

6. Franceschini M.A., Fantini S., Paunescu L.A., Maier J.S., Gratton E. Influence of a superficial layer in the quantitative spectroscopic study of strongly scattering media // Journal of Applied Optics. 1998. Vol. 37. № 31. PP. 7447-7458.
7. Dehaes M., Grant P.E., Sliva D.D., Roche-Labarbe N., Pienaar R., Boas D.A., Franceschini M.A., Selb J. Assessment of the frequency-domain multi-distance method to evaluate the brain optical properties: Monte Carlo simulations from neonate to adult // Biomedical Optics Express. 2011. Vol. 2. № 3. PP. 552-567.

Лариса Петровна Сафонова,
канд. техн. наук, доцент,
Андрей Борисович Селиверстов,
студент 4-го курса,
кафедра «Медико-технические информационные технологии»,
факультет «Биомедицинская техника»,
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Москва,
e-mail: larisa.safonova@gmail.com

Л.Н. Анищенко, А.А. Демендеев, С.И. Ивашов

Использование радиолокации для бесконтактной оценки паттернов дыхания и двигательной активности человека во сне

Аннотация

Доказана возможность использования метода биорадиолокации с целью обнаружения нарушений дыхания во сне. Приведены технические характеристики биорадиолокатора, который может быть использован для бесконтактного мониторинга физиологических параметров человека в течение сна в условиях длительной изоляции. Предложен алгоритм выделения эпизодов двигательной активности из регистрируемого биорадиолокатором сигнала. Приведены результаты обработки биорадиолокационных данных, зарегистрированных в ходе международного научного проекта «МАРС-500» по имитации пилотируемого полета на Марс.

Сон, составляя треть жизни человека, представляет собой периодический процесс изоляции от внешних стимулов, прежде всего зрительных, и является сложным динамическим состоянием. Среди группы факторов, влияющих на сон, важнейшее место занимает стресс. Сложная внутренняя организация сна под влиянием стрессов изменяется и имеет разнообразные физиологические и патофизиологические проявления [1]. Одним из проявлений стресса является возникновение и учащение эпизодов апноэ и гипопноэ во сне.

Для того чтобы обеспечить эффективную профилактику нарушений сна и дыхания, вызванных стрессом, необходимо вовремя обнаружить проявление данных нарушений и предпринять профилактические меры.

В настоящее время в специализированных сомнологических лабораториях для выявления нарушений сна и дыхания во сне применяется дорогостоящий и трудоемкий метод полисомнографии. Он требует наложения значительного количества контактных датчиков и электродов на поверхность тела человека, что сказывается на качестве сна испытуемого. Таким образом, создание бесконтактного метода, позволяющего обеспечивать профилактику нарушений дыхания во сне, является актуальной задачей биомедицинской инженерии. Данная задача может быть решена при помощи метода биорадиолокации [2]. К его достоинствам, кроме отсутствия контакта с телом пациента, следует отнести также простоту и безопасность проведения обследования, что позволяет использовать метод биорадиолокации испытуемым на дому самостоятельно.

Аппаратура и методика проведения эксперимента

В 2006 году в лаборатории дистанционного зондирования МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках национального проекта «Образование» был разработан уникальный многочастотный биорадиолокатор, имеющий следующие технические характеристики:

- частотный диапазон, ГГц: 3,6...4,0;
- количество частот: 16;
- частота дискретизации, Гц: 62,5;

- частоты регистрируемых сигналов, Гц: 0,03...10;
- динамический диапазон регистрируемых сигналов, дБ: 60;
- размеры антенного блока, мм: 120 x 50 x 50.

Безопасность использования данного биорадиолокатора подтверждена протоколом испытаний, проведенных в Испытательном центре медицинских изделий АНО «ВНИИИМТ» в 2009 году.

С целью подтверждения возможности использования биорадиолокатора, разработанного в лаборатории дистанционного зондирования МГТУ им. Н.Э. Баумана, для регистрации сигнала дыхания и двигательной активности человека в течение сна и выработки соответствующей методики проведения обследования, в 2009 году были выполнены эксперименты на базе студенческого санатория-профилактория МГТУ им. Н.Э. Баумана [3]. Результатом проделанной работы стало включение биорадиолокационного эксперимента по оценке параметров дыхания и двигательной активности в течение сна в международный научный проект «МАРС-500» по имитации пилотируемого полета на Марс, который проводился на базе ГНЦ РФ – Институт медико-биологических проблем (ИМБП) РАН с июня 2010 года по ноябрь 2011 года [4]. До начала экспериментов было получено одобрение этического комитета ИМБП и информированное согласие всех членов экипажа. Команда «МАРС-500» была обучена методике проведения экспериментов по регистрации параметров дыхания и движения при помощи биорадиолокатора.

В ходе эксперимента прибор располагался около кровати, антенный блок направлялся на область, где в течение сна должна была находиться грудная клетка испытуемого. Биорадиолокационный сигнал регистрировался в течение всего времени сна. На *рис. 1* представлена фотография проведения биорадиолокационного эксперимента членом экипажа «МАРС-500».

По окончании эксперимента диск с записанными на него биорадиолокационными данными посредством шлюза передавался членом экипажа координаторам эксперимента. Всего в течение проекта «МАРС-500» было проведено 7 серий биорадиолокационных экспериментов для каждого из членов экипажа.



Рис. 1. Биорадиолокационный эксперимент

Результаты обработки экспериментальных данных

Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием программного пакета «MATLAB» и состояла из нескольких этапов. Вначале биорадиолокационный сигнал s_{np} фильтровался при помощи цифрового фильтра низких частот (ФНЧ) Баттерворта 8-го порядка с частотой среза, равной 0,05 Гц. Данный фильтр использовался для устранения дрейфа средней линии, вызванного низкочастотными перемещениями тела человека, не связанными с дыханием и сердцебиением. Обозначим полученный в результате процедуры фильтрации сигнал $s_{ФНЧ}$. На следующем этапе обработки осуществлялось распознавание интервалов записи, в течение которых наблюдались артефакты движения.

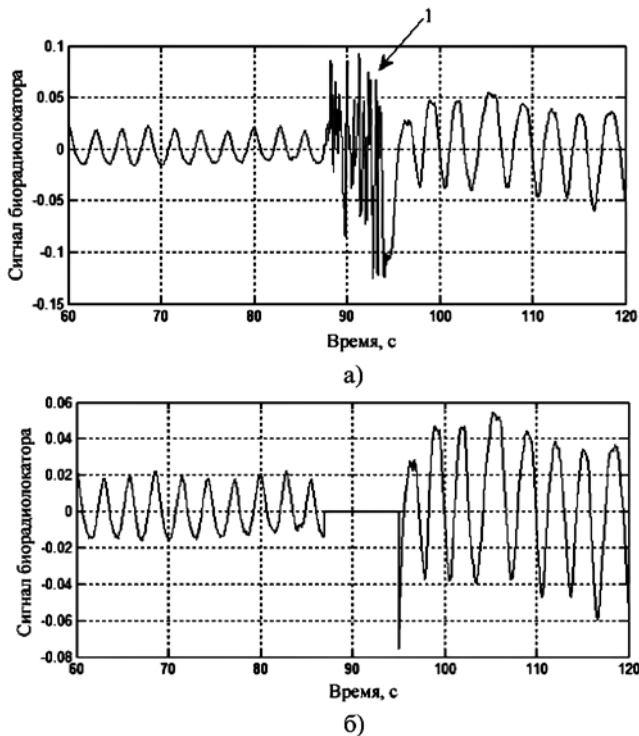


Рис. 2. Биорадиолокационный сигнал до (а) и после (б) выделения артефактов движения: 1 – артефакт движения

Очевидно, что уровни принимаемого сигнала, соответствующие периодам спокойного дыхания и артефактам движения, значительно отличаются, так как амплитуда перемещений при движениях может на порядок пре-

вышать амплитуду колебаний грудной клетки при дыхании (1...2 см в передне-заднем направлении [5]).

Однако основная проблема в распознавании артефактов движения состоит в том, что в течение сна пациент может переворачиваться, меняя таким образом расстояние от антенного блока до поверхности грудной клетки. В результате уровень регистрируемого сигнала может значительно изменяться (рис. 2а). Поэтому осуществить выделение артефактов движения исключительно на основе пороговой обработки с фиксированным уровнем порога не представляется возможным.

Было замечено, что эпизоды сигнала, соответствующие артефактам движения, содержат, в том числе, и компоненты с частотами выше 1,0 Гц, в то время как для эпизодов, соответствующих спокойному дыханию, характерен диапазон 0,1...0,6 Гц. Данное различие в спектральном составе было использовано при создании алгоритма выделения артефактов движения.

Сигнал $s_{ФНЧ}$ подавался на фильтр верхних частот с частотой среза 1,0 Гц. Обозначим результирующий сигнал $s_{ФВЧ}$. Очевидно, что в силу используемых в ФВЧ и ФНЧ частот срезов разностный сигнал $s_{ФНЧ} - s_{ФВЧ}$ будет содержать лишь артефакты движения. Так как частота дыхания (ЧД) может быть оценена только на интервалах, в течение которых отсутствуют артефакты движения, соответствующие им промежутки $s_{ФВЧ}$ обнуляются и в дальнейшем анализе варибельности ЧД не участвуют. Результаты работы данного алгоритма представлены на рис. 2б.

По экспериментальным данным оценивали время засыпания, продолжительность сна, динамику изменения ЧД и двигательной активности во сне. Время засыпания испытуемых рассчитывали как время от начала записи до наступления участка спокойного сна продолжительностью не менее 10 мин. Для удобства описания в данной статье членам экипажа «МАРС-500» присвоены условные номера от 1 до 6.

Как видно из табл. 1, для большинства испытуемых наибольшее время засыпания характерно для второй серии экспериментов, приходящейся на третий месяц изоляции, что можно объяснить периодом адаптации к условиям изоляции на станции. После прохождения этого периода для большинства испытуемых характерно снижение времени засыпания. Наименьшим образом на продолжительности засыпания изоляция сказалась в случае члена экипажа под № 4. В отличие от других испытуемых у № 4 прослеживается тенденция к постепенному снижению времени засыпания на протяжении изоляции (рис. 3). Кроме того, для него характерно минимальное время засыпания на протяжении всего проекта.

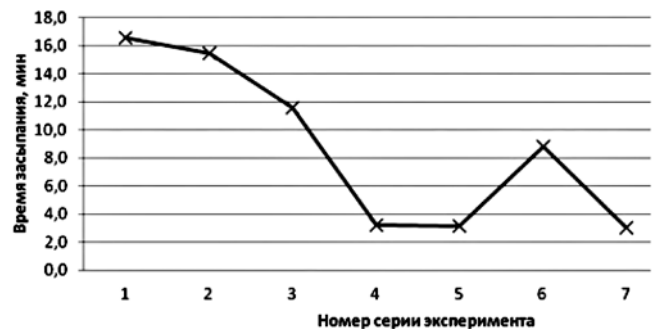


Рис. 3. График изменения времени засыпания для испытуемого № 4 на протяжении всех серий эксперимента

Под временем сна понималась продолжительность записи без учета времени засыпания и времени, которое требовалось испытуемому на выключение записи. Последнее рассчитывалось как интервал в конце записи, в течение которого отсутствовали участки спокойного дыхания продолжительностью более 10 мин. Результаты обработки экспериментальных данных приведены в табл. 2.

Для большинства членов экипажа характерной тенденцией являлось снижение времени сна в первой половине проекта (до этапа имитации высадки на поверхность Марса, которая произошла в феврале 2011 года). Длительность сна возрастала для большинства испытуемых к концу проведения проекта. В качестве примера на рис. 4 приведены данные по испытуемому № 5.

Также оценивалась продолжительность времени сна, в течение которого в записи наблюдались артефакты движения. Этот параметр позволяет оценить степень тре-

возности сна. Для наглядности суммарная длительность артефактов движения оценивалась в процентах от времени сна. Результаты приведены в табл. 3.

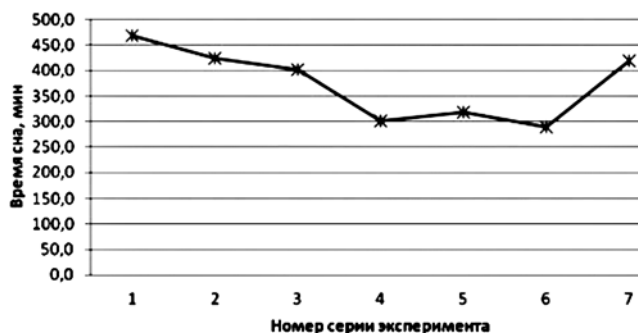


Рис. 4. График изменения времени сна для испытуемого № 5 на протяжении всех серий эксперимента

Таблица 1

Время засыпания испытуемых

Условный номер испытуемого	Время засыпания, мин					
	1	2	3	4	5	6
Июнь 2010	28,2	40,7	13,7	16,5	23,5	31,0
Август 2010	51,1	28,8	16,0	15,5	104,3	125,7
Октябрь 2010	40,9	37,6	34,5	11,6	83,4	27,0
Январь 2011	20,0	33,1	20,7	3,2	45,7	22,0
Май 2011	10,3	39,6	60,5	3,2	63,3	64,7
Июль 2011	36,3	15,1	36,2	8,8	31,3	–
Сентябрь 2011	54,9	34,6	56,2	3,0	42,9	85,1
Среднее время засыпания ± СКО, мин	34,5 ± 15,0	32,8 ± 8,1	34,0 ± 17,4	8,8 ± 5,5	56,4 ± 26,9	59,2 ± 37,3

Таблица 2

Время сна испытуемых

Условный номер испытуемого	Время сна, мин					
	1	2	3	4	5	6
Июнь 2010	404,2	518,4	501,3	361,2	468,6	381,7
Август 2010	361,6	450,3	472,8	467,2	423,8	327,3
Октябрь 2010	318,8	485,4	404,4	422,6	401,3	404,4
Январь 2011	454,6	453,9	353,7	343,1	301,1	473,3
Май 2011	211,4	448,9	355,9	342,3	318,9	357,0
Июль 2011	417,9	329,1	277,3	379,7	288,5	–
Сентябрь 2011	512,9	395,4	436,4	323,4	418,5	396,5
Среднее время сна ± СКО, мин	383,0 ± 90,8	440,2 ± 57,2	400,3 ± 71,8	377,1 ± 47,3	374,4 ± 65,3	390,0 ± 45,3

Таблица 3

Длительность артефактов движения

Условный номер испытуемого	Длительность артефактов движения, %					
	1	2	3	4	5	6
Июнь 2010	5,9	7,1	3,1	3,3	2,2	7,7
Август 2010	3,5	8,1	2,2	4,9	6,7	11,6
Октябрь 2010	7,5	4,1	3,2	5,1	4,6	7,1
Январь 2011	5,9	5,7	2,3	3,9	4,5	7,8
Май 2011	7,0	6,0	1,6	4,8	3,8	8,2
Июль 2011	4,9	2,4	3,7	4,1	3,5	–
Сентябрь 2011	5,9	6,1	4,5	1,2	4,8	8,3
Средний процент ± СКО, %	5,8 ± 1,2	5,6 ± 1,7	2,9 ± 0,9	3,9 ± 1,3	4,3 ± 1,3	8,5 ± 1,5

Заключение

Результаты обработки экспериментальных данных показали индивидуальные особенности засыпания и сна членов экипажа: длительное засыпание и более беспокойный сон у одних и быстрое засыпание и более спокойное и ровное дыхание у других. Длительность сна каждого испытуемого в течение проекта изменялась индивидуально. У четырех из шести членов экипажа на протяжении первых трех серий экспериментов зафиксировано снижение длительности сна более чем на 10 %. В дальнейшем сколько-нибудь значимых изменений контролируемых параметров (частоты дыхания – ЧД – и продолжительности двигательных артефактов во сне) не происходило, что свидетельствует о хорошей переносимости условий длительной изоляции экипажем. У всех членов экипажа нарушений дыхания во сне не обнаружено.

Обработка биорадиолокационных данных позволила выявить у испытуемого № 6 тенденцию к увеличению продолжительности артефактов движения по отношению к длительности всего времени сна. При этом было также выявлено уменьшение продолжительности сна и увеличение времени засыпания, что свидетельствовало о снижении качества сна у рассматриваемого испытуемого. Аналогичный вывод по качеству сна исследователя № 6 был получен по результатам обработки данных контактных методов (электроэнцефалограммы и актограммы) для соответствующих временных отрезков проекта «МАРС-500». Столь значительное изменение паттерна сна объяснялось тем фактом, что начиная с 8-го месяца изоляции у испытуемого № 6 произошло смещение суточных ритмов, что повлияло на продолжительность ночного сна, время отхода ко сну и пробуждения: иногда испытуемый спал меньше 2 ч за ночь и при этом мог проспать 6 ч днем. Данный факт объясняет большое количество артефактов в записях по данному испытуемому.

У некоторых испытуемых при детальном анализе биорадиолокационных записей сна были выявлены участки гипопноэ – уменьшения дыхательного потока на 30 % или более не менее чем на 10 с (рис. 5). Данные эпизоды не были классифицированы как нарушение сна, так как индекс апноэ/гипопноэ не превышал 3, что в соответствии с используемой в сомнологии классификацией называется физиологическим апноэ и может наблюдаться у практически здоровых людей [6].

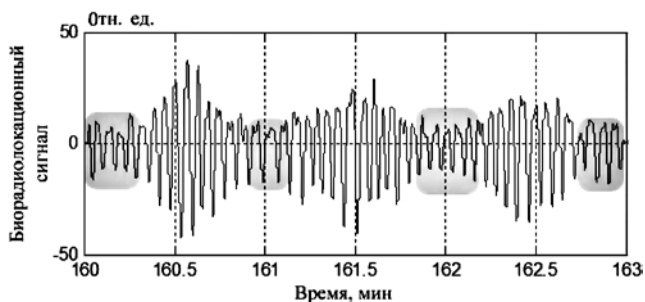


Рис. 5. Фрагмент записи испытуемого № 1 (участки гипопноэ выделены более темным фоном)

Проведенные эксперименты подтвердили возможность использования метода биорадиолокации для контроля паттернов дыхания и двигательной активности людей, находящихся в условиях длительной изоляции. В дальнейшем планируется провести эксперименты по одновременной регистрации данных полисомнографического обследования и биорадиолокации с целью проверки возможности распознавания различных фаз сна, исходя из динамики вариабельности ЧД.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ МК-118.2011.9, задания Минобрнауки 7.305.2011, а также грантов Российского фонда фундаментальных исследований.

Список литературы:

1. Китаев-Смык Л.А. Психология стресса. – М.: Наука, 1983.
2. Биорадиолокация / Коллективная монография под ред. А.С. Бугаева, С.И. Ивашова, И.Я. Иммореева. – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 398 с.
3. Анищенко Л.Н. Разработка технологии и программно-аппаратного комплекса биорадиолокационного мониторинга двигательной активности, дыхания и пульса / Дис. ...канд. техн. наук. – М., 2009. 188 с.
4. Анищенко Л.Н., Дьяченко А.И. Эксперимент «Биораскан» дистанционного измерения параметров дыхания / Сайт проекта «МАРС-500». http://mars500.imbp.ru/520_sci_experiments/520_bioraskan.html.
5. Дьяченко А.А. Брюшной и грудной компоненты дыхательных движений. Биорадиолокация / Под ред. А.С. Бугаева, С.И. Ивашова, И.Я. Иммореева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С. 52.
6. Вегетативные расстройства: клиника, диагностика, лечение / Под ред. А.М. Вейна. – М.: ООО «Медицинское информационное агентство», 2003. С. 698.

*Леся Николаевна Анищенко,
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,
Андрей Андреевич Демендеев,
лаборант-исследователь,
Сергей Иванович Ивашов,
канд. техн. наук, зав. лабораторией,
лаборатория дистанционного зондирования
научно-исследовательской части
научно-учебного комплекса «Фундаментальные науки»,
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Москва,
e-mail: anishchenko@rslab.ru*