Mauguière F. Revisiting the oddball paradigm. Non-target vs neutral stimuli and the evaluation of ERP attentional effects. *Neuropsychologia*. 1992. 30(8): 723–741.
19. Giambra L.M. A laboratory method for investigating influences on switching attention to task-unrelated imagery and thought. *Consciousness and Cognition*. 1995. 4: 1–21.
20. Hillyard S.A., Hink R.F., Schwent V.L., Picton T.W. Electrical signs of selective attention in the human brain. *Science*. 1973. 182(4108): 177–180.
21. Hyde M. The N1 response and its applications. *Audiology & neuro-otology*. 1997. 2(5): 281–307.
22. Kam J.W.Y., Dao E., Farley J., Fitzpatrick K., Smallwood J., Schooler J.W., Handy T.C. Slow fluctuations in attentional control of sensory cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2011. 23(2): 460–470.
23. Klinger E. *Meaning and Void: Inner Experience and Incentives in People's Lives*. Minneapolis: University of Minnesota, 1977. 432 p.
24. McVay J.C., Kane M.J. Does mind wandering reflect executive function or executive failure? Comment on Smallwood and Schooler (2006) and Watkins (2008). *Psychological Bulletin*. 2010. 136(2): 188–197.
25. Melara R.D., Rao A., Tong Y. The duality of selection: excitatory and inhibitory processes in auditory selective attention. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*. 2002. 28(2): 279–306.
26. Näätänen R., Gaillard A.W., Mantysalo S. Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta psychologica*. 1978. 42(4): 313–329.
27. Novak G., Ritter W., Vaughan Jr. H. G. The chronometry of attention-modulated processing and automatic mismatch detection. *Psychophysiology*. 1992. 29(4): 412–430.
28. Smallwood J., Beech E.M., Schooler J.W., Handy T.C. Going AWOL in the brain – mind wandering reduces cortical analysis of the task environment. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2008. 20(3): 458-469.

29. Smallwood J., Obonsawin M.C., Heim D. Task Unrelated Thought: the role of distributed processing. *Consciousness and Cognition*. 2003. 12(2): 169–189.
30. Smallwood J., Schooler J.W. The Restless Mind. *Psychological Bulletin*. 2006. 132(6): 946–958.
31. Tong Y., Melara R.D., Rao A. P2 enhancement from auditory discrimination training is associated with improved reaction times. *Brain Research*. 2009. 1297: 80–88.
32. Treisman A.M., Gelade G. A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*. 1980. 12(1): 97–136.

Таблица 1. Зависимость ответов испытуемых от признаков четырех предъявляемых стимулов согласно инструкции. С данной таблицей в распечатанном виде знакомили испытуемых непосредственно перед экспериментом.

Table 1. Participants' response contingencies on the features of the four stimuli presented as required according to the instruction. The participants were allowed to acquaint themselves with this table in the printed form immediately before the experiment.

	Высокий	Низкий
Чистый	Левая кнопка	Правая кнопка
Зашумленный	Правая кнопка	Левая кнопка

Таблица 2. Сводная поведенческая статистика (N=28).

Table 2. Overall behavioral statistics (N=28).

Показатель	Ситуация	Среднее \pm станд. отклонение (минимум - максимум)
Процент	Правильные ответы	85.1 \pm 8.6 (65 - 96)
	Ошибки	9.6 \pm 5.8 (2.5 - 21.8)
	Пропуски ответа	5.4 \pm 3.7 (0.7 - 14.8)
Среднее время ответа, мс	Правильные ответы	905 \pm 80 (715 - 1074)
	Ошибки	1030 \pm 143 (739 - 1294)
Среднее станд. отклонения времени ответа, мс	Правильные ответы	316 \pm 49 (226 - 383)
	Ошибки	373 \pm 117 (193 - 743)

Таблица 3. Суммарные показатели ВП для правильных, ошибочных ответов и пропусков ответа (усредненные данные для 15 центральных отведений).

Table 3. Summary ERP data statistics for correct responses, erroneous responses and response omissions (averaged on 15 pericentral electrodes).

Показатель	Ситуация	N	Среднее \pm станд. отклонение (минимум - максимум)
Амплитуда N1, мкВ	правильные ответы	26	-6.02 ± 2.84 (-11.49 - -1.43)
	ошибки	24	-5.68 ± 2.37 (-9.54 - -1.47)
	пропуски	16	-4.98 ± 2.47 (-9.05 - -1.2)
Латентность N1, мс	правильные ответы	26	107 ± 14 (74 - 132)
	ошибки	24	108 ± 14 (77 - 130)
	пропуски	16	113 ± 7 (93 - 123)
Амплитуда P2, мкВ	правильные ответы	26	6.14 ± 2.59 (2.15 - 11.26)
	ошибки	24	7.41 ± 2.83 (3.82 - 15.23)
	пропуски	16	7.30 ± 2.02 (3.96 - 10.59)
Латентность P2, мс	правильные ответы	26	193 ± 16 (166 - 247)
	ошибки	24	193 ± 15 (156 - 221)
	пропуски	16	187 ± 9 (171 - 199)

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Усредненный групповой ВП для правильных ответов (N=26). *А* – усредненный ВП в отведении Cz; *Б* – усредненные карты ВП на интервале 40 – 360 мс. Шкала: мкВ

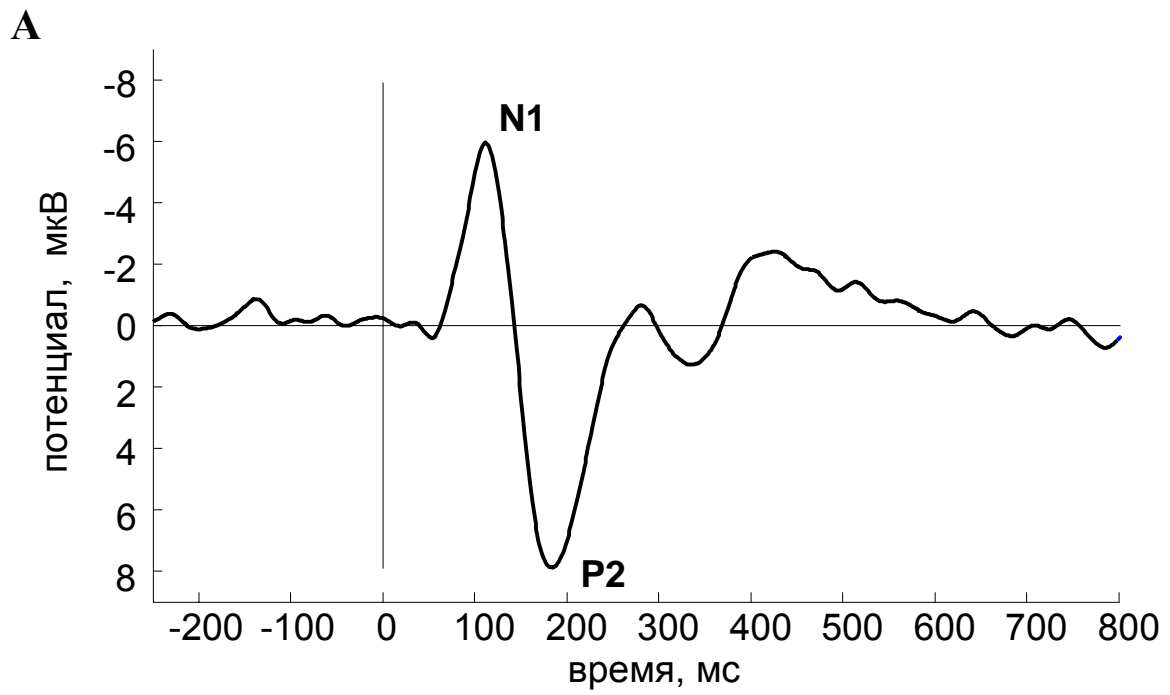
Fig. 1. ERP grand mean for correct responses (N = 26). *A* – ERP grand mean at Cz. *B* – ERP scalp maps at 40 – 360 ms. Scale: μV .

Рис. 2. Усредненные групповые ВП при правильных выполнениях задачи и сбоях внимания (в отведении Cz). *А* – при правильных и ошибочных ответах (N=24); *Б* – при правильных ответах и пропусках (N=16).

Fig. 2. ERP grand means under correct responses and attentional lapses (at Cz). *A* – correct responses and erroneous responses (N = 24). *B* – correct responses and response omissions (N = 16).

Рис. 3. Сравнение показателей уровня активации/бодрствования в предстимульном интервале для ситуаций правильного выполнения, ошибочного выполнения и пропусков ответа. *А, Б* – Мощность альфа-ритма, *В, Г* – длительность RR-интервалов, *Д, Е* – выраженность КГР в диапазоне 1-5 Гц, *Ж, И* – выраженность высокочастотной составляющей миограммы (30-200 Гц). Слева (*А, В, Д, Ж*) – сравнение правильных и ошибочных ответов (N=24), справа (*Б, Г, Е, И*) – сравнение правильных ответов и пропусков (N=16). * – $p < 0.05$.

Fig. 3. Comparison of prestimulus activation/arousal indexes for correct responses, erroneous responses and omissions. *A, B* – alpha-band power spectral density, *B, Г* – heart RR intervals, *Д, Е* – galvanic skin response in 1-5 Hz range, *Ж, И* – high-frequency electromyographic component in 30-200 Hz range. On the left (*A, B, Д, Ж*) – comparison of correct responses vs. erroneous responses (N=24), on the right (*Б, Г, Е, И*) – comparison of correct responses vs. response omissions (N=16). * – $p < 0.05$.



Б

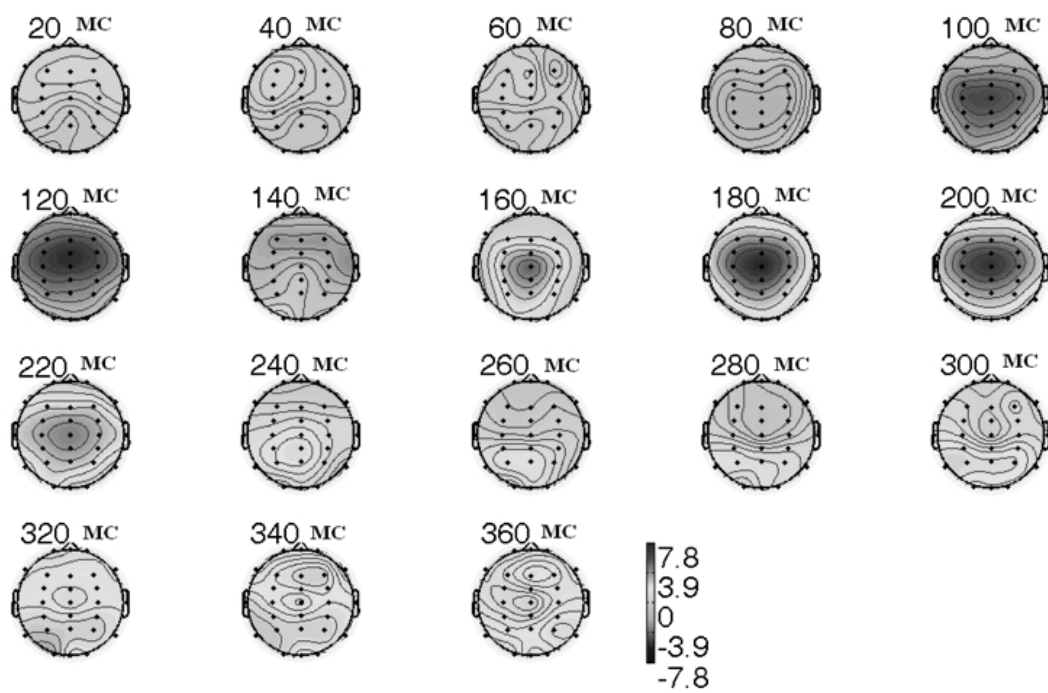


Рис. 1.

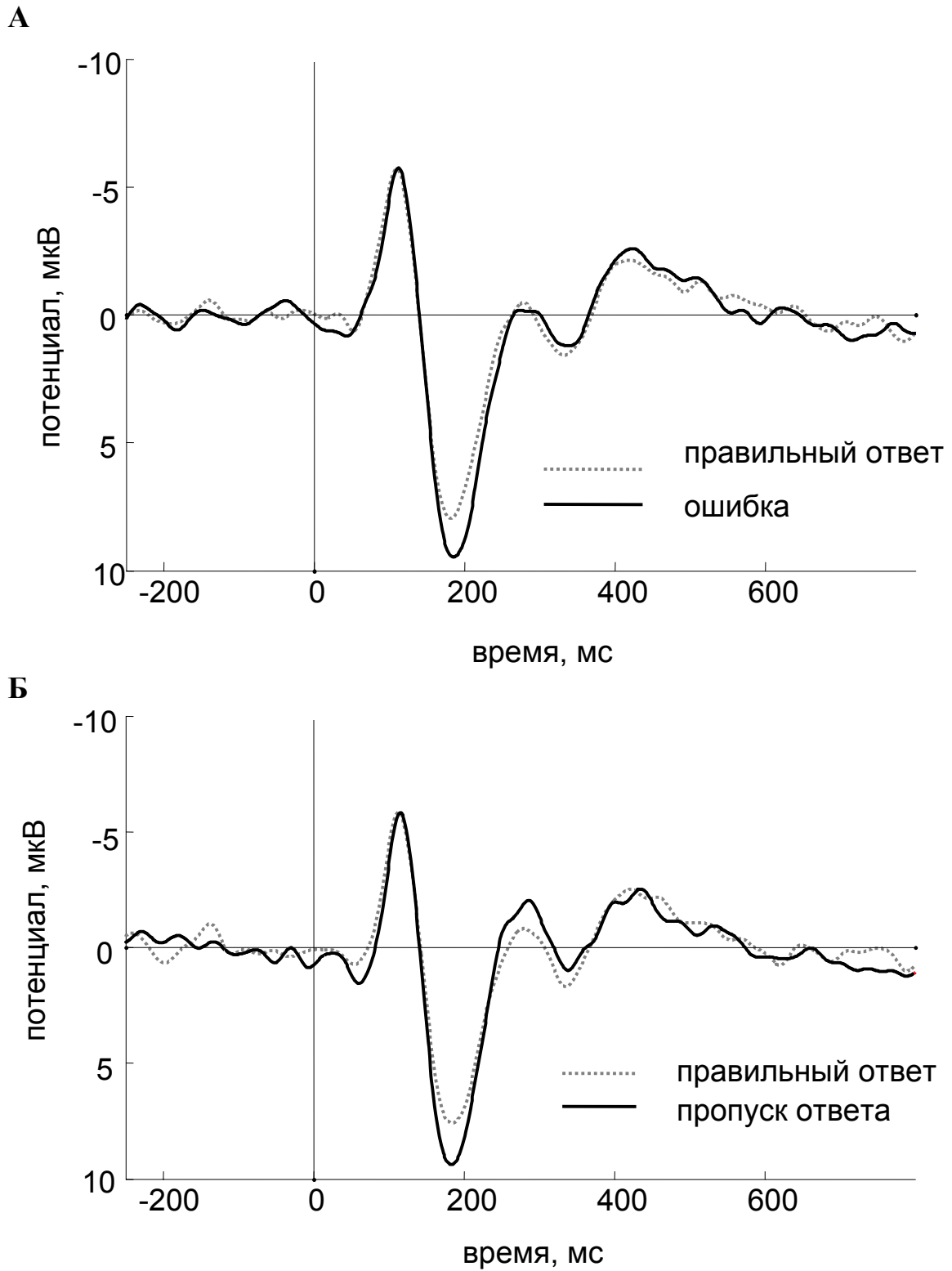


Рис. 2.

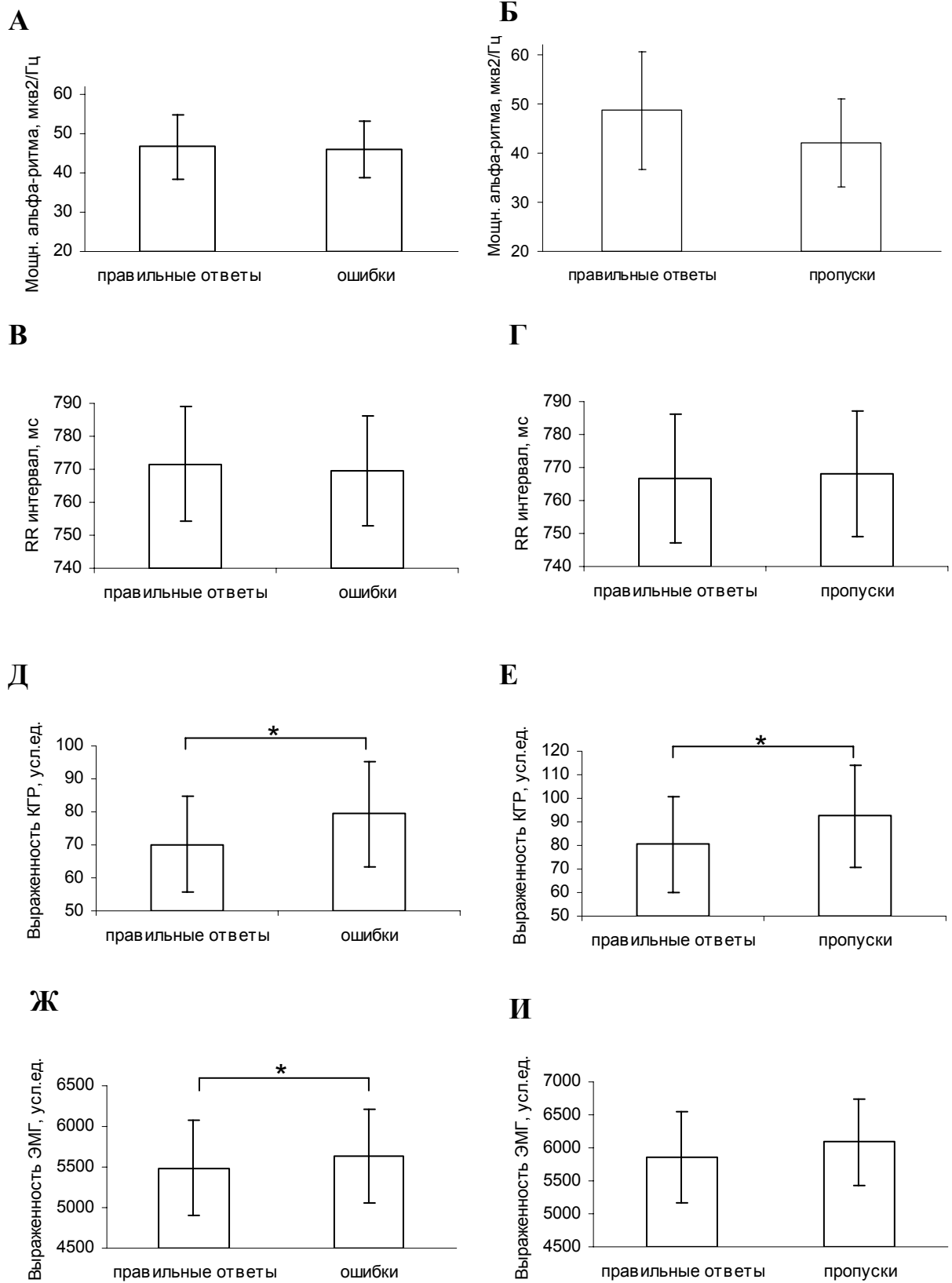


Рис. 3.