

DOI: 10.31862/2500-2961-2019-9-1-96-112

**А.Н. Пучкова, О.Н. Ткаченко, И.П. Трапезников,  
И.А. Пилецкая, Е.В. Тиунова, М.М. Сазонова,  
А.О. Таранов, С.С. Груздева, В.Б. Дорохов**

Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН,  
117485 г. Москва, Российская Федерация

## Оценка потенциальных возможностей амбулаторного устройства Dreem, предназначенного для ЭЭГ-синхронизированной акустической стимуляции во время сна

Нарушения сна – одна из существенных проблем современного общества. Новые исследования направлены на поиск нефармакологических методов улучшения качества сна, которые не влияли бы на структуру сна и медленноволновую активность мозга, играющую важную роль в гомеостазе и когнитивных функциях. Одно из перспективных направлений – синхронизированная с дельта-ритмами ЭЭГ глубокого сна звуковая стимуляция, усиливающая медленноволновую активность мозга. Данная статья описывает Dreem – потребительское беспроводное устройство, проводящее стимуляцию такого типа в домашних условиях. Устройство содержит сухие ЭЭГ-датчики, фотодатчик для регистрации пульса, акселерометр. Встроенные алгоритмы обнаруживают наступление фазы глубокого сна и предъявляют звуковые стимулы на восходящем фронте дельта-волн, а также проводят автоматическое стадирование сна. Получаемые устройством сырые данные доступны пользователю и пригодны для стадирования и базового анализа параметров сна. В пилотном исследовании приняли участие трое испытуемых, для каждого из которых было получено от 10 до 24 записей ночного сна с регистрацией ЭЭГ и стимуляцией.

Автоматически полученные гипнограммы соответствовали структуре нормального ночного сна. Усреднение сигнала ЭЭГ относительно момента стимуляции показало эффективную работу детектора и преимущественное попадание стимулов на восходящий фронт дельта-волны. Устройство Dreem представляет интерес для исследователей сна как простой в использовании инструмент сбора данных вне лаборатории.

**Ключевые слова:** сон, стимуляция во сне, медленноволновая активность, дельта-волны, беспроводные устройства.

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке Российской академии наук и Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-013-00747а.

ССЫЛКА НА СТАТЬЮ: Оценка потенциальных возможностей амбулаторного устройства Dreem, предназначенного для ЭЭГ-синхронизированной акустической стимуляции во время сна / А.Н. Пучкова, О.Н. Ткаченко, И.П. Трапезников и др. // Социально-экологические технологии. 2019. Т. 9. № 1. С. 96–112. DOI: 10.31862/2500-2961-2019-9-1-96-112.

Original research

DOI: 10.31862/2500-2961-2019-9-1-96-112

**A.N. Puchkova, O.N. Tkachenko, I.P. Trapeznikov,  
I.A. Piletskaya, E.V. Tiunova, M.M. Sazonova,  
A.O. Taranov, S.S. Gruzdeva, V.B. Dorokhov**

Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology,  
Russian Academy of Science,  
Moscow, 117485, Russian Federation

## Assessment of potential capabilities of Dreem: An ambulatory device for EEG phase-locked acoustic stimulation during sleep

Sleep disorders are one of the significant problems in the modern society. Current research is on the lookout for the nonpharmacological ways to improve sleep quality and slow wave brain activity that plays a crucial role in homeostasis

and cognitive functions. One of the promising approaches is acoustic stimulation that is phase-locked to deep sleep EEG rhythms. It was already shown that such stimulation improves slow wave brain activity. This article describes Dreem: a wireless consumer device that performs acoustic sleep stimulation in home conditions. The device has dry EEG electrodes, photo sensor for pulse oximetry, and an accelerometer. The inbuilt software detects deep sleep, performs audio stimulation on the ascending slope of the delta wave and does automatic sleep staging. In the pilot study of the device, three subjects made 10 to 24 recordings of night sleep with EEG recording and stimulation. The raw data recorded by the device is available to the user and is sufficient for sleep staging and basic sleep analysis. Automatic hypnograms reflect the structure of a normal night sleep. EEG averaged by the stimulation markers demonstrated the high efficacy of slow wave detectors and placement of stimulations on the ascending slope of a delta wave. Dreem device is of interest for the sleep researchers as an easy to use tool for an out-of-lab data acquisition.

**Key words:** sleep, sleep stimulation, slow wave activity, delta waves, wireless devices.

**Acknowledgements:** The work is performed with support of the Russian Academy of Sciences and of the Russian foundation of Basic Research, grant No. 19-013-00747a.

CITATION: Puchkova A.N., Tkachenko O.N., Trapeznikov I.P., Piletskaya I.A., Tiunova E.V., Sazonova M.M., Taranov A.O., Gruzdeva S.S., Dorokhov V.B. Assessment of potential capabilities of Dreem: An ambulatory device for EEG phase-locked acoustic stimulation during sleep. *Environment and Human: Ecological Studies*. 2019. Vol. 9. № 1. Pp. 96–112. (In Russ.) DOI: 10.31862/2500-2961-2019-9-1-96-112.

## Введение

Жизнь в современном обществе постоянно сталкивает современного человека с эмоциональными и физическими стрессогенными факторами, эффективное сопротивление которым требует слаженной работы всех систем организма. Одну из ключевых ролей в поддержании гомеостаза организма и нормального психического состояния играет здоровый сон, его нарушения имеют выраженные негативные последствия. Расстройства сна многообразны: они проявляются в виде нарушений засыпания, фрагментации сна, ранних пробуждений, недостаточной глубины и т.п., и оказывают негативное влияние на качество сна. Бессонница – самое распространенное из нарушений, ею и иными нарушениями сна в той или иной форме страдают, по данным различных

исследований, от 33 до 50% населения [Schutte-Rodin et al., 2008; Полуэктов, 2012]. Хроническая бессонница увеличивает риск развития соматических и психических заболеваний, вызывает нарушения когнитивных функций [Matteson-Rusby et al., 2010]. Поэтому разработка и совершенствование методов исследования сна и лечения его расстройств является весьма актуальной проблемой.

Традиционно для лечения клинических форм бессонницы применялась фармакологическая терапия препаратами-гипнотиками. Однако даже современные достаточно безопасные препараты могут негативно сказываться на качестве сна, мощности медленноволновой активности (МВА) ЭЭГ мозга во сне и состоянии человека в бодрствовании. Кроме того, появляется риск взаимодействия с другими принимаемыми препаратами [Pagel, Parnes, 2001; Arbon, Knurowska, Dijk, 2015]. В связи с этим идет активный поиск иных способов воздействия на качество сна.

В современных исследованиях особое внимание уделяется возможности терапии расстройств сна нефармакологическими методами, которые позволят сохранить структуру медленноволнового сна. Большое внимание к сохранению МВА во сне связано с ее важной ролью в гомеостазе. МВА в дельта-диапазоне (0,8–4 Гц) ЭЭГ является основной характеристикой 3-й стадии сна (или дельта-сна), соответствующей периоду самого глубокого сна [Achermann, Borbely, 1997]. Известно, что МВА, регистрируемая во время медленноволновой фазы сна, связана с обменными процессами, например, с метаболизмом глюкозы [Cauter Van et al., 2008; Copinschi, Leproult, Spiegel, 2014]. Данные многих исследований свидетельствуют о том, что эта фаза сна способствует консолидации памяти [Marshall et al., 2006; Walker, Helm van Der, 2009] и играет важную роль в регуляции синаптической пластичности и синаптической реорганизации [Huber et al., 2004; Vyazovskiy et al., 2008; Diekelmann, Born, 2010; Maret et al., 2011]. Показано, что исполнительные функции мозга зависят от медленноволнового сна, так что улучшение качества сна может быть путем к улучшению когнитивных функций [Diekelmann, 2014; Wilckens et al., 2018].

Для ряда воздействий показана возможность усиления МВА мозга и углубления сна путем навязывания колебаний дельта-диапазона ЭЭГ [Bellesi et al., 2014]. Это навязывание может осуществляться различными методами: при помощи транскраниальной магнитной стимуляции [Massimini et al., 2007], транскраниальной стимуляции постоянным или импульсным током [Marshall et al., 2006; Meinzer et al., 2013], а также сенсорной стимуляции [Tononi et al., 2010; Низкочастотная электрокожная стимуляция..., 2013; Ngo et al., 2013; Oudiette, Santostasi, Paller,

2013; Cox et al., 2014; Ngo et al., 2015; Santostasi et al., 2016; Arnal et al., 2017; Besedovsky et al., 2017; Leminen et al., 2017; Papalambros et al., 2017; Улучшение качества ночного сна..., 2017; Debellemaniere et al., 2018; Bellesi et al., 2014]. Среди всех видов сенсорных стимулов именно акустические вызывают во сне наиболее выраженное усиление амплитуды медленных волн [Tononi et al., 2010]. В ряде исследований, сосредоточенных на данном вопросе, уже выявлены параметры стимуляции, приводящие к наибольшему усилению МВА: необходима синхронизация подаваемых стимулов с текущей дельта-активностью мозга, оптимальна стимуляция на восходящем фронте дельта-волны [Ngo et al., 2013; Debellemaniere et al., 2018]. Этот момент должен быть синхронизирован с определенной фазой таламо-кортикальных колебаний, поскольку активацией нелемнисковых восходящих путей в таламо-кортикальную систему объясняют эффект стимуляции [Bellesi et al., 2014].

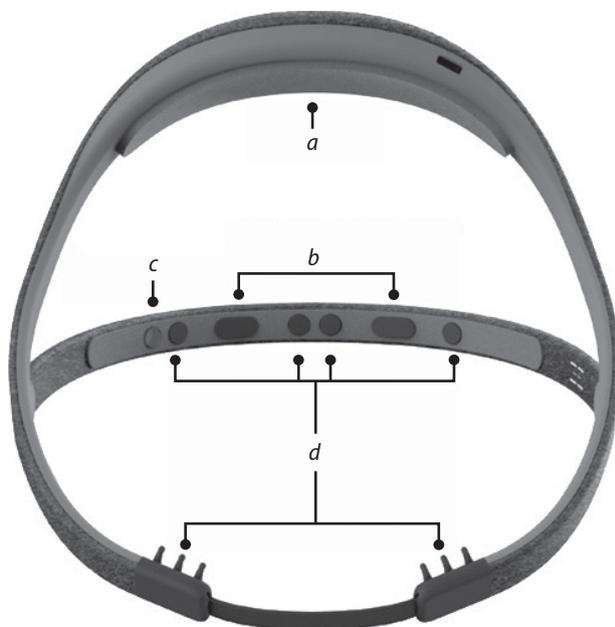
Методы, позволяющие индуцировать МВА во время глубокого сна, имеют важное прикладное значение, т.к. не только нормализуют сон, но и способствуют реализации его функций. Одним из наиболее проработанных с точки зрения регистрации и обработки сигнала является потребительское беспроводное устройство Dreem ([www.dreem.com](http://www.dreem.com), Франция). Оно представляет интерес и для исследователей сна, поскольку позволяет организовать регистрацию полисомнограммы в том числе и в домашних условиях, с минимальными неудобствами для испытуемых. Авторы разработки опубликовали статью, посвященную работе и валидации эффективности используемых датчиков и алгоритмов [Debellemaniere et al., 2018].

### **Характеристики устройства Dreem и его программного обеспечения**

Беспроводное устройство предназначено для регистрации ЭЭГ в амбулаторных условиях. Устройство надевается на голову, имеет датчики для регистрации ЭЭГ, пульсоксиметрии (фотодатчик), а также акселерометр. Для звуковой стимуляции используются динамики костной проводимости, прилегающие ко лбу, а также присутствует стандартный разъем для наушников (рис. 1). Для регистрации и обработки биологических сигналов используются встроенное в устройство вычислительное ядро и алгоритмы, не требующие постоянного беспроводного обмена данными.

Для регистрации используются «сухие» электроды, расположенные в лобных отведениях: Fp1 и Fp2 (два близко расположенных электрода по центру), F7, F8, а также затылочные электроды O1 и O2. При биполярной регистрации в качестве референтов используются ипсилатеральные

пары электродов для минимизации последствий плохого прилегания одного из электродов, когда человек лежит на боку. Использование лобных отведений в данном устройстве оправдано, поскольку МВА сна раньше всего появляется и наиболее выражена в лобных областях.



**Рис. 1.** Беспроводное устройство Dreem, вид с затылочной стороны.

Указано расположение сухих датчиков (c), динамиков костной проводимости (b), акселерометра (a). Нижний обруч с лобными электродами (d) располагается параллельно линии бровей, верхний обруч содержит вычислительное ядро, батарею и передатчик и располагается в области линии роста волос

**Fig. 1.** Wireless Dreem device, view from the back side.

Dry sensors (c), bone conduction dynamics (b) and accelerometer (a) are marked. The lower band with frontal electrodes (d) is positioned in parallel to the brow line; the upper band contains the computing core, the battery and the transmitter and is positioned by the hairline

Устройство выпускается в одном размере, рассчитанном на взрослого человека. Прилегание обеспечивается упругостью материалов обруча устройства и эластичной лентой, расположенной между электродами O1

и О2. Сигнал ЭЭГ регистрируется на частоте 250 Гц, для анализа фильтруется в диапазоне 0,4–18 Гц. Акселерометр регистрирует движения головы по трем осям с частотой 50 Гц.

Встроенные алгоритмы анализа сигнала предназначены для эффективной подачи звукового стимула на восходящем фронте дельта-волны. Для реализации этой цели алгоритм отфильтровывает высокочастотные помехи от электрической сети (фильтры на 48–52 Гц, 58–62 Гц) и постоянно отслеживает, с какой стороны устройства поступает более качественный сигнал, переключаясь на сигнал с правой или левой половины устройства. Алгоритм опирается на результаты машинного обучения на классифицированной экспертами базе сигналов ЭЭГ разного качества. Далее в анализе используется только более качественный сигнал, который разработчики называют «виртуальным каналом».

Следующим этапом анализа является детекция глубокого сна (3-ей стадии). Детектор использует алгоритмы машинного обучения (деревья решений), опирающиеся на сигналы акселерометра, пульсоксиметра и виртуального канала ЭЭГ на 30-секундных отрезках. Если сигнал получает оценку «глубокий сон», то он передается к алгоритму определения фаз. Этот алгоритм постоянно подстраивает синусоидальную функцию под сигнал ЭЭГ в частотном диапазоне 0,4–4 Гц (дельта-диапазон). Его конечной задачей является определение восходящей фазы дельта-волны для подачи звукового стимула.

Звуковая стимуляция запускалась только через 15 минут после начала глубокого сна, на восходящем фронте дельта-волны. Стимуляция представляла собой 2 всплески розового шума громкостью 40 дБ, приходящиеся на восходящие фронты следующих друг за другом дельта-волн. Подобный протокол стимуляции использовался до этого и другими группами исследователей [Ngo et al., 2015; Ong et al., 2016]. Между парами стимулов проходило минимум 9 с. Если после стимуляции детектировался альфа-ритм или движение, стимуляция прекращалась. Для контроля эффективности стимуляции введено условие псевдостимуляции (sham) – часть стимулов регистрируется алгоритмами и прибором, но звуки не предъявляются. Стимуляция велась только в глубоком сне [Debellemaniere et al., 2018].

Помимо алгоритмов детекции глубокого сна и дельта-волн, разработчики устройства Dreem создали систему автоматического стадирования сна и обнаружения микро-событий в ЭЭГ. Микро-события (веретена сна, К-комплексы, ЭЭГ-активация) обнаруживаются с помощью

алгоритмов глубокого обучения (сверточные нейронные сети) с высокими показателями точности и полноты [Chambon et al., 2018]. Для лучшего стадирования сна и детекции дельта-ритма в первую неделю пользования устройством проводится калибровка алгоритмов.

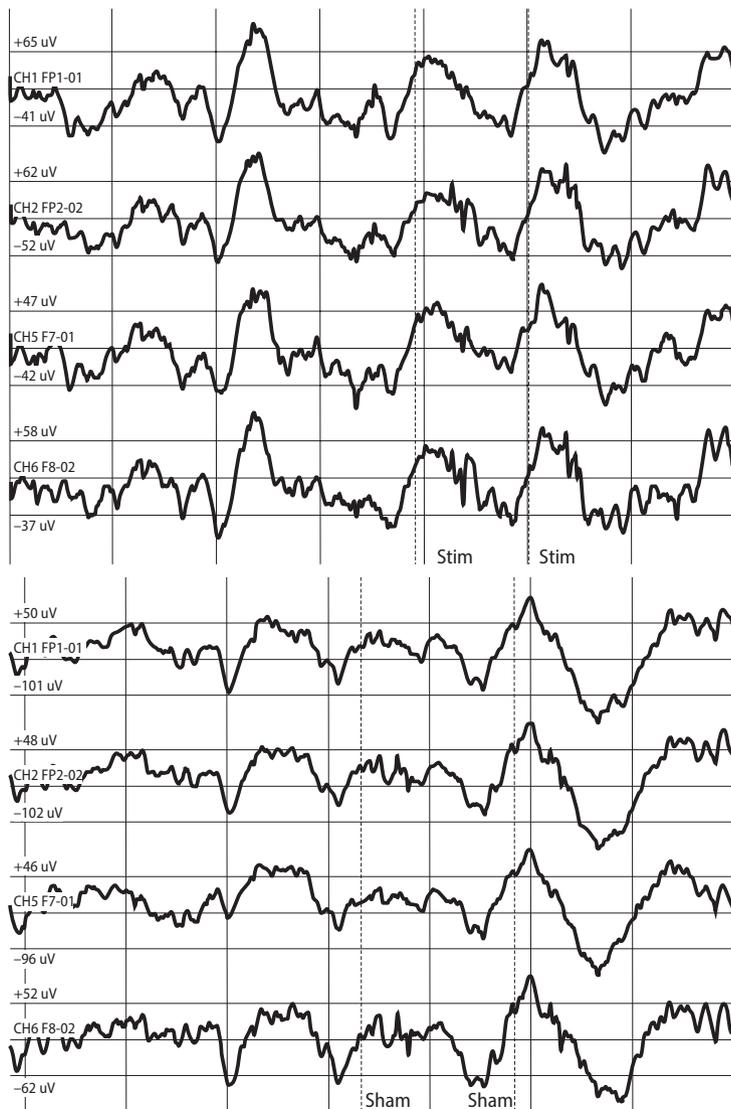
При использовании устройство Dreem после записи ночного сна передает данные в приложение на смартфоне пользователя, где он может увидеть гипнограмму и интегральную оценку параметров и качества сна. Кроме того, все полученные с датчиков сырые данные и маркеры стимуляции загружаются на сервер, где пользователь или исследователь может получить к ним доступ.

Пользователь устройства Dreem или исследователь имеет доступ к следующим данным: запись полисомнограммы в формате edf (отведения F7–O1, F8–O2, F7–F8, F7–FPz, F8–FPz, данные акселерометра по трем осям), автоматически определенная гипнограмма в текстовом и графическом форматах (см. рис. 2), список типов и времен подачи стимулов, которые затем можно анализировать или использовать как временные маркеры для анализа вызванной активности. По результатам автоматической оценки можно получить данные об общем времени сна, длительности 1-й, 2-й, 3-й стадий сна, быстрого сна и пробуждений, количестве предъявленных стимулов.

Целью данного исследования была оценка качества ЭЭГ-данных, регистрируемых устройством Dreem в домашних условиях, точности алгоритмов стимуляции и пригодности данного устройства к использованию в исследованиях сна и звуковой стимуляции во сне в частности.

## Материалы и методы

К пилотному исследованию устройства привлекли 3 испытуемых в возрасте 20–40 лет (2 женщины, 1 мужчина) без клинических нарушений сна или неврологических нарушений. Испытуемые устанавливали на свой смартфон прилагающееся к устройству программное обеспечение, которое пересылало данные записей для последующего скачивания и анализа. Они должны были надевать устройство каждый вечер перед отходом ко сну и спать в нем в обычное для них время и в привычных условиях. Испытуемые спали с устройством Dreem от 2 недель до трех месяцев, записи велись не во все ночи. Было получено по 10 пригодных для анализа записей от двух испытуемых и 24 записи от одного из них. Испытуемые отмечали первоначальное неудобство в использовании устройства во время сна. Двое испытуемых отмечали субъективное улучшение качества сна при использовании устройства.



**Рис. 2.** Примеры записи данных ЭЭГ, полученных с помощью беспроводного устройства Dream.

Указаны маркеры стимуляции (Stim) и псевдостимуляции (Sham)

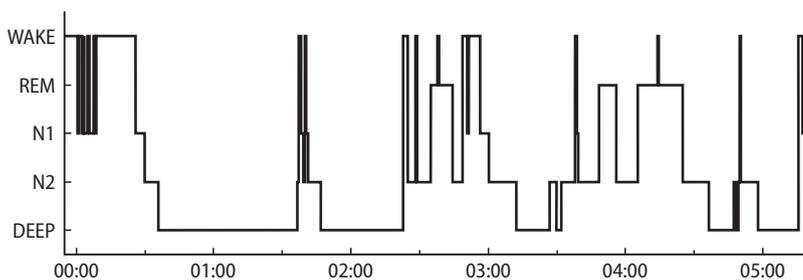
**Fig. 2.** Examples of an EEG recording with the Dream device.

Stimulation (Stim) and pseudostimulation (Sham) markers are shown

## Результаты

Для анализа записи полисомнограмм файлы меток стимуляции и гипнограмм скачивались с сервера разработчиков. При анализе данных было обнаружено, что качество записи ЭЭГ улучшается через несколько ночей после начала использования устройства, поскольку испытуемый привыкает к нему и меньше двигается во сне. Сравнение записей ЭЭГ сна, зарегистрированных одновременно «сухими» электродами устройства Dгеem и электродами с использованием проводящего геля, подключенными к стандартному электроэнцефалографу, показало довольно хорошее совпадение (рис. 2), что подтверждает полученные разработчиками результаты [Debellemaniere et al., 2018].

Для анализа работы встроенного алгоритма определения времени подачи звукового щелчка использовали временные маркеры стимуляции. По этим маркерам стимуляции проводилось усреднение данных, аналогичная процедуре усреднения вызванных потенциалов (ВП) для анализа точности попадания стимула и сравнения эффектов стимуляции и псевдостимуляции (контроль, около 25% стимулов). В большинстве случаев метки времени стимуляции попадали на область восходящего фронта дельта-волны ЭЭГ. Анализ получаемых при автоматическом анализе гипнограмм сна также показал их соответствие нормальной структуре сна здорового человека (рис. 3).



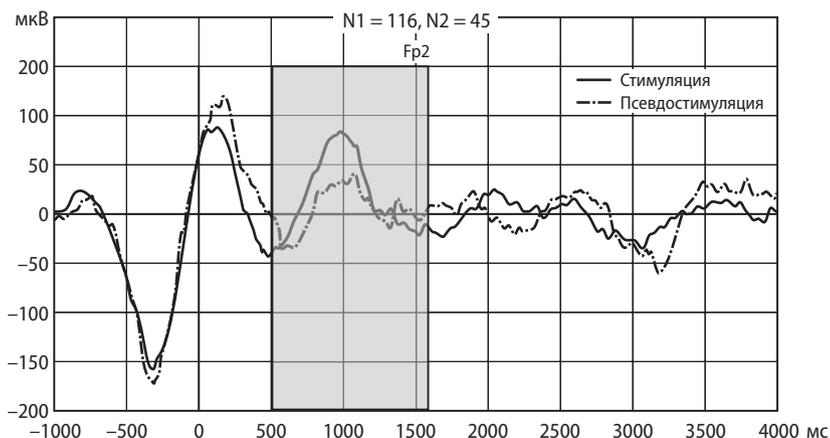
**Рис. 3.** Пример автоматически полученной гипнограммы ночного сна у человека с незначительными проблемами с поддержанием сна.

WAKE – бодрствование, REM – быстрый сон, N1 – первая стадия сна, N2 – вторая стадия сна, DEEP – третья стадия сна

**Fig. 3.** An example of an automatically scored hypnogram of a night sleep in a subject with minor sleep maintenance problems.

REM – rapid eye movement sleep, N1 – stage 1 sleep, N2 – stage 2 sleep, DEEP – stage 3 sleep

На этапе пилотных исследований данные усреднялись только в пределах одной ночи. При усреднении по маркеру первого стимула из пары четко визуализируется восходящая область дельта-волны, на которую приходится стимул, а также предыдущая и последующая дельта-волны, хотя их амплитуды ниже из-за несовпадения длительности отдельных дельта-волн, что приводит к сглаживанию в усреднении. Поскольку стимулы подавались парами, была проведена оценка интервалов между стимулами. Медиана межстимульного интервала составила 1048 мс, среднее – 1068 мс, стандартное отклонение – 318 мс, т.е. алгоритм успешно детектировал идущие друг за другом дельта волны на частоте около 1 Гц (рис. 4).



**Рис. 4.** Усредненная ЭЭГ-активность при звуковой стимуляции и в контроле (псевдостимуляция без звука).

Усреднение по первому стимулу из пары. Видна высокоамплитудная дельта-активность глубокого сна, стимул попадает на восходящий фронт волны, а также следующая за стимулом дельта-волна. Серая область указывает временные рамки, в которые попадал второй стимул

**Fig. 4.** EEG activity averaged for acoustic stimulation and sham conditions.

Averaging is performed by the first stimulus of the pair. High amplitude delta activity of deep sleep, stimulus on the ascending slope and following delta wave can be seen. Gray area denotes the time range for the second stimulus of the pair

## Обсуждение

Устройство Dreet – представитель крайне небольшой группы устройств, пригодных для массовой амбулаторной регистрации ночного и дневного сна. Оно содержит достаточный для базовой регистрации

набор датчиков, не требует применения геля или иных расходных материалов. Беспроводная система передачи и конструкция устройства обеспечивают относительную свободу движения во сне. Оно не требует специфических навыков для установки электродов для качественной регистрации ЭЭГ, после непродолжительной адаптации позволяет регистрировать ненарушенный сон в привычных для человека условиях. Постоянное совершенствование технических характеристик прибора и алгоритмов, а также отсутствие прямых аналогов на рынке делает Dreem фактическим стандартом для подобного класса потребительских устройств, которые будут развиваться и в дальнейшем.

Разработанные авторами алгоритмы эффективно классифицируют стадии сна, выделяют дельта-волны и подают звуковые стимулы, синхронизированные с восходящим фронтом волны. Значимых и воспроизводимых различий в амплитуде дельта-активности в условиях стимуляции по сравнению с псевдостимуляцией при усреднении сигналов в пределах одной ночи получить не удалось. Скорее всего, это связано с относительно небольшим количеством стимулов при усреднении. Разработчики устройства отмечают усиление дельта-активности после стимуляции, однако для воспроизведения этих результатов требуется усреднение данных по большому количеству испытуемых [Debellemaniere et al., 2018]. В дальнейшем исследовании на большем количестве испытуемых мы планируем воспроизвести этот подход. Также представляет интерес оценка динамики реакций при стимуляции в течение ряда ночей без перерывов. Такое исследование сложно реализовать в лабораторных условиях, а применение устройства Dreem позволит провести его без необходимости ежедневного посещения лаборатории.

Устройство представляет большой интерес и для различных популяционных исследований, оценки параметров сна у групп с хронической депривацией сна, сменных работников, людей с субклиническими нарушениями сна или экстремальными хронотипами.

## Выводы

Беспроводное устройство Dreem представляет интерес не только для пользователей, желающих улучшить качество сна, но и как инструмент для исследований сна в привычных для человека условиях. Авторы разработки привлекают желающих к участию в процессе оптимизации алгоритмов детекции сна и акустической стимуляции, широкая пользовательская база позволяет им опираться на большие наборы данных в дальнейших исследованиях.

Используемые алгоритмы эффективно проводят ЭЭГ-синхронизированную звуковую стимуляцию. При отключении режима стимуляции устройство представляет большой интерес для различных популяционных исследований, оценки параметров сна у групп с хронической депривацией сна, сменных работников, людей с субклиническими нарушениями сна или экстремальными хронотипами.

## Библиографический список / References

Низкочастотная электрокожная стимуляция кисти руки во время медленноволновой стадии ночного сна: физиологические и терапевтические эффекты / Индурский П.А., Маркелов В.В., Шахнарович В.М., Дорохов В.Б. // Физиология человека. 2013. Т. 39. № 6. С. 91–105. [Indursky P.A., Markelov V.V., Shakhnarovich V.M., Dorokhov V.B. Low-frequency rhythmic electrocutaneous hand stimulation during slow-wave night sleep: Physiological and therapeutic effects. *Human Physiology*. 2013. Vol. 39. № 6. Pp. 642–654.]

Полуэктов М.Г. Современные представления о природе и методах лечения инсомнии // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 2012. Т. 98. № 10. С. 1188–1199. [Poluektov M.G. Origin and treatment of insomnia: Current status of knowledge. *Russian Journal of Physiology*. 2012. Vol. 98. № 10. Pp. 1188–1199.]

Улучшение качества ночного сна посредством подпороговой электрокожной стимуляции, синхронизированной с медленноволновыми фазами / Гуляев Ю.В., Бугаев А.С., Индурский П.А. и др. // Доклады Академии наук. 2017. Т. 474. № 6. С. 770–773. [Gulyaev Yu.V., Bugaev A.S., Indursky P.A. et al. The Phenomenon of Involving Weak Afferent Signals in Neuronal Synchronization Mechanisms in during Delta-Range Sleep. *Doklady Akademii Nauk*. 2017. Vol. 474. № 6. Pp. 770–773.]

Achermann P., Borbely A.A. Low-frequency (< 1 Hz) oscillations in the human sleep electroencephalogram. *Neuroscience*. 1997. Vol. 81. № 1. Pp. 213–222.

Arbon E.L., Knuruwska M., Dijk D.-J. Randomised clinical trial of the effects of prolonged-release melatonin, temazepam and zolpidem on slow-wave activity during sleep in healthy people. *J. Psychopharmacol.* 2015. Vol. 29. № 7. Pp. 764–776.

Arnal P.J., El Kanbi K., Debellemanniere E., et al. Auditory closed-loop stimulation to enhance sleep quality. *J. Sci. Med. Sport*. 2017. Vol. 20. P. S95.

Bellesi M., Riedner B.A., Garcia-Molina G.N., et al. Enhancement of sleep slow waves: Underlying mechanisms and practical consequences. *Front. Syst. Neurosci.* 2014. Vol. 8. P. 208.

Besedovsky L., Ngo H.-V.V., Dimitrov S., et al. Auditory closed-loop stimulation of EEG slow oscillations strengthens sleep and signs of its immune-supportive function. *Nat. Commun.* 2017. Vol. 8. № 1. P. 1984.

Cauter E. Van, Spiegel K., Tasali E., Leproult R. Metabolic consequences of sleep and sleep loss. *Sleep Med.* 2008. Vol. 9. Pp. S23–S28.

Chambon S. et al. A Deep Learning Architecture for Temporal Sleep Stage Classification Using Multivariate and Multimodal Time Series. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* 2018. Vol. 26. № 4. Pp. 758–769.

Copinschi G., Leproult R., Spiegel K. The important role of sleep in metabolism. *How Gut and Brain Control Metabolism*. Karger Publishers, 2014. Pp. 59–72.

Cox R., Korjoukov I., de Boer M., Talamini L.M.. Sound Asleep: Processing and Retention of Slow Oscillation Phase-Targeted Stimuli. *PLoS One*. 2014. Vol. 9. № 7. P. e101567.

Debellemanni E., Chambon S., Pinaud C., et al. Performance of an Ambulatory Dry-EEG Device for Auditory Closed-Loop Stimulation of Sleep Slow Oscillations in the Home Environment. *Front. Hum. Neurosci.* 2018. Vol. 12. P. 88.

Dickelmann S. Sleep for cognitive enhancement. *Front. Syst. Neurosci.* 2014. Vol. 8. P. 46.

Dickelmann S., Born J. The memory function of sleep. *Nat. Rev. Neurosci.* 2010. Vol. 11. № 2. P. 114.

Huber R., Ghilardi M.F., Massimini M., Tononi G. Local sleep and learning. *Nature*. 2004. Vol. 430. № 6995. P. 78.

Leminen M.M., Virkkala J., Saure E., et al. Enhanced Memory Consolidation Via Automatic Sound Stimulation During Non-REM Sleep. *Sleep*. 2017. Vol. 40. № 3. zsx003.

Maret S., Faraguna U., Nelson A.B. et al. Sleep and waking modulate spine turnover in the adolescent mouse cortex. *Nat. Neurosci.* 2011. Vol. 14. № 11. P. 1418.

Marshall L., Helgadóttir H., Mölle M., Born J. Boosting slow oscillations during sleep potentiates memory. *Nature*. 2006. Vol. 444. № 7119. P. 610–613.

Massimini M., Ferrarelli F., Esser S.K. et al. Triggering sleep slow waves by transcranial magnetic stimulation. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2007. Vol. 104. № 20. Pp. 8496–8501.

Matteson-Rusby S.E., Pigeon W.R., Gehrman P., Perlis M.L. Why treat insomnia? *Prim. Care Companion J. Clin. Psychiatry*. 2010. Vol. 12. № 1.

Meinzer M., Lindenberger R., Antonenko D. et al. Anodal transcranial direct current stimulation temporarily reverses age-associated cognitive decline and functional brain activity changes. *J. Neurosci.* 2013. Vol. 33. № 30. Pp. 12470–12478.

Ngo H-V.V., Miedema A., Faude I. et al. Driving Sleep Slow Oscillations by Auditory Closed-Loop Stimulation – A Self-Limiting Process. *J. Neurosci.* 2015. Vol. 35. № 17. Pp. 6630–6638.

Ngo H-V.V., Martinetz T., Born J., Mölle M. Auditory Closed-Loop Stimulation of the Sleep Slow Oscillation Enhances Memory. *Neuron*. 2013. Vol. 78. № 3. Pp. 545–553.

Oudiette D., Santostasi G., Paller K.A. Reinforcing Rhythms in the Sleeping Brain with a Computerized Metronome. *Neuron*. 2013. Vol. 78. № 3. Pp. 413–415.

Pagel J.F., Parnes B.L. Medications for the treatment of sleep disorders: An overview. *Prim. Care Companion J. Clin. Psychiatry*. 2001. Vol. 3. № 3. P. 118.

Papalambros N.A. et al. Acoustic Enhancement of Sleep Slow Oscillations and Concomitant Memory Improvement in Older Adults. *Front. Hum. Neurosci.* 2017. Vol. 11. P. 109.

Santostasi G., Malkani R., Riedner B. et al. Phase-locked loop for precisely timed acoustic stimulation during sleep. *J. Neurosci. Methods*. 2016. Vol. 259. Pp. 101–114.

Schutte-Rodin S., Broch L., Buysse D. et al. Clinical guideline for the evaluation and management of chronic insomnia in adults. *J. Clin. Sleep Med*. 2008. Vol. 4. № 05. Pp. 487–504.

Tononi G., Riedner B.A., Hulse B.K. et al. Enhancing sleep slow waves with natural stimuli. *Medicamundi*. 2010. Vol. 54. № 2. Pp. 73–79.

Vyazovskiy V.V., Cirelli C., Pfister-Genskow M. et al. Molecular and electrophysiological evidence for net synaptic potentiation in wake and depression in sleep. *Nat. Neurosci.* 2008. Vol. 11. № 2. P. 200.

Walker M.P., Helm E. van Der. Overnight therapy? The role of sleep in emotional brain processing. *Psychol. Bull.* 2009. Vol. 135. № 5. P. 731.

Wilckens K.A., Ferrarelli F., Walker M.P., Buysse D.J. Slow-Wave Activity Enhancement to Improve Cognition. *Trends Neurosci.* 2018. Vol. 41. № 7. Pp. 470–482.

Статья поступила в редакцию 06.12.2018, принята к публикации 14.01.2019

The article was received on 06.12.2018, accepted for publication 14.01.2019

Сведения об авторах / About the authors

**Пучкова Александра Николаевна** – кандидат биологических наук; старший научный сотрудник лаборатории нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва

**Puchkova Alexandra N.** – PhD in Biology; senior research fellow at the Laboratory of Sleep and Wakefulness Neurobiology, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology RAS, Moscow

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2292-6475>

E-mail: puchkovaan@gmail.com

**Ткаченко Ольга Николаевна** – кандидат биологических наук; научный сотрудник лаборатории нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва

**Tkachenko Olga N.** – PhD in Biology; research fellow at the Laboratory of Sleep and Wakefulness Neurobiology, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology RAS, Moscow

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5100-8980>

E-mail: tkachenkoon@gmail.com

**Трапезников Игорь Петрович** – аспирант лаборатории нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва

**Trapeznikov Igor P.** – post-graduate student of the Laboratory of Sleep and Wakefulness Neurobiology, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology RAS, Moscow

E-mail: trapeznikovip@ihna.ru

**Пилецкая Инга Александровна** – лаборант лаборатории нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва

**Piletskaya Inga A.** – Lab assistant at the Laboratory of Sleep and Wakefulness Neurobiology, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology RAS

E-mail: enga1997@yandex.ua

**Тиунова Екатерина Васильевна** – лаборант лаборатории нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва

**Tiunova Ekaterina V.** – Lab assistant at the Laboratory of Sleep and Wakefulness Neurobiology, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology RAS, Moscow

E-mail: tiunova.katia96@gmail.com

**Сафонова Маргарита Михайловна** – лаборант лаборатории нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва

**Sazonova Margarita M.** – Lab assistant at the Laboratory of Sleep and Wakefulness Neurobiology, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology RAS, Moscow

E-mail: margaritka361@gmail.com

**Таранов Антон Олегович** – младший научный сотрудник лаборатории нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва

**Taranov Anton O.** – junior researcher at the Laboratory of Sleep and Wakefulness Neurobiology, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology RAS

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4905-8249>

E-mail: psy.msu.ru@gmail.com

**Груздева Светлана Сергеевна** – младший научный сотрудник лаборатории нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва

**Gruzdeva Svetlana S.** – junior researcher at the Laboratory of Sleep and Wakefulness Neurobiology, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology RAS

E-mail: svetlanagruzdeva25@gmail.com

**Дорохов Владимир Борисович** – доктор биологических наук; заведующий лабораторией нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва

**Dorokhov Vladimir B.** – Dr. Hab. in Biology; head at the Laboratory of Neurobiology of Sleep and Wakefulness, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of the Russian Academy of Sciences

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3533-9496>

E-mail: vbdorokhov@mail.ru

Заявленный вклад авторов

А.Н. Пучкова – анализ текущего состояния исследований в области стимуляции во сне, подготовка теоретического обзора, подготовка текста статьи

О.Н. Ткаченко – анализ данных ЭЭГ для получения вызванной активности, подготовка иллюстраций, разработка скриптов анализа данных

И.П. Трапезников – взаимодействие с разработчиками устройства, доступ к сырым данным, участие в экспериментах, подготовка иллюстраций

И.А. Пилецкая – участие в экспериментах, анализ сырых данных  
Е.В. Тиунова – участие в экспериментах, анализ сырых данных  
М.М. Сазонова – участие в экспериментах, анализ сырых данных  
А.О. Таранов – анализ сырых данных, анализ гипнограмм  
С.С. Груздева – анализ сырых данных, подготовка иллюстраций  
В.Б. Дорохов – общее руководство направлением исследования, планирование исследования, участие в подготовке текста статьи

#### Contribution of the authors

A.N. Puchkova – analysis of the current state of research in the field of stimulation during sleep; preparation of the theoretical review; preparation of the text of the article

O.N. Tkachenko – analysis of EEG data to obtain evoked activity, preparation of illustrations and of data analysis scripts

I.P. Trapeznikova – interaction with device developers, access to raw data, participation in experiments, preparation of illustrations

I.A. Piletskaya – participation in experiments, analysis of raw data

E.V. Tiunova – participation in experiments, analysis of raw data

M.M. Sazonova – participation in experiments, analysis of raw data

A.O. Taranov – raw data analysis, hypnogram analysis

S.S. Gruzdeva – analysis of raw data, preparation of illustrations

V.B. Dorokhov – general direction of research, research planning, participation in the preparation of the text of the article

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

All authors have read and approved the final manuscript