

УДК 612.816,534.7

АКУСТОМИОГРАФИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ, СНИМАЕМЫЕ С ГОЛОВЫ ЧЕЛОВЕКА, – НОВЫЙ КАНАЛ ПОЛУЧЕНИЯ ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

© 2019 г. В. И. Миргородский¹, *, В. Б. Дорохов², В. В. Герасимов¹, С. В. Пешин¹

¹Фрязинский филиал ФГБУН Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская область, Россия

²ФГБУН Институт высшей нервной деятельности, РАН, Москва, Россия

*E-mail: vim288@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 12.04.2018 г.

После доработки 15.01.2019 г.

Принята к публикации 04.02.2019 г.

Целью работы было выяснение происхождения импульсных акустических сигналов, обнаруженных впервые авторами с отведений, расположенных на висках испытуемых, находящихся в состоянии покоя. Исследования проводились в режиме одновременной регистрации акустических, электроэнцефалографических и электромиографических сигналов на испытуемых, находящихся в состоянии покоя. Были обнаружены корреляции акустических сигналов с электромиографическими сигналами при расположении акустических приемников на висках, а электромиографических электродов на соответствующих височных мышцах. Так же были обнаружены корреляции акустических сигналов и электромиографических сигналов при расположении акустических приемников и электромиографических электродов на бицепсах. Найденные корреляции указывают на общую природу наблюдаемых акустических сигналов и электромиографических сигналов, и позволяют их классифицировать как спонтанные акустомиографические сигналы, наблюдаемые в состоянии покоя испытуемых. Это указывает на возможность использовать импульсные акустомиографические сигналы для целей медицинской диагностики подобно использованию электромиографических сигналов.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, электромиография, акустомиография, корреляция.

DOI: 10.1134/S0131164619030123

Основное внимание в процессе медицинской диагностики на основе анализа принимаемых из испытуемого акустических сигналов уделяется рассмотрению акустических сигналов, связанных с сердечной деятельностью: течением крови в теле испытуемых [1], в голове [2], шумам Короткова при измерениях давления [3] т.д. С помощью анализа акустических сигналов, связанных с дыханием [4], осуществляется диагностика респираторной системы. Состояние органов слуха оценивается по отоакустическим сигналам [5]. Состояние мышечной системы анализируется по электрическим и акустическим миографическим сигналам [6, 7]. В работе [6] было впервые предложено использовать акустомиографический сигнал для непосредственного контроля сокращения мышц в диагностических целях. По сути дела биофизический механизм акустомиографии состоит в том, что движения мышц и являются акустическими сигналами, которыми, как известно, являются колебания частиц материи. Отметим, что регистрация акустомиографических сигналов

осуществлялась на конечностях испытуемых во время выполнения ими работы [6, 7], и, насколько известно, не проводилась на голове испытуемых в состоянии покоя.

Таким образом, прием акустических сигналов позволяет диагностировать целый ряд патологий, что и определяет широкое распространение этих методов на практике. Это стимулирует развитие новых технологий приборов для приема акустических сигналов из тела испытуемого таких, например, как электронных стетоскопов [8], с помощью одной разновидности которых, разработанной нами [9, 10], и была выполнена данная работа.

МЕТОДИКА

Поскольку цель работы – выяснение природы обнаруженных ранее акустических сигналов (АС) [9], то для ее выполнения проводили поиск корреляций обнаруженных сигналов с другими сигналами, регистрируемыми с тела человека. Для

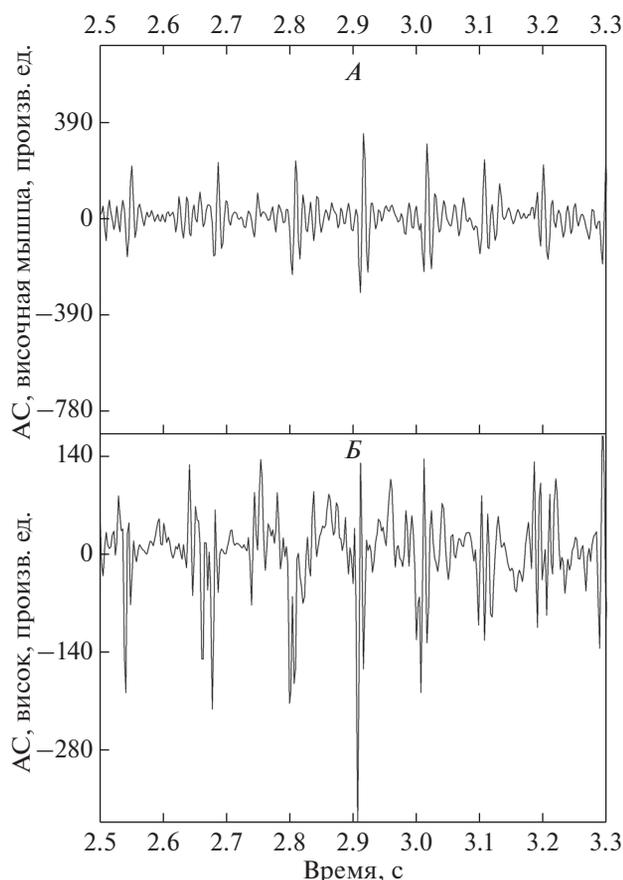


Рис. 1. Зависимости от времени АС при расположении первого приемника на височной мышце над левым ухом испытуемого (А) и АС при расположении второго приемника на левом виске испытуемого (Б).

этого использовали не только регистрацию АС, но и регистрацию электрических сигналов электроэнцефалографического типа (ЭЭГ) и электромиографического типа (ЭМГ).

Снимали ЭЭГ- и ЭМГ-сигналы с помощью стандартных электродов для ЭЭГ с золотым покрытием.

Для осуществления электрического контакта использовали гель типа “Унимакс”, а для акустического контакта использовали гель типа “Меди-агель” — оба производства фирмы “Гельтек-Медика”.

Регистрацию АС осуществляли как в работе [9]. Для регистрации сигналов ЭЭГ и ЭМГ использовали усилители с входным сопротивлением 1 ГОм, типа “Беспроводной 8-ми каналный усилитель биопотенциалов “BR8” выпускаемые фирмой “Biorecorder”, полоса пропускания усилителя составляла 10 кГц, а частота оцифровки 500 Гц.

При проведении экспериментов, для контроля принимаемых сигналов использовали программы “EDF Browser” и “PowerGraph Professional”.

В процессе выполнения экспериментов, осуществляли регистрацию сигналов по четырем независимым каналам, по двум из которых записывали АС, а по двум другим записывали электрические сигналы ЭЭГ или ЭМГ типа. В качестве референтного отведения при регистрации ЭЭГ использовали отведение на мастоиде испытуемого. Сигналы сохраняли на жестком диске компьютера для дальнейшей обработки.

В экспериментах принимали участие 15 испытуемых добровольцев мужского пола, в возрасте 50–70 лет.

При экспериментах на голове акустические датчики устанавливали на висках или вблизи висков испытуемых, а электроды для регистрации ЭЭГ и ЭМГ на отведениях с левой стороны головы $P_3, C_3, F_3, T_5, T_3, F_7$ и соответственно с правой $P_4, C_4, F_4, T_6, T_4, F_8$.

При экспериментах с датчиками на руках акустические приемники устанавливали на бицепсах испытуемых вместе с ЭМГ-электродами.

Каждый эксперимент состоял из двух этапов. На первом этапе длительностью 15 мин испытуемого, лежа с закрытыми глазами, как и в [9], мотивировали на умственную деятельность, которая заключалась в произнесении про себя таблицы умножения. На втором этапе длительностью так же 15 мин, испытуемого, как и в работе [9], мотивировали на релаксацию, в процессе которой нередко происходило засыпание.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Акустические сигналы. На начальном этапе исследований осуществлялся поиск корреляций между акустическими сигналами, снимаемыми с отведений на разных участках тела испытуемых.

В результате были обнаружены корреляции АС при следующих расположениях акустических приемников: 1) одного акустического приемника в височной впадине, а другого вблизи виска, на котором располагался акустический приемник, как правило, в области над ушами испытуемых, 2) при расположениях обоих акустических приемников на бицепсе (левом или правом) испытуемых.

На рис. 1 представлены характерные формы волн (в зависимости от времени) акустических сигналов, полученных при расположении одного из приемников на левой височной впадине, а другого над левым ухом испытуемого.

На рис. 1 наблюдаются импульсные сигналы длительностью около 3–4 мс с частотой повторения около 10 Гц, подобные АС (тем, что были зарегистрированы в работе [9]), при этом видна корреляция сигналов в разных каналах. Частотный спектр этих сигналов простирается до частоты примерно 200 Гц. Следует оценить численную

величину корреляции представленных на графиках сигналов. Для этого с помощью программы *Origin* рассчитывают коэффициент корреляции Пирсона. Расчет дает значение 0.52 при величине статистической значимости $p < 0.001$.

Аналогичная картина наблюдалась и при расположении акустических приемников справа.

Была выполнена серия из 11-ти экспериментов на 4-х испытуемых, в которой один приемник располагался в височной впадине, а другой в различных положениях на голове испытуемого. В результате, как показал анализ полученных данных, корреляции наблюдались только при расположении обоих приемников в области одной височной мышцы (правой или левой) [11, 12]. При расположении второго приемника на поверхности тела испытуемого за пределами соответствующей расположению первого приемника височной мышцы (в данном случае левой) в ряде случаев так же наблюдались аналогичные сигналы (длительности около 4 мс с частотой повторения около 10 Гц, аналогичные АС, обнаруженным в [9]), однако они не были синхронны с сигналами, снимаемыми с виска.

Можно отметить, что сигналы (как на рис. 1) на отведениях, расположенных на голове испытуемых, на некоторых из них наблюдались всего в 1% от времени измерений, в то время как на других — сигналы наблюдались существенно чаще — до 90% от времени измерений. Причем, как правило, во время этапов релаксации испытуемых чаще, чем во время этапов умственной деятельности.

Несколько реже подобные сигналы наблюдались при расположении акустических приемников на бицепсах 4-х испытуемых. На рис. 2 представлены зависимости от времени акустических сигналов, полученных при расположении обоих приемников на бицепсе испытуемого.

Как видно на рис. 2 и на бицепсе испытуемого наблюдаются импульсные сигналы длительностью около 3–4 мс с частотой повторения около 10 Гц, которые по своему виду (зависимостям от времени) подобны АС, обнаруженным ранее на висках испытуемых [9]. При этом видно совпадение по времени сигналов в разных каналах. Можно оценить численную величину корреляции представленных на графиках сигналов. Как показал расчет, коэффициент корреляции Пирсона в этом случае достигает величины 0.48 при значении статистической значимости $p < 0.001$.

Важно отметить, что приведенные зависимости, где наблюдаются корреляции, получены при расположении акустических приемников на одной мышце, в данном случае височной или бицепсе. В то же время, как уже отмечалось, проведенные нами многочисленные эксперименты с расположениями акустических приемников на

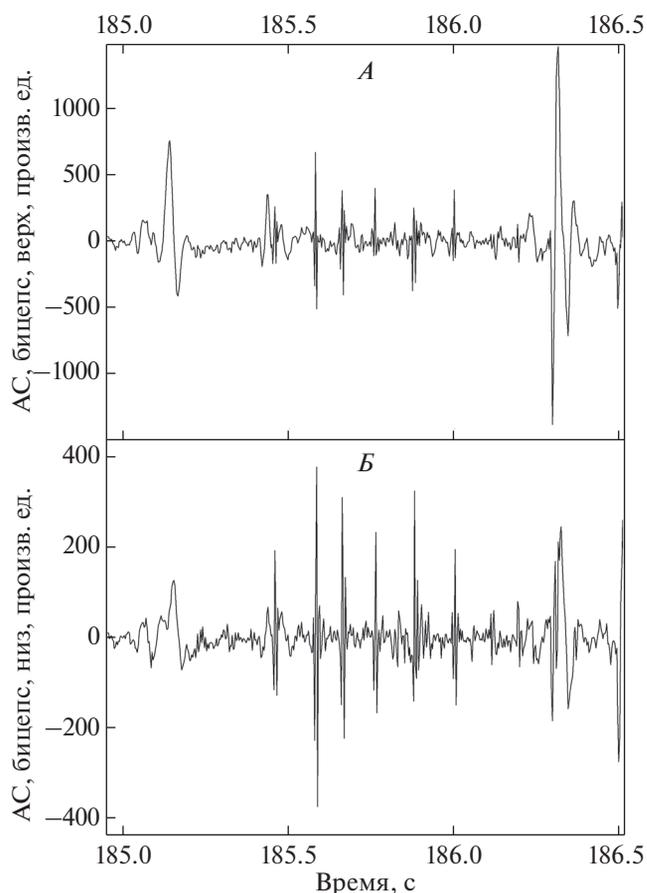


Рис. 2. Зависимости от времени АС при расположении приемников на левом бицепсе испытуемого (А) и (Б).

разных мышцах, например, первый приемник на височной мышце, а второй на височной мышце, но другой стороны головы испытуемого, на руке или ноге, хотя и сопровождалась АС типа обнаруженных в [9] однако эти сигналы от разных приемников не были коррелированы.

Сигналы (типа представленных на рис. 2) на отведениях, расположенных на конечностях испытуемых наблюдались, как и на голове испытуемых спорадически, однако реже, чем на отведениях, расположенных на голове испытуемых — обычно они наблюдались в течение от 1 до 10% от времени эксперимента.

Акустические и электрические сигналы. На следующем этапе работы, как уже отмечалось, для выяснения природы наблюдаемых акустических сигналов проводилась одновременная регистрация акустических и электрических сигналов. При этом исследовались различные комбинации расположений акустических приемников и электродов для съема электрических сигналов — ЭЭГ и ЭМГ типа, на голове, на руках и ногах испытуемых.

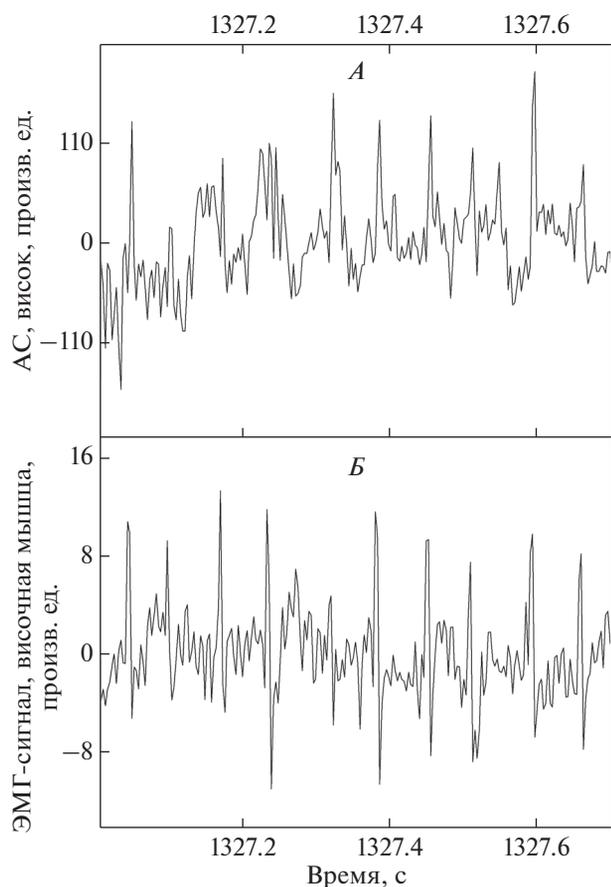


Рис. 3. Зависимости от времени АС при расположении приемника на левом виске испытуемого (А) и ЭМГ-сигнала при расположении электродов над левым ухом испытуемого (Б).

Было обработано значительное количество (более 30-ти) результатов экспериментов, в которых проводился поиск корреляционных зависимостей между АС и сигналами ЭЭГ. Корреляционной обработке подвергались огибающие ЭЭГ-сигналов (ввиду их колебательного характера), предварительно отфильтрованных α -, β -, Δ - и θ -ритмов. В результате, однако, не было получено статистически значимых корреляций акустических и ЭЭГ-сигналов.

Иная картина обнаружилась при корреляционной обработке АС- и ЭМГ-сигналов. Анализ показал, что при некоторых расположениях акустических приемников и ЭМГ-электродов удается наблюдать корреляции АС и ЭМГ электрических сигналов, а именно корреляции акустических сигналов с сигналами ЭМГ наблюдались при расположении электродов вблизи висков, на которых располагались акустические приемники, как правило, над ухом испытуемых и на бицепсах при расположении на них и акустических приемников и электродов.

Типичные зависимости АС- и ЭМГ-сигналов приведены на рис. 3.

На рис. 3 наблюдается совпадение по времени импульсов акустических и электрических сигналов. Можно оценить численную величину корреляции представленных на графиках сигналов. Как показал расчет, коэффициент корреляции Пирсона достигает величины 0.27 при величине статистической значимости $p = 1 \times 10^{-5}$. Аналогичная картина наблюдалась и при расположении акустических приемников и электродов с правой стороны головы испытуемого.

Серия из 10-ти экспериментов, в которой первый приемник располагался в височной впадине, а электроды в различных положениях на голове испытуемого показала, что корреляции наблюдаются только при расположении электродов в области той височной мышцы, на которой располагается акустический приемник.

Похожая картина наблюдалась и при расположении приемников и электродов на бицепсе испытуемого, результаты типичного эксперимента представлены на рис. 4.

Как видно на рис. 4, и в этом случае наблюдается корреляция импульсов акустических и электрических сигналов. Можно оценить численную величину корреляции представленных на графиках сигналов. По расчетам коэффициент корреляции Пирсона достигает величины -0.18 при величине статистической значимости $p = 4 \times 10^{-4}$.

Как уже отмечалось, приведенные зависимости, где наблюдаются корреляции, были получены при расположении акустических приемников и электродов на одной мышце, в данном случае на височной или бицепсе. В тоже время проведенные нами многочисленные эксперименты с расположениями акустических приемников и электродов на разных мышцах, например, акустический приемник на височной мышце, а электроды или на другой височной мышце или на руке, или на ноге, не показали наличия статистически значимых корреляций.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Первым фактом, следующим из анализа экспериментальных результатов, является наличие надежных ($p < 0.001$) корреляций импульсных периодических АС от различных отведений при условии расположения этих отведений на одной мышце — на височной или на бицепсе. Анализ возможностей реализации корреляций АС, полученных от пространственно разнесенных отведений, расположенных на одной мышце, показывает, что это и должно происходить при движении мышцы, так как при этом совершается в какой-то степени синхронизированное движение разных ее частей, это могут быть отдельные двигательные

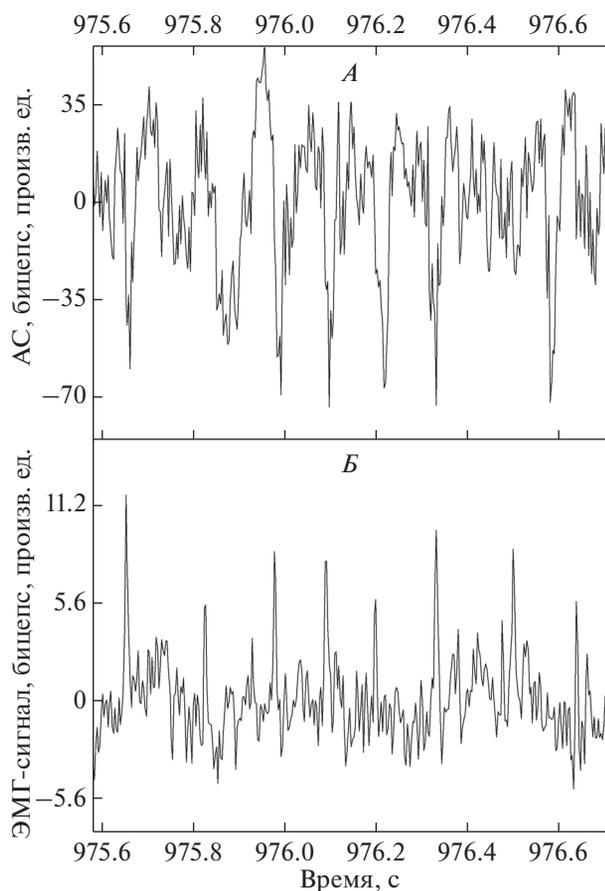


Рис. 4. Зависимости от времени АС при расположении приемника на левом бицепсе испытуемого (А) и ЭМГ-сигнала при расположении электродов на левом бицепсе испытуемого (Б).

единицы или волокна. Движения этих частей и регистрируются акустическими приемниками, расположенными на этой мышце, поэтому сигналы на выходах приемников также синхронизированы. В то же время при расположении акустических приемников на различающихся мышцах такой синхронизации не наблюдается, как и корреляций между сигналами приемников.

Вторым фактом, следующим из анализа экспериментальных результатов, является подобие временных зависимостей сигналов, наблюдаемых при расположении акустических приемников на бицепсах испытуемых, находящихся в состоянии покоя, акустическим сигналам, обнаруженным ранее на головах испытуемых [9], так же находящихся в состоянии покоя. Анализ этого подобия указывает на возможную сходную природу явлений, вызывающих эти сигналы.

Третьим фактом, следующим из анализа экспериментальных данных, являются надежные ($p < 0.001$) корреляции импульсных периодических АС- и ЭМГ-сигналов при условии располо-

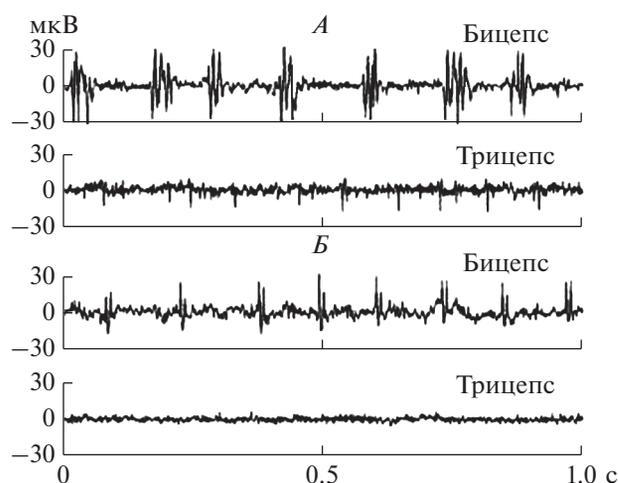


Рис. 5. ЭМГ покоя, зарегистрированные у больной 78 лет с акинетико-ригидно-дрожательной формой болезни Паркинсона (А), и ее клинически здорового сына 54 лет (Б). По оси абсцисс — время в секундах, по оси ординат — амплитуда в мкВ [13].

жения акустических приемников и ЭМГ-электродов на одной мышце — либо на височной, либо на бицепсе. Это явление объясняется тем, что при условии расположения акустических приемников и ЭМГ-электродов на одной мышце, электрический ЭМГ и акустический (отражающий, по сути дела, движения мышцы) сигналы связаны, подобно тому, как это было обнаружено в известных опытах Луиджи Гальвани. Литературный анализ показал, что корреляции между ЭМГ и АС регистрировались и ранее, например, в работе [7], однако там эти сигналы имели шумовой характер, и они наблюдались на напряженных или работающих мышцах, а не в состоянии покоя. Важно отметить, что ЭМГ-сигналы с формой, подобной формам АС, обнаруженных в [9], наблюдались ранее при электромиографических исследованиях на конечностях [6] в виде миотонических залпов.

Таким образом, в наших экспериментах были зарегистрированы ЭМГ-сигналы, аналогичные по временным зависимостям миотоническим залпам. При этом одновременно с электрическими сигналами миотонических залпов были зарегистрированы коррелированные с ними АС. Это дает основание полагать, что и природа обнаруженных в наших исследованиях АС, обнаруженных в работе [9] подобна природе явлений, при которых наблюдаются ЭМГ-сигналы типа миотонических залпов, представленных, в частности, в работе [13] и на рис. 5.

Это обстоятельство позволяет классифицировать АС как спонтанные акустомиографические сигналы, наблюдаемые в состоянии покоя испытуемых.

ЭМГ-сигналы с подобной формой обсуждались в работе [13], где было показано, что электрические сигналы типа миотонических залпов могут сопутствовать некоторым заболеваниям. В частности, в работе [13] сообщалось, что подобные миотонические залпы наблюдаются у пациентов с болезнью Паркинсона (БП) и у их родственников, даже у тех, у которых БП еще не проявилась. В данной работе было предложено рассматривать миотонические залпы как маркеры БП. На рис. 5 представлен типичный вид таких сигналов, сопутствующих БП.

Как видно из рис. 5, зависимости от времени ЭМГ-сигналов с бицепсов больной и ее сына похожи на зарегистрированные в наших работах АС- и ЭМГ-сигналы, представленные на рис. 1–4, полученные от отведений на голове и бицепсах испытуемых.

Поскольку из вышеприведенного следует подобие зависимостей от времени сигналов миотонических залпов с обнаруженными нами импульсными АС, а также наблюдаются совпадения по времени импульсов ЭМГ и АС, то логично предположить, что и эти АС так же могли бы служить для целей медицинской диагностики, аналогичной предложенной в [13]. Исследования таких возможностей представляются, на наш взгляд, целесообразными. Это следует, в частности, и из того факта, что регистрация АС в ряде случаев может оказаться предпочтительнее регистрации ЭМГ-сигналов, ввиду относительной простоты обеспечения акустического контакта по сравнению с обеспечением электрических контактов ЭМГ [6, 14].

ВЫВОДЫ

1. Обнаружены корреляции импульсных АС при их приеме из разных областей на теле испытуемых, относящихся к одной мышце. Корреляции наблюдались на височных мышцах и на бицепсах у испытуемых, находящихся в состоянии покоя.

2. При расположении акустических приемников на бицепсах испытуемых, находящихся в состоянии покоя, обнаружены импульсные периодические сигналы, подобные АС, наблюдаемым ранее на головах испытуемых [9].

3. Обнаружены корреляции АС с ЭМГ-сигналами при их съеме из областей, относящихся к одной мышце, на испытуемых находящихся в состоянии покоя. Корреляции наблюдались на височных мышцах и бицепсах.

4. Поскольку электрические сигналы, форма которых подобна наблюдаемым нами АС, практически не отличаются от известных миотонических залпов, то можно утверждать, что и природа этих явлений подобна [11]. Это позволяет класси-

фицировать обнаруженные в работе [9] АС, как спонтанные акустомиографические сигналы, наблюдаемые в состоянии покоя испытуемых.

5. Поскольку ЭМГ-сигналы применяются для целей медицинской диагностики [11], а наблюдаемые в наших экспериментах АС коррелированы с ними, то это дает основания предполагать возможность использования этих АС в диагностических целях. При этом использование АС может оказаться, как отмечается в [14], в ряде случаев удобнее, чем использование ЭМГ-сигналов.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным биоэтическим комитетом “Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН” (Москва).

Информированное согласие. Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. Исследование проводилось за счет государственного бюджета Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (Фрязино, Московская область).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shervegar M. Vishwanath, Bhat Ganesh V., Shetty Raghavendra M.K.* Phonocardiography – the future of cardiac Auscultation // J. Scientific and Engineering Research. 2011. V. 2. № 10. P. 1.
2. *Rice V.J., Lindsay G., Overby C. et al.* Human Factors Feedback: Brain Acoustic Monitor // Army Research Laboratory – TN_469, February 2012.
3. *Naqvi K.R., Parigi L., Vellani C.W., Kumar S.* Noninvasive method for determining blood pressure and contours of arterial and volume pulses // J. Biomedical Science and Engineering. 2008. V. 1. P. 79.
4. *Вовк И.В., Гринченко В.Т., Макаренко А.П.* Акустика дыхания и сердечной деятельности // Акуст. вестн. 2011. Т. 14. № 1. С. 3.
5. *Kemp D.T.* Stimulated acoustic emissions from within the human auditory system // J. Acoust. Soc. Am. Nov. 1978. V. 64. № 5. P. 1386.
6. *Daniel T. Barry, Steven R. Geiringer, Richard D. Ball.* Acoustic myography: a noninvasive monitor of motor unit fatigue // Muscle and Nerve. 1985. V. 8. № 3. P. 189.
7. *Adrian P. Harrison, Bente Danneskiold-Samsøe, Else M. Bartels.* Portable acoustic myography – a realistic noninvasive method for assessment of muscle activity

- and coordination in human subjects in most home and sports settings // *Physiol. Rep.* 2013. V. 1. № 2:e00029.
8. *Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Дьяченко А.И., Костин А.Е.* Сравнение характеристик акустических датчиков различных типов при регистрации дыхательных звуков на поверхности грудной клетки человека // *Акуст. журн.* 2013. Т. 59. № 4. С. 530.
 9. *Миргородский В.И., Герасимов В., Пешин С.В.* Обнаружение новых акустических сигналов от головы человека // *Акуст. журн.* 2014. Т. 60. № 4. С. 437.
 10. *Миргородский В.И., Герус А.В., Герасимов В.В., Пешин С.В.* Чувствительность акустических приемников с пластинчатыми пьезопреобразователями звукового – ультразвукового диапазона // *Успехи современной радиоэлектроники.* 2015. № 12. С. 3.
 11. http://www.medical-enc.ru/12/musculi_3.shtml.
 12. *Сапин М.Р., Билич Г.Л.* Анатомия человека. М.: ГЭОТАР Медиа, 2009. Т. 1. Рис. 119.
 13. *Карабань И.Н., Луханина Е.П., Березецкая Н.М., Чивликлий М.А.* Электромиографическое исследование мышечной активности у пациентов с болезнью Паркинсона и их родственников // *Международный неврологический журнал.* 2011. Т. 5. № 43.
 14. *Adrian P. Harrison.* A more precise, repeatable and diagnostic alternative to surface electromyography – an appraisal of the clinical utility of acoustic myography // *Clinical Physiology and Functional Imaging.* 2018. V. 38. № 2. P. 312.

Acoustomyographic Signals Recorded on the Human Head—a New Channel for Obtaining Physiological Information

V. I. Mirgorodsky^{a, *}, V. B. Dorokhov^b, V. V. Gerasimov^a, and S. V. Peshin^a

^a*Fryazino Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Fryazino, Russia*

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

*E-mail: vim288@ms.ire.rssi.ru

We studied the origin of pulsed acoustic signals, which had been discovered earlier in the authors' study using temporal leads in subjects at rest. The authors simultaneously recorded acoustic, electroencephalographic and electromyographic signals in subjects at rest. It was found that acoustic signals correlated with electromyographic signals with acoustic receivers placed on the temples and electromyographic electrodes located on the corresponding temporal muscles. Correlations of acoustic signals and electromyographic signals were also observed with acoustic receivers and electromyographic electrodes located on the biceps. These correlations indicate the common nature of observed acoustic signals and electromyographic signals; thus, these signals can be classified as spontaneous acoustomyographic signals observed in subjects at rest. Therefore, pulsed acoustomyographic signals can be used for the of medical diagnostics similarly to the use of electromyographic signals.

Keywords: acoustic emission, electromyography, acoustomyography, correlation.