

**ФИЗИОЛОГИЯ ПОВЕДЕНИЯ;  
ОБУЧЕНИЕ И ПАМЯТЬ**

УДК 612.822.3

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОМЕНТОВ КРИТИЧЕСКОГО СНИЖЕНИЯ  
УРОВНЯ БОДРСТВОВАНИЯ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ  
ЗРИТЕЛЬНО-МОТОРНОЙ КООРДИНАЦИИ**

© 2014 г. Г. Н. Арсеньев, О. Н. Ткаченко, Ю. В. Украинцева, В. Б. Дорохов

*Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва,*

*e-mail: byron100z@gmail.com*

Поступила в редакцию 20.06.2013 г.

Принята в печать 26.09.2013 г.

Разработан психомоторный тест, позволяющий моделировать состояние монотонии и отслеживать изменения зрительно-моторной координации в процессе снижения уровня бодрствования. От испытуемого требовалось в течение 1 ч проследить курсором “мышь” цель, медленно движущуюся на экране монитора по круговой орбите, и при неожиданном появлении нового стимула перевести на него курсор и нажать на клавишу “мышь”. На протяжении всего эксперимента регистрировали показатели зрительно-моторной координации: латентные периоды перемещения взгляда, курсора “мышь” и нажатия на клавишу “мышь” при появлении нового стимула, а также отклонения взгляда и курсора “мышь” от центра цели, характеризующие точность отслеживания цели. По ЭЭГ и видеоизображению испытуемого проводили экспертную оценку изменений уровня бодрствования. Выявлена высокая чувствительность показателей зрительно-моторной координации к колебаниям уровня бодрствования. По мере снижения уровня бодрствования достоверно увеличивались латентные периоды саккадических движений глаз, перемещения курсора “мышь” и нажатия на клавишу “мышь”, а также вариабельность отклонений взгляда и курсора “мышь” от центра цели. Для латентных периодов саккад, начала движения курсора и нажатия на клавишу “мышь” выявлено достоверное увеличение еще за 2–3 мин до того момента, когда эксперт замечал снижение уровня бодрствования. Обсуждается возможность прогнозирования моментов критического снижения уровня бодрствования по показателям зрительно-моторной координации.

*Ключевые слова: зрительно-моторная координация, монотония, саккады, отслеживающие движения глаз, микросон, сонливость, скорость реакции.*

**Predicting the Moments of Critical Vigilance Decline  
by Visuomotor Coordination Parameters**

G. N. Arsenyev, O. N. Tkachenko, U. V. Ukraintseva, V. B. Dorokhov

*Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Russian Academy of Sciences, Moscow,*

*e-mail: byron100z@gmail.com*

A psychomotor test for induction of the state of monotony and visuomotor coordination analysis has been developed. The subject had to follow a small circle slowly moving in circular orbit on a screen with a “mouse” cursor. When an additional target unexpectedly appeared, he had to catch it with a cursor and click a “mouse” button when the cursor was on it. Eye movements were recorded with an eyetracker. The experts marked the episodes of declined vigilance based on EEG and video of a subject. Analysis of parameters of visuomotor coordination demonstrated their high sensitivity to the vigilance decline. We have found the increase of variability in pursuit eye movements and “mouse” cursor movements during the episodes of lowered vigilance before the appearance of the additional target and also a growing latency of saccadic eye movements, cursor movements and “mouse” button presses when the cursor contacted the additional target. For latency of saccadic eye movements, cursor movements and mouse button presses significant increase was found 2–3 min before experts can detect vigilance decline too. The ability by visuomotor coordination parameters to predict the moments of critical vigilance decline is discussed.

*Keywords: visuomotor coordination, monotony, saccades, pursuit eye movements, microsleep, sleepiness, reaction time.*

DOI: 10.7868/S0044467714010031

Во время деятельности уровень внимания у человека может колебаться в широких пределах, вплоть до непроизвольного засыпания на несколько секунд — такие “провалы” в деятельности называются микросном. В эти моменты у человека либо значительно увеличивается время реакции, либо полностью пропадает реакция на внешние стимулы [Boyle et al., 2008]. Полагают, что эпизоды микросна возникают на фоне нарастающей сонливости вследствие экстренного включения механизмов, запускающих сон [Saper et al., 2010]. В эти моменты сдвиги в характере выполнения деятельности настолько внезапны и непредсказуемы, что некоторые авторы выдвинули гипотезу о возникновении состояния нестабильности при снижении уровня бодрствования [Gunzelmann et al., 2009; Zhou et al., 2011]. В различных профессиональных сферах, в частности во время управления транспортом, подобная нестабильность внимания может иметь самые драматические последствия [Дорохов, 2013].

Сонливость, или снижение уровня бодрствования, возникает по разным причинам, в основном она связана с дефицитом сна и со временем суток (циркадианным ритмом). Однако сонливость развивается также и при выполнении монотонной и скучной работы с низким уровнем внешней стимуляции. В этом случае причиной снижения уровня бодрствования является возникновение состояния монотонии [Дорохов, 2003]. Некоторые авторы предполагают, что монотония выявляет существующую “замаскированную” латентную сонливость, которая проявляется при низком уровне стимуляции, характерной для монотонии [Carskadon, Dement, 1987].

Повышенная дневная сонливость — сложный феномен, который может проявляться или в виде длительного и непрерывного состояния дремоты, или в виде внезапных “сонных атак”. Кроме того, повышенная сонливость может быть следствием ряда расстройств: синдрома обструктивного апноэ, нарколепсии и нейродегенеративных заболеваний, включая болезнь Паркинсона [Iganzo, 2011]. Например, при болезни Паркинсона около 50% больных жалуются на повышенную дневную сонливость [Ondo et al., 2001; Shpirer et al., 2006]. Иногда повышенный уровень сонливости является одним из немногих ранних симптомов различных неврологических заболеваний и может быть важным диагностическим признаком, позволяющим вы-

явить заболевание на ранней стадии. В частности, некоторые авторы [Abbott et al., 2005] считают, что при развитии повышенной дневной сонливости риск появления болезни Паркинсона возрастает в 2–3 раза.

В настоящее время не существует достаточно надежных и универсальных методов контроля уровня бодрствования [Деметтиенко, Дорохов, 2013; Деметтиенко и др., 2006; Balkin et al., 2011; Whitlock, 2002]. Поэтому поиск методических подходов для объективной оценки уровня бодрствования и возможности прогнозировать его снижение является актуальной проблемой как в сфере медицины, так и в сфере безопасности профессиональной деятельности.

Наиболее прямой способ оценки функции внимания и его нарушений — это регистрация движений глаз и определение направления и динамики перемещений взора [Величковский, 2003; Колесникова и др., 2006; Шульговский и др., 2008]. Окуломоторный контроль движущихся объектов обеспечивается двумя типами движений глаз: саккадами и прослеживающими движениями [De Xivry et al., 2006; De Xivry et al., 2007]. Для оптимального восприятия объекта, особенно движущегося, необходима тонкая координация между обоими типами движений [De Xivry et al., 2006]. Поэтому методы видеотрекинга, позволяющие бесконтактно регистрировать движения глаз, рассматриваются как наиболее перспективные технологии для создания устройств контроля уровня бодрствования человека на транспорте и производстве [Деметтиенко, Дорохов, 2013].

В нашей лаборатории разработан психомоторный тест для анализа нарушений зрительно-моторной координации, вызываемых снижением уровня бодрствования [Дорохов и др., 2011]. В настоящем исследовании мы намерены проверить, возможно ли с помощью нашей методики прогнозировать наступление состояния со сниженным уровнем бодрствования еще до того, как снизится точность выполнения задания, а также, какие именно показатели зрительно-моторной координации наиболее чувствительны к снижению уровня бодрствования. Предыдущая работа [Дорохов и др., 2011] показала, что разработанный нами психомоторный тест у всех испытуемых через 25–40 мин вызывал состояние монотонии, которое проявлялось в снижении точности выполнения задания, при этом у половины из них отмечались также

моменты микросна, повлекшие за собой возникновение грубых ошибок. В настоящем исследовании мы подвергали испытуемых частичной депривации сна (50%), чтобы у всех участников эксперимента вызвать критическое снижение уровня бодрствования.

## МЕТОДИКА

В эксперименте участвовали 19 человек обоего пола в возрасте от 21 до 30 лет. Эксперименты проводили во второй половине дня (от 13:00 до 18:00). Все испытуемые имели опыт пользования компьютером не менее 3 лет и уверенно владели компьютерной “мышью”. Участники эксперимента были практически здоровы, не имели жалоб на проблемы со сном, все они перед экспериментом имели частичную депривацию сна, составляющую 50% длительности их обычного ночного сна. Испытуемые были ознакомлены с процедурой эксперимента и подписывали письменное согласие на участие в нем. Перед экспериментом проводили тестирование уровня сонливости по Шкале оценки сонливости Эпворта — Epworth Sleepiness Scale [Johns, 1991].

Состояние монотонии моделировалось с помощью методики, разработанной в нашей лаборатории [Дорохов и др., 2011]. От испытуемого требовалось в течение 1 ч с помощью курсора “мышь” компьютера сопровождать цель, которая медленно и равномерно двигалась по экрану по круговой орбите. Как было показано ранее [Дорохов и др., 2011], подобная длительная и однообразная деятельность вызывала состояние монотонии и снижение уровня бодрствования.

Круговая орбита, по которой перемещалась цель, имела радиус 60 мм, сама цель — небольшое круглое пятно диаметром 14 мм двигалась с небольшой скоростью 17 град/с. За 20.5 с цель описывала по экрану полный круг. Испытуемый должен был следить за целью и сопровождать ее курсором “мышь”, удерживая курсор внутри круга-цели.

Изменения реактивности испытуемого при развитии состояния монотонии тестировались неожиданным появлением дополнительной движущейся цели. Для этого у основной цели внезапно появлялся сателлит — кружок диаметром 14 мм, который двигался вокруг нее с постоянной скоростью 25 град/с по орбите с радиусом 70 мм (интервал между появлениями сателлита был случайной вели-

чиной и колебался от 20 до 50 с). При появлении сателлита требовалось как можно скорее перевести курсор на него, и когда курсор оказывался внутри сателлита, нажать на клавишу “мышь”. При правильном нажатии сателлит менял цвет на светло-голубой и через 0.5 с исчезал. Если испытуемый промахивался или забывал “выключить” сателлит, тот сам пропал через 3 с. После выключения дополнительной цели испытуемый должен был вернуть курсор мыши к основной цели.

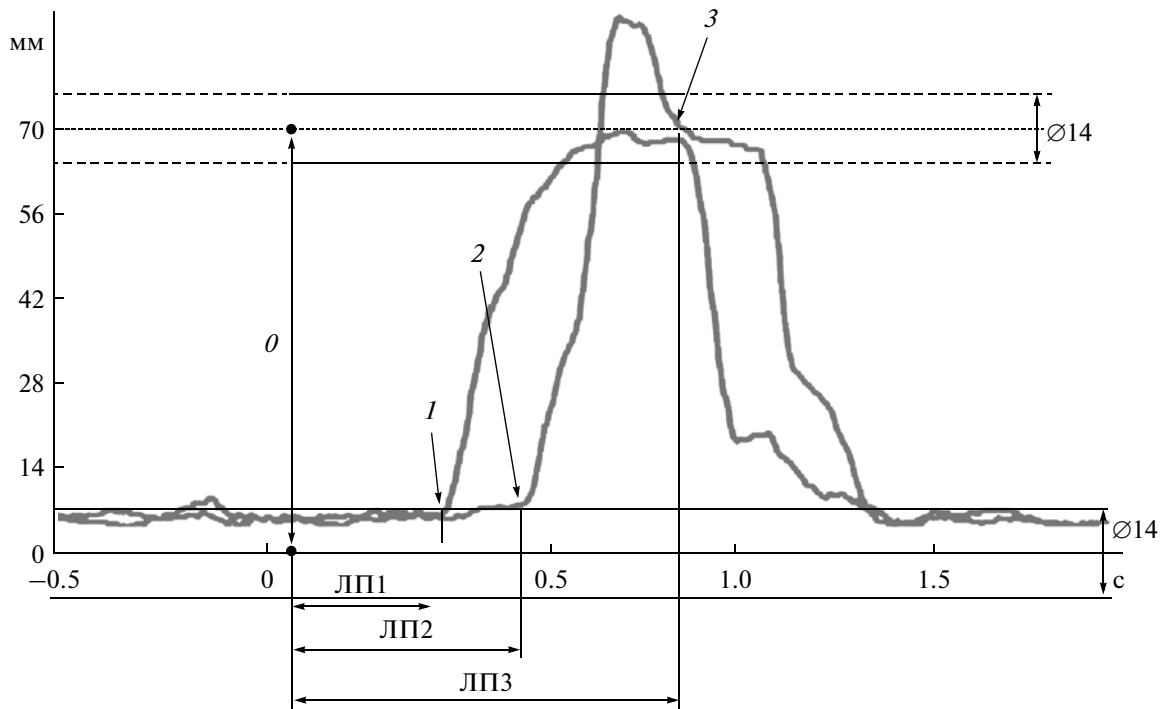
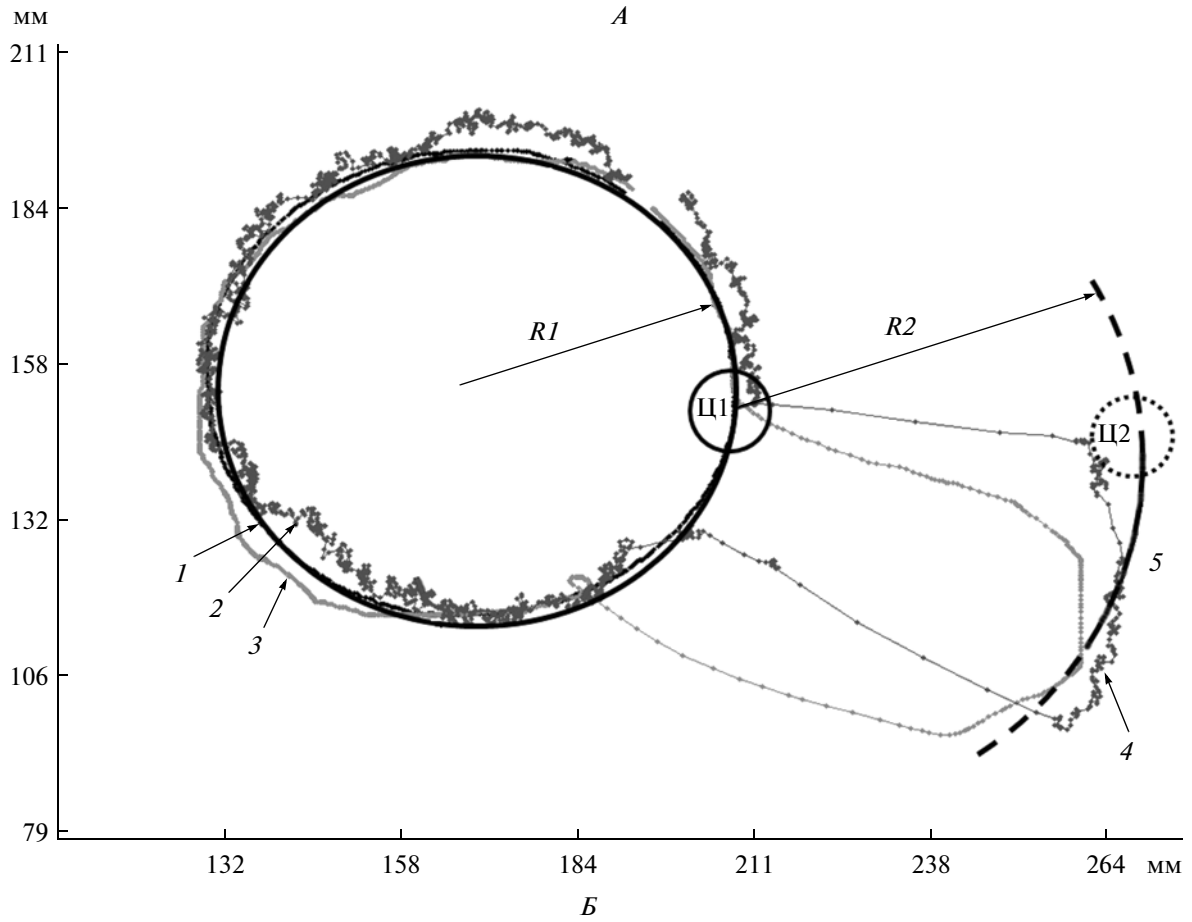
Эксперименту предшествовала тренировка: в течение 7 мин испытуемый учился безошибочно выполнять задание. Продолжительность эксперимента составляла 60 мин, чему соответствовали около 180 повторных проходов цели на круговой траектории. Ошибкой считался выход курсора за пределы цели, когда расстояние между координатами курсора “мышь” и координатами центра цели становилось больше радиуса цели, а также ложные нажатия и пропуски стимула при появлении сателлита.

Во время эксперимента испытуемый располагался в кресле со специальной подставкой для головы, снижающей ее возможные движения, в магнитоэкранированной и звукоизолированной камере с небольшой световой подсветкой (18 лк). На расстоянии 54–70 см от глаз испытуемого находился монитор, на котором предьявлялась движущаяся цель. Кисть рабочей руки испытуемого находилась на подставке ниже монитора и манипулировала беспроводной компьютерной “мышью”.

Для оценки точности выполнения задания и скорости реакций испытуемого в течение всего опыта регистрировались изменения расстояний между координатами курсора “мышь” и координатами центра основной и дополнительных целей (рис. 1, А).

На протяжении всего эксперимента регистрировались также движения глаз (рис. 1, А). Во время сопровождения основной цели, которая двигалась равномерно с небольшой скоростью, отмечались преимущественно медленные прослеживающие движения глаз. В ответ на неожиданное появление дополнительного стимула возникали быстрые саккадические движения глаз, сопровождающие перевод взора. Измерялись латентные периоды саккад, вызванных появлением сателлита.

Анализировали латентные периоды саккад, движения курсора “мышь” и нажатия клавиши “мышь” от момента появления са-



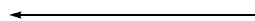
теллита (рис. 1, Б). Из рис. 1, Б видно, что через некоторое время после появления дополнительной цели начиналось движение взгляда, а затем и курсора “мыши” по направлению к новому стимулу. Далее следовало нажатие на клавишу “мыши” и возврат взгляда и курсора “мыши” к основной цели. За латентный период начала саккады было принято время между подачей стимула и выходом взгляда за пределы основной цели при движении по направлению к сателлиту. Латентным периодом начала движения курсора “мыши” считалось время между моментом подачи стимула и выходом курсора “мыши” за пределы основной цели при движении по направлению к сателлиту. Латентным периодом нажатия на клавишу “мыши” считалось время между подачей стимула и нажатием на клавишу “мыши” в момент, когда курсор “мыши” находится внутри сателлита.

Оценивали также вариабельность отклонений взгляда и курсора “мыши” от центра основной цели. Для этого на временных интервалах за 5 с до каждого появления дополнительного стимула рассчитывали среднеквадратическое отклонение для расстояний между центром

цели и точкой фиксации взгляда. Аналогично рассчитывали среднеквадратическое отклонение для расстояний между центром цели и точкой нахождения курсора.

Движения глаз регистрировались системой видеотрекинга для бесконтактной видеорегистрации движения глаз (Eyegaze Development System, “LC Technologies”, USA), основанной на отражении инфракрасного света от роговицы глаза и позволяющей определять координаты направления взгляда с временным разрешением 120 Гц. Траектория движения курсора “мыши” оцифровывалась также с разрешением 120 Гц.

Для оценки уровня бодрствования регистрировались: электроэнцефалограмма (ЭЭГ) в отведениях *C3* и *C4*, электроокулограмма (ЭОГ) и синхронное видеоизображение испытуемого видеокamerой с разрешением 20–25 кадров в 1 с. Для записи этих показателей использовали многоканальный компьютерный полиграф “ПолиСон” производства фирмы НЕЙРОКОМ (Россия). ЭЭГ и ЭОГ регистрировались монополярно, в качестве референтного электрода использовали усредненный потенциал от двух электродов,



**Рис. 1.** Траектории перемещений взгляда и курсора “мыши” при прослеживании основной цели и при появлении дополнительной цели. *А:* по осям абсцисс и ординат – расстояние, мм. Ц1 – основная цель; Ц2 – дополнительная цель; 1 – траектория движения основной цели; 2 – траектория движения взгляда; 3 – траектория движения курсора “мыши”; 4 – траектория движения дополнительной цели; 5 – стрелкой указан момент нажатия на клавишу “мыши”. Сплошная линия – видимая часть траектории дополнительной цели с момента ее включения, пунктирная – невидимая часть траектории до ее появления и после исчезновения. *Б:* по оси ординат – расстояние (мм) между центром основной цели и координатами взгляда (1) и курсора “мыши” (2); 3 – момент нажатия на кнопку “мыши”. Отметка “0” на оси ординат – центр траектории основной цели, отметка “70” на оси ординат – центр траектории дополнительной цели. Ø 14 мм – горизонтальные линии отмечают границы диаметров основной и дополнительной целей, сплошная линия – видимая часть траектории с момента включения дополнительной цели, пунктирная – невидимая часть траектории до ее появления и после исчезновения. *R1* – радиус окружности, по которой движется основная цель, *R2* – радиус окружности, по которой движется дополнительная цель. По оси абсцисс – время, с; вертикальная стрелка – момент появления дополнительной цели. ЛП1 – латентный период начала движения взгляда, ЛП2 – латентный период начала движения “мыши”, ЛП3 – латентный период нажатия клавишей “мыши” по дополнительной цели.

**Fig. 1.** Trajectories of gaze and “mouse” cursor during tracking main target and during appearance additional target. *A:* ordinate and abscissa – monitor screen coordinates measured from down left angle (mm). Ц1 – the main target, Ц2 – additional target, 1 – circular trajectory of the main target movement, 2 – trajectory of gaze (saccadic movement), 3 – trajectory of “mouse” cursor. 4 – circular trajectory of the additional target rotating around the main target, 5 (arrow) – the moment of button pressing when the mouse cursor contacts with the additional target. Continuous line – visible part of trajectory from the moment of additional target appearance, dotted line – invisible part of the trajectory. *B:* on ordinate – distance on the monitor (mm) between the center of a main target and coordinates of gaze (1) and the “mouse” cursor (2); 3 – the moment of “mouse” button pressing when cursor contacts with the additional target. Lower Line “0” – center main target trajectory. Upper Line “70” – center additional target trajectory. Ø 14 мм – two thin horizontal lines – mark diameters of the main and additional targets. Continuous line – visible part of additional target trajectory, dashed line – invisible part. On abscissa – time, s. ЛП1 – saccade latency, ЛП2 – “mouse” cursor latency, ЛП3 – “mouse” button pressure latency.

установленных на мастоидных костях черепа. Временное разрешение регистрации сигналов ЭЭГ и ЭОГ составляло 200 Гц.

По окончании эксперимента, после удаления артефактных участков записи, ЭЭГ, ЭОГ и видеозапись поведения испытуемого анализировали три независимых эксперта с целью выявления изменений уровня бодрствования. Стадии сна определяли по атласу А. Рехтшаффена и А. Кале [Rechtschaffen, Kales, 1968]. Эксперты анализировали только ЭЭГ, ЭОГ и видеоизображение, данные, касающиеся точности и скорости выполнения задания, экспертам не показывали. Синхронная запись ЭЭГ, ЭОГ и видео была разбита на эпохи по 10 с, каждая эпоха была отнесена к тому или иному функциональному состоянию. В итоге вся запись эксперимента была разделена на три типа состояний: 1) состояние спокойного бодрствования — отсутствовали ЭЭГ- и поведенческие признаки засыпания; 2) состояние со сниженным уровнем бодрствования — на ЭЭГ присутствовали признаки снижения уровня бодрствования или дремоты, наблюдались изменения поведения, указывающие на снижение уровня бодрствования; 3) состояние микросна — на ЭЭГ отмечались паттерны, характерные для 1-й или даже 2-й стадии сна, испытуемый переставал реагировать на происходящее на экране.

Графическое представление и визуальный анализ траекторий взгляда, курсора “мыши” и нажатия клавиши “мыши” проводились с помощью программ Matlab 7.12 и Excel 2010. Для статистического анализа изучаемых показателей и для оценки значимости их изменений в различных состояниях использовался пакет программ Statistica 8.0. Данные преобразовывали для приведения распределения к нормальному виду и сравнивали с помощью t-критерия Стьюдента для зависимых выборок.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Тестирование по Шкале оценки сонливости Эпворта показало, что уровень сонливости испытуемых в начале эксперимента составлял  $12.31 \pm 1.26$  балла, что соответствовало умеренной дневной сонливости.

В соответствии с экспертными оценками ЭЭГ и видеоизображений испытуемых весь опыт делился на три состояния: 1) состояние спокойного бодрствования; 2) состояние со

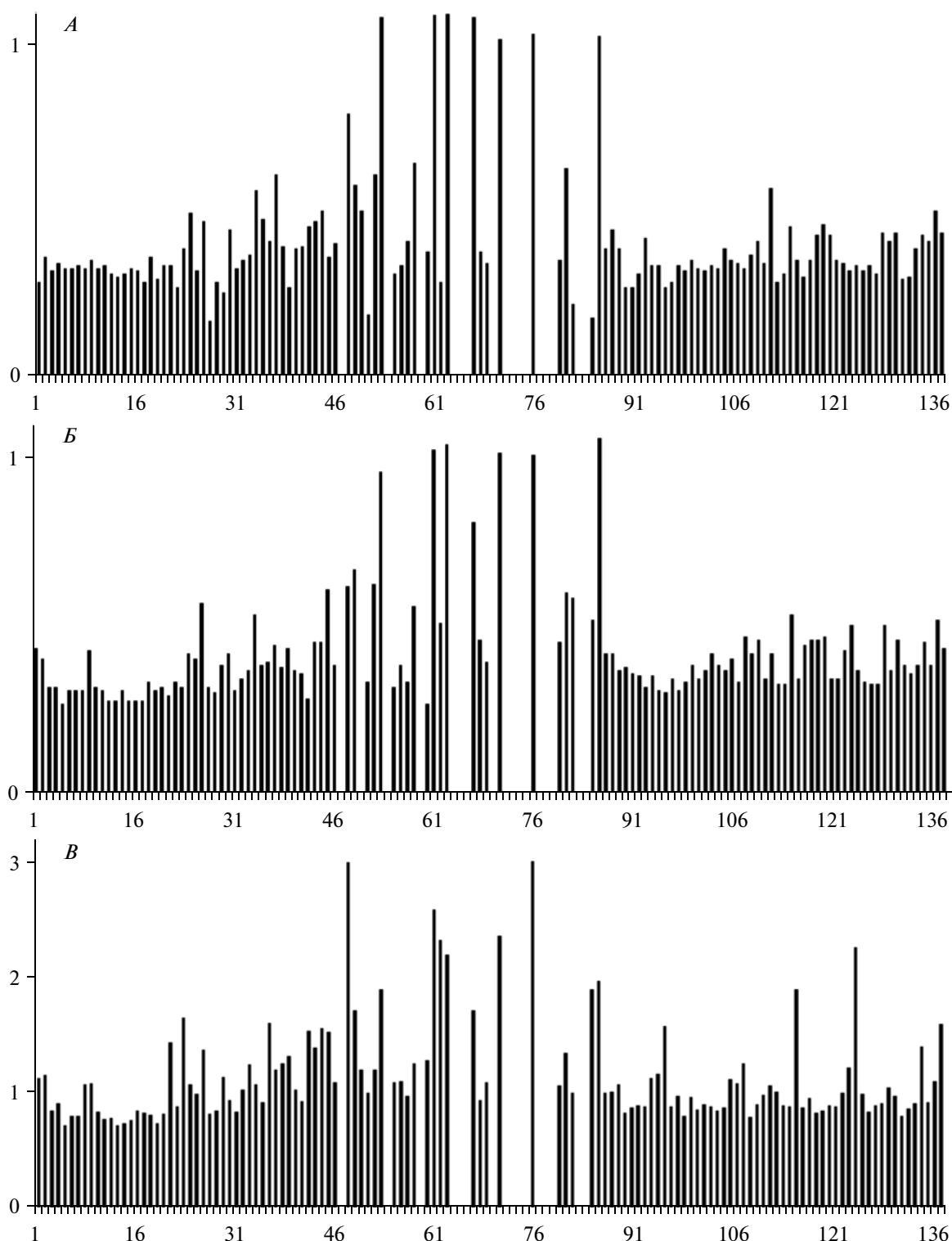
сниженным уровнем бодрствования; 3) состояние микросна.

*Состояние спокойного бодрствования* (Бодрст.) по ЭЭГ характеризовалось хорошо выраженным бета-ритмом, периодическим появлением альфа-ритма невысокой амплитуды и одиночных тета- и дельта-волн. На ЭОГ регистрировались моргания.

В состоянии со сниженным уровнем бодрствования (ССУБ) на ЭЭГ наблюдался либо хорошо выраженный альфа-ритм, либо его угнетение на фоне низкоамплитудных тета- и дельта-волн; бета-ритм был слабо выражен. На ЭОГ отмечались изменения характера морганий: у некоторых испытуемых они становились более частыми, у других — более редкими и продолжительными. На видеоизображении была заметна расфокусировка взгляда. Изменялись положение головы, мимика лица. Нарушалось выполнение задания: увеличивалось время реакции, иногда возникали отдельные ошибки.

Во время микросна (МС) на ЭЭГ появлялись выраженные тета- и/или дельта-ритмы, иногда регистрировались сонные веретена. Часто наблюдались закрывание глаз или закатывание глазного яблока. В случае открытых глаз у испытуемого наблюдался расфокусированный взор и отсутствие прослеживающих и саккадических движений. Как правило, значительно изменялось положение головы (клонилась на плечо или падала на грудь). Рука останавливалась или двигалась по случайной траектории. Во время микросна выполнение задания прекращалось, но обычно испытуемый сам просыпался и возобновлял работу. В трех случаях испытуемые засыпали по-настоящему, и через 10 мин их будил экспериментатор. У разных испытуемых в течение 60-минутного эксперимента наблюдалось от 5 до 18 эпизодов микросна.

Всего у 19 испытуемых было зарегистрировано 220 эпизодов, когда отмечалось состояние со сниженным уровнем бодрствования. В 71 случае из этих 220 после состояния со сниженным уровнем бодрствования следовал микросон, но чаще из состояния со сниженным уровнем бодрствования испытуемый сам возвращался в состояние спокойного бодрствования. И наконец, было отмечено 3 эпизода внезапного наступления микросна (2 раза у одного испытуемого и один раз у второго).



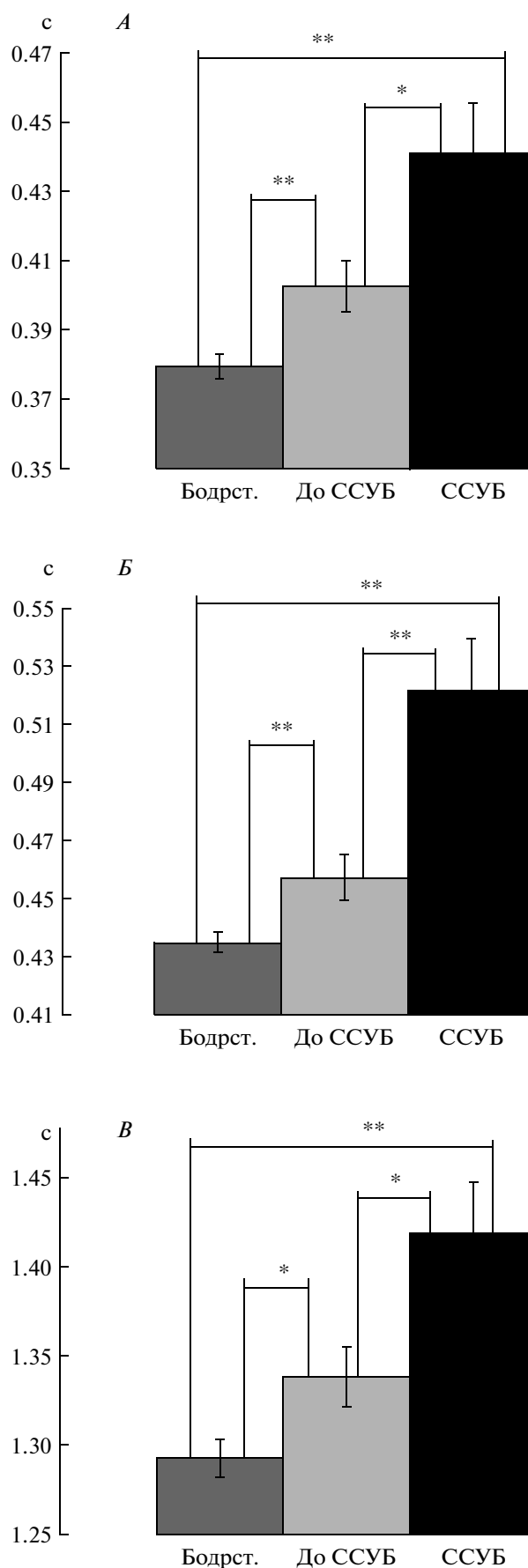
**Рис. 2.** Латентные периоды реакций одного испытуемого на протяжении всего эксперимента. По оси абсцисс – порядковый номер каждого появления дополнительной цели, по оси ординат – латентный период реакций, с. Вертикальные столбики – отдельные реакции на дополнительную цель. Участки с отсутствием вертикальных столбиков – эпизоды микросна. *A* – латентные периоды саккад, *B* – перемещения курсора “мыши” и *B* – нажатия на клавишу “мыши”.

**Fig. 2.** The latent period for the experiment of a single subject. On the horizontal axis - the number of implementation from beginning of the experiment. The vertical axis – latency responses in seconds. Areas without vertical bars – microslepp episodes. *A* – saccade latency (ЛП1), *B* – the latent periods of “mouse” cursor (ЛП2), *B* – the latent periods “mouse” pressure button (ЛП3).

Была рассчитана средняя продолжительность всех трех функциональных состояний. Средняя длительность состояния бодрствования составляла 127 с, максимальная длительность – 2460 с, минимальная – 10 с (или одна эпоха анализа). Невысокая средняя длительность состояния бодрствования обусловлена большим количеством коротких эпизодов бодрствования, вклинивавшихся между состояниями со сниженным уровнем бодрствования и эпизодами микросна (рис. 2). Средняя длительность состояния со сниженным уровнем бодрствования составляла 38 с, максимальная – 350 с, а минимальная – 10 с. Средняя длительность состояния микросна составляла 31 с, максимальная 430 с, а минимальная 10 с.

В среднем уже через 20–30 мин монотонный однообразный характер деятельности вызывал развитие состояния со сниженным уровнем бодрствования. На рис. 2 приведен типичный эксперимент. Можно видеть, что с 46-го по 87-е предъявление дополнительного стимула случались моменты, когда испытуемый реагировал на стимул с большим опозданием (сниженный уровень бодрствования) либо не реагировал вовсе (микросон). Видно также, что после 85-го стимула эпизодов с засыпанием не наблюдалось.

Были проанализированы изменения скорости реакции на дополнительный стимул: латентные периоды перемещений взора, кур-



**Рис. 3.** Латентные периоды реакций испытуемых в состояниях с разным уровнем бодрствования: *A* – латентные периоды взора, *Б* – курсора “мыши” и *В* – нажатия клавиши “мыши”. По оси ординат – значения латентных периодов, с; по оси абсцисс: Бодрст. – средние значения показателей для состояния бодрствования, До ССУБ – состояние за четыре реализации до развития состояния со сниженным уровнем бодрствования, ССУБ – состояние со сниженным уровнем бодрствования. \* – различия достоверны при  $p < 0.05$ , \*\* – при  $p < 0.01$  (по t-критерию Стьюдента).  
**Fig. 3.** The latent periods of subjects reactions during states with various level of wakefulness. *A* – saccade latency, *B* – the latent periods of mouse cursor, *B* – the latent periods mouse pressure button. Ordinate: columns – value of latent periods, s. Abscissa: Бодрст. – average values for awake, До ССУБ – 4 implementation before the state with reduced level of consciousness, ССУБ – state with reduced level of consciousness. \* –  $p < 0.05$ , \*\* –  $p < 0.01$  (Student’s t-test).



**Таблица 1.** Латентные периоды реакций испытуемых в состояниях с разным уровнем бодрствования  
**Table 1.** The latent periods of subjects reactions during states with various level of wakefulness

Показатель	ЛП начала движения взора, с			ЛП начала движения курсора, с			ЛП нажатия на кнопку “мышь”, с		
	Бодрст.	до ССУБ	ССУБ	Бодрст.	до ССУБ	ССУБ	Бодрст.	до ССУБ	ССУБ
ЛП	0.379 ± ± 0.004	0.403 ± ± 0.008	0.441 ± ± 0.014	0.435 ± ± 0.003	0.466 ± ± 0.007	0.521 ± ± 0.018	1.293 ± ± 0.010	1.338 ± ± 0.017	1.419 ± ± 0.028
<i>p</i>	0.003		–	0.001		–	0.014		–
	–	0.013		–	0.002		–	0.012	
	0.001	–	0.001	0.002	–	0.002	0.001	–	0.001
<i>N</i>	1400	572	322	1400	572	322	1400	572	322

*Примечание.* Для каждого состояния приведены средние значения показателя и ошибка среднего ( $M \pm S.E.$ ). Бодрст. – состояние бодрствования, до ССУБ – состояние за четыре реализации до развития состояния со сниженным уровнем бодрствования, ССУБ – состояние со сниженным уровнем бодрствования. *p* – уровень значимости различий между состояниями, серым цветом выделены уровни значимости  $<0.05$ . *N* – количество реализаций.

сора и нажатий на клавишу “мышь” в разных функциональных состояниях. Сначала мы сравнили латентные периоды реакций в состоянии сниженного уровня бодрствования, за которым не следовал микросон, и в состоянии сниженного уровня бодрствования с последующим развитием микросна. Перед микросном отмечались несколько более замедленные реакции, однако различия между этими двумя состояниями сниженного бодрствования оказались недостоверными ( $p = 0.47$ ,  $p = 0.48$  и  $p = 0.33$  – для взора, курсора “мышь” и нажатия на клавишу “мышь” соответственно). Отсутствие достоверных различий позволило нам при дальнейшем анализе данных объединить эти два состояния.

Из рис. 2 видно, что некоторое замедление реакций у испытуемого можно заметить за 2–3 мин до того момента, когда эксперт способен определить состояние со сниженным уровнем бодрствования. Поэтому мы сравнили латентные периоды начала движения взора, движения курсора “мышь” и нажатия на кнопку “мышь” при бодрствовании, во время состояния со сниженным уровнем бодрствования, а также в ответ на последние 4 стимула (т.е. примерно за 2 мин) перед развитием состояния со сниженным уровнем бодрствования (рис. 3). Выявлен достоверный рост латентных периодов перед снижением уровня бодрствования и дальнейшее их возрастание во время состояния со сниженным уровнем бодрствования (средние значе-

ния параметров и значения уровня значимости *p* приведены в табл. 1). Оказалось, что реакции испытуемых в течение последних 2 мин перед развитием состояния со сниженным уровнем бодрствования уже достоверно замедлены, хотя визуальный анализ ЭЭГ и поведения в этот период времени еще не позволяет распознать снижение уровня бодрствования. Всего были проанализированы 2294 реакции на предъявление стимула. Из них 1400 были в состоянии бодрствования, 572 в состоянии за четыре реализации до развития состояния со сниженным уровнем бодрствования, 322 во время развития состояния со сниженным уровнем бодрствования.

Далее мы анализировали, как отражается снижение уровня бодрствования на точности отслеживающих движений взора и руки при сопровождении цели. Корреляционный анализ выявил положительную связь ( $r = 0.75$  при  $p < 0.05$ ) между среднеквадратическим отклонением расстояний от центра цели до точки фиксации взора и латентным периодом нажатия на кнопку “мышь” в ответ на появление дополнительного стимула. Иначе говоря, это может указывать на то, что замедление реакции на неожиданный стимул предваряется менее точным сопровождением основной цели.

Сравнение среднеквадратических отклонений для взора и курсора “мышь” при бодрствовании и во время эпизодов со снижен-

**Таблица 2.** Среднеквадратичные отклонения расстояний взора и курсора “мыши” до центра прослеживаемой цели в состояниях с разным уровнем бодрствования**Table 2.** The standard deviation of distance between target and gaze or cursor during states with various level of wakefulness

Показатель	Среднеквадратичное отклонение расстояний взора, мм		Среднеквадратичное отклонение расстояний “мыши”, мм	
	Бодрст.	ССУБ	Бодрст.	ССУБ
$\sigma$	$3.07 \pm 0.019$	$3.29 \pm 0.049$	$2.21 \pm 0.011$	$2.34 \pm 0.028$
$p$	0.013		0.010	
$N$	1972	322	1972	322

*Примечание.* Для каждого состояния приведены средние значения среднеквадратического отклонения  $\sigma$  и ошибка среднего ( $M \pm S.E.$ ). Остальные обозначения как в табл. 1.

ным уровнем бодрствования (рис. 4) показало их высокую чувствительность к состоянию монотонии: снижение уровня бодрствования вызывает достоверное увеличение вариабельности отклонений взора и курсора “мыши” от центра основной цели (средние значения показателей и уровень значимости  $p$  приведены в табл. 2).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

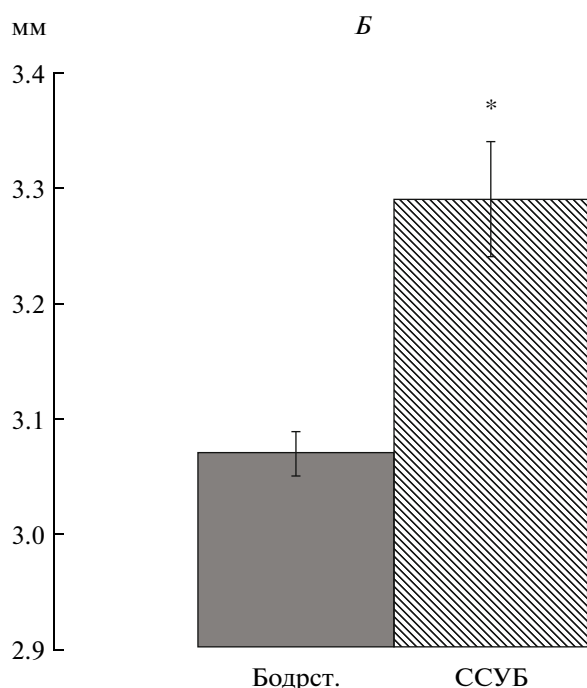
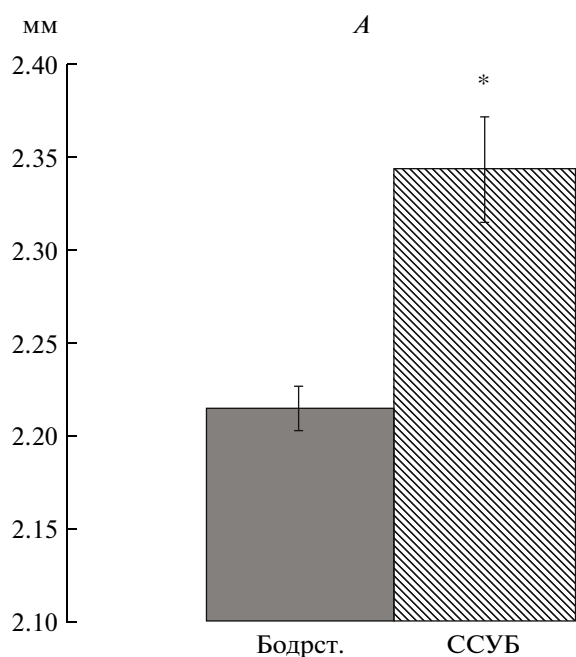
Монотонный характер деятельности в нашем эксперименте уже через 20–30 мин вызывал развитие состояния со сниженным уровнем бодрствования и выраженные изменения в скорости и точности реакций на стимулы вплоть до полного прекращения работы во время эпизодов микросна. При этом у испытуемых на ЭЭГ наблюдались паттерны, характерные для 1-й стадии сна (“дремотные паттерны ЭЭГ”) и даже для 2-й стадии сна. Отмечались также характерные нарушения поведения, в частности на начальной стадии снижения уровня бодрствования изменялся характер морганий, что считается одним из ранних признаков нарастания усталости и сонливости [Papadelis et al., 2007; Wright et al., 2008].

Анализируемыми нами параметрами являлись латентные периоды реакций взора, курсора “мыши” и нажатия на клавишу при появлении неожиданного стимула — эти показатели характеризовали скорость реакции испытуемого, а также среднеквадратичные отклонения расстояний взора и курсора “мыши” от центра прослеживаемой цели — они отражали точность выполнения задания. В моменты, которые по ЭЭГ и по изменениям поведения классифицировались экспертами

как состояния со сниженным уровнем бодрствования, наблюдался достоверный рост латентных периодов саккад, начала движения курсора и нажатия на клавишу “мыши”. Снижалась также точность прослеживания цели — увеличивалась вариабельность отклонений взора и курсора от центра цели.

Корреляционный анализ исследуемых параметров выявил положительную связь между латентным периодом нажатия кнопки “мыши” в ответ на появление нового стимула и среднеквадратическим отклонением расстояний взора от центра цели за 5 с до стимула. Другими словами, замедление реакции по мере снижения уровня бодрствования происходит на фоне роста амплитуды колебаний взора при прослеживании цели. В экспериментах с депривацией сна было показано, что нарастание потребности во сне сопровождается увеличением времени реакции и ростом нестабильности поведенческих реакций [Doran et al., 2001; Zhou et al., 2011]. При этом не происходит плавного изменения латентности реакции по мере увеличения длительности бодрствования, а она может моментально увеличиваться в 2–3 раза и вслед затем быстро вернуться к исходным значениям [Boyle et al., 2008; Saper et al., 2010].

В наших экспериментах у испытуемых на фоне состояния со сниженным уровнем бодрствования возникали эпизоды микросна. Сравнение реакций, предшествовавших этим эпизодам, с другими реакциями в состоянии со сниженным уровнем бодрствования не выявило достоверных различий между ними. Можно заключить, что на фоне повышенной сонливости микросон может наступить внезапно. В работе В.В. Дементенко с



соавторами [Дементенко и др., 2008] было показано, что зависимость между величиной снижения уровня бодрствования и количеством ошибок в деятельности носит вероятностный характер, что противоречит интуитивным представлениям о постепенном характере перехода ко сну. Полагают, что высокая потребность во сне может вызывать экстренное кратковременное включение ме-

Рис. 4. Среднеквадратичные отклонения расстояний взора и курсора “мыши” до центра прослеживаемой цели при бодрствовании и в состоянии со сниженным уровнем бодрствования: А – курсора “мыши”; В – взора. По оси ординат – значения среднеквадратичного отклонения, мм; по оси абсцисс: Бодрст. – средние значения показателей для состояния бодрствования, ССУБ – средние значения показателей для периодов со сниженным уровнем бодрствования. \* – различия достоверны при  $p < 0.05$  (по t-критерию Стьюдента).

Fig. 4. The standard deviation of distance between target and gaze or cursor during wakefulness and during state with lower level of wakefulness. A – standard deviation of the mouse cursor distance. B – standard deviation of gaze distance. The vertical axis – the value of the standard deviation, mm; abscissa: Бодрст. – average values for the state of wakefulness, ССУБ – average values for periods with reduced levels of wakefulness. \* –  $p < 0.05$  (Student's t-test).

ханизмов сна, что проявляется в виде внезапных провалов в деятельности [Boyle et al., 2008; Saper et al., 2010].

Анализ латентных периодов реакций на 4 последних стимула (т.е. за 2–3 мин) перед моментом, когда эксперт замечал снижение уровня бодрствования, показал, что эти реакции уже были достоверно замедлены, хотя экспертный анализ ЭЭГ и поведения в этот период времени еще не позволяет распознать усиление сонливости. Таким образом, латентные периоды реакций позволяют предсказать развитие состояния со сниженным уровнем бодрствования еще до того, как оно отразится на деятельности человека.

Таким образом, анализ временных характеристик движений взора и руки показал их высокую чувствительность к снижению уровня бодрствования. По изменению латентных периодов реакций руки и взора можно предсказать развитие состояния со сниженным уровнем бодрствования до того момента, когда появятся изменения в поведении человека, в том числе и до того, как изменится характер морганий. Вариабельность отклонений взора и курсора от центра цели также оказалась показателем, достаточно чувствительным к ухудшению функционального состояния.

Таким образом, можно заключить, что созданная в нашей лаборатории методика позволяет адекватно моделировать состояния

монотонии. Мы полагаем, что на основе представленной модели возможна разработка прогностических критериев, позволяющих предвидеть развитие состояний со сниженным уровнем бодрствования и принимать необходимые меры еще до того, как существенно снизится точность и безопасность деятельности. Этот тест может также использоваться в качестве метода объективной оценки уровня сонливости.

## ВЫВОДЫ

1. В моменты, которые по ЭЭГ и по изменениям поведения классифицировались экспертами как состояния со сниженным уровнем бодрствования, наблюдался достоверный рост латентных периодов саккад, начала движения курсора “мыши” и нажатия на клавишу “мыши” в ответ на неожиданное появление стимула.

2. Показано достоверное увеличение латентных периодов саккад, начала движения курсора и нажатия на клавишу “мыши” за 2–3 мин до того момента, когда эксперт замечал снижение уровня бодрствования.

3. Снижение уровня бодрствования вызывает достоверное увеличение вариабельности отклонений взора и курсора от центра цели при ее прослеживании.

Работа выполнена при поддержке Российского гуманитарного научного фонда (проекты № 12-36-01293a2 и 13-36-01041a1).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Величковский Б.М.* Успехи когнитивных наук: технологии, внимательные к вниманию человека. В мире науки. 2003 (12): 87–93.
- Дементюенко В.В., Дорохов В.Б.* Оценка эффективности систем контроля уровня бодрствования человека-оператора с учетом вероятностной природы возникновения ошибок при засыпании. Журн. высш. нерв. деят. 2013. 63(1): 24–32.
- Дементюенко В.В., Дорохов В.Б., Герус С.В., Коренева Л.Г., Марков А.Г., Шахнарович В.М.* Биоматематическая модель засыпания человека-оператора. Физиология человека. 2008. 34(5): 63–72.
- Дементюенко В.В., Дорохов В.Б., Герус С.В., Марков А.Г., Шахнарович В.М.* Эффективность систем мониторинга водителя. Журн. техн. физики. 2006. 77(6): 103–108.
- Дорохов В.Б.* Анализ психофизиологических механизмов нарушения деятельности при дремотных изменениях сознания. Вестн. РГНФ. 2003. 4: 137–144. Online: [http://www.sleep.ru/download/Dorohov\\_04.pdf](http://www.sleep.ru/download/Dorohov_04.pdf).
- Дорохов В.Б.* Сомнология и безопасность профессиональной деятельности. Журн. высш. нерв. деят. 2013. 63(1): 33–47.
- Дорохов В.Б., Арсеньев Г.Н., Ткаченко О.Н., Захарченко Д.В., Лаврова Т.П., Дементюенко В.В.* Психомоторный тест для исследования зрительно-моторной координации при выполнении монотонной деятельности по прослеживанию цели. Журн. высш. нерв. деят. 2011. 61(4): 476–484.
- Колесникова О.В., Терещенко Л.В., Молчанов С.А., Латанов А.В., Шульговский В.В.* Зависимость латентных периодов саккадических движений глаз человека от сложности зрительной среды. Журн. высш. нерв. деят. 2006. 56(2): 178–186.
- Шульговский В.В., Славуцкая М.В., Мусеева В.В.* Внимание и движения глаз. Психофизиологические представления, нейрофизиологические модели и ЭЭГ-корреляты. Журн. высш. нерв. деят. 2008. 58 (2): 131–150.
- Abbott R.D., Ross G.W., White L.R., Tanner C.M., Masaki K.H., Nelson J.S., Curb J.D., Petrovitch H.* Excessive daytime sleepiness and subsequent development of Parkinson disease. Neurology. 2005. 65(9): 1442–1446.
- Balkin T.J., Horrey W.J., Graeber R.C., Czeisler C.A., Dinges D.F.* The challenges and opportunities of technological approaches to fatigue management. Accid. Anal. Prev. 2011. 43: 565–572.
- Boyle L.N., Tippin J., Paul A., Rizzo M.* Driver performance in the moments surrounding a microsleep. Transp. Res. Part F. Traffic Psychol. Behav. 2008. 11(2): 126–136.
- Carskadon M.A., Dement W.C.* Daytime sleepiness: Quantification of a behavioral state. Neurosci. Biobehav. Rev. 1987. 11: 307–317.
- De Xivry J.J.O., Bennett S.J., Lefevre P., Barnes G.R.* Evidence for synergy between saccades and smooth pursuit during transient target disappearance. J. Neurophysiol. 2006. 95: 418–427.
- De Xivry J.J.O., Lefevre P.* Saccades and pursuit: two outcomes of a single sensorimotor process. J. Physiol. 2007. 584(1): 11–23.
- Doran S.M., Van Dongen H.P.A., Dinges D.F.* Sustained attention performance during sleep deprivation: evidence of state instability. Arch. Ital. Biol. 2001. 139: 253–267.
- Gunzelmann G., Gross J.B., Gluck K.A., Dinges D.F.* Sleep deprivation and sustained attention performance: integrating mathematical and cognitive modeling. Cogn. Sci. 2009. 33(5): 880–910.
- Iranzo A.* Sleepwake changes in the premotor stage of Parkinson’s disease. J. Neurol. Sci. 2011. 310: 283–285.
- Johns M.W.* A new method for measuring daytime sleepiness: the Epworth sleepiness scale. Sleep. 1991. 14: 540–545.
- Ondo W.G., Dat Vuong K., Khan H., Atassi F., Kwak C., Janjovic J.* Daytime sleepiness and other sleep disorders

- in Parkinson's disease. *Neurology*. 2001. 57(8):1392–1396.
- Papadelis C., Chen Z., Kourtidou-Papadeli C., Bamidis P.D., Chouvarda I., Bekiaris E., Maglaveras N.* Monitoring sleepiness with onnboard electrophysiological recordings for preventing sleepdeprived traffic accidents. *Clin. Neurophysiol.* 2007. 118(9): 1906–1922.
- Rechtschaffen A., Kales A.* A Manual of Standardized Terminology, Techniques and Scoring System for Sleep Stages of Human Subjects. Washington, D.C: U.S. Government Print. Office. 1968. 65 p.
- Saper C.B., Fuller P.M., Pedersen N.P., Lu J., Scammell T.E.* Sleep state switching. *Neuron*. 2010. 68(6): 1023–1042.
- Shpirer I., Miniovitz A., Klein C., Goldstein R., Prokhorova T., Theitler J., Pollak L., Rabey J.M.* Excessive daytime sleepiness in patients with Parkinson's disease: a polysomnography study. *Movement Disorders*. 2006. 21(9): 1432–1438.
- Whitlock A.* Driver Vigilance Devices: Systems Review. Surrey, UK: Quintec Assoc. Limited. 2002. Retrieved from <http://www.rssb.co.uk/pdf/reports/research>.
- Wright N.A., Stone B.M., Horberry T.J., Reed N.* A review of innvehicle sleepiness detection devices. Berkshire, UK: TRL Limited. 2008. Retrieved from [http://www.trl.co.uk/store/report\\_detail.asp?srid=61-71&pid=211](http://www.trl.co.uk/store/report_detail.asp?srid=61-71&pid=211)
- Zhou X., Ferguson S.A., Matthews R.W., Sargent C., Darwent D., Kennaway D.J., Roach G.D.* Dynamics of neurobehavioral performance variability under forced desynchrony: evidence of state instability. *Sleep*. 2011. 34(1): 57–63.