ЖУРНАЛ ВЫСШЕЙ НЕРВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, 2023, том 73, № 6, с. 785–799

ФИЗИОЛОГИЯ ВЫСШЕЙ НЕРВНОЙ (КОГНИТИВНОЙ) ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

УДК 612.821.6

ВОССТАНОВЛЕНИЕ МОТОРНЫХ И КОГНИТИВНЫХ ФУНКЦИЙ ПРИ ФОРСИРОВАННОМ ПРОБУЖДЕНИИ ИЗ ТРЕТЬЕЙ СТАДИИ ДНЕВНОГО СНА

© 2023 г. А. К. Соловьева[1, 4, *], Н. К. Соловьев[2], А. О. Мокроусова[3], Ю. В. Украинцева[4, **]

[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

[2]ФГБОУ высшего образования “МИРЭА – Российский технологический университет”, Москва, Россия

[3]Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск, Россия

[4]ФГБУН Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва, Россия

**e-mail: s_anna_99@gmail.com*

***e-mail: ukraintseva@yandex.ru*

Поступила в редакцию 14.07.2023 г.
После доработки 23.08.2023 г.
Принята к публикации 31.08.2023 г.

Механизмы восстановления различных форм поведения при пробуждении от сна до сих пор недостаточно изучены. В настоящей работе мы исследовали восстановление простых моторных реакций на зрительный стимул, тонкой зрительно-моторной координации, а также абстрактного мышления при пробуждении из самой глубокой, третьей стадии дневного сна. В бодрствовании до сна и в течение первых 2 мин пробуждения от сна добровольцам предлагали два типа задач: зрительно-моторные, в которых нужно было управлять движущимся объектом; и арифметические, в которых нужно было определять верность предложенных равенств. Полученные результаты показали, что скорость простой моторной реакции на появление зрительного стимула достигала уровня, характерного для бодрствования, практически сразу же после пробуждения (в течение 4 с), тогда как восстановление способности определять верность или неверность арифметических равенств, а также точного управления траекторией движущегося объекта требовало гораздо больше времени: около 40 с (в арифметической задаче) и 60 с (в зрительно-моторной задаче). Мощность альфа-ритма при пробуждении была выше, чем в бодрствовании. Дельта-мощность была повышена только в начале пробуждения, пока решение задач было затруднено, а на второй минуте пробуждения, когда оно восстанавливалось, дельта-ритм снижался. Полученные нами данные свидетельствуют о том, что простые и сложные формы поведения при пробуждении восстанавливаются неодновременно.

Ключевые слова: дневной сон, зрительно-моторная координация, абстрактное мышление, 3-я стадия сна, пробуждение, ЭЭГ, альфа-ритм, дельта-ритм

DOI: 10.31857/S0044467723060096, **EDN:** ULAEPC

ВВЕДЕНИЕ

Научная проблема, на решение которой направлена работа, – это определение очередности и скорости восстановления разных аспектов моторных и когнитивных функций при пробуждении от сна. В настоящее время эта научная проблема остается неизученной.

Сон – это естественное состояние покоя, отличающееся выраженной ареактивностью и отключением сенсорных систем от внешней среды. Во время медленного (ортодоксального) сна активность нейронов из десинхронизированной, характерной для бодрствования, становится синхронизированной – равномерно распределенной и групповой. Из-за такой смены активности условия для переработки информации в мозге резко ухудшаются. Вместе с этим по мере углубления сна растут пороги для всех внешних сенсорных сигналов и их поступление в мозг затрудняется (Ковальзон, 2012). Самая глубокая, третья стадия ортодоксального сна характеризуется распределенной по всему кортексу высоко синхронизированной и стереотипной активностью в низкочастотном дельта-диапазоне (0.5–2 Гц) (Steriade et al., 2001), наибольшим угнетением сознания, высокими порогами возбуждения и выраженной инерцией сна при пробуждении (Trotti, 2017).

Как же происходит пробуждение из этой стадии сна? На настоящий момент о феномене пробуждения известно относительно немного (Украинцева, Соловьева, 2023). По некоторым имеющимся данным (Peter-Derex et al., 2015; Latreille et al., 2020; Liaukovich et al., 2022), форсированное пробуждение из третьей стадии длится десятки секунд, в течение которых сначала на записи ЭЭГ появляются K-комлексы и сигма-веретена, после чего происходит увеличение частоты дельта-ритма, который постепенно сменяется высокочастотной активностью – альфа и бета. Единичные исследования, в которых процесс пробуждения изучался с помощью вживленных в мозг электродов у пациентов с фармакорезистентной эпилепсией (Bassetti et al., 2000; Terzaghi et al., 2009 Peter-Derex et al., 2015), обнаружили неодновременность пробуждения разных отделов мозга. В частности, было показано, что у сенсорных и моторных зон коры порог активации ниже, чем у ассоциативных (Terzaghi et al., 2009 Peter-Derex et al., 2015), более того, на раннем этапе пробуждения активация сенсорных и моторных областей сопровождается еще большей деактивацией ассоциативных – в дорсолатеральной фронтальной коре и в дорсолатеральной теменной коре регистрируется парадоксальное увеличение дельта-мощности, как будто бы эти отделы пытаются подавить распространение возбуждения и продолжить "спать" (Peter-Derex et al., 2015). Также было показано, что во время неполных пробуждений у пациентов, страдающих сомнамбулизмом, в моторной и поясной коре может регистрироваться бодрствующая активность, в то время как в лобно-теменной ассоциативной коре преобладает повышенная дельта-активность, характерная для глубокого сна (Terzaghi et al., 2009). Кроме того, недавняя работа на здоровых добровольцах с использованием метода фМРТ также продемонстрировала, что первыми в процесс пробуждения вовлекаются правая островковая доля и сенсомоторная кора, при том, что лобные и теменные области коры активируются значительно позже (Alcaide et al., 2021). Поскольку во время сна мы наиболее уязвимы, основная функция пробуждения – восстановление восприятия внешних сигналов и поведенческой реактивности, и это восстановление должно происходить быстро. Поэтому можно заключить, что очередность пробуждения разных отделов мозга неслучайна и имеет важный адаптационный смысл. По-видимому, пониженный порог пробуждения моторных отделов коры объясняется их филогенетической древностью относительно других корковых зон и является эволюционной адаптацией, способствующей выживанию в дикой природе, позволяя спастись бегством при пробуждении, вызванном внезапным появлением опасности.

Более низкий порог активации моторной коры отмечается не только при пробуждении, он также неоднократно был описан в исследованиях, посвященных неоднородности глубины сна в разных отделах мозга, в частности в исследованиях такого феномена, как локальное бодрствование (Nobili et al., 2011; De Carli et al., 2016). Такая неоднородность уровней бодрствования в коре головного мозга может быть обусловлена тем, что разные области неокортекса испытывают различное "давление сна", т.е. подвергаются различному влиянию гомеостатических факторов, обусловливающих потребность во сне. Так, лобные области коры испытывают наиболее высокое давление сна и демонстрируют выраженный ответ на его депривацию (Marzano et al., 2010). Было также показано, что даже во время реакций arousal, возникающих во время сна в ответ на внешние стимулы, у ассоциативных зон коры порог активации выше, чем у сенсорных и моторных (Peter-Derex et al., 2015; Latreille et al., 2020).

В итоге данные литературы указывают на то, что пробуждение не является однородным процессом, равномерно охватывающим весь мозг. Различие порогов активации сенсомоторных и ассоциативных отделов коры головного мозга приводит к тому, что в начале пробуждения в них сосуществуют локальные очаги бодрствования и сна. Поэтому можно предположить, что если простые поведенческие реакции могут восстанавливаться в первые секунды пробуждения, то сложные формы поведения, требующие участия ассоциативных зон, такие как ориентация в пространстве и абстрактное мышление, по-видимому, требуют полного пробуждения мозга и восстанавливаются значительно позднее. На это указывают также результаты исследования, в котором с помощью анализа вызванных потенциалов мозга у здоровых добровольцев было показано, что разные аспекты пробуждения – восстановление доминирующего альфа-ритма в ЭЭГ, или ЭЭГ-пробуждение, появление первых неосознанных реакций на внешние стимулы и, наконец, их сознательное восприятие – происходят не одновременно. Если автоматические реакции могут быть зарегистрированы уже в первые секунды перехода от сна к бодрствованию, еще до ЭЭГ-пробуждения, то способность к сознательным реакциям восстанавливается значительно позже. А именно – такие корреляты осознанного восприятия стимулов, как появление компонента Р300 в вызванных потенциалах мозга, а также способность избирательно реагировать на целевые стимулы при пробуждении, появляются на 20–25 с позже восстановления в ЭЭГ альфа-активности, характерной для бодрствования (Liaukovich et al., 2022).

Однако, несмотря на то, что неодновременность пробуждения сенсомоторных и ассоциативных областей коры была неоднократно показана (Terzaghi et al., 2009; Peter-Derex et al., 2015; Alcaide et al., 2021), особенности восстановления функций, в которых участвуют эти отделы, до сих пор не изучались. Поэтому мы решили сравнить восстановление сенсомоторных реакций, обеспечивающихся "ранопробуждающимися" сенсорными и моторными отделами мозга, с восстановлением способности к абстрактному мышлению, которое требует участия ассоциативных отделов неокортекса. Также мы решили сопоставить особенности восстановления этих форм поведения при пробуждении с восстановлением бодрствующей активности мозга в суммарной электроэнцефалограмме (ЭЭГ). К сожалению, ЭЭГ обладает малым пространственным разрешением в сравнении с внутримозговой регистрацией биоэлектрической активности (Müller-Putz, 2020), но, поскольку ЭЭГ имеет достаточно высокое временное разрешение, этот метод позволяет исследовать не только первые минуты, но и первые секунды пробуждения, и сопоставлять динамику восстановления поведенческих реакций с постепенным повышением уровня бодрствования.

В итоге мы поставили своей целью оценить возможные различия в скорости восстановления зрительно-моторной координации и абстрактного мышления в первые секунды пробуждения от сна. А также сопоставить динамику восстановления этих функций с динамикой восстановления бодрствующей активности в ЭЭГ. Поскольку дневной сон имеет те же механизмы, что и ночной (Mylonas et al., 2020), в данной работе мы ограничились изучением пробуждений из 3-й стадии дневного сна. Дневной сон, хоть он и короче ночного и состоит обычно из одного цикла, в большинстве случаев включает в себя все стадии сна, и в том числе 3-ю стадию (Mylonas et al., 2020; Simon et al., 2022; Shah et al., 2023), поэтому он вполне подходит для исследования закономерностей восстановления разных форм поведения при пробуждении из 3-й стадии сна. В качестве задачи на зрительно-моторную координацию мы выбрали управление движущимся объектом, которое требует постоянного моторного направления объекта, движущегося по экрану по случайной траектории, и приведения его к цели. Эта задача позволяет, во-первых, регистрировать простые зрительно-моторные реакции на появление объекта; во-вторых, она дает возможность оценивать динамику восстановления тонкой зрительно-моторной координации, необходимой для приведения объекта к цели по кратчайшей траектории. В качестве задачи на абстрактное мышление было выбрано решение арифметических примеров.

МЕТОДИКА

Участники

В эксперименте участвовали 30 добровольцев (средний возраст 24 ± 4 года), без неврологических нарушений и нарушений сна. Мы использовали следующие критерии исключения из эксперимента: острые или хронические заболевания, прием любых медикаментов, алкогольная или наркотическая зависимость, работа со сменным графиком, отсутствие регулярного режима сна и бодрствования, расстройства сна, перелеты со сменой часовых поясов в течение последнего месяца. Участники исследования соблюдали регулярный цикл сна-бодрствования с длительностью ночного сна около 8 ч со временем отхода ко сну 23:00–00:00 и временем подъема 07:00–08:00. За сутки перед участием в эксперименте они воздерживались от употребления алкоголя, кофе, чая, шоколада. Перед началом опыта испытуемые были осведомлены о предмете и процедуре исследования, а добровольность участия была подтверждена подписанным Информированным согласием. По завершении каждого эксперимента они получали денежное вознаграждение (750 руб.). Все протоколы в нашем исследовании были составлены в соответствии с требованиями Хельсинкской декларации и одобрены этической комиссией ИВНД и НФ РАН. Поскольку 4 добровольца не смогли достичь 3-й стадии сна (наблюдались только 1-я и 2-я стадии), они были исключены из анализа, в итоге анализировались данные только 26 добровольцев, среди которых было 7 мужчин и 19 женщин.

Процедура

После подписания информированного согласия все участники эксперимента заполняли опросник "Самочувствие, активность, настроение" (САН), оценивающий их психоэмоциональное состояние, а также проходили тесты, определяющие субъективный уровень сонливости: стэнфордскую шкалу сонливости (Stanford Sleepiness Scale/SSS) и визуально-аналоговую шкалу сонливости (Visual Analogue Sleepiness Scale/VASS).

Перед дневным сном добровольцу сообщали, что будет оцениваться скорость его пробуждения из 3-й стадии дневного сна, просили проснуться как можно быстрее и предупреждали, что, когда его разбудят, сразу нужно будет смотреть на экран, закрепленный над кроватью и решать предложенную задачу, используя для этого мышь-кольцо, закрепленную на пальце.

Добровольцам предлагали два типа задач — на зрительно-моторную координацию и на арифметический счет. Задачи демонстрировали на экране компьютерного монитора, расположенного на высоте около 1 м над ногами участника. В задаче на зрительно-моторную координацию "Кружки" испытуемый должен был управлять траекторией красного кружка, движущегося по экрану из левого нижнего угла по случайной параболе, и, поворачивая вверх и вниз колесико компьютерной мыши-кольца (закрепленной на пальце), направлять его в цель — черный кружок такого же размера в правом верхнем углу (рис. 1 слева сверху). В задаче на арифметический счет "Равенства" доброволец должен был ответить, верно ли предложенное арифметическое равенство или нет. На экране монитора ему предъявлялись правильные либо неправильные равенства и два полых квадрата сверху и снизу от примера — зеленый и красный. Выбор верности-неверности производился поворотом вверх и вниз колесика компьютерной мыши (в сторону зеленого или красного квадрата) (рис. 1 справа сверху). Каждая задача включала в себя 40 проб (40 движущихся кружков либо 40 примеров) и длилась 2 мин. В зрительно-моторной задаче каждая проба длилась 2.5 с и между пробами отсутствовали паузы. Длительность пробы в арифметической задаче составляла 3 с, и пробы были разделены между собой фиксационной точкой длительностью в 0.5 с. Однако добровольцы в нормальном состоянии решали каждое равенство быстрее отведенного времени — приблизительно за 2 с. Поэтому в среднем длительность проб (вместе с паузами) в обеих задачах была одинаковой и составляла 2.5 с. В задаче "Кружки" все параболы, по которым вылетали кружки, задавались случайным образом. Половина проб в задаче "Равенства" представляла собой сложение двух однозначных чисел, а вторая половина — сложение двузначного и однозначного чисел. Два типа сложений были распределены в задаче квазислучайно и были примерно одинаковы по сложности. Задачи предъявлялись в бодрствовании до и после сна (обе задачи), а также во время форсированного пробуждения от дневного сна — сразу же после пробуждающего сигнала (одна из задач).

Каждый доброволец участвовал в двух экспериментах: в одном при пробуждении предъявлялась задача на зрительно-моторную координацию "Кружки", в другом — задача на арифметический счет — "Равенства". Соблюдали строгий контрбаланс: половина добровольцев при первом пробуждении получала зрительно-моторную задачу, вторая половина — арифметическую. Каждый эксперимент начинался в 13:00 и заканчивался в 17:30. Начало дневного сна приходилось на промежуток времени 14:30—15:00, добровольца будили при достижении им 3-й стадии ортодоксального сна. Испытуемые спали в звукоизолированной и специально оборудованной для сна комнате при полностью выключенном освещении.

Регистрация ЭЭГ

Для записи использовали 19 каналов ЭЭГ (по международной системе 10—20), один канал электромиограммы (ЭМГ) и два канала окулограммы, использовали энцефалограф "Энцефалан-EEGR-19/26" (фирма "Медиком", Таганрог, Россия) с частотой дискретизации 250 Гц. ЭМГ регистрировали от подбо-

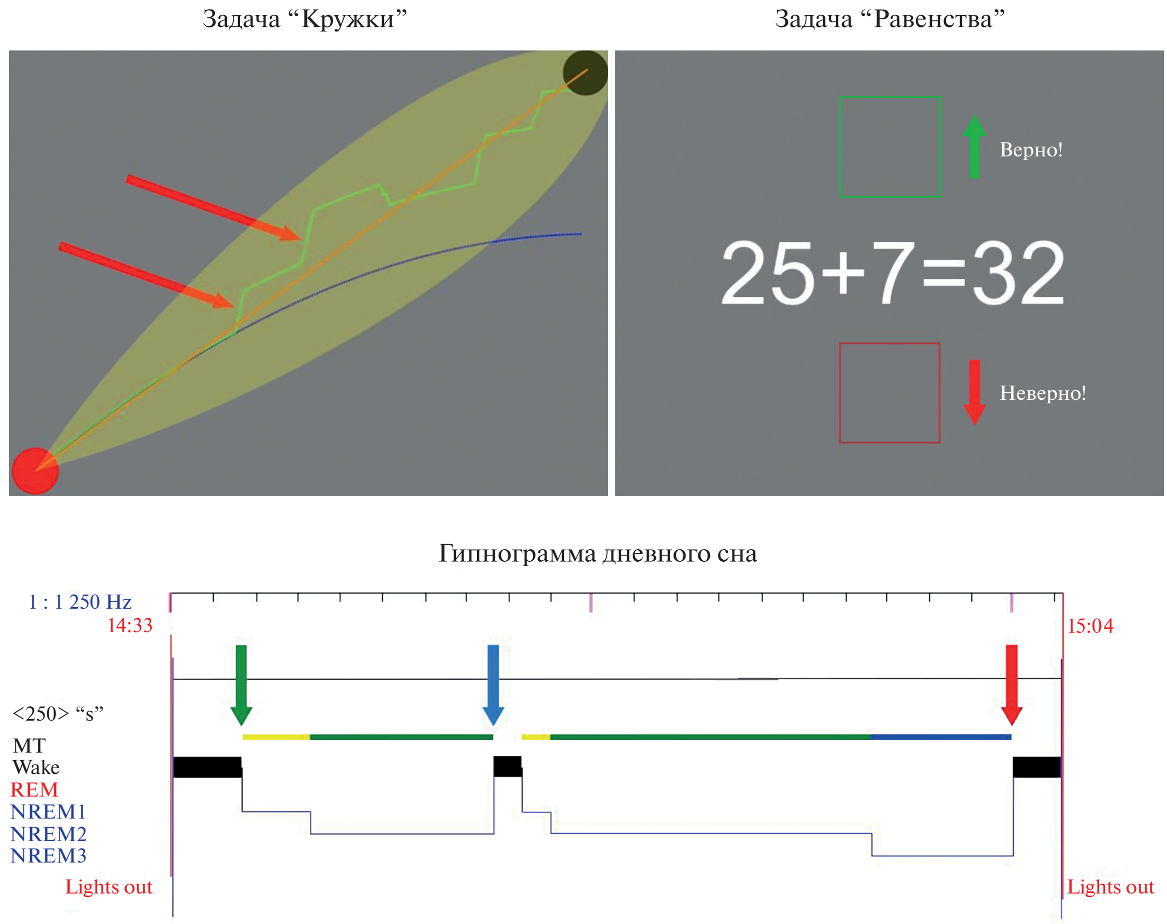

Рис. 1. Задачи “Кружки” и “Равенства” и пример типичной гипнограммы дневного сна. Синей кривой показана случайная парабола, по которой движется кружок. Зеленая линия – результирующая траектория полета кружка. Желтым полем обозначен оптимальный коридор. Наклонными красными стрелками указаны корректирующие “подкрутки”. Вертикальными красной и зеленой стрелками над равенством показано направление движения колесика компьютерной мыши-кольца при решении когнитивной задачи. На гипнограмме зеленой стрелкой показано начало засыпания; синей стрелкой – спонтанное пробуждение из 2-й стадии сна; красной стрелкой – форсированное пробуждение из 3-й стадии сна.
Fig. 1. The motor task “Circles” and the cognitive task “Equalities” and example of a typical daytime nap hypnogram. The blue arrows show the parabola along which the circle moves in motor task. The green line shows the resulting trajectory of the circle, controlling by subjects. The yellow field indicates the optimal corridor. Slanted red arrows show corrective “spins”. The red and green vertical arrows show the direction of movement of the computer mouse-ring wheel when subjects solve the cognitive task. On the hypnogram, the green arrow shows the start of falling asleep; the blue arrow shows spontaneous awakening from the 2nd stage of sleep; the red arrow shows the forced awakening from the 3rd stage of sleep.

родка. Для регистрации использовалась программа “Энцефалан”. Частота дискретизации составляла 250 Гц.

Во время дневного сна добровольцев полисомнограмму отслеживали в режиме “онлайн”. Наступление 3-й стадии определяли по индексу дельта-ритма в соответствии со стандартными критериями (Iber C et al., 2007) – когда он превышал 20% (когда в течение 30-секундной эпохи анализа наблюдалось 6 или больше секунд дельта-активности с амплитудой более 75 мВ и частотой, меньшей 2 Гц). При мониторинге полисомнограммы в основном ориентировались на центральные отведения C3, Cz, C4. Пробуждение из 3-й стадии сна производили акустическим тоном – “будильником” – частотой 440 Гц, длительностью 1.5 с и индивидуально подобранной для каждого испытуемого интенсивностью. Звук подавался через динамик, расположенный на расстоянии примерно 1 м от головы испытуемого.

Стадирование полисомнограмм

Запись ЭЭГ разбивали на 30-секундные эпохи. Каждую эпоху относили либо к бодрствованию, либо к одной из стадий ортодоксальной фазы сна (стадия 1, стадия 2, стадия 3), либо к парадоксальной фазе сна в соответствии со стандартными критериями (Iber C et al., 2007).

На основе проведенного стадирования строили гипнограммы для каждой записи дневного сна (рис. 1 снизу) и фиксировали данные о таких параметрах сна, как латентный период засыпания, а также латентный период и длительность 3-й стадии сна.

Спектральный анализ ЭЭГ

Полученные записи ЭЭГ обрабатывали в программном обеспечении Brainvision Analyzer 2.0 (Brain Products GmbH, Гильхинг, Германия). На запись накладывали следующие фильтры: notch-фильтр 50 Гц, фильтр верхних частот 0.5 Гц и фильтр нижних частот 30 Гц. Далее из записей всего сна вырезали момент форсированного пробуждения и производили очистку артефактов от ЭОГ, ЭКГ и ЭМГ с помощью анализа независимых компонент (Independent Component Analysis, ICA) и его обратной версии (inverse ICA) (Makeig et al., 1996). Из очищенных записей вырезали сегменты длительностью 5 с в самом начале пробуждения на первых пробах (на 1–5-й пробах) предъявляемой задачи (когда выполнение задачи все еще было затруднено), в конце пробуждения на 25–35-й пробах, а также в середине выполнения задачи (на 15–25-й пробах) во время бодрствования до сна. После этих преобразований проводили спектральный анализ с помощью метода быстрого преобразования Фурье и получали мощностно-частотные спектры по каждому сегменту для следующих ЭЭГ-каналов: F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz, P4, O1, O2.

Анализ выполнения задач

Для анализа правильности и скорости выполнения обоих типов задач подсчитывали количество правильно решенных проб. Количество правильно решенных проб выражали в процентах от их общего числа (от 40). Также мы подсчитывали долю добровольцев, верно справившихся с каждой пробой, от общего числа принявших участие в нашем эксперименте испытуемых (от 26) и латентный период первой реакции добровольца при решении каждой пробы (время первой реакции). В зрительно-моторной задаче “Кружки” первой реакцией считалась первая “подкрутка” — короткое движение колесиком мыши-кольца — для коррекции траектории движения красного кружка. В арифметической задаче первой реакцией являлся поворот колесика мыши для ввода ответа — верно или неверно. Исследовали изменение общей доли верных проб, а также динамику изменения верных решений и времени первой реакции для каждой пробы в течение всей длительности задач.

Анализ стратегий управления траекторией полета кружка

Для анализа тонкой зрительно-моторной координации добровольцев выделяли оптимальный коридор вокруг прямой, соединяющей левый нижний угол экрана (точку вылета кружка) и правый верхний угол экрана (цель, в которую его нужно было направить), — удержание траектории кружка в этой области повышало его вероятность попадания в цель, вне этой области возрастал риск не справиться с задачей (упустить кружок за пределы экрана). Область задавали следующим образом: так как изначально кружок двигался по траектории в виде параболы, то в качестве оптимальной выбирали область, ограниченную двумя параболами с вершинами в точке начала движения, симметричными относительно прямой, проходящей через центр цели и точку вылета, и касающимися окружности с центром, совпадающим с центром цели, и радиусом больше радиуса цели на 10 пикселей (рис. 1 слева сверху). Для каждого кружка (для всех 40 проб) анализировали результирующую траекторию. Сначала оценивали, какая доля этой траектории находилась в оптимальном коридоре (протяженность в пикселях части/частей траектории, находившейся в оптимальном коридоре, выраженная в процентах к общей протяженности траектории). Считали, что чем выше эта доля, тем точнее добровольцы справлялись с управлением движущимся объектом. Кроме того, мы подсчиты-

Таблица 1. Оценка функционального состояния, сонливости и структуры сна – средние значения
Table 1. Assessment of the functional state, drowsiness and sleep structure – average values

Задачи	Опросник САН, баллы			Опросник SSS, баллы		Опросник VASS, баллы		Объективные показатели сна		
	само-чувствие	актив-ность	настро-ение	до сна	после сна	до сна	после сна	ЛП сна, мин	ЛП SWS, мин	длитель-ность SWS, мин
Кружки	5.4 ± 1.21	5.0 ± 1.16	5.9 ± 1.04	3.5 ± 1.42	2.8 ± 1.13	5.6 ± 2.23	3.5 ± 2.00	13.4 ± 14.13	18.6 ± 13.44	6.3 ± 3.22
Равенства	5.3 ± 1.23	6.9 ± 10.31	5.7 ± 1.19	3.4 ± 1.47	2.6 ± 0.99	5.6 ± 1.85	3.2 ± 1.88	11.9 ± 5.76	19.7 ± 9.21	4.9 ± 2.00
Уровень значимости, *p*	**0.49**	**0.62**	**0.38**	**0.67**	**0.31**	**0.87**	**0.47**	**0.74**	**0.15**	**0.067**

вали количество корректирующих “подкруток”, совершенное в ходе выполнения каждой пробы, а также подразделяли их на верные и неверные. “Подкрутка” считалась верной, если она сокращала расстояние до прямой, проходящей через центр цели и точку начала движения, и неверной в противоположном случае.

Статистический анализ

Статистический анализ выполняли с использованием программы Statistica 10 (Stat Soft. Inc., Талса, Оклахома, США). Решение каждой отдельной задачи при пробуждении сравнивали с решением задач в бодрствовании до сна. Также сравнивали решения двух задач между собой. Для оценки нормальности распределения полученных данных применяли критерий Колмогорова – Смирнова. Для нормально распределенных переменных использовали дисперсионный анализ ANOVA (однофакторный и для повторных измерений), для апостериорного анализа применяли критерий Вилкоксона. При сравнении вероятности правильного выполнения каждой пробы при решении обоих типов задач использовали таблицу сопряженности 2 × 2, доверительный интервал в которой вычислялся по критерию Хи-квадрат.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Структура сна, сонливость и функциональное состояние

Мы сравнили баллы опросника САН и оценки сонливости по методикам SSS и VASS в двух типах экспериментов (с решением при пробуждении зрительно-моторной либо арифметической задачи) и не обнаружили каких-либо значимых различий в функциональном состоянии добровольцев в этих экспериментах (табл. 1). Анализ дневного сна также показал, что латентность засыпания, латентный период наступления третьей стадии сна, а также длительность этой стадии были сопоставимы в двух экспериментах. Полученные данные свидетельствуют о схожем состоянии добровольцев перед началом каждого из экспериментов, и о том, что различия в выполнении двух типов задач при пробуждении не были вызваны различным функциональным состоянием добровольцев, их сонливостью либо длительностью глубокого сна.

Доля верно выполненных проб

Средняя доля верно выполненных проб для задачи “Кружки” составила 74.8% в бодрствовании до сна (далее “контроль”) и 59.3% при пробуждении, тогда как для задачи “Равенства” доля верных проб была 88.3% в контроле и 80.9% при пробуждении. Анализ данных показал, что для обоих типов задач средняя доля верных проб при пробуждении была достоверно ниже, чем в контроле ($p < 0.001$). Однако мы также обнаружили, что доля верных проб для задачи “Кружки” была значимо ниже, чем для задачи “Равенства” даже в контроле ($p < 0.001$). Это указывает на то, что задачи оказались несколько различными по сложности выполнения, хотя мы предполагали их сходство на этапе разработки методики.

Чтобы оценить динамику восстановления способности правильно решать каждую задачу, мы для каждой из 40 проб посчитали долю участников эксперимента, верно выполнивших задание. Эта доля, описывающая вероятность верного решения каждой отдельной пробы, также снижалась при пробуждении, но это снижение зависело от типа задачи. Значимое снижение для задачи “Кружки” мы получили для первой половины проб – предъяв-

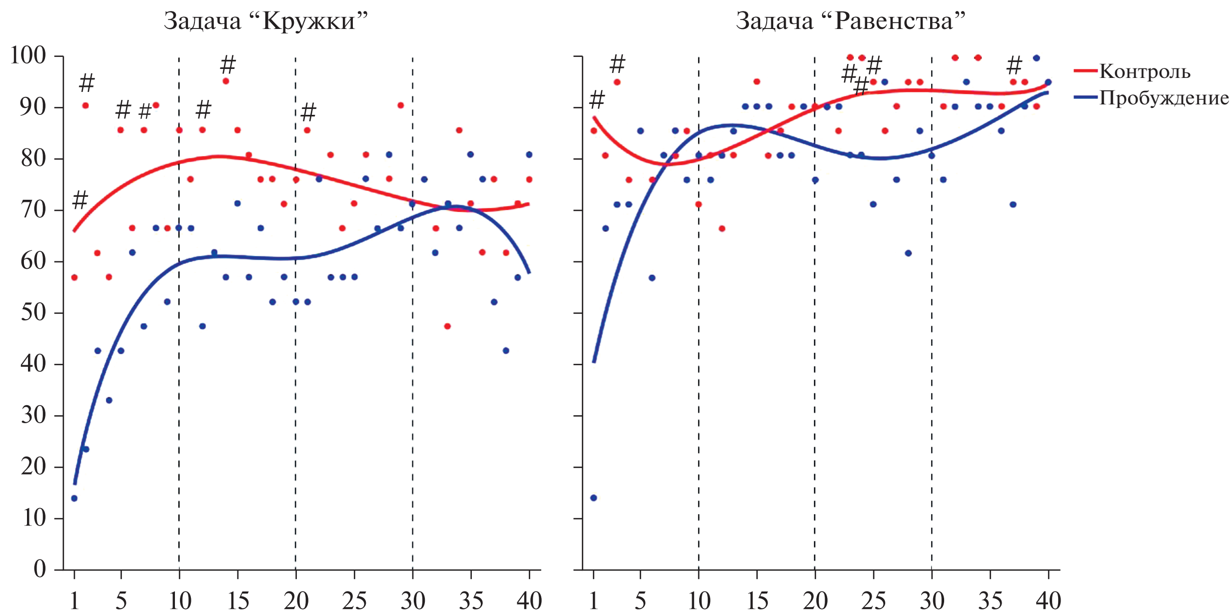

Рис. 2. Динамика изменения вероятности верного решения задач ($n = 26$). По оси ординат – количество участников эксперимента (в процентах), правильно решивших данную пробу, по оси абсцисс – номер пробы. Жирными кривыми показаны линии полиномиального тренда степенью 4. # – $p < 0.05$.
Fig. 2. The dynamics of change in the probabilities of correct solution of each trial ($n = 26$). X-axis – the number of participants in the experiment (in percent), correctly solved this test; Y-axis – the trial number. Bold lines show polynomial trend lines of degree 4. # – $p < 0.05$.

лявшихся в течение 1 минуты от начала пробуждения (для 1, 2, 5, 7, 12, 14-й и 21-й проб $p < 0.05$), а при решении задачи "Равенства" – только для первых проб (для 1-й и 3-й пробы $p < 0.05$) и, что интересно, мы отметили повторное уменьшение вероятности верного решения проб в середине выполнения задачи – для 23–25-й и 37-й проб ($p < 0.05$) (рис. 2). Таким образом, результаты показали, что, хотя среднее значение доли верно выполненных проб при пробуждении снижается для обеих задач, успешность выполнения зрительно-моторной задачи при пробуждении страдает заметно сильнее, чем успешность выполнения арифметической задачи.

Из дальнейшего анализа была исключена первая проба, поскольку для нее мы получили мало данных (число добровольцев, выполнивших первую пробу: $n = 9$ для задачи "Кружки"; $n = 3$ для задачи "Равенства"), поскольку добровольцы часто спали на боку и не успевали повернуться к экрану и поэтому пропускали ее.

Время первой реакции

Как и ожидалось, время первой реакции при решении двух типов задач различалось – для зрительно-моторной задачи "Кружки" двигательные реакции регистрировались раньше, чем для задачи "Равенства". Среднее время реакции для задачи "Кружки" в контроле составило 1.0 ± 0.52 с, а при пробуждении – 1.1 ± 0.62 с; в то время как среднее время первой реакции при выполнении задачи "Равенства" составило 1.4 ± 0.46 с для контроля и 1.5 ± 0.45 с для пробуждения. Такое различие объясняется тем, что зрительно-моторная задача "Кружки" требовала раннего реагирования и постоянного моторного управления движущимся кружком, в то время как при решении задачи "Равенства" испытуемые поворачивали колесико мыши-кольца только на заключительном этапе – для ввода ответа.

В задаче "Кружки" при пробуждении время первой моторной реакции на появление стимула было в среднем несколько выше, чем в бодрствовании, однако анализ ANOVA показал, что различия между этими состояниями значимы лишь на уровне тенденции ($F(1, 20) = 3.2214$, $p = 0.08$). Чтобы оценить динамику восстановления способности решать задачи, мы разделили все пробы на 3 группы по 13 проб: с 2-й пробы по 14-ю включительно, то есть пробы, которые предъявлялись в течение первых 40 с после пробуждения; пробы с 15-й

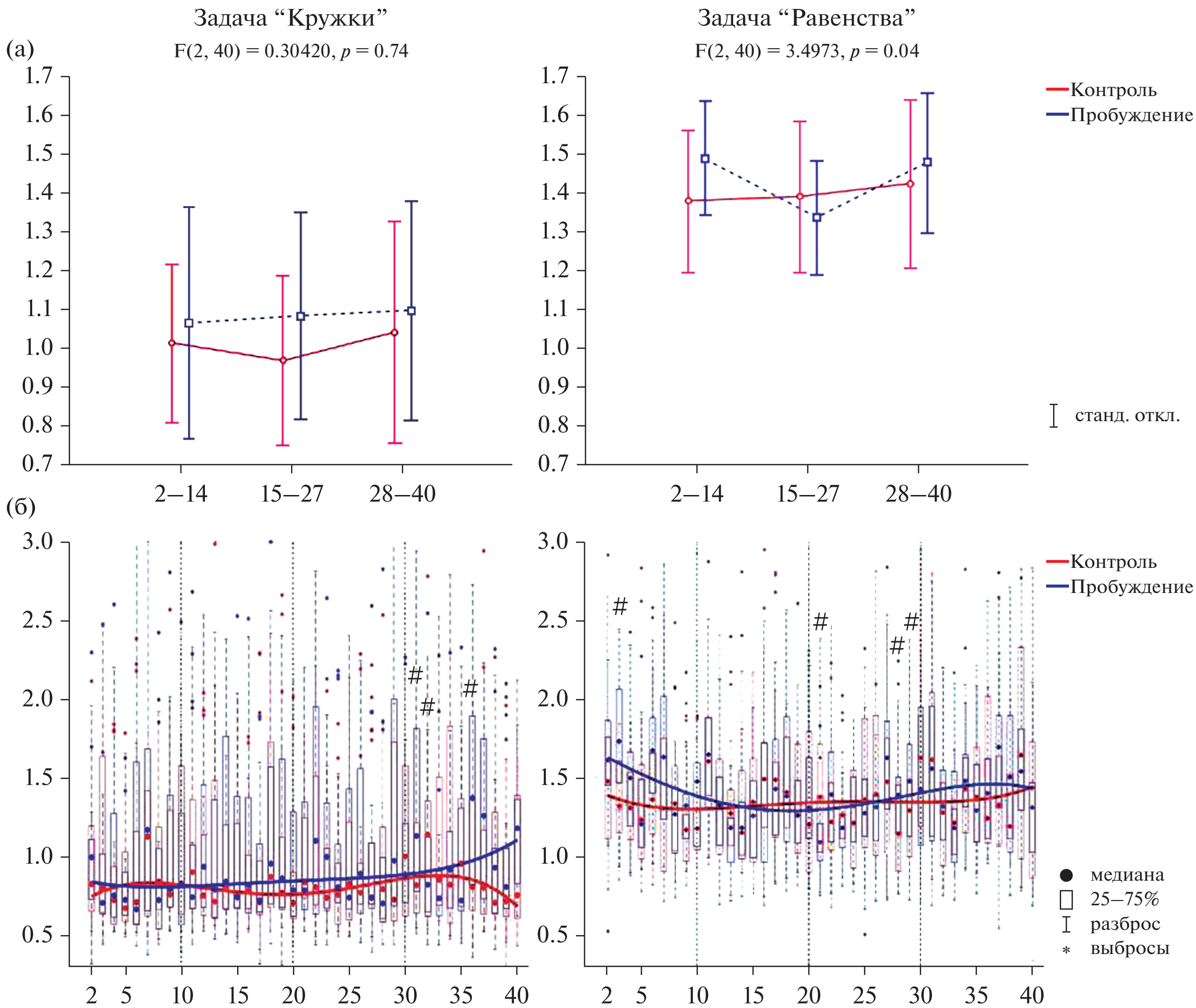

Рис. 3. Результаты дисперсионного анализа ANOVA для повторных измерений для взаимодействия факторов “состояние” × “группы проб” (а) и изменения времени первой реакции (б) для задач “Кружки” и “Равенств” ($n = 26$). По оси ординат – время первой реакции (сек), по осям абсцисс – группы проб (а) и номер пробы (б). Жирными кривыми показаны линии полиномиального тренда степенью 4 для медиан. # – $p < 0.05$.
Fig. 3. Repeated measures ANOVA results for factor interactions “State” X “Trial groups” (a) and changes in the first reaction time (б) for the motor task “Circles” and the cognitive task “Equalities” ($n = 26$). X-axis – the first reaction time (sec), Y-axes – the trial groups (a) and the trial number (б). Bold lines show polynomial trend lines of degree 4 for median. # – $p < 0.05$.

по 27-ю включительно – предъявлявшиеся примерно с 40-й по 80-ю секунды от момента пробуждения; и пробы с 28-й по 40-ю включительно – предъявлявшиеся после 80-й с решения задачи. Двухфакторный ANOVA “состояние” × “группы проб” не выявил взаимодействия между этими факторами ($F(2, 40) = 0.30420$, $p = 0.74$), то есть время первой реакции оставалось примерно одинаковым как в контроле, так и при пробуждении в течение выполнения всей задачи (рис. 3 (а)).

Для задачи “Равенства” время реакции в среднем также не отличалось от контроля: $F(1, 20) = 1.1142$, $p = 0.30$ по ANOVA, – однако в динамике скорость ответа при пробуждении восстанавливалась нелинейно. Анализ ANOVA показал статистически значимое взаимодействие факторов “состояние” × “группы проб” ($F(2, 40) = 3.4973$, $p = 0.04$): для первых 13 проб время реакции было больше, чем в контроле, но для вторых 13 – меньше. Апостериорный анализ с помощью критерия Вилкоксона подтвердил, что для проб 3, 28 и

29 при пробуждении время реакции было достоверно выше, чем в контроле, а для пробы 21 — ниже ($p < 0.05$) (рис. 3 (б)).

Показатели зрительно-моторной координации

Чтобы оценить динамику восстановления способности тонкого управления движущимся кружком, мы рассчитывали долю его результирующей траектории, которая находилась внутри оптимального коридора вокруг прямой, соединяющей точку вылета кружка и его цель (рис. 1 слева). При пробуждении средняя доля попадания в оптимальный коридор — 67.3% — была значимо ниже, чем в контроле — 78.5% (по критерию согласия частот, $p < 0.001$). Анализ ANOVA показал статистически значимое взаимодействие факторов "состояние" × "группы проб" ($F(2, 48) = 6.8216$, $p = 0.002$) — доля траектории в оптимальном коридоре была ниже, чем в контроле на протяжении всего пробуждения, что было подтверждено апостериорным анализом для первых 10 проб, а также для 21-й, 23-й и 32-й пробы ($p < 0.05$) (рис. 4 слева).

Также мы оценивали число корректирующих "подкруток" и долю верных из них. Средняя доля верных "подкруток" от общего числа была значимо ниже при пробуждении (65.7%), чем в контроле (70.8%) ($p = 0.01$, по критерию согласия частот). В среднем общее число корректирующих "подкруток" при пробуждении (6 ± 3 "подкрутки") практически не отличалось от контроля (7 ± 3 "подкрутки"). Но в динамике обнаружились отличия — для общего числа "подкруток" с помощью двухфакторного анализа ANOVA мы получили, что их было меньше при пробуждении для 1-й и 2-й групп проб, чем в контроле ($F(2, 48) = 4.2690$, $p = 0.020$). Интересно, что в контроле число "подкруток" постепенно уменьшалось от 1-й группы проб к 3-й, то есть в начале выполнения задачи добровольцы чаще корректировали траекторию, чем в конце. Апостериорный анализ подтвердил значимость отличий для 1, 4, 13, 19, 20, 24-й и 37-й проб ($p < 0.05$) (рис. 4 справа).

Спектральный анализ

Статистическое сравнение данных спектрального анализа в бодрствовании, в начале пробуждения (когда выполнение задачи все еще было затруднено) и в конце пробуждения (когда выполнение задач стало стабильным) показало различие в спектральной мощности разных частотных диапазонов в этих трех состояниях. Различия в спектральной мощности для всех диапазонов не зависели от типа задачи, поэтому для дальнейшего анализа мы объединили данные обеих задач. Анализ ANOVA показал, что спектральная мощность всего альфа-диапазона была значимо выше при пробуждении, чем в бодрствовании: для альфа-1 (8—10 Гц) ($F(2, 50) = 17.181$, $p < 0.001$), для альфа-2 (10—12 Гц) ($F(2, 50) = 17.155$, $p < 0.001$) и для альфа-3 (12—14 Гц) ($F(2, 50) = 21.653$, $p < 0.001$). Апостериорный анализ с помощью критерия Вилкоксона подтвердил значимость увеличения спектральной мощности альфа-активности во всех отведениях при пробуждении ($p < 0.05$) (рис. 5 слева). Интересно, что эта мощность была высокой не только в начале пробуждения, когда выполнение задач было еще затруднено, но и в его конце, когда способность решать оба типа задач уже восстановилась. Спектральная мощность бета-1-диапазона (14—24 Гц) также была достоверно выше как в начале, так и в конце пробуждения, чем в бодрствовании (анализ ANOVA $F(2, 50) = 25.829$, $p < 0.001$), что было подтверждено апостериорным анализом для всех отведений ($p < 0.05$). Мощность как дельта-1-, так и дельта-2-диапазона была выше в начале пробуждения и снижалась к его концу, то есть когда восстанавливалась способность верно решать предъявляемые задачи: $F(2, 50) = 25.251$, $p < 0.001$ для дельта-1 (0.5—2 Гц) и $F(2, 50) = 28.759$, $p < 0.001$ для дельта-2 (2—4 Гц). Значимость этих изменений была также подтверждена апостериорным анализом ($p < 0.05$) во всех отведениях для дельта-1-диапазона (в начале пробуждения относительно бодрствования и конца пробуждения) и в 9 отведениях для дельта-2-диапазона (F3, P3, Pz, P4, O1 в начале пробуждения относительно бодрствования и F3, Cz, P4, O2 в начале пробуждения относительно его конца) (рис. 5 справа).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные нами результаты показали, что в среднем в течение первых двух минут после форсированного пробуждения из 3-й стадии дневного сна участники эксперимента хуже справлялись с задачами по сравнению с контролем (во время бодрствования перед сном). Средняя доля верно выполненных проб и в задаче "Кружки" на зрительно-мо-

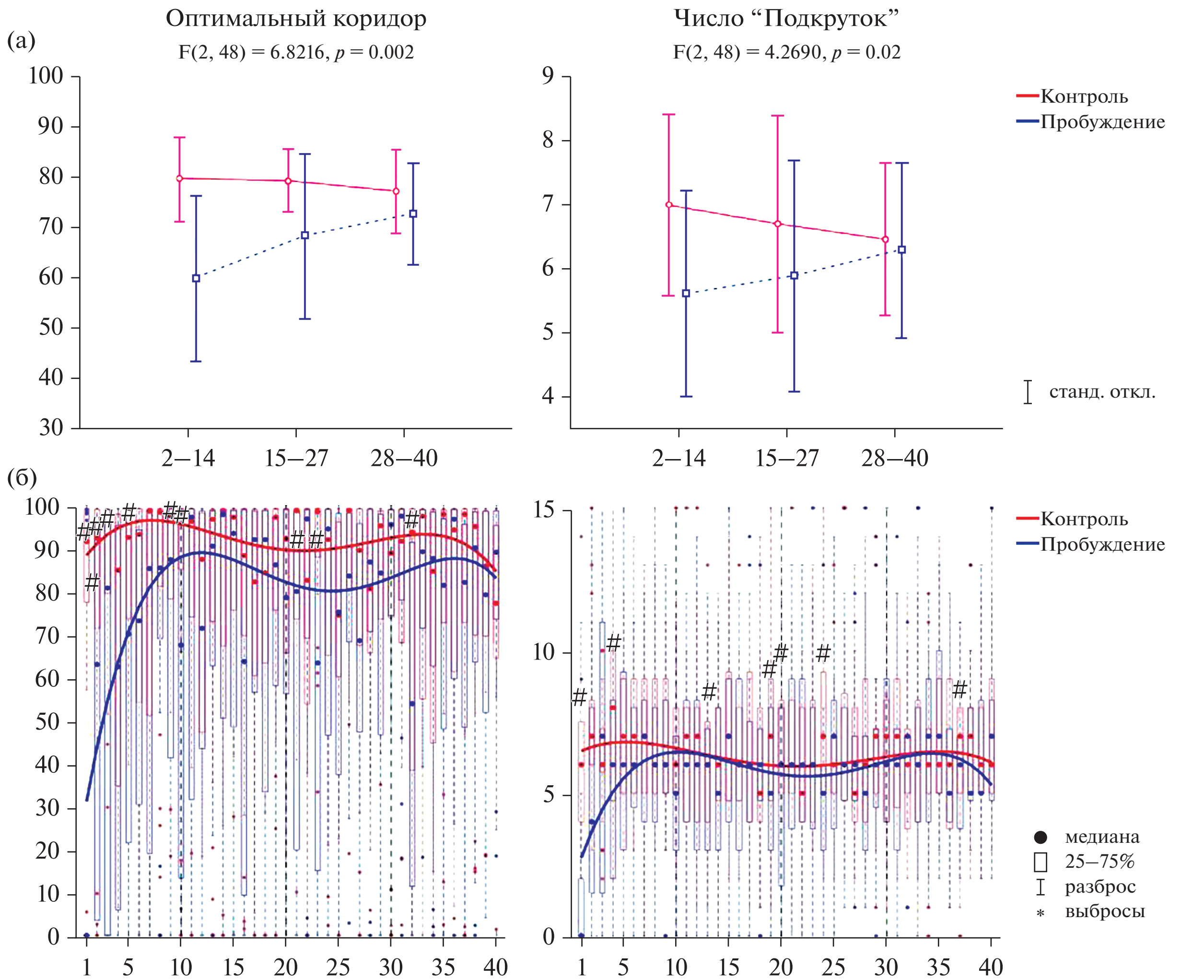

Рис. 4. Результаты дисперсионного анализа ANOVA для повторных измерений для взаимодействия факторов "состояние" × "группы проб" (а) и динамика восстановления зрительно-моторной координации (б) при решении задачи "Кружки" ($n = 26$). По осям ординат – доля траектории, находившейся в оптимальном коридоре (в процентах) (слева) и общее число "подкруток" (справа), по осям абсцисс – группы проб (а) и номер пробы (б). Остальные обозначения как на рис. 3.

Fig. 4. Repeated measures ANOVA results for factor interactions "State" X "Trial groups" (a) and the dynamics of restoration of hand-eye coordination (б) in the motor task "Circles" ($n = 26$). X-axes – change in the proportion of the trajectory that hit the optimal corridor (in percent) (left) and the total number of "spins" (right), Y-axis – the trial groups (a) and the trial number (б). Other designations as in Fig. 3.

торную координацию, и в задаче "Равенства" на арифметический счет была ниже, чем в контроле. Снижены были и такие показатели зрительно-моторной координации, как способность удерживать движущийся объект в оптимальном коридоре, а также доля верных корректирующих "подкруток". Однако время простой моторной реакции на появление зрительного стимула лишь на уровне тенденции было ниже, чем в контроле.

Анализ динамики выполнения задач показал, что простые моторные реакции на появление зрительного стимула восстанавливаются при пробуждении практически сразу же – в течение 4 с. Однако более сложные функции – тонкая зрительно-моторная координация и абстрактное мышление – восстанавливаются значительно позже. Так, способность оценивать верность арифметических равенств в задаче "Равенства" восстанавливалась в течение 10 с после пробуждения – начиная с 4-й пробы вероятность верного решения задачи уже не отличалась от контроля. Но при этом до 14-й пробы (в течение, примерно, 40 с)

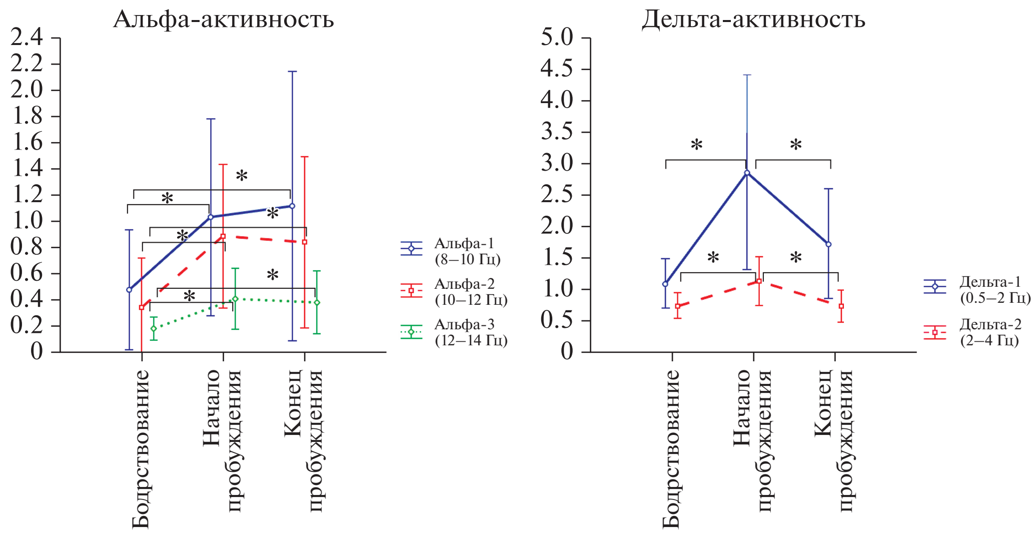

Рис. 5. Результаты анализа ANOVA для повторных измерений для альфа- и дельта-мощности при решении обеих задач усредненные по всем отведениям (n = 26). По оси ординат – мощность (в мкВ^2). * – $p < 0.05$.
Fig. 5. Repeated measures ANOVA results for alpha- and delta-power in both tasks averaged over all leads (n = 26). X-axis – the spectral power (µV^2). * – $p < 0.05$.

скорость решения задачи оставалась замедленной.

Интересно, что восстановление способности решать задачу “Равенства” происходило нелинейно: через минуту после пробуждения (на 23–25-й пробах) вероятность верного решения повторно снижалась, хотя скорость решения в это время парадоксальным образом оказалась несколько выше, чем в контроле (статистически значимо для пробы 21), а выполнение проб 28 и 29 снова оказалось замедленным. В литературе есть данные о нелинейном повышении активности нейрональных систем, обеспечивающих поддержание бодрствования, во время пробуждения (для обзора см. (Украинцева, Соловьева, 2023)). В отличие от засыпания, процесс пробуждения не является плавным, а начинается с всплеска как вегетативной, так и общей активации (arousal), превышающего уровень, характерный для спокойного бодрствования. В связи с этим, как было показано в исследовании рефлекса вздрагивания на крысах (Horner et al., 1997), в первые секунды после пробуждения центральная нервная система находится в состоянии повышенной готовности к реагированию на внешние стимулы. Возможно, такой всплеск arousal привел к появлению в середине задачи “Равенства” более быстрых, чем в контроле, и, по-видимому, более импульсивных реакций. На повышенный arousal может указывать также высокая спектральная мощность бета-диапазона, которую мы обнаружили как в начале пробуждения (при выполнении первых 5 проб) так и в конце (во время выполнения проб 25–35).

Восстановление способности верно решать задачу “Кружки” происходило более линейно. Однако, несмотря на то, что время простой сенсомоторной реакции на появление движущегося кружка уже на 2-й пробе не отличалось от бодрствования, все показатели тонкой зрительно-моторной координации достигали контрольного уровня дольше, чем показатели в задаче “Равенства”. В течение первой минуты после пробуждения вероятность приведения объекта в цель в 7 пробах из 21 была значимо ниже, чем в контроле. Способность удерживать объект в оптимальном коридоре восстанавливалась еще дольше – в конце выполнения задачи. Общее количество корректирующих “подкруток” тоже менялось при пробуждении: сначала оно было значительно ниже, чем в контроле, и только к концу задачи достигло контрольных значений.

Таким образом, если простой моторный ответ на появление зрительного стимула возможен уже в первые секунды пробуждения из 3-й стадии сна, то способность верно и быстро решать арифметическую задачу, так же как и способность точно управлять движущимся объектом, возвращаются значительно позже. По-видимому, это может быть связано с тем, что пробуждение сенсорных и моторных зон опережает пробуждение ассоциативных (Peter-Derex et al., 2015; Alcaide et al., 2021). В результате, как недавно было показано, автоматические, досознательные реакции на внешний стимул появляются значительно раньше, чем осознанные (Liaukovich et al., 2022) – даже до появления доминирующего альфа-ритма в ЭЭГ. Возможный механизм такого поэтапного включения простых, а затем сложных реакций, скорее всего, выработался в ходе эволюции, позволяя быстро среагировать на угрозу, застигшую животное во сне. Он предполагает максимально быстрое включение при пробуждении первых, автоматических реакций, которые могут быть сформированы без участия ассоциативных зон коры. Более сложные, осмысленные и скоординированные реакции на стимулы, требующие участия ассоциативных областей, включаются позже. По-видимому, это связано с тем, что в бодрствовании ассоциативные зоны характеризуются самым высоким уровнем метаболической активности, вследствие этого имеют наиболее высокое гомеостатическое давление сна и, в итоге, требуют больше времени для пробуждения (Braun et al., 1997).

Во время 3-й стадии сна в коре преобладает высокоамплитудный дельта-ритм. Эта активность характеризуется высокой синхронизацией и стереотипностью во всех отделах коры (Steriade et al., 2001), она препятствует обработке информации (Ковальзон, 2012), и ее мощность коррелирует со степенью угнетения сознания (Trotti, 2017). При пробуждении эта активность исчезает в ЭЭГ не сразу – наши результаты показали, что в течение первых 15 с (во время выполнения первых 5 проб) мощность дельта-ритма оставалась все еще повышенной несмотря на то, что в записи преобладал альфа-ритм. Можно предположить, что, когда человек еще не полностью вышел из состояния сна, очаги локального бодрствования в сенсорных и моторных зонах достаточны для осуществления простых, автоматических реакций на стимул. Но, поскольку как для арифметического счета, так и для точного зрительно-моторного манипулирования необходима активация не только моторных областей коры, но и ассоциативных, то выполнение этих задач на высоком уровне требует более полного пробуждения. Во время выполнения проб с 25-й по 35-ю, когда показатели решения обеих задач достигли контрольного уровня, мощность дельта-ритма снизилась и уже не отличалась от мощности в бодрствовании перед сном. Поэтому можно заключить, что для восстановления способности к абстрактному мышлению и тонкому зрительно-моторному манипулированию при пробуждении недостаточно появления регулярной альфа-активности в ЭЭГ, но необходимо еще снижение мощности дельта-ритма.

Интересно, что при пробуждении спектральная мощность альфа-диапазона была значимо выше своего уровня в бодрствовании до сна и все еще оставалась повышенной на второй минуте решения задач (пробы с 25-й по 35-ю) несмотря на то, что обе задачи добровольцы решали с открытыми глазами. Вероятно, повышение мощности альфа-ритма может объясняться общей тенденцией к гиперсинхронизации биоэлектрической активности мозга, характерной для сна, которая сохраняется какое-то время и при пробуждении (Левкович, 2022).

Однако следует отметить, что обнаруженные нами изменения спектральной мощности ЭЭГ при пробуждении описывают глобальные сдвиги функционального состояния всего неокортекса. В дальнейшем представляется целесообразным сопоставить восстановление простых и сложных форм поведения при пробуждении с локальными различиями в скорости активации ассоциативных и сенсомоторных областей коры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали полученные результаты, разные аспекты решения задач на абстрактное мышление и на зрительно-моторную координацию при пробуждении из 3-й стадии дневного сна восстанавливаются не одновременно и в части случаев нелинейно. Если скорость простого моторного ответа на стимул достигает уровня бодрствования практически сразу после пробуждающего сигнала, то восстановление способности определять верность или неверность арифметических равенств, а также точного управления траекторией движущегося объекта требует значительно больше времени. Также наши результаты свидетельствуют о том, что для восстановления при пробуждении абстрактного мышления и тонкого зрительно-моторного манипулирования недостаточно появления регулярной альфа-активности в ЭЭГ, но необходимо еще снижение мощности дельта-ритма.

ВЫВОДЫ

1. При пробуждении скорость моторной реакции на появление зрительного стимула восстанавливается почти сразу – в течение 4 с после пробуждающего сигнала.

2. При пробуждении способность выполнять задачи как на абстрактное мышление, так и на зрительно-моторную координацию снижена и восстанавливается примерно через 40 (для задачи на арифметический счет) и 60 (для задачи на управление движущимся объектом) секунд после пробуждающего сигнала.

3. При пробуждении в течение первых 1.5 мин сохраняется более высокая, чем в бодрствовании, спектральная мощность альфа- и бета-активности.

4. При пробуждении в течение первых 15 с, пока способность выполнять задачи на абстрактное мышление и на зрительно-моторную координацию затруднена, отмечается повышенная спектральная мощность дельта-диапазона. Восстановление способности решать оба типа задач сопровождается снижением мощности дельта-активности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации на 2021–2023 гг.

The work was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for 2021–2023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ковальзон В.М. Основы Сомнологии: Физиология и нейрохимия цикла “бодрствование-сон”. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2012. 239 с.

Левкович К.М. Восстановление сознания при пробуждении от ортодоксального и парадоксального сна. Электрофизиологическое исследование: автореф... дис. канд. биол. наук. М.: 2022. 26 с.

Украинцева Ю.В., Соловьева А.К. Феномен пробуждения от сна. Нейрофизиологические и вегетативные процессы, его обеспечивающие. Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2023. 123 (5): 21–27.

Alcaide S., Sitt J., Horikawa T., Romano A., Maldonado A.C., Ibanez A., Sigman M., Kamitani Y., Barttfeld P. fMRI lag structure during waking up from early sleep stages. Cortex. 2021. 142 (3): 94–103.

Bassetti C., Vella S., Donati F., Wielepp P. SPECT during sleepwalking. Lancet. 2000. 356 (9228): 484–485.

Braun A.R., Balkin T.J., Wesenten N.J., Carson R.E., Varga M., Baldwin P., Selbie S., Belenky G., Herscovitch P. (1997). Regional Cerebral Blood Flow throughout the Sleep-Wake Cycle. An H2(15)O PET Study. Brain 120 (Pt 7), 1173–1197. https://doi.org/10.1093/brain/120.7.1173

De Carli F., Proserpio P., Morrone E., Sartori I., Ferrara M., Gibbs S.A., De Gennaro L., Lo Russo G., Nobili L. Activation of the motor cortex during phasic rapid eye movement sleep. Ann. Neurol. 2016. 79 (2): 326–330.

Horner R.L., Sanford L.D., Pack A.I., Morrison A.R. Activation of a distinct arousal state immediately after spontaneous awakening from sleep. Brain Res. 1997. 778 (1): 127–134.

Iber C., Ancoli-Israel S., Chesson A., Quan S.F. for the American Academy of Sleep Medicine. The AASM manual for the scoring of sleep and associated events: rules, terminology and technical specification. 1st ed.: Wenstchester, Illinois: American Academy of Sleep Medicine, 2007. 59 p.

Latreille V., von Ellenrieder N., Peter-Derex L., Dubeau F., Gotman J., Frauscher B. The human K-complex: insights from combined scalp-intracranial EEG recordings. Neuroimage. 2020. 213: e116748.

Liaukovich K., Sazhin S., Bobrov P., Ukraintseva Y. Event-related potential study of recovery of consciousness during forced awakening from slow-wave sleep and rapid eye movement sleep. Int. J. Mol. Sci. 2022. 23 (19): e11785.

Makeig S., Bell A., Jung T.P., Sejnowski T.J. Independent component analysis of electroencephalographic data. Advances in neural information processing systems. 1995. 8: 145–151.

Marzano C., Ferrara M., Curcio G., De Gennaro L. The effects of sleep deprivation in humans: topographical electroencephalogram changes in non-rapid eye movement (NREM) sleep versus REM sleep. J. Sleep Res. 2010. 19 (2): 260–268.

Müller-Putz G.R. Electroencephalography. Handb. Clin. Neurol. 2020. 168 (2007): 249–262.

Mylonas D., Tocc C., Coon W.G., Baran B., Kohnke E.J., Zhu L., Vange M.G., Stickgold R., Manoach D.S. Naps reliably estimate nocturnal sleep spindle density in health and schizophrenia. Journal of sleep research. 2020. 29 (5): e12968.

Nobili L., Ferrara M., Moroni F., De Gennaro L., Russo G. Lo, Campus C., Cardinale F., De Carli F. Dissociated wake-like and sleep-like electro-cortical activity during sleep. Neuroimage. 2011. 58 (2): 612–619.

Peter-Derex L., Magnin M., Bastuji H. Heterogeneity of arousals in human sleep: a stereo-electroencephalographic study. Neuroimage. 2015. 123: 229–244.

Shah S., Ghosh S., Nagarajan L. Is sleep captured during a standard daytime EEG sufficient to diagnose Electrical Status Epilepticus in Sleep. Epilepsy Behav. Reports. 2023. 23: e100611.

Simon K.C., McDevitt E.A., Ragano R., Mednick S.C. Progressive muscle relaxation increases slow-wave sleep during a daytime nap. J. Sleep Res. 2022. 31 (5): 1–10.

Steriade M., Timofeev I., Grenier F. Natural waking and sleep states: a view from inside neocortical neurons. J. Neurophysiol. 2001. 85 (5): 1969–1985.

Terzaghi M., Sartori I., Tassi L., Didato G., Rustioni V., LoRusso G., Manni R., Nobili L. Evidence of dissociated arousal states during NREM parasomnia from an intracerebral neurophysiological study. Sleep. 2009. 32 (3): 409–412.

Trotti L.M. Waking up is the hardest thing I do all day: sleep inertia and sleep drunkenness. Sleep Med. Rev. 2017. 35: 76–84.

MOTOR CONTROL AND COGNITIVE FUNCTIONS RECOVERY DURING FORCED AWAKENING FROM SLOW-WAVE DAYTIME SLEEP

A. K. Soloveva[a, d, #], N. K. Solovev[b], A. O. Mokrousova[c], and Yu. V. Ukraintseva[d, ##]

[a]*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

[b]*MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia*

[c]*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

[d]*Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology RAS, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: s_anna_99@mail.ru*

[##]*e-mail: ukraintseva@yandex.ru*

The recovery mechanisms of various forms of behavior upon awakening from sleep are still not well understood. In this work, we investigated the recovery of simple motor reactions to visual stimuli, fine hand-eye coordination, and abstract thinking upon awakening from the deepest, SWS stage of daytime sleep. Subjects were offered two types of tasks: visual-motor tasks in which it was necessary to control a moving object; and arithmetic, in which it was necessary to determine the correctness of the proposed equalities in wakefulness before sleep and during the first 2 minutes of awakening from sleep. The results obtained showed that the speed of a simple motor reaction to the appearance of a visual stimulus reached the wakefulness level almost immediately after awakening (within 4 seconds), while the restoration of the ability to determine the correctness or incorrectness of arithmetic equalities, as well as the ability to accurately control the trajectory of a moving object required much more time: about 40 seconds (in the arithmetic task) and 60 seconds (in the visual-motor task). The power of the alpha-rhythm upon awakening was higher than in wakefulness. Delta-rhythm power was increased only at the beginning of awakening while task performing was difficult, and in the second minute of awakening the delta-rhythm decreased when task performing was restored. Our data indicate that simple and complex forms of behavior upon awakening are not restored simultaneously.

Keywords: daytime sleep, hand-eye coordination, abstract thinking, SWS stage of sleep, awakening, EEG, alpha-rhythm, delta-rhythm