



*В.Б.Дорохов**

Анализ психофизиологических механизмов нарушения деятельности при дремотных изменениях сознания

Проблема дневной сонливости имеет большую социальную значимость, так как критические состояния сонливости являются причиной различных инцидентов на транспорте и производстве. Недостаток сна вызывает сонливость, а сон уменьшает выраженность этого состояния, вплоть до полного его исчезновения. Сонливость является базовой потребностью, подобно голоду или жажде, и ее интенсивность определяется тем, как быстро она наступает, насколько легко разрушается и как долго длится. В лабораторных условиях дефицит сна может быть определен путем оценки дневной сонливости, нарушений в психоэмоциональной сфере и снижении работоспособности. В реальной жизни его последствиями становятся сложности в учебе, проблемы в межличностных взаимоотношениях, ошибки и катастрофы. Люди

* **Дорохов Владимир Борисович** — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, руководитель проекта «Объективные и субъективные показатели критических уровней дневной сонливости» (01-60-00176а).

редко бывают защищены от несвоевременных эпизодов сна в связи с тем, что они не могут самостоятельно распознавать состояние сонливости. Сонные водители, подобно водителям-наркоманам, не осознают того, что они не способны к адекватным действиям, могут отрицать свою сонливость и сниженную работоспособность.

Известно, что при дневной сонливости способность выполнять сложные движения нарушается в меньшей степени по сравнению со способностью к обучению или концентрации внимания. Особенно сильно нарушаются функции связанные с сознанием — способность к предвидению и ситуационная уверенность. Сложность исследования изменения субъективных процессов, вызываемых сонливостью, заключается в отсутствии параллелизма между уровнями бодрствования и уровнями сознания. Известные физиологические критерии бодрствования/сна [10] недостаточно полно описывают критические изменения уровня сознания, которые вызываются переходными процессами от бодрствования ко сну. Ряд исследователей предполагает, что дремота является особым состоянием сознания, когда внимание переключается с внешней среды организма на внутренние информационные процессы, что субъективно воспринимается человеком как погружение в собственные мысли, задумчивость.

Исследование реальной деятельности человека при засыпании затруднительно по ряду причин, одной из которых является угроза появления опасных для жизни человека ошибок. Имеющиеся методологические подходы и тесты для определения уровня сонливости у пациентов с патологиями сна ориентированы в основном на медицинские задачи, а для исследования психофизиологических механизмов деятельности при сниженном уровне бодрствования они малоэффективны. Поэтому необходима разработка экспериментальных моделей нарушений деятельности при засыпании, в которых одновременно регистрируются физиологические, поведенческие и субъективные показатели деятельности. В наших исследованиях мы используем две модели: первая — монотонная непрерывная деятельность с закрытыми глазами, быстро вызывающая развитие дремотного состояния и появление ошибок; вторая — длительное (5—8 часов) вождение на автомобильном компьютерном симуляторе, которое вызывает усталость и дремотное состояние, сопровождающиеся ошибками вождения и авариями в игровом виртуальном мире [4]. В рамках данной статьи мы рассмотрим результаты, полученные на первой модели.

Психомоторный тест

Для исследования психофизиологических механизмов нарушений деятельности при засыпании мы разработали психомоторный непрерывно-дискретный тест [2, 3, 5], который довольно скоро (через 5—15 минут) вызывает дремотное состояние, а при углублении дремоты — «микросон». Такое быстрое снижение уровня бодрствования определяется несколькими причинами: во-первых монотонным характером теста, во-вторых, снижением афферентного притока как от внешней среды (закрывание глаз и выполнение теста в заглушенной камере), так и от интерорецепторов (положение лежа или сидя).

Монотонный характер теста достигался непрерывным повторением двух серий счета «про себя». В первой серии счет от 1 до 10 сопровождался одновременным нажатием кнопки большим и указательным пальцами. Во

второй серии испытуемый считал от 1 до 5 без нажатий на кнопку. Выбор количества отсчетов — 10 и 5, которые определяют длительность последовательных серий теста, объясняется особо значимым характером этих чисел для субъекта (количество пальцев), облегчающим запоминание и оперирование этими числами при засыпании. Для объективного определения связи появления ошибок в деятельности с развитием дремотного состояния на компьютерном полиграфе проводили регистрацию физиологических (ЭЭГ, ЭОГ, ЭКГ, КГР) и поведенческих показателей [3]. Выполнение теста с закрытыми глазами и минимумом двигательной активности позволяет безартефактно регистрировать электрофизиологические показатели, что особенно существенно при регистрации электрической активности мозга человека.

Мы предложили два принципиально различных варианта теста: счет «про себя» без внешнего стимула и отсчет внешних стимулов (щелчков). Эти два типа деятельности (self-paced and externally-paced tasks) отличаются как на когнитивном, так и на структурно-функциональном уровнях. Наличие стимула облегчает количественный анализ деятельности, на чем основана широко используемая парадигма «стимул-реакция», но очевидно, что реальная деятельность в эту парадигму полностью не укладывается. В данной статье рассматриваются результаты исследований с первым вариантом теста, более близким к реальной деятельности человека.

Альфа-активность ЭЭГ и эффекторное взаимодействие с внешним миром

Наиболее показательными изменениями электрической активности мозга человека при переходе от бодрствования ко сну является исчезновение альфа- и появление тета-ритма электроэнцефалограммы (ЭЭГ). По современным представлениям [11], генез альфа-ритма определяется таламо-кортикальными нейронными сетями мозга и связан с взаимодействием субъекта с внешним миром. А генез тета-ритма более ориентирован на прием и обработку информации от внутренней среды организма, он обуславливается гиппокампадно-кортикальной системой. Эти нейрофизиологические представления совпадают с существующим предположением [8, 10], что в процессе развития дремоты происходит изменение состояния сознания, при котором внимание переключается с внешнего мира на внутренний.

Анализ работ, в которых исследовалась динамика альфа-ритма ЭЭГ при переходе от бодрствования ко сну [11], показывает, что увеличение мощности в низкочастотном альфа-диапазоне (6—9 гц) связано с наличием «усилий» (и, вероятно, трудностью) для поддержания субъектом определенного уровня бодрствования, необходимого для взаимодействия с внешней средой. В частности, показано [12], что при засыпании испытуемые, получившие инструкцию нажимать кнопку при подаче звукового щелчка, продолжали выполнять эту инструкцию до тех пор, пока мощность альфа-ритма была довольно высокой, несмотря на увеличение мощности ЭЭГ в тета- и дельта-диапазонах. Прекращение нажатий сопровождалось резким снижением мощности ЭЭГ в альфа-диапазоне, что, по мнению этих авторов, можно считать моментом наступления сна.

Следует отметить, что переход от бодрствования ко сну является циклическим процессом, для которого характерно периодическое появление активацион-

ных процессов в ЭЭГ на фоне тета/дельта активности, характерных для «дремотной» электроэнцефалограммы. По существующим представлениям, периодическое появление фазических активационных процессов во время сна обеспечивает гибкий контакт спящего с окружающей средой, сохраняя возможность экстренного пробуждения при изменении внешней или внутренней среды организма [9]. Известно, что активационные процессы в зависимости от глубины сна имеют различное электрофизиологическое проявление. При развитии дремотного состояния и на первой стадии сна электроэнцефалографическая активация мозга проявляется в виде альфа-веретен. Во второй стадии сна основным активационным паттерном ЭЭГ становится К-комплекс.

Основываясь на вышеизложенном, можно предположить, что альфа-ритм ЭЭГ при сниженном уровне бодрствования является необходимым условием для моторного взаимодействия организма с внешней средой. Для проверки этой гипотезы мы провели две серии экспериментов с регистрацией ЭЭГ при сниженном уровне бодрствования, в которых испытуемые выполняли психомоторный тест с закрытыми глазами [2, 5]. Динамика ЭЭГ анализировалась в двух сериях в положении сидя ($n=64$) и лежа ($n=20$) при последовательном снижении уровня бодрствования. Вначале появлялись моторные нарушения деятельности в виде уменьшения силы нажатия на кнопку, вызванные снижением тонуса мышц. Затем, при углублении дремоты нарушались психические процессы, связанные с устным счетом: изменялось количество нажатий в их сериях, увеличивалась длительность интервалов между отдельными нажатиями и их сериями.

Анализ ЭЭГ при нарушениях выполнения теста показал хорошую корреляцию изменений ЭЭГ с показателями деятельности при разных уровнях дремоты. В бодрствующем состоянии эта корреляция анализировалась у 83 испытуемых. При снижении уровня бодрствования измерения проводились у 80 испытуемых, анализировалось более 1000 участков записей со снижением силы нажатия и их исчезновением на разных стадиях дремоты.

Мы получили следующие результаты. В состоянии бодрствования и при легкой дремоте необходимым условием для нажатия на кнопку было наличие альфа-ритма (в 100% случаев у 83 испытуемых). Снижение силы нажатия при углублении дремоты сопровождалось уменьшением амплитуды альфа-ритма (в 80—90% случаев) и появлением тета-волн (в 60—80% случаев). При прекращении нажатий на кнопку, которые вызываются дальнейшим углублением дремоты, колебания в альфа-диапазоне ЭЭГ исчезали в 100% случаев. При этом альфа-ритм замещался ЭЭГ-активностью в тета/дельта диапазонах. Спонтанное (без внешнего стимула) восстановление нарушенной деятельности во всех случаях (100%) сопровождалось характерными изменениями в ЭЭГ, которые мы обозначили как фазические активационные паттерны ЭЭГ.

В зависимости от характера нарушения деятельности и глубины дремотного состояния фазические активационные паттерны имели разную структуру, но их необходимой составляющей было наличие альфа-ритма. Мы выделили два основных типа фазических активационных паттернов. Первый тип наблюдался на ранних стадиях дремоты в обеих сериях экспериментов при изменениях характера деятельности: в начале новой серии нажатий, при спонтанном восстановлении силы нажатия на кнопку, после моторных нарушений деятельности в виде уменьшения силы нажатия на кнопку.

Первый тип паттернов — выглядел как фазическое увеличение амплитуды альфа-ритма, то есть как альфа-веретено, предшествующее или совпадающее с началом новой серии нажатий или увеличением силы нажатия на кнопку. Довольно часто (в 40—60% случаев) в составе этого альфа-веретена наблюдались более высокочастотные составляющие ЭЭГ в диапазоне бета-ритма. При легкой и средней степенях дремоты начало альфа-веретена в 50—70% случаев совпадало с началом новой серии нажатий. В остальных случаях увеличение амплитуды альфа-ритма наблюдалось одновременно с фазическим увеличением силы нажатия на кнопку в произвольном месте серии нажатий. Время между началом альфа-веретена и увеличением силы нажатия на кнопку обычно не превышало 1—2 секунд. В обеих сериях экспериментов было проанализировано более 1000 фрагментов, содержащих эти паттерны у 80 испытуемых.

Второй тип фазических активационных паттернов ЭЭГ состоял из паттерна первого типа (альфа-веретен с включением высокочастотных составляющих ЭЭГ) и предшествовавшего ему К-комплекса или его компонентов. Этот тип активационного паттерна наблюдался только в положении лежа после грубых нарушений деятельности, сопровождаемых микроэпизодами сна по ЭЭГ-показателям. Были проанализированы 213 фрагментов, содержащих эти паттерны второго типа у 12 человек.

Таким образом, результаты наших исследований подтверждают гипотезу о роли альфа-ритма ЭЭГ как необходимого условия моторной деятельности при сниженном уровне бодрствования. Возникает вопрос, что является первичным при спонтанном восстановлении деятельности — возникновение моторной команды в памяти субъекта или активация нейронных сетей, генерирующих альфа-ритм, которые создают условия для доступа моторной команды из оперативной памяти к исполнительным моторным структурам. Для ответа на этот вопрос полезно привлечь современные представления о роли фазических активационных процессов во время сна, функциональная роль которых определяется необходимостью поддерживать гибкий контакт спящего организма с окружающей средой.

Существует предположение, что каждый раз, когда происходит фазическая активация мозга, осуществляются психологические процессы, связанные с анализом всей доступной информации и принятием решения просыпаться или продолжать спать [9, 10]. На нейрофизиологическом уровне этому соответствует процесс объединения и синхронизации различных структур мозга («binding process»), обеспечивающий доступ к оперативной памяти всей необходимой информации от внешней и внутренней сред организма для последующего выполнения адаптивной деятельности. В последние годы «binding process» рассматривают, как один из возможных нейрофизиологических механизмов функционирования сознания [10]. При этом ведущая роль в функционировании сознания отводится кортико-таламическим взаимодействиям, которые осуществляют синхронизацию процессов в разных структурах мозга, необходимую для возникновения субъективного образа внешней среды и организации адекватной деятельности. Предполагают, что в разных функциональных состояниях организма ЭЭГ-коррелятом такой синхронизации могут быть как высокочастотные ритмы (от 40 гц и выше), так и ритмы в альфа-диапазоне (8—12 гц). Результаты нашей работы служат аргументом

в пользу того, что при низком уровне бодрствования ЭЭГ-коррелятом «binding process» может быть альфа-ритм, который запускается эндогенными механизмами и создает условия для доступа моторной команды из оперативной памяти к исполнительным моторным структурам.

КГР как объективный показатель субъективного восприятия ошибки

Исходя из существующих представлений о механизме ориентировочного рефлекса (ОР) [6, 13], можно предположить, что появление ошибки в деятельности оценивается организмом как значимый стимул и вызывает ОР. Считается, что одним из наиболее устойчивых компонентов ОР на новый или значимый стимул является кожно-гальваническая реакция (КГР) [1, 6]. Регистрация фазических компонентов КГР имеет определенные преимущества перед другими показателями активации вегетативной нервной системы (ВНС). Во-первых, надежное выделение КГР на одиночный стимул, не требующее большого числа суммаций, что особенно важно для психофизиологических экспериментов, связанных с исследованием редких ситуаций и появлением значимых стимулов эндогенного характера типа «инсайт». Во-вторых, возникновение КГР преимущественно связано с информационно-эмоциональными и другими несоматическими компонентами активации организма и, наконец, генез этого показателя определяется в основном симпатической нервной системой. Исходя из сказанного выше, мы предположили, что процессы определения значимости ошибки в деятельности по механизму ОР и субъективное восприятие ошибки могут быть связаны между собой.

Тонические и фазические компоненты КГР регистрировались с пальцев руки по методу Фере «сухим электродом» при выполнении психомоторного теста в положении сидя у добровольцев (N=64). Было показано, что осознание ошибки в деятельности, вызванной развитием дремотного состояния, сопровождается появлением фазических КГР через 10,1 сек. после возникновения ошибки. За 69,8 сек. до момента появления ошибки происходило торможение КГР. Сравнение интервалов между исчезновением КГР до ошибки и после показал их достоверное различие ($p < 0,001$, t-тест для связанных событий). Опрос испытуемых после нарушения и восстановления деятельности дает возможность предполагать наличие взаимосвязи между субъективным восприятием ошибки и появлением КГР. Мы полагаем, что появление КГР после ошибки является вегетативным компонентом ориентировочного рефлекса, механизм которого активируется в момент субъективного восприятия ошибки как значимого стимула эндогенного характера [5].

Концепция «presence» и возникновение ошибок при засыпании

Для обсуждения психофизиологических механизмов появления ошибок в деятельности при засыпании представляют интерес подходы, развиваемые в концепции «presence». Концепция возникла из практической необходимости анализа психических процессов в системах виртуальной реальности (ВР) и описания основного психологического феномена, характерного для систем ВР — «эффекта присутствия», который связан с возникновением ощущения «здесь и сейчас» у субъекта, помещенного в виртуальную среду.

В определенном смысле вся реальность, в которой мы живем, является виртуальной, так как субъективный мир человека основан на свойстве чело-

веческой психики оперировать субъективными образами. Анализируя нейро-биологические основы концепции «presence» Riva & Waterworth [14] полагают, что чувство «presence» эволюционно возникло из необходимости разделить информацию, получаемую субъектом от внутренней среды организма от окружающей внешней среды. По современным представлениям, чувство presence может быть максимальным при нахождении субъекта в трех разных мирах: реальном, виртуальном и внутреннем, психическом.

В настоящее время наиболее актуальной задачей для развития концепции «presence» является разработка адекватных методов измерения этого чувства.

Мы предполагаем, что с позиции концепции «presence» при засыпании происходит неосознанный переход чувства «presence» от реального мира к внутреннему миру [7], сходному со сновидениями, что подтверждает появление в это время гипногагических зрительных образов — ярких, но осознанных мысленных картин, возникающих на границе между бодрствованием и сном. При спонтанной активации субъекта, сопровождающейся фазической КГР и восстановлением альфа-активности ЭЭГ [2, 5], у него происходит переключение чувства «presence» к восприятию реального мира, от присутствия субъекта «там», в своем внутреннем мире, к присутствию его «здесь и сейчас» в реальном мире. В основе такого переключения, несомненно, участвуют нейрофизиологические механизмы, регулирующие процессы сна и бодрствования. Применение концепции «presence» к анализу возникновения ошибок при засыпании может быть продуктивным как для понимания психофизиологических механизмов возникновения ошибок, так и для развития этой концепции, являющейся ядром исследований психологических процессов в системах виртуальной реальности.

Литература

1. Дементенко В.В., Дорохов В.Б., Коренева Л.Г., Марков А.Г., Шахнарович В.М. Гипотеза о природе электродермальных реакций // Физиология человека. 2000. Т. 26. — ц 2. — С. 124—131.
2. Дорохов В.Б. Альфа-веретена и К-комплекс — фазические активационные паттерны при спонтанном восстановлении нарушений психомоторной деятельности на разных стадиях дремоты // Журн. высш. нервн. деят. 2003. Т. 53. — ц 4. — С. 503—512.
3. Дорохов В.Б. Применение компьютерных сомнологических полиграфов в психофизиологии и для клинических исследований // Физиология человека. 2002. Т. 28. — ц 2. — С. 105—112.
4. Дорохов В.Б., Марков А.Г., Шахнарович В.М. и др. Автомобильные симуляторы: динамика вегетативных показателей при утомлении и снижении уровня бодрствования // Материалы 2-й школы конференции «Сон — окно в мир бодрствования». — М., 2003. — С. 34—35.
5. Дорохов В.Б., Дементенко В.В., Коренева Л.Г., Марков А.Г., Шахнарович В.М. Электродермальные показатели субъективного восприятия ошибок в деятельности при наступлении дремотного состояния // Журн. высш. нервн. деят. 2000. Т. 50. — ц 2. — С. 206—218.
6. Dawson M.E., Shell A.M., Filion D.N. The electrodermal system // Principles of Psychophysiology (Ed. J.T.Cacioppo, L.G.Tassinari). Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1990. P. 295—324.

7. Dorokhov V.B. Switch of sense of presence during erroneous performance caused by sleep/wake transitions // Материалы 2-й Всероссийской школы-конференции «Сон — окно в мир бодрствования». — М., 2003.— С. 34—35
8. Foulkes D., Vogel G. Mental activity at sleep onset // J.Abnorm. Psychol. 1965. 70, p. 231—243.
9. Halasz P. Hierarchy of micro-arousals and the microstructure of sleep // Neurophysiol. Clin. 1998. 28, 461—475.
10. Hobson J.A, Pace-Schott E., Stickgold R. Dreaming and the brain: toward a cognitive neuroscience of conscious states. Behavioral and Brain Sciences. 2000. 23 (6): 54—138.
11. Klimesch W. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis // Brain Res. Rev. 1999. 29 (2—3): 169—195.
12. Ogilvie R.D., Simons I.A., Kuderian R.H., MacDonald T., Rustenburg J. Behavioral, event related potential and EEG/FFT changes at sleep onset // Psychophysiology. 1991. 28: 54—64.
13. Ohman A. The orienting response, attention and learning: An information processing perspective // The orienting reflex in humans. Eds. H.D. Kimmel, E.N. van Olst, J.F. Orlebeke, Hillsdale, NG: Erlbaum. 1979. P. 443—471.
14. Riva G. and Waterworth J.A. Presence and the Self: a cognitive neuroscience approach // Presence-Connect, 2003. 3 (3).