

РЕАКЦИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОЗЫ ЧЕЛОВЕКА НА ОДИНОЧНЫЕ ЗВУКОВЫЕ СИГНАЛЫ РАЗНОГО ЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ

© 2022 г. О. П. Тимофеева¹, И. Г. Андреева^{1, *}

¹*Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН,
Санкт-Петербург, Россия*

**E-mail: ig-andreeva@mail.ru*

Поступила в редакцию 14.04.2022 г.

После доработки 28.06.2022 г.

Принята к публикации 29.06.2022 г.

Прослушивание биологически значимой звуковой информации приводит к непроизвольной поструральной подготовке для последующего двигательного ответа. В работе исследованы поструральные показатели, характеризующие изменения вертикальной позы человека в ответ на одиночные короткие биологически значимые звуковые стимулы. В первой части работы психоакустический эксперимент выполняли с применением системы невербальной изобразительной оценки при участии группы из 46 испытуемых. По его результатам были выбраны три звуковых стимула длительностью около 1 с: два негативного содержания (женский крик и звук тормоза автомобиля) и эмоционально нейтральный стимул — звонок телефона. Во второй части работы выполняли регистрацию положения центра давления (ЦД) тела в ответ на эти три стимула в группе из 21 испытуемого. Анализ данных в течение 8 с после начала стимула (время формирования пострурального ответа) выявил увеличение по сравнению с тишиной следующих стабильнометрических показателей: длины траектории перемещения ЦД, его скорости и разброса по обеим осям, площади доверительного эллипса. Данный методический прием оказался устойчивым к вариабельности латентности и амплитуды пострурального ответа. Согласно полученным результатам, короткие (менее продолжительности пострурального ответа) звуки независимо от их эмоционального содержания приводили к кратковременной небольшой дестабилизации позы. Наибольшие изменения были получены по интегральному показателю площадь доверительного эллипса, они составили 36–39% по средним данным для разных стимулов.

Ключевые слова: позный контроль, эмоционально значимые звуковые стимулы, центр давления тела, дестабилизирующее действие

DOI: 10.31857/S0869813922080088

ВВЕДЕНИЕ

Одна из ключевых функций слуховой системы состоит в получении дистантных биологически значимых сигналов. К ним могут быть отнесены сигналы о движении объектов, видоспецифические сигналы, а также сигналы, регулирующие повседневное поведение. Их интерпретация обязательно содержит эмоциональный компонент и в результате побуждает к определенным действиям. Поэтому прослушивание биологически значимой звуковой информации должно приводить к непроизвольной поструральной подготовке для последующего движения. В ходе эво-

люции были сформированы противоположные типы двигательных реакций в зависимости от значения звуковых стимулов: увеличение активности или замирание. В первом случае изменения контроля позы предполагает увеличение колебаний центра давления (ЦД) тела, а во втором — их уменьшение.

Постуральный ответ на сложный биологически значимый звуковой сигнал опосредован механизмами мультисенсорного контроля и формируется в течение длительного времени. Вследствие этого в исследованиях контроля позы при звуковой стимуляции применяют преимущественно длительные, т.е. превышающие продолжительность постурального ответа, или ритмически организованные стимулы [1–4]. В исследовании [5] выполняли стимуляцию короткими по длительности (1.6–4.8 с) сигналами — движущимися звуковыми образами, и получили в ответ изменение положения ЦД тела в сторону, противоположную направлению движения звукового образа. Однако латентность и амплитуда таких постуральных ответов существенно варьировали не только от человека к человеку, но при ответах одного и того же испытуемого. Исследования позных реакций на короткие одиночные сигналы биологически значимого содержания в литературе нами не обнаружены, кроме работы [6]. В ней было показано, что слуховые раздражители длительностью 6 с приводят к ухудшению контроля равновесия и повышению риска падения. Длительность стимула в последней работе была сопоставима с продолжительностью постурального ответа.

Продолжительность формирования позного ответа и нестабильность его характеристик затрудняют изучение влияния коротких одиночных стимулов на контроль позы и интерпретацию полученных результатов. Короткой длительностью в данном случае можно рассматривать такую, которая меньше, чем продолжительность формирования самого постурального ответа. Таким образом, остается неясным, как короткие звуковые сигналы влияют на постуральный контроль. Это влияние представляет интерес в связи с возможностями применения звуковой стимуляции при реабилитации пациентов с нарушениями опорно-двигательного аппарата путем создания кратковременного дестабилизирующего воздействия с различных направлений, включая заднее полупространство, недоступное для зрительной стимуляции. Другим возможным практическим применением таких сигналов является их использование в диагностических исследованиях при оценке устойчивости пациентов, т.к. в повседневной жизни часто встречаются именно короткие сигналы информационно и биологически важного содержания.

При изучении воздействия дистантной информации на позу применяют сигналы высокой биологической значимости, такие сигналы неизбежно имеют эмоциональное содержание. Воздействия эмоционально значимых сигналов подробно изучены для зрительного анализатора [7]. Известно, что просмотр изображений с отрицательной валентностью оказывает большее влияние на контроль позы по сравнению с нейтральной или положительной валентностью. В работах отмечается два типа реакций. В одних работах [8, 9] было зафиксировано значительное уменьшение раскачивания тела во время просмотра неприятных снимков. Такую реакцию авторы этих работ трактуют как “замирание” или “брадикардию страха”, наблюдаемые у многих видов при столкновении с угрожающими стимулами. В других работах отмечали смещение положения ЦД тела от негативного стимула, что рассматривается как тенденция к избеганию негативных ситуаций [10, 11].

Позднее было проведено исследование слухового воздействия нейтральных, приятных и негативных стимулов [6]. Результаты этой работы показали, что влияние слуховых стимулов на контроль равновесия зависит от их аффективного содержания. Было выявлено дестабилизирующее действие слуховых негативных стимулов на контроль равновесия. По сравнению с исходным состоянием (без звука) неприятные слуховые стимулы увеличивали постуральное покачивание, в то время

как приятные и нейтральные слуховые стимулы не вызывали реакции. Таким образом, на зрительные и слуховые стимулы негативного содержания были показаны позные ответы, соответствующие упоминавшимся выше эволюционно сформированным реакциям.

Цель настоящего исследования – выявить поструральные показатели, характеризующие изменения вертикальной позы человека в ответ на одиночные короткие биологически значимые звуковые стимулы, и оценить возможные различия в поструральных ответах на сигналы разного эмоционального содержания.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Все процедуры, выполненные в исследованиях с участием людей, соответствуют этическим стандартам национального комитета по исследовательской этике и Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующим изменениям или сопоставимым нормам этики. От каждого из включенных в исследование участников было получено информированное добровольное согласие (протокол заседания Этического комитета ИЭФБ РАН по биоэтике № 1-02 от 25 февраля 2021 г.).

Эксперимент 1. В первой части работы испытуемые выполняли эмоциональную оценку звуковых сигналов. В исследовании приняло участие 46 испытуемых в возрасте от 18 до 60 лет (25 женщин и 21 мужчина, средний возраст – 41 ± 2 года. Здесь и далее показаны среднее и ошибка среднего). Все испытуемые прошли предварительное тестирование на состояние периферического и центрального отделов слухового анализатора. Все испытуемые, принимавшие участие в исследовании, имели нормальный слух. Эксперимент 1 состоял в выполнении эмоциональной оценки предложенных звуковых стимулов. Каждый из испытуемых прослушивал последовательность из 22 звуковых стимулов, подаваемых через наушники Sennheiser HD 280 на комфортном для испытуемого уровне интенсивности. Звуки разного смыслового и эмоционального содержания были выбраны из библиотеки аудиоредактора Acoustica Mixcraft (<https://mixcraft.ru/>). Применяли звуки, встречающиеся в повседневной жизни, такие как телефонный звонок, скрип тормозов, лай собаки и другие (14 сигналов), а также искусственно синтезированные звуки (8 сигналов), которые не соотносились с реально существующими объектами. Эти звуки представляли собой широкополосные шумовые сигналы с различной временной динамикой и спектральными максимумами. После прослушивания каждого звука испытуемый выполнял его эмоциональную оценку, для которой была использована система невербальной изобразительной оценки (манекен самооценки). Эта система была разработана Lang [12], она часто используется для эмоциональных оценок стимулов различной модальности [13, 14]. В этой системе каждый стимул оценивается в трех измерениях: валентности (знак эмоции), возбуждения (выраженность эмоции) и доминирования (личной позиции испытуемого по поводу эмоции). В трех рядах – измерениях, графически представлено по пять фигур, каждая из которых выражает аффективное состояние. Для каждого ряда под фигурами, а также под промежутками между двумя последовательными картинками предложены количественные оценки, которые формируют 9-балльную шкалу: валентность (от 1 – хмурая, несчастная фигура, до 9, улыбающаяся, счастливая фигура); возбуждение (от 1 – расслабленная, сонная фигура, до 9, возбужденная фигура); доминирование (от 1 – маленькая фигура, представляющая контролируемое существо, до 9 – большая фигура, представляющая контролирующее, подавляющее существо). Каждое испытание проводили в собственном темпе испытуемого, при этом он мог прослушивать каждый звук неограниченное количество раз. Средняя продолжительность испытания составляла у разных испытуемых от 12 до 30 мин.

Таблица 1. Временные и спектральные характеристики биологически значимых звуковых сигналов

| Характеристика | Женский крик | Тормоз автомобиля | Звонок телефона |
|------------------------------------|------------------|-------------------|--|
| Длительность, мс | 1000 | 850 | 1000 |
| Длительность фронта нарастания, мс | 200 | 38 | 19 |
| Спектральные максимумы, Гц | 1500, 3000, 4600 | 1000, 2000 | 1200, 1500, 3000, 3800, 5400, 6700, 8200 |
| Спектральный диапазон, Гц | 500–4900 | 0–5000 | 0–10000 |

Проверка на нормальность распределения бальных оценок по трем шкалам в группе испытуемых осуществлялась с применением непараметрического теста Шапиро–Уилка. Для анализа влияния различий эмоциональных оценок у испытуемых разного пола они были разделены на группы: женщины (24 человека, возраст 40 ± 3 года) и мужчины (22 человека, возраст 41 ± 4 года). Последующий статистический анализ для сравнения эмоциональных оценок звуковых стимулов группами испытуемых выполняли с использованием непараметрического критерия Манна–Уитни.

Эксперимент 2. В исследовании приняла участие группа из 21 испытуемого с нормальным слухом, без диагностированных нарушений вестибулярной системы и опорно-двигательного аппарата в возрасте от 18 до 58 лет (12 женщин и 9 мужчин, средней возраст 29 ± 3 года). Состояние слуха испытуемых оценивали при помощи тональной аудиометрии, которую проводили на клиническом аудиометре АА-02 (Биомедилен). В дополнение к тональной аудиометрии оценку временного разрешения слуха выполняли с применением теста на обнаружение паузы [15]. Все испытуемые, участвовавшие в экспериментах, успешно прошли аудиометрический тест и тест на обнаружение паузы.

Применяли три различных биологически значимых сигнала: женский крик (видоспецифический сигнал), звук тормозов автомобиля (звук движущегося объекта), звонок механического телефона (сигнал, регулирующий повседневное поведение). Стимулы были выбраны по результатам Эксперимента 1: два первых были негативного эмоционального содержания, а третий – нейтрального. Осциллограммы и соннограммы сигналов представлены на рис. 1. Длительность этих сигналов не превышала 1 с. Фронты нарастания уровней сигналов различались в 2 и 10.5 раз. Спектральные максимумы всех трех сигналов располагались в области частот выше 1 КГц. Основные временные и спектральные параметры трех сигналов представлены в табл. 1.

Звуковую стимуляцию выполняли с громкоговорителя Klipsch R-3800-C, расположенного прямо перед испытуемым на расстоянии 2.0 м, на высоте 1.2 м. Генерацию звука производили с компьютера через USB-аудиоинтерфейс Creative E-MU 0202. Уровень сигнала на громкоговорителе регулировали при помощи усилителя мощности NevaAudio SA-3004. Измерения уровня сигнала в месте головы испытуемого производили с применением микрофона 41–45, предусилителя 26–39 и усилителя 26–06 от Brüel and Kjær. Уровень всех звуковых стимулов в месте прослушивания составил 72 дБ уровня звукового давления.

Регистрацию постуральных показателей проводили в звукоизолированной камере объемом 62.2 м^3 , имеющей специальное покрытие потолка, стен и пола, обеспечивающее условия для свободного поля. Уровень ослабления внешнего шума в камере был не менее 40 дБ в диапазоне частот от 0.5 до 16 кГц. Для оценки посту-

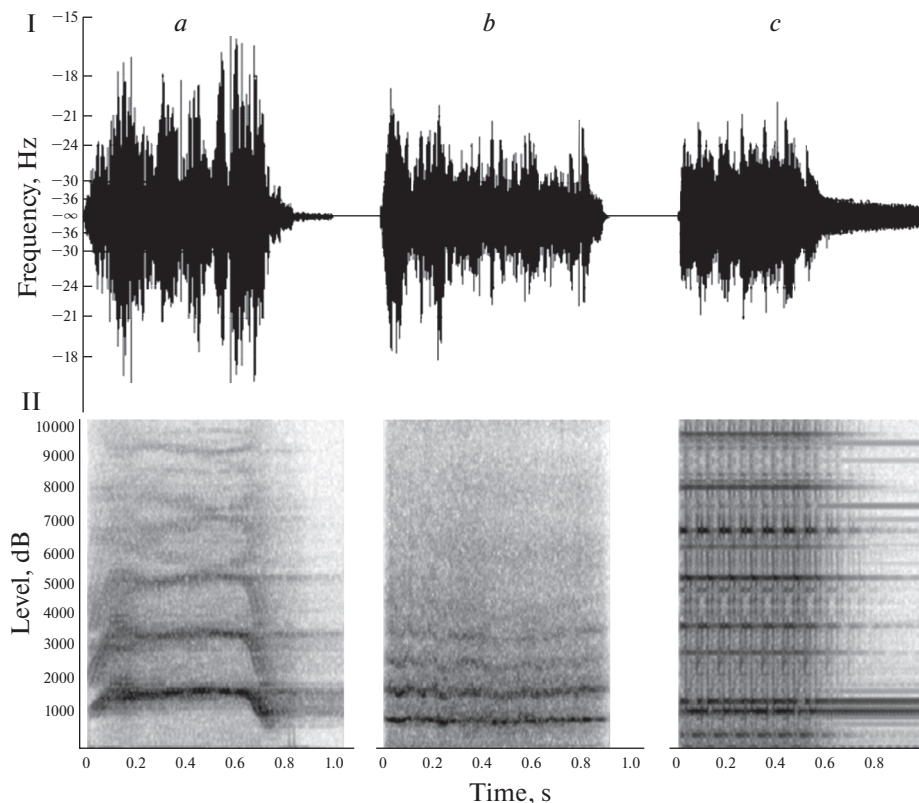


Рис. 1. Осциллограммы (I) и спектрограммы (II) трех звуковых сигналов – женского крика (*a*), тормоза автомобиля (*b*) и звонка телефона (*c*).

I – по оси абсцисс – время в с, по оси ординат – частота сигнала, Гц. II – по оси абсцисс – время в с, по оси ординат – уровень сигнала, дБ.

ральных показателей применяли стабилоплатформу “Стабилан 01” из перечня зарегистрированных в России в качестве изделия медицинского назначения [16]. Испытуемый стоял на стабилометрической платформе в позе “пятки вместе, носки врозь”, руки свободно опущены вдоль тела. Платформа располагалась на массивной опоре в центре камеры. Испытуемого просили стоять неподвижно с закрытыми глазами во время всего эксперимента. Изменения положения ЦД тела регистрировали с применением программы Stabmed 2.05. Частота дискретизации оценки положения ЦД составляла 50 Гц.

Стабилометрическое исследование включало контрольную стойку с закрытыми глазами в тишине и шесть экспериментальных стоек с закрытыми глазами. Во время каждой из них в случайном порядке и с квазислучайными интервалами предъявляли три различных звуковых сигнала. Длительность каждой стойки составляла 72–78 с. В каждой экспериментальной стойке первый сигнал звучал на 20-й секунде с момента начала регистрации, второй – на 40–44-й секунде, третий – на 60–66-й секунде. Пример временной последовательности стимуляции и выбора периодов анализа в двух стойках показан на рис. 2. Начало периода анализа совпадает с началом звукового стимула. После каждых двух регистраций испытуемому предоставляли 2–3-минутный период отдыха. Общая продолжительность регистрации была не более 30 мин.

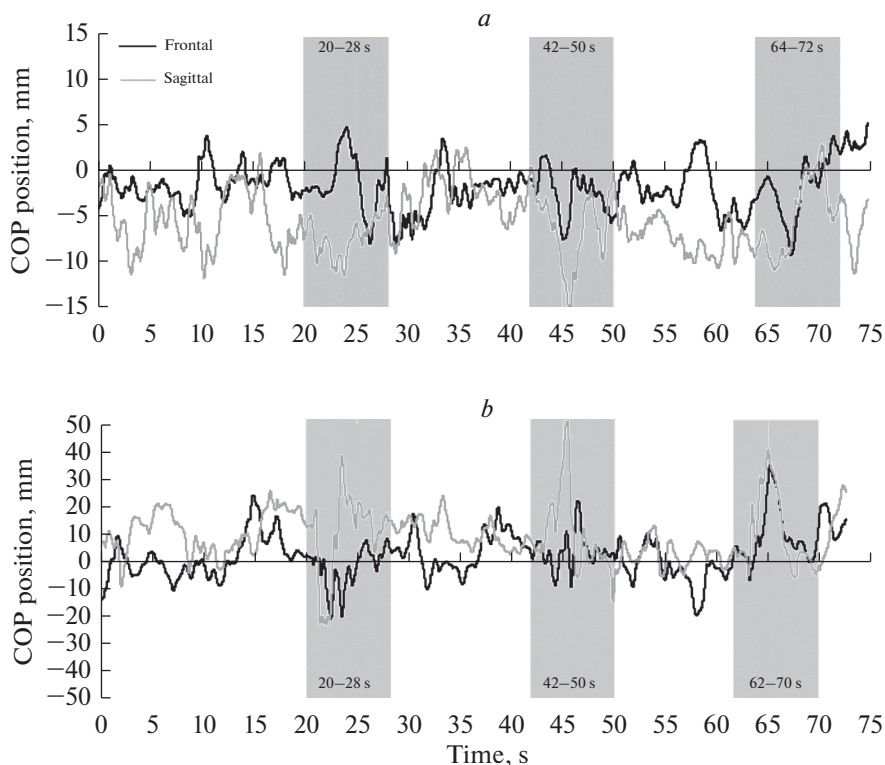


Рис. 2. Индивидуальные стабиллограммы для испытуемых № 15 (а) и № 10 (б) по сагиттальной и фронтальной осям.

По оси абсцисс – время в с, по оси ординат – положение ЦД тела, мм. Области серого цвета показывают периоды длительностью 8 с, в которых выполняли анализ положения ЦД тела.

Для анализа результатов применяли фрагменты полученных записей стабиллограмм длительностью 8 с. Выбор длительности периода регистрации обусловлен результатами экспериментов Агаевой с соавт. [5]. Согласно этой работе, постуральный ответ на кратковременное звучание движущихся источников звука имеет латентность 0.5–3 с и продолжается в течение примерно 3–5 с. В нашем случае для контрольной стойки фрагменты начинались с 20-, 40- и 60-й секунд регистрации, т.е. с моментов предъявления звукового сигнала в экспериментальных стойках. Для каждого из трех фрагментов одной записи определяли следующие показатели колебаний ЦД тела: длину траектории перемещения ЦД тела (далее длина траектории), линейную скорость перемещения ЦД тела (далее скорость) и разброс положения ЦД тела (далее разброс) вдоль сагиттальной и фронтальной осей (табл. 2). Помимо характеристик колебания ЦД вдоль одной из осей оценивали интегральные показатели вертикальной позы: площадь доверительного эллипса (далее площадь эллипса), характеризующую часть площади опоры, в которой перемещается во фронтальной и сагиттальной плоскости ЦД при стоянии и его сжатие, а также показатель “качество функции равновесия” [17]. Последний показатель оценивает, насколько минимальна скорость перемещения ЦД.

Статистические расчеты проводили в пакете программ Statistica v.5.5A. Достоверность различий величин стабиллографических показателей от контрольных зна-

Таблица 2. Формулы расчета стаблогографических показателей согласно [17]

| Стаблогографический показатель | Определение | Формула |
|--|---|---|
| Длина траектории ЦД по фронтали и сагиттали (LX, LY) | Длина составляющих стаблогографического сигнала – фронтальная и сагиттальная | $LX = \sum_{i=1}^N (X_i - X_{i-1}), LY = \sum_{i=1}^N (Y_i - Y_{i-1})$ |
| Средняя линейная скорость по фронтали и сагиттали ($V_{X_{cp}}, V_{Y_{cp}}$) | Среднее значение проекции линейной скорости во фронтальной и сагиттальной плоскости | $V_{X_{cp}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{V_{X_i}}{T}, V_{Y_{cp}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{V_{Y_i}}{T}$ |
| Разброс по фронтали и сагиттали (Q_x, Q_y) | Среднеквадратическое отклонение ЦД по фронтали и сагиттали относительно смещения | $Q_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - X_{cp})^2}$ $Q_y = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (Y_i - Y_{cp})^2}$ |
| Площадь доверительного эллипса ($S_{S_{xy}}$) | Основная часть площади, занимаемой стаблогограммой без, так называемых, петель и случайных выбросов | $S_{S_{xy}} = 2 \ln \frac{1}{1-\beta} \sqrt{D(X)D(Y) - Cov(X, Y)^2}$ |
| Коэффициент сжатия доверительного эллипса | Отношение длины большой оси доверительного эллипса к длине малой оси | $k = \frac{\frac{D(X) + D(Y)}{2} + \sqrt{\left(\frac{D(X) - D(Y)}{2}\right)^2 + Cov(X, Y)^2}}{\frac{D(X) + D(Y)}{2} - \sqrt{\left(\frac{D(X) - D(Y)}{2}\right)^2 + Cov(X, Y)^2}}$ |
| Качество функции равновесия | Траектория движения ЦД тела анализируется с применением методов векторного анализа* | Расчетный коэффициент интерпретируется как показатель, описывающий качество функции равновесия |

X_i, Y_i – отсчеты координат ЦД во времени;

N – число отсчетов;

V_{X_i}, V_{Y_i} – мгновенное значение вектора скорости;

T – продолжительность исследования;

β – вероятность попадания точки статокинезиограммы в эллипс ($\beta = 0.9$);

$D(X), D(Y)$ – дисперсия соответствующей компоненты.

* – показатель рассчитывается в виде процентного отношения площади, ограниченной функцией распределения длин векторов скоростей, и некоторой константы, равной площади прямоугольника, ограниченного осями координат, горизонтальной асимптотой функции распределения длин скоростей и вертикальной границей.

Таблица 3. Эмоциональные оценки звуковых сигналов по группе из 46 испытуемых

| Шкала | Звуковой сигнал | | |
|---------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | женский крик | тормоз автомобиля | звонок телефона |
| Валентность | 2 [1, 3] | 3 [1, 4] | 5 [3, 5] |
| Возбуждение | 5 [3, 6] | 7 [5, 8] | 5 [5, 7] |
| Доминирование | 4 [3, 5] | 6 [4, 8] | 7 [4, 7] |

Данные представлены как медиана [нижний квартиль; верхний квартиль].

чений осуществляли с применением парного непараметрического метода Вилкоксона. Попарное сравнение показателей в ответ на разные звуковые стимулы выполняли с поправкой Бонферрони на множественные сравнения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперимент 1. Эмоциональные оценки 22 звуковых сигналов, выполненные группой из 46 испытуемых, показали широкий диапазон значений для всех трех шкал из системы невербальной изобразительной оценки. Шкала валентности эмоции для большинства сигналов выявила наличие оценок у разных испытуемых в широком диапазоне баллов: от 1 до 7 для одних типов сигналов; от 1 до 9 – для других. Аналогичные результаты получили и для шкал “выраженность” и “доминирование” эмоции. Таким образом, была выявлена неоднозначность оценок группой испытуемых для многих звуковых сигналов.

Для биологически значимых и легко интерпретируемых звуковых сигналов оценки были более определенными. Звук тормоза и женский крик по “валентности” эмоции имели диапазон оценок в баллах существенно уже: от 1 до 5. Результат проверки на нормальность распределения балльных оценок этих сигналов в группе испытуемых был отрицательным. Поэтому в табл. 3 представлены результаты, демонстрирующие близкие значения эмоциональных оценок этих двух сигналов по всем трем шкалам в виде медианы и квартилей. Оба звуковых сигнала негативного эмоционального содержания были использованы для изучения поструральных ответов. Достоверные различия между испытуемыми разного пола по “валентности” эмоции не были выявлены (звуки: тормоза ($p = 0.27$), женского крика ($p = 0.99$), звонок телефона ($p = 0.91$), непараметрический критерий Манна–Уитни). Поэтому последующий анализ влияния звуков на контроль позы был проведен без разделения по полу. Вместе с тем физические параметры этих сигналов различались, прежде всего, по длительности фронта нарастания сигнала, что могло повлиять на поструральный ответ (рис. 1, табл. 1).

Для сопоставления влияния эмоциональной значимости сигнала на поструральные показатели был выбран еще один стимул, который по валентности эмоции был нейтральным и находился по средним оценкам в середине двух других шкал (табл. 3). Причем в качестве звукового стимула этот эмоционально нейтральный сигнал является повседневным и побуждающим к действию. Он имел короткий фронт нарастания, близкий с фронтом звука тормоза автомобиля (табл. 1).

Эксперимент 2. В исследовании показателей позы применяли 6 экспериментальных стоек, во время каждой из которых звучали три сигнала, отобранные на основании результатов психофизического эксперимента. Индивидуальные поструральные ответы на звуковые сигналы существенно различались по величине, латентному периоду и продолжительности. В ряде случаев наблюдали выраженную синхронизацию изменения положения ЦД по обеим осям. Примеры высокоамплитудных синхронизированных по обеим осям поструральных ответов, характер-

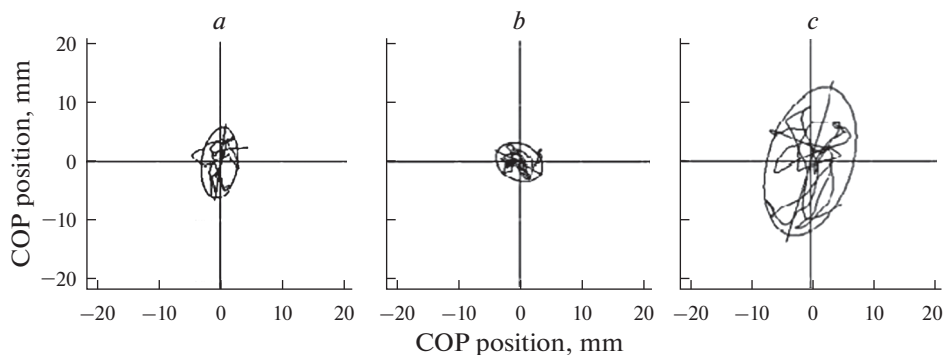


Рис. 3. Индивидуальные статокинезиограммы стоек длительностью 8 с, выполненных в тишине для испытуемых № 5 (a), № 2 (b) и № 17 (c).

По оси абсцисс – положение ЦД тела по фронтальной оси, мм. По оси ординат положение ЦД тела по сагиттальной оси, мм. Показан доверительный эллипс, рассчитанный за период стойки длительностью 8 с. Прямой линией показана длинная ось эллипса.

ных для испытуемых (№ 10 и 15), представлены на рис. 2. Латентность ответов можно оценить по положению отчетливо видимых на представленных стабилотограммах пиков. Она составляет в большинстве случаев 2–3 с. Общая продолжительность ответа варьирует в пределах 5 с. Выбранная нами продолжительность периода анализа – 8 с, позволяла выявить высокоамплитудную компоненту ответа при кратковременном звуковом воздействии.

Показатели, рассчитанные в периоды постуральных ответов на звуковые стимулы, сопоставляли с аналогичными показателями, полученными за такие же временные периоды в контрольной стойке с закрытыми глазами в тишине. В результате испытуемые и в контрольной стойке находились в состоянии ожидания сигнала, но влияние самого звукового сигнала отсутствовало. В контрольной стойке были выявлены значительные индивидуальные различия по всем рассчитанным стабилотографическим показателям. По показателю “качество равновесия” минимальное и максимальное значения в группе составили 38 и 89%, т.е. результаты отдельных испытуемых могли различаться более чем в 2 раза. По площади эллипса разница оказалась более, чем в 10 раз: минимальные/максимальные значения составили 40 и 530 мм². По показателю сжатие минимальные/максимальные значения были 1.2 и 3.2, т.е. различия превышали 2.5 раза. Примеры статокинезиограмм для испытуемых с выраженными индивидуальными различиями стабилотографических показателей для стоек длительностью 8 с, выполненных в тишине, представлены на рис. 3.

Выявлена взаимосвязь индивидуальных значений длины траектории по двум осям (рис. 4a). Диапазон значений этого показателя по фронтальной оси составил от 20 до 118 мм, по сагиттальной – от 42 до 124 мм. Аналогичная взаимосвязь была выявлена и для показателей линейных скоростей перемещения ЦД тела по обеим осям (рис. 4b). Диапазон данных линейной скорости составил по фронтальной оси от 2.3 до 13.5 мм/с, а по сагиттальной – от 4.7 до 14.1 мм/с. Представленные данные свидетельствуют о том, что в тишине (контрольная стойка) длина траектории и производный от нее показатель – линейная скорость – сходным образом изменяются по разным осям от испытуемого к испытуемому. Следовательно, при оценке воздействия звука на постуральные показатели было необходимо нормировать изменения показателей позы с учетом описанных выше индивидуальных различий.

Индивидуальные реакции на звук также значительно варьировали по амплитуде и латентности ответов. Это касалось показателей положения ЦД тела по сагитталь-

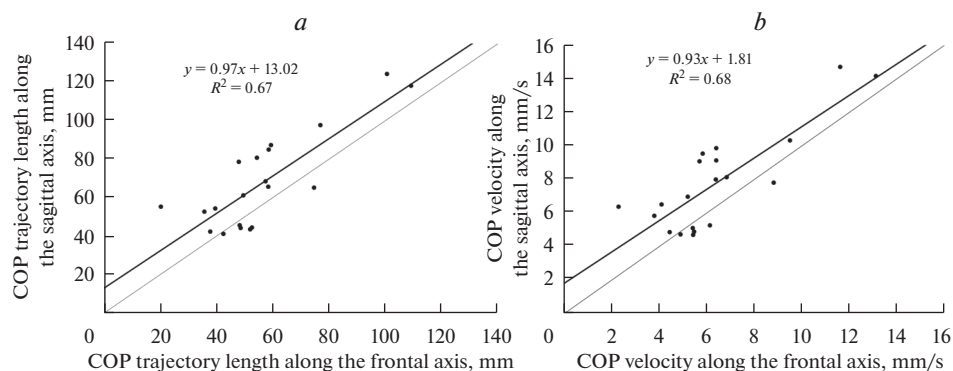


Рис. 4. Взаимосвязь индивидуальных значений длины траектории (*a*) и линейной скорости движения ЦД тела (*b*) по двум осям.

a) – по оси абсцисс – длина траектории ЦД тела по фронтальной оси, мм; по оси ординат – длина траектории ЦД тела по сагиттальной оси, мм. *b*) – по оси абсцисс – скорость ЦД тела по фронтальной оси, мм/с; по оси ординат скорость ЦД тела по сагиттальной оси, мм/с.

Жирная линия – линейная аппроксимация данных для группы испытуемых. Показаны соответствующие коэффициенты корреляции. Тонкая линия – биссектриса, на ней длины траекторий и скорости по обоим осям равны.

ной и фронтальной осям. Тем не менее, даже в отсутствие нормировки средние по группе показатели в период ответа на звук заметно отличались от контрольных значений (табл. 5). Все средние показатели, кроме показателя “качество функции равновесия” и сжатия эллипса, были выше в ответ на стимуляцию по сравнению с контролем. Показатель “качество функции равновесия” оказалось при звуковой стимуляции ниже, чем в контроле. Таким образом, при всех типах стимуляции была обнаружена тенденция к дестабилизации позы. Вместе с тем, вариабельность контрольных значений должна быть учтена при определении влияния звуковой стимуляции на позу. Относительные изменения поструральных показателей позволяют выявить влияние звука независимо от индивидуальных особенностей поддержания позы.

Сравнительный статистический анализ был выполнен для нормированных значений показателей. Нормирование индивидуальных показателей к контрольным значениям, полученным для данного испытуемого, выполняли по формуле:

$$N = P/Pc \times 100,$$

где *N* – нормированная величина в %, *P* – показатель в период ответа на звук, *Pc* – контрольное значение показателя.

Результаты нормирования индивидуальных показателей и их последующего усреднения по группе из 21 испытуемого представлены на рис. 5. При действии трех звуковых стимулов выявлены достоверные отличия по сравнению с контрольным условием с закрытыми глазами для восьми из девяти проанализированных стабилметрических показателей. Направление изменений было одинаковым для всех трех звуковых сигналов по фронтальной и по сагиттальной осям. По сравнению с контрольным условием получили достоверное увеличение длины траектории ЦД на 15–20% по сагиттальной оси для всех типов звуковых сигналов ($p < 0.001$). По фронтальной оси для женского крика и звонка телефона получили достоверные изменения ($p < 0.01$ и $p < 0.001$ соответственно), тогда как для звука тормоза автомобиля увеличение длины траектории происходило в виде тенденции ($p < 0.08$).

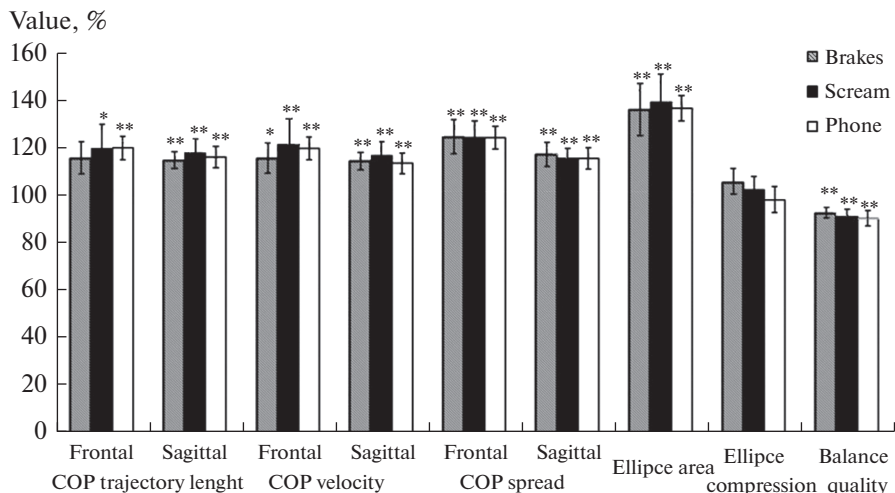


Рис. 5. Результаты нормирования индивидуальных показателей, характеризующих положение ЦД тела, и их последующего усреднения по группе из 21 испытуемого.

По оси ординат: величина показателей при прослушивании звуковых сигналов в % к показателям в контрольной стойке, принятым за 100%. По оси абсцисс: стабилометрические показатели. Достоверные отличия для сравнения условий со звуковой стимуляцией с контрольным условием: * – $p < 0.05$, ** – $p < 0.01$; непараметрический парный тест Вилкоксона.

Для показателей средней линейной скорости достоверное увеличение на 13–21% выявили для всех трех звуковых стимулов ($p < 0.003$ и $p < 0.03$ для сагиттальной и фронтальной оси соответственно). Разброс положения ЦД тела был больше относительно контрольного условия в тишине при всех звуковых стимулах: по сагиттальной оси на 15–17% ($p < 0.006$), по фронтальной оси – на 24–25% ($p < 0.007$).

Таблица 4. Средние по группе из 21 испытуемого стабилографические показатели

| Стабилографический показатель | Контроль | Звуковая стимуляция | | |
|--------------------------------------|-------------|---------------------|---------------|-----------------|
| | | тормоз автомобиля | женский крик | звонок телефона |
| Длина траектории ЦД по фронтали, мм | 59 ± 5 | 69 ± 9 | 74 ± 13** | 72 ± 8** |
| Длина траектории ЦД по сагиттали, мм | 70 ± 6 | 80 ± 8** | 84 ± 11** | 82 ± 9** |
| Скорость по фронтали, мм/с | 6.8 ± 0.7 | 7.9 ± 1.1* | 8.6 ± 1.6** | 8.2 ± 0.9** |
| Скорость по сагиттали, мм/с | 8.0 ± 0.7 | 9.2 ± 0.9** | 9.7 ± 1.4** | 9.2 ± 1.0* |
| Разброс по фронтали, мм | 0.94 ± 0.09 | 1.18 ± 0.15* | 1.20 ± 0.18** | 1.17 ± 0.13** |
| Разброс по сагиттали, мм | 1.07 ± 0.10 | 1.25 ± 0.14* | 1.25 ± 0.16** | 1.24 ± 0.15** |
| Площадь эллипса, мм ² | 155 ± 33 | 225 ± 67* | 265 ± 97** | 229 ± 60** |
| Сжатие | 1.88 ± 0.11 | 1.90 ± 0.07 | 1.83 ± 0.05 | 1.76 ± 0.07 |
| Качество равновесия, % | 73 ± 3 | 69 ± 4** | 68 ± 4** | 68 ± 4** |

Достоверные отличия для сравнения условий со звуковой стимуляцией с контрольным условием: * – $p < 0.05$, ** – $p < 0.01$; непараметрический парный тест Вилкоксона. Данные представлены как среднее ± стандартная ошибка среднего.

Интегральные показатели, характеризующие равновесие тела в вертикальной стойке, также изменялись однонаправленно при действии всех звуковых стимулов. Изменения показателя площадь эллипса оказались наиболее выраженными. Его увеличение при звуковом воздействии составило 36–39% по сравнению с контрольным условием ($p < 0.01$). При этом форма эллипса осталась прежней – коэффициент сжатия достоверно не изменился, различия в средних данных не превышали 6%. Показатель “качество функции равновесия” достоверно снизился на 7–10% ($p < 0.005$).

По всем стабилметрическим показателям достоверных различий в реакции на разные типы звуковых сигналов не обнаружено.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Психоакустическое шкалирование, выполненное по системе невербальной изобразительной оценки [12], позволило охарактеризовать ряд часто встречающихся, а также искусственно синтезированных звуковых стимулов по знаку и выраженности эмоции. Одновременно была выполнена оценка по доминированию, т.е. личной позиции испытуемого по поводу данной эмоции. Было выявлено, что для биологически значимых и легко интерпретируемых звуковых сигналов их оценки разными испытуемыми имели близкие значения. Разделение испытуемых на группы по полу и последующая проверка на влияние этого фактора на результаты эмоциональной оценки звуковых сигналов не выявило достоверных различий. Этот результат полностью согласуется с данными работы [4].

Это позволило выбрать стимульный материал для выполнения второй части исследования. В ней были использованы два звуковых стимула негативного содержания (женский крик и звук тормоза автомобиля) и третий стимул – звонок телефона, который существенно отличался от них эмоционально нейтральным значением. Все три звуковых сигнала были существенно короче, чем продолжительность постурального ответа на стимул, и близкими по длительности. Таким образом, результаты психоакустического исследования позволили обеспечить стимуляцию, адекватную поставленной задаче – зарегистрировать постуральные ответы на одиночные короткие биологически значимые звуковые стимулы разного эмоционального содержания.

Контрольная серия постуральных стоек в тишине выявила значительную индивидуальную вариабельность показателей положения ЦД тела. Одной из причин данной вариабельности может служить обнаруженный нами ранее факт, что стратегия поддержания позы при отсутствии дистантной информации различается у людей разного когнитивного стиля [18]. В работе была показана значительная разница между группами полнезависимых и полезависимых испытуемых по большинству исследованных постуральных показателей, она проявлялась в более выраженных колебаниях тела у первых. Достоверное различие было выявлено для показателей длины траектории, скорости перемещения ЦД тела и разброса по сагиттальной оси, тогда как по фронтальной оси различия отсутствовали. Полезависимые и полнезависимые субъекты не только по-разному поддерживали равновесие в отсутствие сенсорной стимуляции, но и по-разному реагировали на звуковую информацию [19, 20]. В этих работах было показано, что при прослушивании в течение 45 с звуковой стимуляции, содержащей информацию о движении, – стабилметрические показатели, характеризующие выраженность колебаний ЦД тела, – длина траектории, средняя линейная скорость, разброс и площадь эллипса, оказались больше в группе испытуемых с полнезависимым когнитивным стилем, чем с полезависимым. В настоящем исследовании существенные индивидуальные различия в показателях также наблюдали не только в контроле, но и при формировании ответа на короткие звуковые стимулы. Этот результат подтвердил полученные ранее данные и привел к необходимости нормировки индивидуальных стабилметрических показателей при групповом анализе данных.

Регистрация положения ЦД тела в ответ на все использованные звуковые стимулы и последующий анализ стабилметрических показателей выявили относительное увеличение длины траектории перемещения ЦД, его скорости и разброса по обеим осям по сравнению с тишиной. Такие изменения характерны для дестабилизации позы [21], они свидетельствовали о подготовке к последующему движению, а не к реакции замирания, при которой должны были бы возникать противоположные изменения – снижение длины траектории и других показателей положения ЦД тела. Нам не удалось обнаружить различий между стабилметрическими показателями по обеим осям в ответах на короткие звуковые сигналы негативного и нейтрального эмоционального содержания. Зарегистрированные изменения пострурального контроля в ответ на звуковые сигналы не могут являться старт-рефлексом, который представляет собой произвольную двигательную реакцию тела как целого на внезапный раздражитель. Старт-рефлекс обычно исследуют при интенсивности звука 120 дБ, но есть работы, где его удалось отследить при уровне звука 80 дБ. В нашей работе уровень интенсивности всех звуковых сигналов был высоким – 72 дБ УЗД, но недостаточным для формирования такого рефлекса. Помимо этого особенностью старт-рефлекса является короткая латентность ответа – в пределах 200 мс [22]. Наблюдаемая в нашей и других работах [5, 19] нестабильная величина латентности пострурального ответа на сложные звуковые стимулы в 1–3 с до пикового отклонения положения ЦД оказывается на порядок больше, чем продолжительность старт-рефлекса. Таким образом, и по интенсивности стимуляции, и по временным характеристикам, и по стабильности показателей ответа эти процессы оказываются различными.

Критически важную роль для формирования реакции на звук имеет скорость его нарастания. Хорошо известно, что в слуховой системе длительность фронта нарастания звука определяет формирование ответа [23]. Поэтому нам представлялось важным выяснить, не будет ли разная скорость активации в слуховой системе проявляться в показателях позного ответа. С этой целью исследовали показатели ЦД тела в ответ на сигналы с фронтами нарастания звука, которые различаются по длительности в пять раз (женский крик и звук тормозов). Достоверных различий между показателями поструральных ответов на звуковые сигналы с разной длительностью фронта и сходным эмоциональным содержанием выявлено не было. Гипотетически поструральный ответ можно было бы интерпретировать как подготовку двигательной реакции в ответ на звук, которая подавляется инструкцией стоять неподвижно.

Примененный в работе подход, предполагающий оценку стабилметрических показателей в оптимальный временной интервал – 8 с, за который формируется поструральный ответ на короткие одиночные стимулы, оказывается устойчивым к вариабельности латентности и амплитуды ответа. Он позволяет разрешить методическую проблему, которая возникает при анализе траекторий перемещения ЦД тела на подобные стимулы, и описана в работе [5]. Изменение интегральных показателей, характеризующих равновесие тела в вертикальной стойке, было однонаправленным и близким по величине при действии всех трех звуковых стимулов. Наибольшие изменения были выявлены по показателю площадь эллипса, который является производным показателем от разброса по обеим осям, и также указывает на дестабилизацию позы. На основании полученных нами результатов при оценке эффекта воздействия коротких звуковых сигналов на позу можно применять данный поструральный показатель.

Наши данные свидетельствуют о дестабилизации позы под действием звука, тогда как в большинстве исследований звуковая стимуляция рассматривается как стабилизирующий фактор [2–4, 24]. Это принципиальное различие в результатах поструральных исследований легко объяснимо. В нашей работе применяли корот-

кие, т.е. существенно меньшие по длительности, чем постуральный ответ, звуковые стимулы. В то же время в остальных работах использовали длительные движущиеся [3] или стационарные [2, 4] пространственные слуховые сигналы, которые рассматривают как “якорные” для поддержания равновесия [25]. Анализ постуральных показателей в последних случаях выполняют в течение продолжительного времени, что не позволяет выявить ответ на начало звуковой стимуляции, который, по нашим представлениям, должен иметь дестабилизирующий характер. Отметим, что дестабилизирующий ответ на короткий движущийся звуковой образ был впервые показан в работе Агаевой с соавт. [5]. В нашем исследовании были применены короткие звуковые стимулы разного эмоционального содержания, и результат воздействия внезапного короткого звукового стимула оказался дестабилизирующим независимо от его содержания. Этот методический подход может быть использован при оценке постуральной устойчивости, а также для тренировки в реабилитационных мероприятиях.

В настоящей работе мы не ставили задачи изучения влияния воздействия звуковых сигналов из источников, различающихся положением в пространстве, на изменение положения ЦД тела. Однако, естественно предположить, что при различной локализации источника звука положение ЦД будет изменяться по-разному. В пользу такого предположения свидетельствует работа [26], в которой при прослушивании звука шагов приближающихся сзади и спереди от испытуемого, наблюдали изменение показателя смещения в противоположных направлениях: при шагах спереди испытуемые увеличивали отклонение назад, а при шагах сзади — вперед. В работе с ритмической стимуляцией [1] звук, подаваемый в течение 1 мин, переключали каждые 10 с с динамиков, расположенных спереди-сзади или слева-справа, и наблюдали увеличение колебаний тела в сагиттальной плоскости в первом случае и во фронтальной — во втором. Используя разную локализацию источника звука и короткие сигналы, по-видимому, можно достичь кратковременной дестабилизации позы со смещением среднего положения ЦД тела в заданном направлении.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана средствами государственного бюджета по госзаданию (тема № 075-0152-22-00).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

ВКЛАД АВТОРОВ

Идея работы и планирование эксперимента (И.Г.А., О.П.Т.), сбор данных (О.П.Т.), обработка данных (О.П.Т.), написание и редактирование манускрипта (И.Г.А., О.П.Т.).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам Лаборатории физиологии движения Института физиологии им. И.П. Павлова за предоставленную возможность выполнить работу на стабилографе “Стабилан 01”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Soames RW, Raper SA* (1992) The influence of moving auditory fields on postural sway behaviour in man. *Eur J Appl Physiol* 65: 241–245.
<https://doi.org/10.1007/BF00705088>
2. *Zhong X, Yost WA* (2013) Relationship between postural stability and spatial hearing. *J Am Acad Audiol* 24: 782–788.
<https://doi.org/10.3766/jaaa.24.9.3>
3. *Gandemer L, Parsehian G, Kronland-Martinet R, Bourdin C* (2014) The influence of horizontally rotating sound on standing balance. *Exp Brain Res* 232: 3813–3820.
<https://doi.org/10.1007/s00221-014-4066-y>
4. *Siedlecka B, Sobera M, Sikora A, Drzewowska I* (2015) The influence of sounds on posture control. *Acta Bioeng Biomech* 17: 95–102.
<https://doi.org/DOI:10.5277/ABB-00150-2014-03>
5. *Agaveva MY, Altman YA, Kirillova IY* (2006) Effects of a sound source moving in a vertical plane on postural responses in humans. *Neurosci Behav Physiol* 36: 773–780.
<https://doi.org/10.1007/s11055-006-0087-8>
6. *Chen X, Qu X* (2016) Influence of affective auditory stimuli on balance control during static stance. *Ergonomics* 60: 404–409.
<https://doi.org/10.1080/00140139.2016.1182649>
7. *Lelard T, Stins J, Mouras H* (2019) Postural responses to emotional visual stimuli *Neurophysiol Clin* 49: 109–114.
<https://doi.org/10.1016/j.neucli.2019.01.005>
8. *Azevedo TM, Volchan E, Imbiriba LA, Rodrigues EC, Oliveira JM, Oliveira LF, Lutterbach LG, Vargas CD* (2005) A freezing-like posture to pictures of mutilation. *Psychophysiol* 42: 255–260.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2005.00287>
9. *Stins JF, Beek PJ* (2007) Effects of affective picture viewing on postural control. *BMC Neurosci* 8: 83.
<https://doi.org/10.1186/1471-2202-8-83>
10. *Eerland A, Guadalupe TM, Franken IH, Zwaan RA* (2012) Posture as index for approach-avoidance behavior. *PLoS One* 7: e31291.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0031291>
11. *Lelard T, Krystkowiak P, Montalan B, Longin E, Bucchioni G, Ahmadi S, Godefroy O, Mouras H* (2014) Influence of postural threat on postural responses to aversive visual stimuli. *Behav Brain Res* 266: 137–145.
<https://doi.org/10.1016/j.bbr.2014.02.051>
12. *Lang PJ* (1980) Behavioral treatment and bio-behavioral assessment: Computer applications. 119–137. In: *Sidowski JB, Johnson JH, Williams TA* (eds) *Technology in mental health care delivery* Ablex Publishing. New York. USA.
13. *Bradley M, Lang P* (2007) The International Affective Picture System (IAPS) in the study of emotion and attention. 29–46. In: *Handbook of Emotion Elicitation and Assessment; Series in Affective Science; Coan JA, Allen JJB*, (eds) Oxford Univer Press. New York. USA.
14. *Yang W, Makita K, Nakao T, Kanayama N, Machizawa MG, Sasaoka T, Sugata A, Kobayashi R, Hiramoto R, Yamawaki S, Iwanaga M, Miyatani M* (2018) Affective auditory stimulus database: An expanded version of the International Affective Digitized Sounds (IADS-E). *Behav Res Methods* 50: 1415–1429.
<https://doi.org/10.3758/s13428-018-1027-6>
15. *Keith RW* (2000) Development and standardization of SCAN-C test for auditory processing disorders in children. *J Am Acad Audiol* 11: 438–445.
16. *Бабанов НД, Каленова АА, Серченко ЯА, Гроховский СС, Кубряк ОВ* (2019) Стандартизация, взаимозаменяемость и анализ предложений стабилоплатформ в России. *Пробл стандартизации в здравоохран* (9–10): 10–17. [*Babanov ND, Kalenova AA, Serchenko YaA, Grohovskij SS, Kubryak OV* (2019) Standartizaciya, vzaimozamenyaemost i analiz predlozhenij stabiloplatform v Rossii. *Probl standartizacii v zdavoohran* (9–10): 10–17. (In Russ)].
<https://doi.org/10.26347/1607-2502201909-10010-017>
17. Руководство пользователя “Стабилан-01”. Программно-методическое обеспечение компьютерного стабилометрического комплекса StabMed 2 (2004) Таганрог. ЗАО ОКБ Ритм. [Руководство pol’zovatelya “Stabilan-01”. Programmnno-metodicheskoe obespechenie komp’yuternogo stabilometricheskogo kompleksa StabMed 2 (2004) Taganrog ЗАО ОКБ Ritm 2004. (In Russ)].
18. *Timofeeva OP, Andreeva IG* (2021) Postural control features of field-dependent and field-independent subjects in the absence of visual and audio information. *Human Physiol* 47: 374–381.
<https://doi.org/10.1134/S0362119721040150>
19. *Andreeva IG, Gvozdeva AP, Bobrova EV, Gerasimenko YP* (2018) Differences in the postural responses to approaching and receding sound images in subjects with different perceptual styles.

- Dokl Biol Sci 482: 6178–6181.
<https://doi.org/10.1134/S0012496618050125>
20. Тимофеева ОП, Гвоздева АП, Боброва ЕВ, Андреева ИГ (2020) Постуральные колебания у людей с разным когнитивным стилем при ожидании слуховой информации о движении. Журн высш нерв деят им ИП Павлова 70(6): 752–762. [Timofeeva OP, Gvozdeva AP, Bobrova EV, Andreeva IG (2020) Postural fluctuations in people with different cognitive styles when waiting for auditory information about movement. J Higher Nerv Activity IP Pavlova 70(6): 752–762. (In Russ)].
<https://doi.org/10.31857/S0044467720060106>
 21. Mainenti MRM, De Oliveira LF, De Melo Tavares De Lima M, Nadal J (2007) Stabilometric signal analysis in tests with sound stimuli. Exp Brain Res 181(2): 229–236.
<https://doi.org/10.1007/s00221-007-0921-4>
 22. Nonnekens J, Carpenter MG, Inglis JT, Duysens J, Weerdsteijn V (2015) What startles tell us about control of posture and gait. Neurosci Biobehav Rev 53: 131–138.
<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.04.002>
 23. Радионова ЕА (1971) Функциональная характеристика нейронов кохлеарных ядер и слуховая функция. Л Наука. [Radionova EA (1971) Functional characteristics of cochlear nuclei neurons and auditory function. L Nauka. (In Russ)].
 24. Stevens MN, Barbour DL, Gronski MP, Hullar TE (2016) Auditory contributions to maintaining balance. J Vestib Res 26: 433–438.
<https://doi.org/10.3233/VES-160599>
 25. Lubetzky AV, Gospodarek M, Arie L, Kelly J, Roginska A, Cosetti M (2020) Auditory Input and Postural Control in Adults: A Narrative Review. JAMA Otolaryngol Head Neck Surg 146: 480–487.
<https://doi.org/10.1001/jamaoto.2020.0032>
 26. Тимофеева ОП, Андреева ИГ, Гвоздева АП (2021) Dynamics of Postural Indices in Case of Listening to Sounds of Steps Approaching from the Front and from Behind. J Evol Biochem Physiol 57: 1522–1532.
<https://doi.org/10.1134/S0022093021060284>

Human Postural Responses to Single Sound Signals with Different Emotional Content

O. P. Timofeeva^a and I. G. Andreeva^{a, *}

^a*Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

^{*}*e-mail: ig-andreeva@mail.ru*

The listening of biologically significant sound information leads to involuntary postural preparation for the subsequent motor response. In this work, postural indicators characterizing changes in the human vertical posture in response to single short biologically significant sound stimuli are investigated. In the first part of the work, a psychoacoustic experiment was performed using the International Affective Picture System in group of 46 subjects. According to its results, three sound stimuli with the duration of about 1 second were selected: two with negative content (a woman's scream and the sound of a car brake) and one with emotionally neutral stimulus — a phone call. In the second part of the work, the center of the pressure (CoP) of the body was recorded in response to the three stimuli in a group of 21 subjects. Analysis of the data within 8 seconds after the start of the stimulus (the time of the postural response) revealed a increase in the following stabilometric indicators compared to silence: the CoP trajectory length, COP average linear velocity and the spread along the frontal and sagittal axes, the area of the confidence ellipse. This method proved to be resistant to the variability of latency and amplitude of the postural response. According to the results obtained, short sounds that were with duration less than ones of the postural response, led to a short-term slight destabilization of the pose regardless of their emotional content. The area of the confidence ellipse has the largest changes in comparison with the other indicators up to 36–39% according to the average data for different stimuli.

Keywords: balance control, affective auditory stimuli, center of pressure, destabilising influence