

На правах рукописи

Пучкова Александра Николаевна

**ЗРИТЕЛЬНО-МОТОРНАЯ КООРДИНАЦИЯ ПРИ
УМСТВЕННОМ УТОМЛЕНИИ И АДАПТИВНАЯ ФУНКЦИЯ
ДНЕВНОГО СНА**

03.03.01 – физиология

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук**

Москва, 2013

Работа выполнена в лаборатории нейробиологии сна и бодрствования (заведующий лабораторией – доктор биологических наук Владимир Борисович Дорохов) Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт Высшей Нервной Деятельности и Нейрофизиологии РАН» (директор – доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН Павел Милославович Балабан).

Научный руководитель:

Доктор биологических наук, Владимир Борисович Дорохов.

Официальные оппоненты:

Доктор медицинских наук, профессор Юрий Викторович Урываев,
заслуженный деятель науки РФ

Кандидат биологических наук Гарах Жанна Валерьевна

Ведущая организация

Биологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

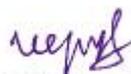
Защита состоится «23» мая 2013 года в 15:30 часов на заседании диссертационного совета Д 002.044.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт Высшей Нервной Деятельности и Нейрофизиологии РАН» по адресу: 117485, Москва, ул. Бутлерова, д. 5а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт Высшей Нервной Деятельности и Нейрофизиологии РАН».

Автореферат разослан « 17 » апреля 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Доктор биологических наук

Виктор Николаевич Иерусалимский



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В современной жизни большую роль играет умственный труд и сложная ответственная операторская работа, требующая постоянной сосредоточенности. Все сильнее распространяется такой вид деятельности, как работа за компьютером, сопряженная с интенсивной когнитивной нагрузкой. Продолжительное выполнение такой работы приводит к развитию состояния утомления. И хотя до сих пор нет четкого определения термина «утомление», именно им, в общем случае, характеризуют состояние сниженной работоспособности и потребности в отдыхе, развивающееся в ходе трудовой деятельности. В различных работах используются наиболее подходящие к их контексту определения утомления. Их все объединяет то, что «утомление – это гипотетическая концепция, которая связывает ряд факторов, предположительно служащих причиной развития усталости, что может вызывать нарушения безопасности деятельности» (Williamson et al., 2011).

На развитие утомления влияет множество факторов, включая время суток, количество часов сна в предыдущие сутки, продолжительность бодрствования и самой деятельности, сложность выполняемых задач, специфика выполняемой работы, соотношение трудозатрат и ожидаемого результата, мотивация (Waterhouse 2010; Williamson, Lombardi et al. 2011; Дорохов 2013). Утомление может вести к нарушению функций внимания, нарушению реагирования на внешние стимулы и росту числа ошибок, неоптимальному отслеживанию собственной эффективности (Boksem, Meijman et al. 2005; Lorist, Boksem et al. 2005). Монотонность задания и необходимость постоянно удерживать высокий уровень внимания являются факторами риска для развития нарушений продуктивности работы (Kato, Endo et al. 2009; Williamson, Lombardi et al. 2011). При этом следует отличать ухудшение параметров деятельности, вызванные "перегрузкой" в случае сложного задания и "недостаточной нагрузкой" в случае достаточно простого и монотонного задания. Однообразное и скучное задание, субъективно не воспринимаемое как сложное,

может само по себе вызывать состояние монотонии, сопровождающееся ухудшением функций внимания и сонливостью (Akerstedt 2007). Состояния монотонии и утомления относятся к группе состояний со сниженной работоспособностью (ССР) и, хотя в реальных условиях они часто сочетаются, их следует разделять (Леонова, Величковская 2002; Ильин 2005).

Поиск биологических маркеров сонливости и утомления ведется во многих направлениях, среди которых наибольший интерес представляют бесконтактные методы и, в частности, метод видеотрекинга по показателям глазодвигательной активности. Для определения степени сонливости и общего утомления довольно эффективными параметрами оказались моргания, длительные закрывания глаз и появление сверхдлинных фиксаций взора (Schleicher, Galley et al. 2008, Костин А. Н., Голиков Ю. Я. 2010).

Отдельный интерес представляет умственное утомление, вызываемое непрерывной работой, требующей интенсивной когнитивной деятельности, когда развитие сонливости недопустимо или маловероятно, а развитие монотонии подавляется сосредоточением на выполнении задания. Показано, что умственное утомление приводит к ухудшению функций произвольного внимания, замедляет дискриминацию стимулов и увеличивает время реакции. Кроме того, умственное утомление ухудшает способность к субъективному восприятию своих ошибок и в целом нарушает работу систем реагирования на стимулы (Klimesch 1999; Boksem, Meijman et al. 2005; Tassi, Bonnefond et al. 2006; Kato, Endo et al. 2009).

Поиск показателей умственного утомления ведется среди широкого спектра психофизиологических параметров, в том числе ЭЭГ, глазодвигательной активности (моргания, фиксации, саккады, диаметр зрачка) и др. Показатель длительности фиксаций взора остается менее изученным в контексте детекции умственного утомления. Кроме того, не всегда в исследованиях четко разделяются эффекты депривации сна, утомления и монотонии, поэтому вопрос наличия глазодвигательных коррелятов чисто умственного утомления нельзя считать решенным. Также исследования

показали, что близкое к утомлению состояние монотонии вызывает нарушение зрительно-моторной координации: движений рук к отслеживаемым глазом мишеням (Дорохов, Арсеньев и соавт. 2011). При выполнении профессиональных задач на компьютере или терминале анализ зрительно-моторной координации (ЗМК) позволяет охватить основные каналы получения информации и реализации действий оператором.

В последнее время большое внимание уделяется разработке технических систем контроля уровня утомления оператора. Эти системы основаны на использовании различных физиологических и поведенческих показателей, но пока имеют ограниченную область применения и эффективность (Дементиенко, Дорохов 2013). На настоящий момент остается не до конца ясным влияние продолжительной интенсивной умственной нагрузки на основные параметры глазодвигательной активности и зрительно-моторной координации. Остается открытым вопрос о соотношении объективных параметров работоспособности, состояния утомления и субъективно воспринимаемой усталости.

Также актуальна проблема восстановительной функции дневного сна, в частности, при интенсивных когнитивных нагрузках в условиях отсутствия предшествующей депривации сна. Представляет интерес оценка его эффективности в восстановлении исходного функционального состояния оператора по сравнению с простым отдыхом и прекращением деятельности.

Цель исследования.

Цель работы состояла в разработке методологии бесконтактной детекции развития умственного утомления при интенсивной когнитивной нагрузке у пользователей компьютеров по показателям глазодвигательной активности и зрительно-моторной координации, а также сравнение эффективности функциональной коррекции работоспособности оператора при помощи короткого дневного сна по сравнению с отдыхом в состоянии спокойного бодрствования.

Задачи исследования.

1. Разработать психомоторный тест, моделирующий изменение функционального состояния оператора при интенсивной умственной работе за компьютером.
2. Исследовать динамику параметров работоспособности, глазодвигательной активности и зрительно-моторной координации в ходе продолжительного воздействия умственной нагрузки.
3. Выбрать дополнительные физиологические показатели и психофизиологические тесты, расширяющие оценку функционального состояния оператора при утомлении.
4. Провести анализ эффективности функциональной коррекции работоспособности оператора с помощью короткого дневного сна по сравнению с отдыхом в состоянии спокойного бодрствования, той же длительности, по поведенческим, физиологическим и субъективным показателям.
5. Оценить вклад индивидуальных особенностей оператора в развитии умственного утомления.

Научная новизна исследования.

Впервые предложен комплексный подход к экспериментальному моделированию развития умственного утомления, вызываемого арифметическими вычислениями, и позволяющий одновременно исследовать динамику развития утомления по показателям глазодвигательной активности, зрительно-моторной координации (ЗМК) и электрической активности мозга (ЭЭГ).

Впервые высказано предположение, что показателем появления компенсированного утомления может служить возникновение кратковременных эпизодов увеличения времени решения арифметических задач, с последующим возвращением к исходным значениям.

Впервые предложен подход к оценке утомления по изменению паттернов траекторий взгляда, позволяющий определять индивидуальные стратегии решения арифметических задач и их изменение при продолжительной работе.

Впервые проведена сравнительная оценка эффективности функциональной коррекции работоспособности оператора с помощью дневного сна по сравнению с отдыхом в состоянии спокойного бодрствования. С этой целью применен дизайн эксперимента с тестированием каждого испытуемого дважды: со сном и без него.

Впервые, для сравнительной оценки функциональных состояний испытуемого до и после когнитивной нагрузки и восстановительных функций дневного сна по сравнению с отдыхом без сна, применен тест угасания альфа-ритма ЭЭГ.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Полученные результаты представляют интерес для изучения механизмов возникновения и развития компенсируемого умственного утомления.

Показано, что использованная в экспериментах когнитивная нагрузка в течение 1,5 часов вызывает утомление, определяемое по субъективным показателям, но компенсируемое на поведенческом уровне. Предполагается, что разработанная методология бесконтактной диагностики работоспособности по показателям глазодвигательной активности и зрительно-моторной координации может быть более эффективна при длительных когнитивных нагрузках, а также для диагностики возникновения других состояний со сниженной работоспособностью.

Предложена гипотеза, что показателем развития компенсируемого утомления может служить возникновение кратковременных эпизодов увеличения времени решения задач, с последующим возвращением к исходным значениям. Это следует учитывать при разработке компьютерных систем диагностики утомления.

Показанные особенности адаптивной роли дневного сна представляют практический интерес при формировании стратегий поддержания высокой работоспособности профессионалов, занятых интенсивным умственным трудом.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработана методология моделирования умственного утомления у пользователей компьютеров в ходе решения арифметических задач и диагностики утомления с помощью бесконтактной регистрации показателей работоспособности, глазодвигательной активности и зрительно-моторной координации.
2. Для динамики работоспособности при когнитивной нагрузке средней длительности (1,5 часа) характерно возникновение кратковременных эпизодов нестабильности работоспособности с последующим возвращением к исходным значениям и изменением функциональной пробы ЭЭГ и субъективного самочувствия, что можно рассматривать как показатель развития компенсируемого утомления.
3. Дневной сон после рабочей сессии позволяет сохранить более высокие параметры субъективного самочувствия и может быть эффективен для стабилизации состояния при дальнейшей работе по сравнению с отдыхом в состоянии спокойного бодрствования.

Апробация работы.

Основные результаты работы доложены на 16-ой Европейской конференции по движениям глаз (Марсель, 2011), 51-м съезде общества психофизиологов — SPR (Бостон, 2011), 6-ой молодежной школе-конференции "Сон — окно в мир бодрствования" (Москва, 2011), 15 и 16 школах-конференциях молодых ученых по физиологии высшей нервной деятельности и нейрофизиологии (Москва, 2011, 2012), 5-ой международной конференции по когнитивной науке (Калининград, 2012), 21-м конгрессе Европейского

общества изучения сна — ESRS (Париж, 2012), VIII Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы сомнологии» (Москва, 2012).

По теме диссертации опубликовано 7 работ, из них 1 в журнале, рекомендованном ВАК.

Объем и структура диссертации.

Диссертация содержит следующие основные разделы: введение, обзор данных литературы, материалы и методы исследования, главы результатов собственных исследований и их обсуждение, заключение, выводы, приложения и библиографический указатель, включающий работы на русском (23) и английском (118) языках. Диссертация изложена на 111 страницах, содержит 3 таблицы и 14 рисунков.

Материалы и методы исследования.

Испытуемые. В экспериментах участвовали 16 испытуемых в возрасте 18-28 лет (7 женского пола, 9 – мужского пола), правши, способные читать крупный текст с монитора без очков и не страдающие повышенной дневной сонливостью.

Схема эксперимента:

Было проведено 2 серии опытов, имевших общую схему и отличавшихся длительностью и интенсивностью когнитивной нагрузки и функциональными пробами (см. рис. 1). В первой серии первая сессия длилась 60 мин., а вторая сессия — 30 мин. Во второй серии — соответственно 90 мин. и 40 мин. Также во второй серии опытов использовали только задачи, занимавшие более 6 секунд на решение у испытуемых первой серии (поскольку испытуемые отмечали невысокую сложность задания, и доля таких задач была достаточно высока) и дополнительно записывали ЭЭГ-тест угасания альфа-ритма (alpha attenuation test, ААТ — Stampi, 1995). В обеих сериях перерыв на отдых длился

90 минут, из них 60 минут испытуемый в основном эксперименте спал или спокойно бодрствовал в контрольном эксперименте.

Схема эксперимента представлена на рис. 1.

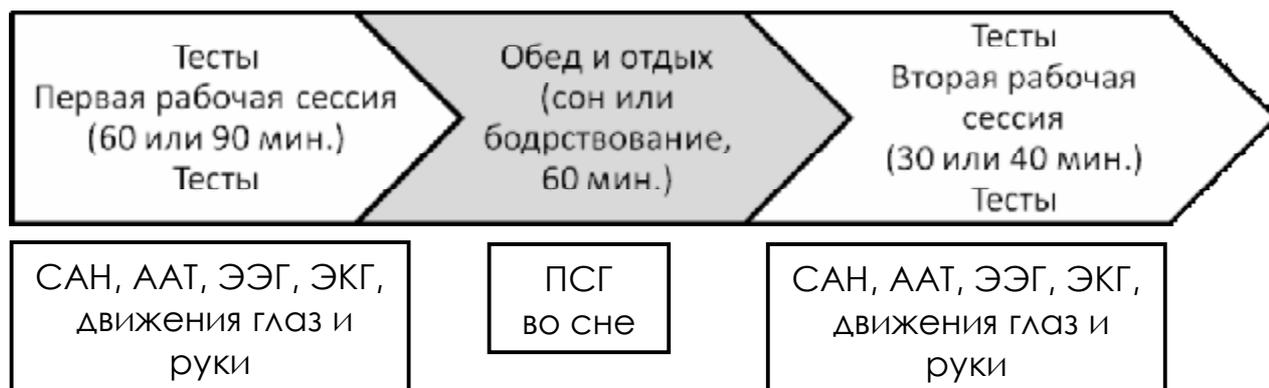


Рис. 1. Общая схема эксперимента (вверху) и регистрируемые в опыте тесты и параметры (внизу).

Когда испытуемый впервые приходил в лабораторию, он заполнял шкалу сонливости Эпворта (Epworth Sleepiness Scale) для оценки общей дневной сонливости перед началом первой рабочей сессии. Кроме того, перед началом и по окончании каждой рабочей сессии испытуемый заполнял опросник САН (субъективная оценка текущего самочувствия, активности и настроения — Доскин, 1973). В тесте ААТ испытуемого просили сидеть расслабленно с закрытыми и открытыми глазами последовательно по 1 минуте. Всего тест длился 10 минут (5 раз – глаза открыты, 5 раз – глаза закрыты).

После этих тестов испытуемый выполнял задание с когнитивной нагрузкой, вызывающее умственное утомление в течение первой рабочей сессии. Затем он обедал и отдыхал (спал или спокойно бодрствовал). Между пробуждением и началом второй рабочей сессии следовал перерыв в 15 минут для заполнения опросника САН, записи ААТ и уменьшения эффектов инерции сна. После отдыха испытуемый работал в ходе второй рабочей сессии, которая служила для оценки эффектов восстановления работоспособности после отдыха.

Программа когнитивной нагрузки для решения арифметических задач (моделирования умственного утомления).

Когнитивная нагрузка: Арифметические задачи состояли из четырех различных случайных двузначных чисел, между которыми в произвольном порядке стояли два знака «+» и один «-», например "32-79+51-40". Задача располагалась в рамке размером 300 на 100 пикселей в центре экрана. Испытуемый должен был как можно быстрее вычислить решение предложенной задачи и щелкнуть левой кнопкой мыши в пределах рамки. После этого справа и слева от задачи появлялись варианты ответа в рамках (140 на 100 пикселей). Правильный ответ был не меньше 30, неправильный отличался от правильного не более, чем на 15. Расположение правильного ответа справа или слева было случайным, например, "36" слева и "44" справа:
36 32-79+51-40 44.

Инструкция. Испытуемый должен был как можно быстрее найти правильный ответ, перевести на него курсор и щелкнуть левой кнопкой мыши в пределах рамки вокруг ответа. После щелчка по любому из ответов экран пустел. Испытуемый должен был вернуть курсор мыши в исходное положение в центре экрана. Через 3 секунды автоматически предъявлялась следующая задача. Таким образом, испытуемому на экране монитора последовательно предъявлялось: 1) задача, 2) задача с ответами, 3) пустой экран

Программа моделирования когнитивной нагрузки была написана на языке C++ и предъявляла испытуемым загружаемые из отдельного файла арифметические задачи для решения.

Экспериментальное оборудование и регистрируемые параметры.

Задачи для решения и предлагаемые ответы предъявлялись на мониторе черным шрифтом в черных прямоугольных рамках на сером фоне. Яркость освещения в экспериментальной камере составляла 500 люкс. Задачи предъявлялись на ЖК мониторе с диагональю 19 дюймов и разрешением 1280 на 1024 пикселя, находящемся на расстоянии 57-60 см. от глаз испытуемого (горизонтальный угол обзора около 32°, вертикальный – около 25°). Условия освещения и контрастность видимого изображения подбирались с целью минимизировать нагрузку на зрительную систему.

Все время работы у испытуемых записывалась ЭЭГ в 6 отведениях (F3, F4, C3, C4, O1, O2), электрокардиограмма от левого запястья (ЭКГ) и электроокулограмма (ЭОГ) с помощью полисомнографического усилителя фирмы Dr. Sagura Royal Medical Systems AG и программы LEONARDO BRAINMAP. Для регистрации движений взора использовалась система видеотрекинга Eyegaze Analysis System программа NYAN 2.0) с частотой опроса 120 Гц, т.е. между каждым измерением видеотрекера проходило 8,3 мс. Программа, предъявляющая задание, каждые 15 мс записывала координаты курсора мыши, состояние левой кнопки мыши (нажата/не нажата), что предъявляется испытуемому на мониторе (задача, задача с ответами, пустой экран). Во время сна записывалась полисомнограмма (ПСГ): ЭЭГ в 6 отведениях, электромиограмма подбородочных мышц, ЭОГ и ЭКГ.

Обработка данных.

С помощью программы, разработанной в среде Matlab 7.1, проводилась синхронизация данных, полученных программой предъявления задач и данных видеотрекера. Определялось время решения задачи (от появления задачи до щелчка по ней) и время поиска ответа (от щелчка по задаче до щелчка по ответу), правильность решения задачи, справа или слева находился правильный ответ. Для каждой решенной задачи регистрировалась и анализировалась траектория движений глаз и мыши.

Анализ. Для каждой решенной задачи выделялись области фиксации взора и траектории саккад при поиске ответа. В области фиксации взора выделялись группы зарегистрированных видеотрекером точек, ограниченных заданным радиусом (30 пикселей), скорость движения глаз между которыми была ограничена максимальной пороговой скоростью (9 пикселей между последовательными точками) и минимальной длительностью 67 мс (8 измерений видеотрекера. Саккады определялись по критерию минимально допустимой скорости движения глаз, и пороговой скорости (какая доля от минимальной скорости должна быть достигнута, чтобы считать, что саккада началась). На основе данных по временам начала саккад, фиксаций и движений

мышь выделялись времена реакций между началом саккады и ответом, началом фиксации на правильном ответе и началом движения мыши, средняя длительность фиксаций для каждой решенной задачи. Эти времена являлись параметрами реакций системы "глаз-рука" и служили для оценки динамики зрительно-моторной координации испытуемых в ходе работы.

Полученные в тесте ААТ данные ЭЭГ разделялись на эпохи длительностью 1 сек. и подвергались быстрому преобразованию Фурье с последующим выделением диапазона альфа- ритма (8-12 Гц). Каждая проба разделялась на периоды с закрытыми и открытыми глазами (длительностью по 1 мин.), с отбрасыванием артефактов закрытия глаз и движений испытуемого. Для каждой пробы данные по мощности ЭЭГ ($\text{мкВ}^2/\text{Гц}$) усреднялись для всех периодов с закрытыми и открытыми глазами для симметричных пар электродов С и О для диапазона частот 9-12 Гц, как наиболее показательного и устойчивого к артефактам записи ($P_{\text{закр}}$ и $P_{\text{откр}}$). Отношение полученных мощностей для закрытых и открытых глаз давало коэффициент угасания альфа-ритма (КУА): $\text{КУА} = P_{\text{закр}} / P_{\text{откр}}$.

Полисомнограмма сна (ПСГ) стадировалась экспертом по стандартам Американской академии медицины сна (AASM), согласно которым выделяется 3 стадии медленноволнового сна и REM сон (Iber, 2007). Стадирование сна проводилось по эпохам длительностью 30 с. Для каждого испытуемого составлялась гипнограмма сна, по которой определялось времени засыпания (латентность 1 стадии сна) и длительность каждой стадии сна.

Статистическая обработка проводилась в программном пакете Statistica 7.0 (StatSoft, США), отличия считали достоверными при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение.

1. Анализ эффективности выполнения психомоторного теста.

В ходе первой серии опытов была отмечена тенденция, подтвердившаяся во второй сессии: в течение первой рабочей сессии у испытуемых развивалось умственное утомление, проявлявшееся в значительной (достоверной по

критерию Краскела-Уоллеса для большинства испытуемых) нестабильности среднего по пятиминутным интервалам времени решения задачи (см. рис. 2). Эта нестабильность выявлялась как плавное снижение скорости работы с последующим восстановлением или как резкие «рывки» и «провалы». При этом плавной тенденции к снижению скорости работы к концу сессии не обнаруживалось.

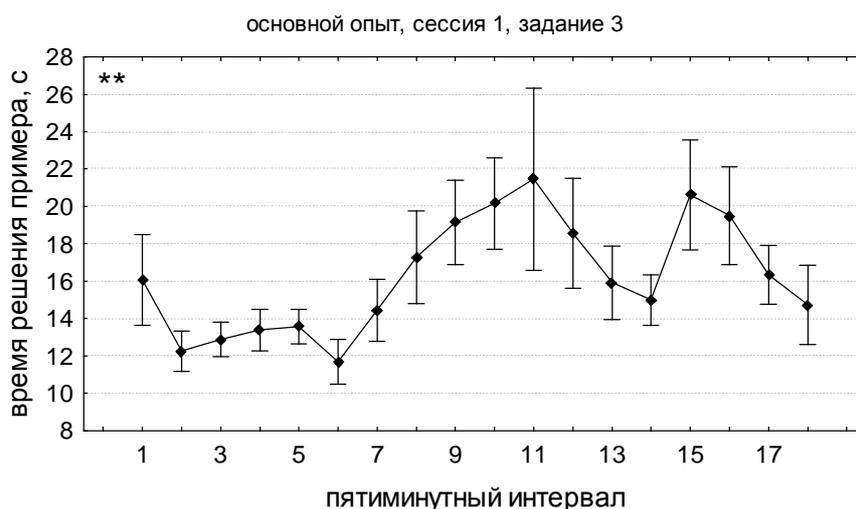


Рис. 2. Динамика работы испытуемого А в 1-й сессии с усреднением по пятиминутным интервалам работы. Отклонения от медианы значимы по критерию Краскела-Уоллеса (** - $p < 0,01$).

Выраженность колебаний была индивидуальна и, видимо, зависела от устойчивости конкретного испытуемого к когнитивным нагрузкам и уровня его тренированности. Подобные колебания продуктивности работы при умственных нагрузках уже отмечались другими авторами (van der Linden et al., 2003).

Мы предполагаем, что колебания темпа работы — типичный паттерн развития умственного утомления. Представляет интерес соотнесение его со сходно проявляющимся феноменом «состояния нестабильности», обнаруживаемом работе на фоне депривации сна и снижения уровня бодрствования (Doran et al., 2001; Gunzelmann et al., 2009; Zhou et al., 2011). В этом состоянии наблюдаются кратковременные эпизоды снижения продуктивности работы, времени реакции, внимания и моменты «микросна». При этом оператор может воспринимать свое состояние как приемлемое для

эффективного выполнения работы (Дорохов, 2013). Возможно, оба эти феномена связаны с утомлением и кратковременным переходом отдельных зон мозга, в особенности лобной коры, в неоптимальное состояние с последующим компенсаторным возвратом к норме. Такое объяснение возможно также и в контексте развиваемой сейчас концепции локальных механизмов возникновения сна (Killgore, 2010; Rector et al., 2009; Вязовский, 2013; Тимофеев, 2013).

Во второй рабочей сессии колебания обычно не были значимыми, однако все 3 отмеченных случая значимых колебаний пришлось на контрольный эксперимент. Это позволяет предположить, что сон мог более эффективно восстанавливать функциональное состояние испытуемого, в то время как после отдыха в спокойном бодрствовании, испытуемые не полностью восстанавливались и следовые эффекты проявлялись даже в короткой второй сессии.

Несмотря на колебания работоспособности, средние параметры скорости работы и процент совершаемых ошибок (выборов неправильного ответа и возвратов к повторному решению задачи) были стабильны для каждого испытуемого и индивидуальны. Видимо, они характеризуют человека как работника в данном задании и отражают его индивидуальные характеристики в выбираемом им балансе «скорость-точность».

2. Анализ параметров глазодвигательной активности и зрительно-моторной координации.

При анализе глазодвигательной активности в ходе решения задач и поиска ответа был выявлен ряд характерных паттернов и особенностей движений глаз, не связанных с правильностью окончательно выбранного ответа:

Нормальный паттерн: в ходе решения задачи взор незначительно выходит за пределы рамки с задачей. После решения задания и щелчка кнопкой мыши по задаче совершается саккада вправо или влево. При угадывании с первого раза мышь перемещается на правильный ответ, и испытуемый щелкает кнопкой мыши по нему (рис. 3, Б), в противном случае начинается саккада к другому

ответу (рис. 3, А). Для некоторых испытуемых был характерен паттерн с тремя последовательными саккадами: испытуемый сначала обнаруживал правильный ответ, затем переводил взгляд к неправильному, и вновь возвращался к правильному ответу. Первая саккада к задаче могла быть предварительной: она начиналась еще до щелчка по задаче и, соответственно, до появления ответов.

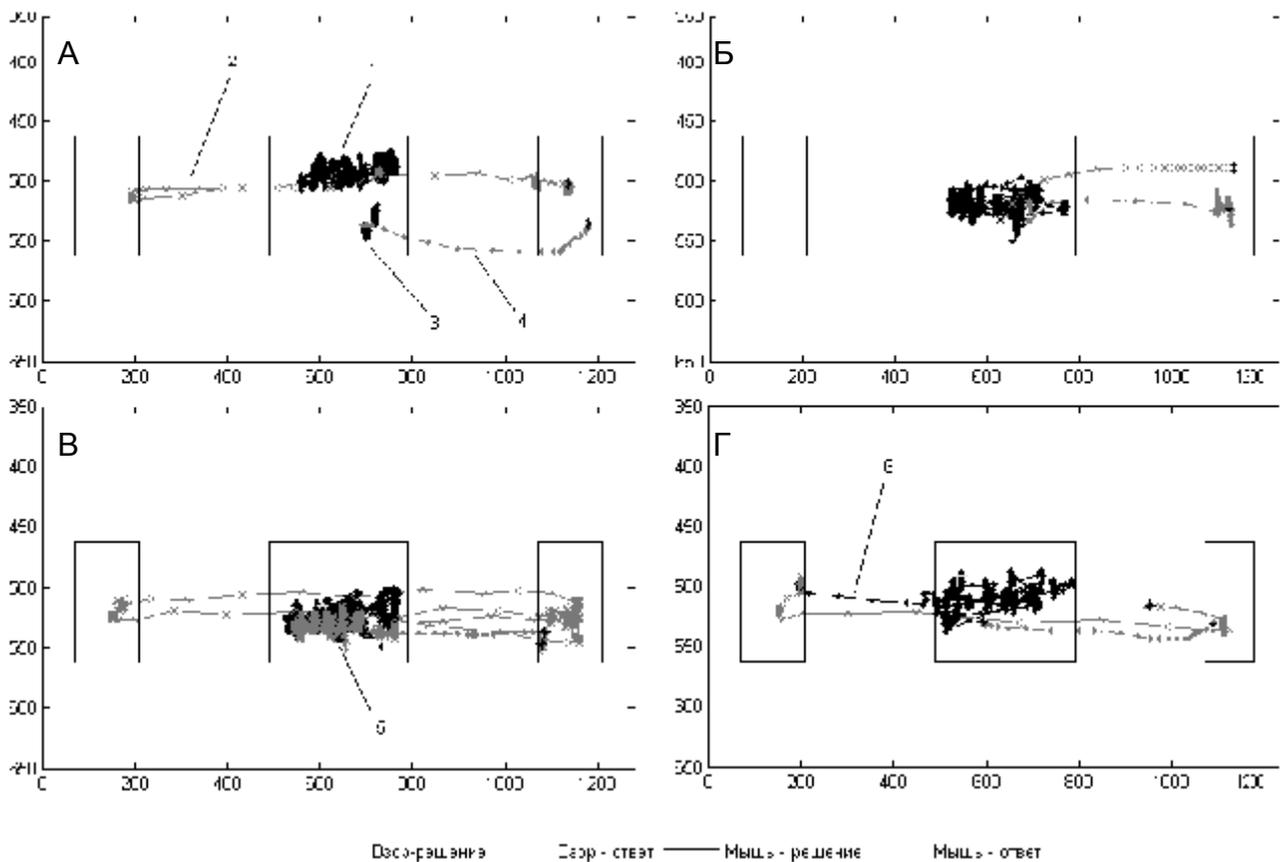


Рис. 3. Основные паттерны движений глаз испытуемого и курсора мыши в ходе решения отдельных задач. По осям – координаты точек в пикселях (масштаб не соблюден). Черные прямоугольники – рамки, в которых предьявлялись задача и ответы. Интервал между маркерами - 15 мс. 1 – движения взгляда в ходе вычисления решения задачи. 2 – движения взгляда в ходе поиска ответа. 3 – движения мыши в ходе вычисления решения задачи. 4 – движения мыши в ходе поиска ответа. 5 – движения взгляда при пересчете задачи. 6 – предварительная саккада к ответу.

Возможно, это бессознательно используемая испытуемыми стратегия ускорения поиска ответов (рис. 3, Г). Щелчок по задаче может произойти во время совершения предварительной саккады, в момент окончания саккады и, в

крайних случаях, после начала фиксации на области, где должен появиться ответ. В таком случае можно также говорить о предварительной фиксации. Этот паттерн требовал запоминания областей появления ответа до начала саккады и фиксации отсутствующей цели, однако подобное обучение происходило быстро: предварительная саккада могла появиться уже на третьей задаче, выполняемой испытуемым. Выраженность этих предварительных глазодвигательных паттернов была индивидуальна (см. табл. 1).

Пересчет: Вариант ошибочного решения. После щелчка по задаче испытуемый не обнаруживает вычисленного ответа среди предложенных ему на экране, и пересчитывает задачу заново, поскольку ему сообщалось, что правильный ответ присутствует всегда. После пересчета вновь производится поиск ответа среди предложенных (рис. 3, В).

Возврат к задаче: в ходе поиска ответа делается 1 или, реже, 2 фиксации на задаче. Серии фиксаций на различных числах и знаках задачи, в отличие от пересчета, не наблюдается.

исп.	Доля предварительных саккад, %	доля первых саккад вправо, %	ответ выбран с 1 раза, %	ответ выбран со 2 раза, %	ответ выбран с 3 раза, %
А1	52,14±17,48	84,40±7,37	42,74±5,85	47,26±3,88	4,40±1,47
Б1	76,34±14,24	3,04±4,63	25,32±5,79	50,77±2,44	20,10±8,83
В1	9,91±2,04	66,36±7,16	29,69±5,95	48,05±5,72	15,68±5,99
А	52,08±10,65	96,07±1,26	33,52±8,07	47,93±3,37	16,74±3,83
Б	71,29±7,95	4,10±3,77	30,79±10,01	50,77±7,16	12,90±5,31
В	31,23±17,82	81,13±10,87	15,54±13,65	41,50±4,11	35,01±9,37
Г	86,44±7,16	98,97±1,09	39,76±4,87	44,49±2,20	6,55±1,19
Д	37,17±13,43	92,27±4,31	32,70±6,05	39,21±1,37	16,52±3,63
Е	50,77±10,63	92,48±4,01	26,24±6,04	44,43±2,57	21,25±5,87
Ж	24,78±5,07	36,99±6,72	30,84±4,37	41,60±6,76	9,31±3,16
З	52,76±23,09	95,36±4,90	26,15±3,37	43,57±2,57	18,87±2,99
И	61,80±6,22	95,59±4,24	7,22±0,26	42,87±4,85	41,93±10,41

Табл. 1. Усредненные значения по всем рабочим сессиям для доли предварительных саккад при поиске правильного ответа, первых саккад вправо, и случаев выбора ответа с 1, 2 и 3-го перевода взгляда для испытуемых первой (А1-В1) и второй (А-И)

серий опытов. Выбор ответа более чем с 3 раза встречался редко и поэтому не включен в таблицу.

Был проведен анализ параметров фиксаций взора в ходе работы. Обнаружена прямая линейная связь между временем решения задачи и количеством фиксаций на ней. Коэффициент корреляции был высок и достоверен ($p < 0,05$) для всех записей: в среднем он составил $r = 0,92 \pm 0,046$, и колебался в пределах 0,83-0,98. Корреляции между временем решения и средней длительностью фиксаций на задаче отсутствовали. Количество фиксаций на задаче имело динамику, сходную со скоростью работы, и тоже отражало нестабильное состояние испытуемых при развитии умственного утомления. Не отмечалось увеличения средней длительности фиксаций на более сложной (занимавшем больше времени на решение) задаче, хотя такая связь длительности фиксаций и когнитивной нагрузки отмечается в литературе (Di Stasi et al., 2013; Schleicher et al., 2008; Velichkovsky et al., 2005). Видимо, это было проявлением специфики предлагаемого испытуемым задания, и при решении более сложных задач требовалось большее количество переводов взгляда между элементами задачи, но не более длительные остановки взгляда на них. Между тем, для средней длительности фиксаций также был характерен колебательный характер динамики в ходе работы. Анализ динамики среднего времени фиксаций на задаче проводился после усреднения этого параметра на пятиминутных интервалах работы. Отмечались как резкие отклонения от средних показателей, так и более плавные, в течение нескольких пятиминутных интервалов, смещения с последующим возвращением к исходному уровню. Эти колебания были достоверны по критерию Краскела-Уоллиса для 25 из 27 допущенных для анализа записей второй серии опытов и для 5 из 11 записей первой серии опытов. Такое различие позволяет предположить наличие связи между выраженностью колебаний средней длительности фиксаций на задаче с общей когнитивной нагрузкой при выполнении задания, хотя эти колебания и не совпадают с динамикой скорости работы.

3.2.2. Анализ динамики зрительно-моторной координации.

При анализе паттернов поиска ответа времена реакций разбивались на группы в соответствии с тем, с какого раза произошел выбор ответа: с первого, второго или третьего. Движения мыши всегда отставали от начала саккад, но при измерении задержки между началом фиксации на выбранном ответе и началом движения мыши играло роль, с какого раза выбран ответ. Если испытуемый выбирал ответ со второго или третьего раза, то движение мыши могло начаться еще до остановки взгляда на выбранном ответе. В связи с этим общая динамика времен реакции разбивалась на три группы по моменту выбора ответа. Внутри каждой группы времена различных задержек в зрительно-моторной системе показывали высокую стабильность, что, вероятно, говорит о высоком уровне автоматизма выполнения этих реакций при выполнении типовых заданий.

3.3. Анализ динамики угасания альфа-ритма ЭЭГ в ААТ

ЭЭГ-тест ААТ был записан у 14 испытуемых, из них у шести угасание альфа-ритма было хорошо выражено (3 мужчин, 3 — женщины), у 8 — выражено слабо (5 мужского пола, 3 — женского). У испытуемых первой группы закрывание глаз вызывало появление мощного альфа-ритма ЭЭГ, подавляемого при открывании глаз. Во вторую группу попали испытуемые, не обладающие выраженным альфа- ритмом и те, у кого при закрывании глаз альфа-ритм возникал в виде кратковременных веретен малой амплитуды. Для вычисления коэффициента угасания альфа-ритма (КУА) были использованы показатели мощности ЭЭГ в диапазоне 9-12 Гц в центральных (С) и затылочных (О) отведениях, как наиболее устойчивых к помехам в записи и чувствительных к изменениям состояния испытуемых. У испытуемых второй группы КУА был меньше единицы из-за чувствительности к помехам при открытых глазах, и его анализ не проводился.

КУА для пар отведений С и О демонстрировали сходную динамику. В большинстве случаев наблюдалось снижение КУА за время работы в первой и второй сессиях. При этом исходная величина КУА могла варьировать в разные

экспериментальные дни для одного испытуемого. Снижение КУА может свидетельствовать о снижении уровня бодрствования и, возможно, о развитии сонливости (Kaida et al., 2006; Stampi et al., 1995). При этом снижение КУА обусловлено не только увеличением мощности альфа-ритма при открытых глазах, но и в некоторых случаях, снижением мощности при открытых глазах.

3.4. Анализ субъективных оценок по опроснику САН.

В экспериментах первой серии участвовали 4 испытуемых. В экспериментах усложненной второй серии — 12 испытуемых. Поскольку общая динамика изменения субъективных параметров в сериях оказалась сходна, результаты серий были объединены.

При оценке изменений субъективных показателей по опроснику САН выявилось влияние экспериментального задания и дневного сна на: 1) самочувствие и 2) уровень активности. Оценки настроения менялись на протяжении эксперимента. Такой результат подтвердил отсутствие эмоциональной компоненты в предоставленном задании, развившемся состоянии утомления и исследуемых типах отдыха. Оценки всех параметров по опроснику САН могут колебаться в пределах 1-7 баллов.

Показатели самочувствия значимо падали в ходе первой рабочей сессии (с $5,22 \pm 0,92$ до $4,42 \pm 1,06$ в опыте со сном, с $5,2 \pm 0,9$ до $4,35 \pm 0,88$ в опыте без сна, критерий Вилкоксона, $p < 0,05$). Отдых обоих типов приводил к значимому по сравнению с концом первой сессии восстановлению параметров до исходных значений ($5,19 \pm 0,82$ в опыте со сном, $5,01 \pm 0,75$ в опыте без сна). После окончания второй рабочей сессии в основном и контрольном опыте параметры самочувствия продемонстрировали различия. В случае, если испытуемый во время отдыха бодрствовал, показатели самочувствия значимо снижались (с $5,01 \pm 0,75$ до $4,44 \pm 0,74$, $p < 0,05$), если спал – практически не изменялись по сравнению с измерением сразу после отдыха ($5,29 \pm 0,86$). Показатели в опыте со сном были значимо выше, чем в опыте с бодрствованием и находились на уровне исходных значений.

Показатели активности показали довольно сходную динамику изменений, однако, не вышедшую на уровень значимости. Они так же совпадали в основном и контрольном опытах в первых трех тестах и так же различались для опытов со сном и без него в измерении после второй рабочей сессии.

Таким образом, по опроснику САН были получены следующие результаты: продолжительная умственная работа в первой сессии снижала субъективные показатели активности и самочувствия, перерыв в деятельности восстанавливал их до исходных значений. Однако, только дневной сон способствовал дальнейшему сохранению этих параметров на высоком уровне в ходе второй рабочей сессии. Простое бодрствование в качестве отдыха не препятствовало повторному развитию утомления.

3.6. Анализ параметров дневного сна.

Все 16 испытуемых в основном эксперименте во время отдыха засыпали и достигали 2 стадии сна, 10 испытуемых достигли 3 стадии сна (глубокий медленноволновой сон). Фаза парадоксального (быстрого, REM) сна не отмечалась. 4 испытуемых просыпались до конца периода сна, остальные были разбужены. Среднее время сна составило $41,4 \pm 3,2$ минуты (см. табл. 2).

Параметры сна	Длительность, мин.
Длительность засыпания	$12,6 \pm 2,1$ (1,5-33)
Общее время сна	$41,4 \pm 3,2$ (19,5-54,5)
1 стадия	$5,8 \pm 1,0$ (1,5-15,5)
2 стадия	$26,5 \pm 2,0$ (14,5-39,5)
3 стадия	$10,4 \pm 3,0$ (0-34)

Табл. 2. Параметры дневного сна испытуемых. В скобках указаны минимальные и максимальные значения.

При этом связи между наблюдаемой структурой сна и описанными испытуемыми привычками к дневному сну не наблюдалось. Типичные гипнограммы сна представлены на рис. 4.

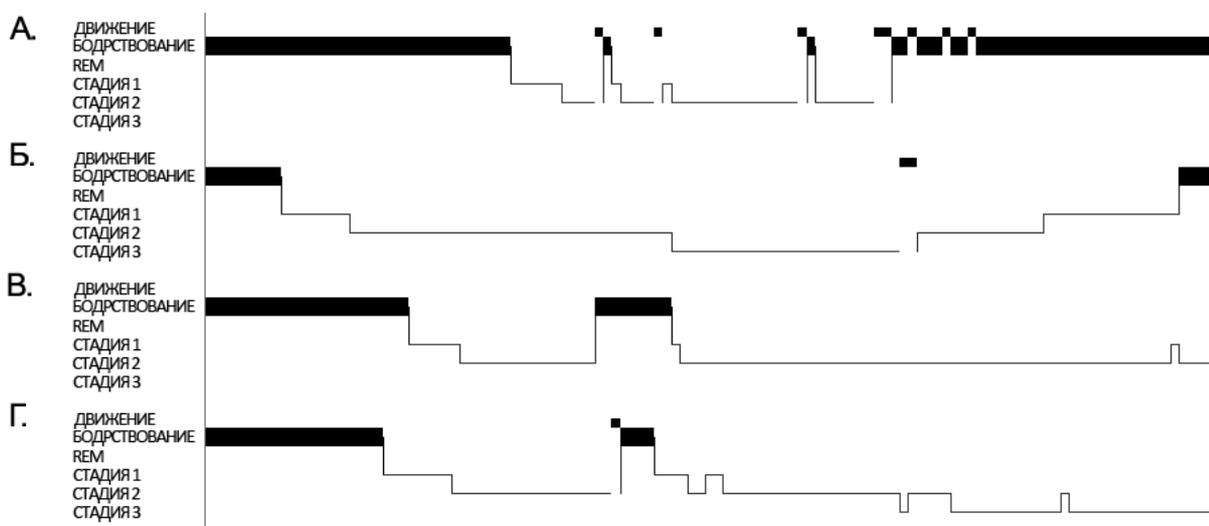


Рис 4. Основные типы дневного сна (гипнограммы четырех испытуемых).
 Длительность всех записей – 1 час. А – кратковременный сон, доходящий до 2 стадии, со спонтанными пробуждениями. Б – сон, доходящий до 3 стадии, со спонтанными пробуждениями во второй трети сна и в конце. В – сон, разделенный периодом бодрствования, доходящий до 2 стадии; испытуемый разбужен. Г — сон, разделенный периодом бодрствования, доходящий до 3 стадии; испытуемый разбужен.

Заключение.

Разработана новая методика моделирования умственного утомления, позволяющая детально анализировать совместную работу зрительной и моторной систем и отслеживать изменения в ЭЭГ испытуемого, а также исследовать влияние дневного сна на состояние утомленного испытуемого. Методика использует комплексный подход к экспериментальному моделированию умственного утомления, вызываемого арифметическими вычислениями, позволяющий одновременно исследовать динамику развития утомления по показателям движения глаз, зрительно-моторной координации и электрической активности мозга (ЭЭГ), субъективным оценкам самочувствия и поведенческим показателям скорости работы.

Разработанная методика также представляет интерес в контексте когнитивных исследований паттернов глазодвигательной активности при решении достаточно сложных арифметических задач, а также стратегий оптимизации подсчетов и ускорения поиска правильного ответа и их внутри- и межиндивидуальных различий. Методология исследования достаточно универсальна и может быть адаптирована для анализа различных

функциональных состояний: монотония, эмоциональный стресс, депривация сна, десинхронизация суточных ритмов и фармакологических воздействиях на организм.

Показано, что непрерывное выполнение арифметических вычислений в течение периода до 1,5 часов вызывает развитие состояния компенсируемого умственного утомления, которое характеризуется нестабильностью времени решения задач и количества фиксаций на задачах с кратковременными периодами их увеличения или снижения и последующим компенсаторным возвращением к средним значениям. На возникновение компенсируемого утомления указывает развитие чувства усталости по показателям самочувствия и активности (тест САН).

Было выдвинута гипотеза, что количественный анализ динамики нестабильности работоспособности может служить показателем индивидуальной способности компенсировать когнитивные нагрузки при развитии утомления.

Паттерны движений глаз, а также функциональной пробы альфа-ритма ЭЭГ обладают высокой межиндивидуальной вариабельностью. Индивидуальные различия доли предварительных саккад и предварительных фиксаций, а также склонности к пересчетам, скорее всего, говорят о произвольном выборе различных стратегий ускорения работы отдельными испытуемыми. Для средней длительности фиксаций на задаче в ходе работы характерны выраженные достоверные колебания, однако этот параметр имеет отличную от скорости работы динамику и с ним не коррелирует. Величина времени реакции в зрительно-моторной системе зависит от того, с какого раза был выбран правильный ответ, и при разделении экспериментальных записей по этому признаку обладают высокой стабильностью, что видимо, обусловлено высокой степенью автоматизации этих реакций при выполнении стереотипных заданий. У испытуемых с выраженным альфа-ритмом ЭЭГ при закрытых глазах, отмечалась тенденция к ослаблению коэффициента угасания альфа-ритма за время работы.

Дневной сон в качестве отдыха после рабочей сессии позволяет сохранить высокие параметры субъективного самочувствия при дальнейшей работе, чего спокойное бодрствование обеспечить не может, а также способствует стабилизации состояния испытуемых после развившегося умственного утомления.

Интенсивная умственная деятельность не препятствовала засыпанию испытуемых. Дневной сон всех испытуемых имел первые две стадии сна, у большинства – также и 3 стадию глубокого медленноволнового сна. Парадоксального сна не наблюдалось, что является нормальным для выбранной длительности дневного сна без предшествующей депривации ночного сна.

Выводы.

1. Разработанная методика моделирования умственного утомления, позволяет детально анализировать скорость и правильность работы, совместную работу зрительной и моторной систем и отслеживать изменения в ЭЭГ испытуемого, а также исследовать влияние дневного сна на умственное утомление.
2. Выполнение психомоторного теста в течение 1,5 часов вызывает развитие состояния умеренного умственного утомления, что отражается в дестабилизации параметров работоспособности, компенсируемых на поведенческом уровне. Показателем развития компенсируемого утомления может служить возникновение кратковременных эпизодов достоверного увеличения времени решения арифметических задач и соответствующего им количества фиксаций на отдельных элементах задания, с последующим возвращением к исходным значениям.
3. Развитие состояния компенсируемого умственного утомления в ходе работы приводит к снижению субъективных оценок самочувствия (по тесту САН) и отражается в функциональной пробе угасания альфа-ритма ЭЭГ.
4. Средняя длительность фиксаций за время решения задачи показала отсутствие связи со скоростью решения. Времена реакций в зрительно-

моторной системе неизменны на протяжении рабочих сессий. Паттерны движений глаз, а также функциональной пробы альфа-ритма ЭЭГ обладают высокой межиндивидуальной вариабельностью.

5. Восстановительные функции дневного сна при среднем уровне утомления проявлялись только у части испытуемых, поддерживая субъективное самочувствие и работоспособность на более стабильном уровне по сравнению с отдыхом в состоянии спокойного бодрствования.

Работа поддержана грантом РГНФ 12-36-01296 а2.

Список опубликованных по теме диссертации работ:

Пучкова А.Н., Ткаченко О.Н., Дорохов В.Б. Экспериментальная модель исследования умственного утомления и адаптивной функции дневного сна для восстановления работоспособности, Экспериментальная психология, Т. 6, No.1, 2013, с. 48-61.

Материалы конференций:

1. Умственное утомление: восстановление зрительно-моторной координации после дневного сна. Пучкова А. Н., Ткаченко О. Н., Королева Н. В., Дорохов В. Б. // Сборник материалов 6-ой Российской молодежной школы-конференции «Сон-окно в мир бодрствования» М., 2011, с. 89.

2. Evaluation of mental fatigue by eye and hand movement parameters. Puchkova A. N., Dorokhov V.B., Tkachenko O.N. // 16th European Conference on Eye Movements. Abstracts // Marseille 2011, p. 172.

3. Daytime nap recuperates psychomotor activity affected by mental fatigue. Alexandra N. Puchkova, Vladimir B. Dorokhov, Olga N. Tkachenko. // Psychophysiology, 48. Suppl 1. p. S109.

4. Нарушения зрительно-моторной координации при умственном утомлении и ее восстановление после короткого дневного сна. Пучкова А. Н., Дорохов В.Б. // Тезисы докладов Пятой международной конференции по когнитивной науке. Калининград, 2012. с. 587.

5. The effects of daytime nap on mental fatigue. A. Puchkova, O. Tkachenko, V. Dorokhov. // Journal of Sleep Research 21 (Suppl. 1) 2012, p.118-119.

6. Дневной сон как способ восстановления работоспособности при умственном утомлении. Пучкова А.Н., Ткаченко О.Н., Дорохов В.Б. // Сборник материалов VIII Всероссийской Научно-практической конференции «Актуальные проблемы сомнологии» М., 2012, с. 67.

