



# СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ



Журнал публикует оригинальные статьи, обзоры, краткие сообщения и хронику по всем вопросам физиологии, морфологии, биофизики, психофизики сенсорных систем, сенсорной биологии, технических сенсорных систем и биосенсоров



НАУКА

— 1727 —



*Российская академия наук*

# СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ

**Том 38      Номер 4      2024**

**ОКТАБРЬ—НОЯБРЬ—ДЕКАБРЬ**

Журнал основан в январе 1987 г.

Выходит 4 раза в год

ISSN: 0235-0092

*Журнал издается под руководством*

*Отделения физиологии и фундаментальной медицины РАН*

**Главный редактор**

**член-корреспондент РАН М. Л. Фирсов**

**Редакционная коллегия:**

д.б.н. И.Г. Андреева (зам. гл. редактора), д.б.н. С.В. Алексеенко,  
д.м.н., проф. Артюшкин С.А., д.б.н. Н.Г. Бибиков, д.м.н.,  
проф. Бобошко М.Ю., д.м.н. Голованова Л.Е.,  
к.б.н. М.А. Грачева (ответственный секретарь),  
доктор наук К. Доннер (Финляндия), к.б.н. М.И. Жуковская,  
чл.-корр. РАН С.С. Колесников, д.б.н., проф. Б.В. Крылов,  
д.б.н. Д.Н. Лапшин, д.ф.-м.н. Малых М.Д., д.физ.-мат.н. П.П. Николаев,  
д.тех.н. Д.П. Николаев, к.б.н. Е.А. Огородникова (ответственный секретарь),  
академик РАН М.А. Островский, д.т.н. Попов С.Б., д.б.н. проф. Г.И. Рожкова,  
чл.-корр. РАН В.Г. Скребицкий, д.б.н., проф. А.Я. Супин (зам. гл. редактора),  
д.м.н. Тварткиладзе Г.А., к.б.н. Р.В. Фролов, чл.-корр. РАН Н.С. Чернецов,  
д.б.н., проф. Т.В. Черниговская, д.тех.н. П.А. Чочиа, д.физ.-мат.н.,  
проф. А.И. Чуличков, д.мед.н., проф. Ю.Е. Шелепин

*Зав. редакцией*

**М.А. Грачева**

*Адрес редакции:*

119071 Москва, Ленинский пр-т., 14

тел. 8-906-759-85-98

*E-mail:* editor.sensys@gmail.com

*E-mail:* editor@sensorysystems.ru

**Адрес в Интернете:** <http://sensorysystems.ru>

**Москва**

ФГУП «Издательство «Наука»

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

**Т. 38. N 4**

---

---

## ОБЗОРЫ

Механическая стимуляция опорных зон стоп как средство предотвращения негативных последствий двигательной разгрузки

*М. П. Бекренева, А. А. Савеко, О. Э. Курбанова, А. М. Рябова, Т. А. Шигуева, Е. С. Томиловская* 3

Водопровод улитки и его значение в патологии слуха. Обзор литературы и собственное наблюдение

*Л. В. Торопчина* 19

---

## СЛУХОВАЯ СИСТЕМА

Влияние сенсорно-когнитивных упражнений на показатели восприятия, внимания и памяти у лиц пожилого возраста

*И. С. Медведев, С. П. Пак, Е. А. Огородникова* 27

Локализация звукового сигнала в условиях маскировки в вертикальной плоскости

*М. Ю. Агаева* 38

Состояние пространственного слуха при симметричной сенсоневральной тугоухости 1-й и 2-й степени по данным опросника SHQ

*Е. А. Клишова, Л. Е. Голованова, И. Г. Андреева* 49

---

## ИНТЕРОРЕЦЕПЦИЯ

Представленность сердечных сокращений в слуховых отделах височной коры у ненаркотизированной кошки

*Н. Г. Бибилов, И. Н. Пигарев* 60

---

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕНСОРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Вычислительно эффективная адаптивная цветовая коррекция

*М. В. Харкевич, О. А. Басова, И. А. Коноваленко* 78

---

---

# CONTENT

---

---

## V. 38. N 4

---

---

### REVIEWS

Mechanical stimulation of the soles support zones as a countermeasure of negative effects of motor unloading <i>M. P. Bekreneva, A. A. Saveko, O. E. Kurbanova, A. M. Riabova, T. A. Shigueva, E. S. Tomilovskaya</i>	3
The cochlear aqueduct and its significance in hearing pathology. Literature review and clinical case <i>L. V. Toropchina</i>	19

---

### AUDITORY SYSTEM

The effect of sensory-cognitive training on perception, attention and memory in elderly people <i>I. S. Medvedev, S. P. Pak, E. A. Ogorodnikova</i>	27
Localization of a sound signal in the vertical plane under masking conditions <i>M. Yu. Agaeva</i>	38
The spatial hearing disability measured by the Spatial Hearing Questionnaire in clinically normal-hearing and in mild or moderate sensorineural hearing loss persons <i>E. A. Klishova, L. E. Golovanova, I. G. Andreeva</i>	49

---

### INTEROCEPTION

The representation of heart contractions in some auditory parts of the temporal cortex in a non-anesthetized cat <i>N. G. Bibikov, I. N. Pigarev</i>	60
---	----

---

### SENSORY PROCESS MODELING

Computationally efficient adaptive color correction <i>M. V. Kharkevich, O. A. Basova, I. A. Konovalenko</i>	78
---	----

---

---

УДК: 612.816

## МЕХАНИЧЕСКАЯ СТИМУЛЯЦИЯ ОПОРНЫХ ЗОН СТОП КАК СРЕДСТВО ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ НЕГАТИВНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ РАЗГРУЗКИ

© 2024 г. М. П. Бекренева<sup>1, \*</sup>, А. А. Савеко<sup>1</sup>, О. Э. Курбанова<sup>1</sup>, А. М. Рябова<sup>1</sup>,  
Т. А. Шигуева<sup>1</sup>, Е. С. Томиловская<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем Российской академии наук, 123007 Москва, Хорошевское шоссе, 76А, Россия

\*E-mail: mbekreneva@gmail.com

Поступила в редакцию 30.06.2024 г.

После доработки 24.07.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

Явления, возникающие в ответ на снижение уровня опорной афферентации, – рефлекторное снижение мышечного тонуса, структурные изменения мышечной периферии, нарушения координации движений – наблюдаются как в условиях невесомости и наземных моделях ее физиологических эффектов, так и у иммобилизованных пациентов, пожилых людей. Формирование концепции триггерной роли опорной афферентации в работе позно-тонической мышечной системы послужило толчком для развития метода опорной стимуляции в качестве меры профилактики негативных последствий двигательной разгрузки.

Данный обзор посвящен рассмотрению результатов применения метода механической стимуляции опорных зон стоп в предотвращении негативных последствий опорной и двигательной разгрузки в практике космической и земной медицины.

**Ключевые слова:** опорная афферентация, опорная стимуляция, двигательная разгрузка, микрогравитация, реабилитация.

**DOI:** 10.31857/S0235009224040017 **EDN:** ADGVBE

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что последствия влияний различных факторов космического полета, в частности фактора невесомости, в той или иной степени встречаются и в земной жизни в условиях гиподинамии, гипокинезии, деафферентации и т.д. (Orlov et al., 2022). Гипокинезия и гиподинамия являются актуальными проблемами современного общества и представляют собой ограничение двигательной активности, которое обусловлено малоподвижным образом жизни, спецификой профессиональной деятельности или длительной иммобилизацией, связанной с восстановительным периодом после травм, инсульта, хирургического вмешательства, а также с заболеваниями опорно-двигательного аппарата. Подобные проблемы возникают и у лиц пожилого возраста, которые постепенно снижают свою двигательную активность вследствие хронических болезней или иных обстоятельств. Очевидно, что двигательная разгрузка сопровождается общим снижением

гравитационной нагрузки на опорно-двигательный аппарат. Исследования функционирования сенсомоторной системы человека в условиях космического полета позволили отметить, что устранение опорной нагрузки в условиях микрогравитации сопровождается существенным снижением опорного афферентного притока от стоп (DeWitt, Ploutz-Snyder, 2014; Fomina et al., 2017; Saveko et al., 2021), что играет ключевую роль в развитии целого ряда негативных последствий двигательной разгрузки (Козловская, 2004). Например, усиливается распад белков саркомерного скелета (Шенкман и др., 2017), может ускоряться процесс деминерализации костной ткани (Свешников и др., 2005).

Концепция триггерной роли опорной афферентации в организации и контроле работы позно-тонической мышечной системы была подтверждена в серии экспериментальных исследований с применением метода механической стимуляции опорных зон стоп в режиме

естественных локомоций (Козловская, 2004; Григорьев и др., 2004; Шенкман и др., 2017). В ряде исследований показано, что устранение опорной нагрузки может запустить каскад нейромоторных адаптаций, начинающихся с изменения порядка вовлечения двигательных единиц в мышцах-разгибателях голени, активно участвующих в контроле позы (Киренская и др., 1986; Шигуева и др., 2013), и, в конечном счете, приводящих к нарушению координации движений. К наиболее выраженным последствиям снижения опорной и двигательной нагрузки относятся: снижение доли вовлечения тонических при одновременном увеличении доли вовлечения фазных мышц в локомоторных движениях (Melnik et al., 2003); снижение поперечной жесткости мышц (Григорьев и др., 2004) и уменьшение размеров мышечных волокон (Шенкман и др., 2003), а также максимальной произвольной силы мышц голени (Popov et al., 2003; Miller et al., 2004); снижение абсолютной силы одиночных скинированных мышечных волокон в изометрическом сокращении, вызванном ионами кальция (Widrick et al., 1999; Шенкман и др., 2003; Григорьев и др., 2004); выявление процессов трансформации миозинового фенотипа в быструю сторону (Шенкман и др., 2003; Григорьев и др., 2004). Таким образом, снижение гравитационной нагрузки закономерно сопровождается глубокими нарушениями во всех звеньях двигательной системы — сенсорных системах, мышечном аппарате и центральных отделах системы управления движениями, что в совокупности получило название гипогравитационного двигательного синдрома (Козловская, 2018; Томиловская и др., 2021). При этом применение метода механической стимуляции опорных зон стоп в режимах, моделирующих естественные локомоции (медленная ходьба — 75 шаг/мин, быстрая ходьба — 120 шаг./мин; величина оказываемого давления — 40 кПа) устраняло в условиях безопорности все вышеперечисленные эффекты (Григорьев и др., 2004; Шенкман и др., 2017). Позже аналогичные результаты о влиянии опорной стимуляции на предотвращение негативных последствий опорной и двигательной разгрузки были также получены Layne и Forth (Layne, Forth, 2008), которые показали, что применение опорной стимуляции эффективно снижает негативные последствия разгрузки.

Более того, с использованием функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) были получены уникальные данные о влиянии механической стимуляции опорных зон стоп на центральную нервную систему (Кремнева и др., 2013; Черникова и др., 2013; Labriffe et al., 2017; Pechenkova et al., 2019). Так, Кремнева и соавторы (Кремнева и др., 2013) показали, что

данная стимуляция вызывает в обоих полушариях головного мозга активацию первичной сомоторной коры и ассоциативных сенсорных областей, которые важны для построения и выполнения локомоторных программ (Черникова и др., 2013). Печенкова и соавторы (Pechenkova et al., 2019) в фМРТ-исследовании, направленном на изучение функциональных связей мозга после длительного космического полета, выявили значительные функциональные изменения в нейронных сетях, связанных с ходьбой, что, тем самым, подчеркнуло значительный вклад фактора опорной разгрузки в развитие выявленных изменений в головном мозге.

Эффективность применения механической опорной стимуляции с целью предотвращения структурных и функциональных изменений опорно-двигательного аппарата, вызванных пребыванием в условиях опорной и двигательной разгрузки, проверялась в исследованиях с участием не только людей, но и животных. Еще до формирования концепции о роли опорной афферентации в регуляции работы позно-тонической системы, а именно в исследованиях, проведенных с участием животных — крыс с вывешенными конечностями, регистрировали положительное влияние опорной стимуляции в предотвращении мышечной атрофии (De-Doncker et al., 2000). Немного позже, одновременно с работами И.Б. Козловской, А.И. Григорьева и Б.С. Шенкмана с участием человека, в экспериментах с участием крыс была показана эффективность опорной стимуляции в предотвращении атрофических изменений позно-тонической мышцы (Nemirovskaya, Shenkman, 2002; Kyparos et al., 2005). Более того, работы последних 5 лет позволяют более глубоко понять механизмы действия опорной стимуляции. Так, Тыганов и соавторы (Tyganov et al., 2021) в исследовании NOS-зависимых эффектов подошвенной стимуляции на механические характеристики белков цитоскелета камбаловидной мышцы крысы показали, что использование данного метода во время 7-суточного вывешивания задних конечностей позволяет предотвращать снижение пассивной жесткости и силы камбаловидной мышцы, а также сохранять на исходном уровне транскрипцию мРНК и содержание белков цитоскелета NOS-зависимым образом. Позже Шарло и соавторы (Sharlo et al., 2022) показали, что механическая стимуляция опорных зон стоп у крыс при подвешивании задних конечностей, посредством поддержания мышечной тонической активности, приводит к сохранению фенотипа медленно сокращающихся окислительных волокон камбаловидной мышцы и устойчивости к утомлению за счет

корегуляции экспрессии генов медленного типа и мышечного окислительного метаболизма.

Подтвержденная уникальность метода механической стимуляции заключается в том, что оказание давления в режиме естественных локомоций на опорные зоны стоп, характеризующиеся максимальной плотностью кожных механорецепторов (телец Мейснера и Фаттера-Пачини), формирует мощный афферентный поток и оказывает регулирующее действие на структуры центральной нервной системы, контролирующие движения, стимулируя процессы нейропластичности (Кремнева и др., 2013; Шенкман и др., 2017; Labriffe et al., 2017; Pechenkova et al., 2019).

Схожесть явлений, возникающих вследствие устранения опоры, и, следовательно, снижения уровня опорной афферентации в условиях невесомости и ее моделях (Kozlovskaya, 2004; 2018; Шенкман и др., 2020; Moore et al., 2019; Saveko et al., 2023), а также у пациентов, иммобилизованных в течение длительного времени, и у пожилых людей (Ратушный, Буравкова, 2023; Pandiarajan, Hargens, 2020), стали основанием для применения метода механической стимуляции опорных зон стоп с целью устранения негативного влияния гипогравитации на двигательную систему человека в наземной медицине (Motanova et al., 2022).

Цель данного обзора состояла в объединении информации о результатах применения метода механической стимуляции опорных зон стоп в качестве меры профилактики негативных последствий опорной и двигательной разгрузки в условиях микрогравитации, наземных моделях, а также у иммобилизованных пациентов вследствие травм и нарушений работы опорно-двигательного аппарата.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ ОПОРНЫХ ЗОН СТОП В УСЛОВИЯХ КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА

Впервые концепция влияния кожных афферентов и механорецепторов в стопе человека на модуляцию постурально-тонической системы млекопитающих возникла в ходе экспериментов, выполненных в условиях микрогравитации и “сухой” иммерсии (СИ) (Козловская, 2004; Kozlovskaya et al., 2007b; Григорьев и др., 2004). При этом первые результаты применения опорной стимуляции стоп были получены в ходе совместного советско-кубинского эксперимента “Суппорт” (Эрнандес Корво и др., 1981). В ходе данного 7-суточного космического эксперимента кубинский космонавт, с целью изучения возможностей

профилактики изменений структурно-функциональных свойств стопы и других двигательных нарушений, использовал устройство “КУПУЛА САНД-501” – сандалии с подпружинными индивидуальными профилированными супинаторами, оказывающими дозированное постоянное давление в диапазоне от 20 до 60 мм рт. ст. на свод стопы. Данное устройство было специально разработано и усовершенствовано в ходе модельных наземных экспериментов на базе Института медико-биологических проблем Министерства здравоохранения СССР (Эрнандес Корво и др., 1981; Егорова, 2011).

Полученные в ходе 7-суточного космического полета результаты доказали профилактический эффект применения метода опорной стимуляции с помощью устройства “КУПУЛА САНД-501”. Так, постоянное давление, которое устройство оказывало на стопу, уменьшало интенсивность вестибулярной иллюзии перевернутого пространства, а также сопровождалось проявлением рефлекса разгибания нижних конечностей, который обычно возникает в нормальной гравитационной среде под воздействием подошвенных раздражений и приводит к исправлению осанки и изменению механизмов пространственного контроля (Эрнандес Корво и др., 1981). Более того, по результатам исследования скоростно-силовых свойств мышц нижних конечностей, у кубинского космонавта после полета было отмечено некоторое увеличение (до 10%) момента силы икроножной и передней большеберцовой мышц на всех скоростных режимах, в том числе в изометрическом, по сравнению с предполетным уровнем.

Важным результатом данного эксперимента явились данные о положительном влиянии применения механической стимуляции на морфофункциональные свойства стоп, а также на поздние и локомоторные характеристики кубинского космонавта. Согласно отчету И.Б. Козловской, систематическая тренировка с устройством “КУПУЛА САНД-501” до полета способствовала скорому исправлению пронационного положения таранной кости, которое возникло вследствие действия фактора безопорности, а также улучшению плантографического чернильного отпечатка стоп. При этом ежедневная профилактическая стимуляция в ходе полета обеспечила предплюсно-плюсневую устойчивость, внутреннюю функциональную линейность и сыгранность опорно-рессорного аппарата стопы. Более того, ежедневная стимуляция привела к повышению порогов вибрационной чувствительности опорных зон стоп, что способствовало более стабильной работе подошвенной поверхности всей стопы. Результаты регистрации распределения проекций общего центра тяжести (ОЦТ), полученные

с помощью измерений на тензометрической платформе до и на первый и третий дни после завершения полета, свидетельствовали о незначительных колебаниях площади проекции ОЦТ кубинского космонавта после возвращения на Землю, а также о тенденции к улучшению позной рефлексии, что, по мнению авторов, было достигнуто за счет использования профилактического устройства. Стоит также отметить, что согласно данным киноциклограмм обычной ходьбы, полученным в пред- и послеполетный периоды, у кубинского космонавта более равномерными и стабильными, чем у советского, оказались траектории перемещения тазобедренного, коленного и голеностопного суставов во время ходьбы (Эрнандес Корво и др., 1981).

Результаты применения устройства для постоянной механической стимуляции опорных зон стоп в ходе эксперимента “Суппорт” указывают на его профилактическую эффективность. Однако результаты этого эксперимента не позволили сделать авторам окончательные выводы, так как в нем принимало участие только 2 космонавта. Несмотря на это, полученный опыт использования данного метода стал основанием для дальнейшего изучения роли опорной афферентации в системе моторного контроля, а также развития метода опорной стимуляции с целью профилактики негативных последствий воздействия фактора гипогравитации.

Следует отметить, что на сегодняшний день уже усовершенствованный метод механической стимуляции опорных зон стоп (с применением стимуляции в режиме естественных локомоций в зонах пятки и плюсны) используется в локомоторных тренировках для профилактики гипогравитационных нарушений на борту Международной космической станции (Фомина и др., 2021).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ ОПОРНЫХ ЗОН СТОП В УСЛОВИЯХ НАЗЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФАКТОРОВ БЕЗОПОРНОСТИ И ДВИГАТЕЛЬНОЙ РАЗГРУЗКИ

##### Модель “сухая” иммерсия

“Сухая” иммерсия (СИ) является одной из наиболее широко используемых наземных моделей микрогравитации, которая точно и быстро воспроизводит такие факторы космического полета, как опорная, двигательная и весовая аксиальная разгрузка (Tomilovskaya et al., 2019; Saveko et al., 2023). Как уже упоминалось ранее, именно в условиях СИ была начата серия исследований

с участием 18 здоровых испытуемых-добровольцев, направленная на подтверждение положения о триггерной роли опорной афферентации в регуляции структурно-функциональных свойств тонической мышечной системы (Григорьев и др., 2004). В ходе этих исследований применяли разработанный сотрудниками ГНЦ РФ – ИМБП РАН и НПО “Звезда” компенсатор опорной разгрузки (КОР). Данное устройство, представляющее собой ботинки с вложенными в них пневматическими стельками, оказывало механическое попеременное давление с силой  $0,5 \pm 0,1$  кг/см<sup>2</sup> на опорные зоны стоп – плюсну и пятку – в режиме естественных локомоций (75 и 120 шагов в минуту). Стимуляцию в ходе 7-суточной СИ проводили ежедневно в течение 6 часов по 20 минут в начале каждого часа.

Результаты наземных модельных исследований подтвердили гипотезу о триггерной роли опорной афферентации в развитии гипогравитационного двигательного синдрома в строгих контролируемых экспериментальных условиях (Григорьев и др., 2004; Kozlovskaya et al., 2007a; 2007b; Layne, Forth, 2008; Popov et al., 2003; Khusnutdinova et al., 2004; Litvinova et al., 2004; Miller et al., 2004; Moukhina et al., 2004; Shenkman et al., 2004a; 2004b; Netreba et al., 2005; Tomilovskaya et al., 2019). Так, Попов и соавторы (Popov et al., 2003) показали, что снижение поперечной жесткости камбаловидной мышцы в группе испытуемых, которые применяли механическую стимуляцию опорных зон стоп, достигало достоверных значений лишь к шестым суткам иммерсионного воздействия, в то время как в контрольной группе уже к концу первых суток жесткость этой мышцы снижалась в среднем на 30%. Кроме того, применение опорной стимуляции позволило полностью предотвратить снижение амплитуды электромиограммы покоя камбаловидной мышцы в ходе СИ, а также снижение ее максимальной изокинетической силы после завершения СИ (Sayenko et al., 2003; Litvinova et al., 2004; Григорьев и др., 2004; Саенко и др., 2010; Миллер, 2010). В ряде работ получили аналогичные результаты при исследовании жесткостных и электромиографических характеристик передней большеберцовой мышцы голени (Григорьев и др., 2004; Miller et al., 2004; 2005; 2010). Стимуляционные воздействия в ходе СИ позволили также предотвратить структурные изменения мышечного аппарата – в группе с применением опорной стимуляции отсутствовали изменения площади поперечного сечения мышечных волокон, не наблюдалось уменьшения доли волокон, содержащих медленные изоформы тяжелых цепей миозина, а также снижения чувствительности миофибрилл к свободным ионам кальция (Григорьев и др., 2004; Moukhina et al.,



2004; Шенкман и др., 2017). Огнева и соавторы (Огнева и др., 2011) показали, что применение механической стимуляции зон стоп приводит к увеличению содержания белка десмина, а также выдвинули предположение, что подобное повышение являлось причиной увеличения жесткости сарколеммы при активации сокращения мышечного волокна.

Применение опорной стимуляции также было эффективным в предотвращении увеличения венозной растяжимости и ортостатической неустойчивости (Vinogradova et al., 2002). Интересно, что намного позже коллектив Амировой и соавторов (Amirova et al., 2016) в исследовании влияния опорной стимуляции на реакции сердечно-сосудистой системы в ходе тестирования ортостатической устойчивости не обнаружили улучшения ортостатической переносимости и существенного влияния стимуляции на число аномальных реакций сердечно-сосудистой системы. Однако стоит учитывать, что в исследовании, проведенном Виноградовой и соавторами (Vinogradova et al., 2002), стимуляция подошвы стопы применялась в качестве ежедневной меры профилактики (20 мин/ч каждые 6 ч, т.е. 2 ч/сут) в течение 7 суток иммерсионного воздействия, в то время как Амирова и соавторы оценивали только воздействие стимуляции подошвы стопы на сердечно-сосудистую систему в нормальных условиях.

Закирова и соавторы (Закирова и др., 2015) при исследовании характеристик Н-рефлекса камбаловидной мышцы у человека показали, что применение опорной стимуляции в ходе 7-суточной СИ оказывало модулирующее влияние на спинальную рефлекторную возбудимость, предотвращая развитие гиперрефлексии, подтвердив ранее полученные Bastani (Bastani et al., 2010) данные об эффектах влияния механической стимуляции подошвы стопы на возбудимость мотонейронного пула камбаловидной мышцы (значительное снижение возбудимости) в нормальных условиях.

В исследовании порядка вовлечения двигательных единиц (ДЕ) мышц-экстензоров голени в задаче удержания небольшого усилия (5–7% от максимальной произвольной силы) показано, что в условиях опорной разгрузки порядок рекрутирования ДЕ отчетливо изменяется, опровергая закон Хеннемана: значительно увеличивается число вовлеченных в выполнение двигательной задачи ДЕ с высокими значениями межмпульсных интервалов (больших ДЕ), практически не участвующих в выполнении подобных задач в нормальных условиях. Применение в ходе “сухой” иммерсии механической стимуляции опорных зон стоп способствовало сохранению

нормального порядка рекрутирования с преимущественным вовлечением в удержание небольшого усилия малых тонических ДЕ (Шигуева и др., 2013).

Более того, использование в условиях СИ метода механической стимуляции опорных зон стоп с помощью компенсатора опорной разгрузки позволило предотвратить и изменения таких интегральных двигательных актов, как локомоции. Так, Мельник и соавторы (Мельник и др., 2006) в исследовании биомеханических характеристик локомоций показали, что стимуляция опорных зон стоп в режиме естественной ходьбы не изменяла энергозатраты мышц, однако нивелировала увеличение амплитуды колебаний угловых параметров, характеризующих движения в коленном суставе при ходьбе, наблюдавшееся после 7-суточного иммерсионного воздействия в группе без средств профилактики.

Механическая опорная стимуляция в режиме естественных локомоций в условиях опорной разгрузки оказывает благоприятное влияние и на зрительно-вестибулярную функцию. В группе испытуемых без стимуляции наблюдались заметные разнонаправленные отклонения в параметрах следящих движений глаз, тогда как в группе испытуемых с механостимуляцией опорных зон стоп эти параметры были близки к исходным значениям. Опорная стимуляция также стабилизировала функцию плавного зрительного слежения (Kornilova et al., 2004).

#### **Модель опорной разгрузки методом вывешивания нижних конечностей**

В дальнейшем влияние механической опорной стимуляции стоп в режиме естественных локомоций (75 и 120 шаг./мин) на работу спинального локomotorного центра было оценено Томиловской и соавторами (Томиловская и др., 2013) в исследовании с участием 20 здоровых испытуемых-добровольцев с использованием модели опорной разгрузки методом вывешивания ног (Gurfinkel et al., 1998; Томиловская и др., 2013). Авторы обнаружили, что ритмическое раздражение опорных зон стоп в режиме локомоции в значительном числе случаев (более 50%) провоцировало у испытуемых возникновение движений, паттерны которых были идентичны ходьбе. Кроме того, авторы отметили, что характеристики регистрировавшихся при движениях показателей электромиографической активности у испытуемых имели общие черты: индивидуальный паттерн локомоций воспроизводился даже в случае раздражений части опорного контура (только пятки или только одной ноги), а частота вызванных шагов не зависела от частотных характеристик стимуляции. Данное

исследование позволило показать, что стимуляция опорных зон стоп активизирует структуры локомоторного генератора и что вызываемый этим раздражением эффект включает запуск не только ритмической, но и неритмической (позной) компоненты ходьбы.

Логическим продолжением описанной работы стало исследование Герасименко и соавторов (Gerasimenko et al., 2016), направленное на изучение интеграции сенсорных, спинномозговых и волевых нисходящих сигналов в регуляции локомоции человека. Авторы изучили конвергенцию чрескожной электрической спинальной стимуляции, механической стимуляции опорных зон стоп и произвольных усилий при активации локомоторных движений у здоровых испытуемых ( $n = 6$ ) при поддержке всего веса тела в вертикальном положении (вертикальном вывешивании). При этом опорная стимуляция осуществлялась тем же методом, что и в работе Томиловской и соавторов (Томиловская и др., 2013). Авторы обнаружили, что опорная стимуляция вызывала всплеск электромиографической активности в мышцах-сгибателях и разгибателях голеностопного сустава у 84% испытуемых. Более того, комбинированная спинальная и опорная стимуляция вызывала более выраженные двигательные реакции, чем любой из методов по отдельности. Авторы предположили, что двигательные реакции, вызываемые только спинальной или только опорной стимуляцией, активируют различные, но перекрывающиеся друг с другом нейронные сети спинного мозга, а при одновременном включении ступенчатые реакции функционально дополняют друг друга. Кроме того, при индуцированном шагании наиболее значительная модуляция произвольного шага происходила в ответ на комбинированную спинальную и опорную стимуляцию. Результаты данной работы подтвердили гипотезу об эффективности применения комбинации спинальной и опорной стимуляции для улучшения восстановления двигательного контроля у людей с неврологическими травмами и расстройствами (Gerasimenko et al., 2016).

Следствием описанных выше исследований явилось применение метода механической стимуляции опорных зон стоп в режиме локомоций в системе нейрореабилитации. С этой целью благодаря совместной работе ученых Института медико-биологических проблем Российской академии наук, специалистов ООО “Центр авиакосмической медицины и технологий” и компании ООО “ВИТ” (Санкт-Петербург, Россия) была создана новая итерация стимулятора: имитатор опорной нагрузки “Корвит”.

Совместимость новой модификации опорного стимулятора с работой МРТ дала возможность специалистам Научного центра неврологии РАН и Института медико-биологических проблем РАН не только исследовать локомоторные проекции опорной стимуляции в коре головного мозга, но и разработать функциональную пробу для контроля процессов реабилитации пациентов после инсульта (Черникова и др., 2013; Саенко и др., 2017).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ ОПОРНЫХ ЗОН СТОП В КЛИНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Результаты применения устройства “Корвит” в реабилитации пациентов после инсульта позволили полагать, что в основе его терапевтического действия лежит процесс активации опорной афферентации, отвечающей за нормализацию соотношения процессов возбуждения и торможения в центральной нервной системе, что приводит к уменьшению спастичности мышц, а также развитию функциональных связей в головном мозге, способствующих восстановлению координации движений (Кремнева и др., 2013; Черникова и др., 2013; Глебова и др., 2014; Саенко и др., 2017). Преимуществом данного устройства является возможность его применения независимо от положения (сидя или лежа) и степени подвижности пациента (Черникова Л.А. и др., 2013).

Применение метода механической стимуляции опорных зон стоп в режиме естественных локомоций оказывает благоприятное влияние на локомоторные и поструральные характеристики у пациентов с нарушениями опорно-двигательного аппарата (Шварков и др., 2011; Саенко и др., 2017; Титаренко и др., 2015). Высокая эффективность использования этой технологии отмечается при реабилитации и восстановлении пациентов с двигательной разгрузкой: на всех этапах реабилитации после инсульта (Шварков и др., 2011; Nordin et al., 2014), включая острый период (Глебова и др., 2014; Саенко и др., 2017), а также при черепно-мозговой травме (Петрова и др., 2019), длительной иммобилизации пациентов различного нозологического профиля, тяжелой полинейропатии (синдром Гийена–Барре) (Хорошун и др., 2012). Также показано, что механическая стимуляция опорных зон стоп эффективна в предотвращении развития ортостатической непереносимости при переломах костей нижних конечностей (Serova et al., 2012), а также при комплексной реабилитации после повреждений спинного мозга (Виссарионов и др., 2016; Shapkova et al., 2021) и травм позвоночника (Shapkova et al., 2017; Толстая и др., 2023). Кроме того, несмотря

на иную этиологию заболевания опорно-двигательного аппарата, нельзя не отметить высокую эффективность применения механической стимуляции опорных зон стоп при детском церебральном параличе (Левченкова и др., 2012; Притыко и др., 2019).

Проведенный анализ литературных данных позволяет отметить высокую эффективность и результативность применения метода в реабилитационной практике. Таким образом, опорная стимуляция сопровождается активацией областей коры головного мозга, ответственных за построение и реализацию программ движений; нормализацией мышечного тонуса в нижних конечностях; активацией механизмов консолидации костей.

Конкретными примерами эффективного применения метода механической стимуляции стоп являются результаты, полученные в российских медицинских учреждениях. Так, в ГБУЗ “Центр патологии речи и нейрореабилитации ДЗМ” было проведено исследование эффективности применения подошвенного имитатора “Корвит” в программе комплексной нейрореабилитации у пациентов с острым нарушением мозгового кровообращения (ОНМК;  $n = 19$ ) и черепно-мозговыми травмами (ЧМТ;  $n = 7$ ). У больных с ОНМК имел место левополушарный инсульт. ЧМТ была представлена последствиями ушиба головного мозга тяжелой степени ( $n = 4$ ) или последствиями оперированной травматической субдуральной гематомы ( $n = 3$ ). У всех больных отмечались выраженные двигательные и речевые нарушения. Помимо применения традиционной медикаментозной терапии, логопедических занятий, лечебной физкультуры, физиотерапевтического и других стандартных методов лечения, для всех больных проводили занятия с применением метода механической стимуляции опорных зон стоп устройством “Корвит”: 20 сеансов в течение 10 дней (по 2 процедуры в день). Стойкий положительный эффект получен у 93% больных с последствиями ОНМК и практически у всех больных с последствиями ЧМТ. В результате проводимой терапии у всех больных отмечена положительная динамика со стороны неврологического статуса. Наибольшие изменения отмечены со стороны нижних конечностей: увеличение мышечной силы, уменьшение спастичности и гиперрефлексии. В процессе лечения уменьшилась выраженность позы Верникс–Манна, больные стали увереннее ходить. Более того, специалисты отметили, что у всех больных повысилась активность двигательной стороны речевого акта, в сравнении с больными, не охваченными лечением данным методом (Шкловский и др., 2022).

Высокая эффективность применения устройства “Корвит” в комплексной реабилитации была также показана Шапковой и соавторами (Шапкова и др., 2013) во время проведения электростимуляции локомоторных центров спинного мозга в сочетании с опорной стимуляцией с целью восстановления локомоторных способностей при нижних параплегиях. Авторы показали, что воздействие прямоугольными импульсами длительностью 0,5 мс с базовой частотой 3 Гц на среднюю часть поясничного утолщения в течение 40–60 мин с одновременной ритмичной стимуляцией опорных зон стоп, имитирующей нагрузку при ходьбе (длительность цикла – 400, 500 и 800 мс; сила давления – 10–40 кПа), увеличило объем вызванных движений в голеностопных суставах в ходе стимуляции у пациентов, при этом эффект сохранялся и даже усиливался после остановки опорной стимуляции. В конце курса наблюдалось увеличение мышечной массы голени, переход к самостоятельной тетрапедальной ходьбе. Стоит подчеркнуть, что метод опорной стимуляции и электромиостимуляция отмечены авторами как взаимодополняющие методы.

Таким образом, опорная стимуляция в локомоторном режиме является надежным методом, показавшим эффективность в реабилитации пациентов с различными неврологическими и двигательными нарушениями.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Специалисты в области реабилитации все чаще используют механическую стимуляцию опорных зон стоп, основанную на принципе пневматического давления на большие области стоп, содержащие максимальное число механорецепторов (Levchenkova et al., 2012; Глебова и др., 2014; Притыко и др., 2019). Здесь важно упомянуть, что существуют и другие методы механической опорной стимуляции, например, точечное давление на кожу стоп (Brognara, Cauli, 2020; Mauer et al., 2001), использование текстурированных поверхностей или обувных стелек (Leelachutidej et al., 2023; Qiu et al., 2013), а также подошвенный массаж (Yumin et al., 2017; Wikstrom et al., 2017). Однако есть все основания полагать, что метод механической стимуляции больших участков стоп, в частности с помощью устройства “Корвит”, является наиболее многообещающим в клинической практике (Кремнева и др., 2013; Черникова и др., 2013).

Подавляющее большинство исследований эффективности применения опорной стимуляции ограничиваются относительно небольшими сроками воздействия факторов опорной и двигательной разгрузки (как правило, не более недели экспозиции). Сведений о профилактической

результативности данного метода при более длительных экспозициях и более глубоких последствиях гипокинезии, иммобилизации или сниженной двигательной активности недостаточно.

Анализ эффектов опорной механостимуляции при длительных экспозициях в условиях космического полета или моделирования действия его факторов на Земле во многом является предметом будущих исследований.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 24–15–00309, <https://rscf.ru/project/24-15-00309/>.

## УЧАСТИЕ АВТОРОВ

Е.С. Томиловская, М.П. Бекренева, А.А. Савеко и Т.А. Шигуева внесли свой вклад в разработку основной идеи. М.П. Бекренева написала первый вариант рукописи. Е.С. Томиловская, А.А. Савеко, Т.А. Шигуева, О.Э. Курбанова и А.М. Рябова внесли свой вклад в доработку рукописи. М.П. Бекренева несла основную ответственность за окончательное содержание. Все авторы внесли свой вклад в редактирование рукописи и одобрили представленную версию.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виссарионов С. В., Солохина И. Ю., Икоева Г. А. и др. Двигательная реабилитация пациента с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы методом неинвазивной электростимуляции спинного мозга в сочетании с механотерапией. *Хирургия позвоночника*. 2016. Т. 13. № 1. С. 8–12. DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2016.1.8-12>.
- Глебова О. В., Максимова М. Ю., Черникова Л. А. Механическая стимуляция опорных зон стоп в остром периоде среднетяжелого и тяжелого инсульта. *Вестник восстановительной медицины*. 2014. Т. 1. С. 71–75.
- Григорьев А. И., Козловская И. Б., Шенкман Б. С. Роль опорной афферентации в организации тонической мышечной системы. *Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова*. 2004. Т. 90. № 5. С. 507–521.
- Егорова О. В. Из истории российско-кубинского сотрудничества в космосе. *Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова. Годичная научная конференция*, 2010. 2011. С. 553.
- Закирова А. З., Шигуева Т. А., Томиловская Е. С., Козловская И. Б. Влияние механостимуляции опорных зон стоп на характеристики Н-рефлекса в условиях безопорности. *Физиология человека*. 2015. Т. 41. № 2. С. 46–52. DOI: 10.7868/S0131164615020174
- Киренская А. В., Козловская И. Б., Сирота М. Г. Влияние иммерсионной гипокинезии на характеристики ритмической активности двигательных единиц камбаловидной мышцы. *Физиология человека*. 1986. Т. 12. № 1. С. 617–632.
- Козловская И. Б. Гравитация и позно-тоническая двигательная система. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2017. Т. 51. № 3. С. 5–21. DOI: 10.21687/0233-528X-2017-51-3-5-21
- Козловская И. Б. Опорная афферентация в контроле тонической мышечной активности. *Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова*. 2004. Т. 90. № 8. С. 418–419.
- Корнилова Л. Н., Алехина М. И., Темникова В. В., Азаров К. А. Следящая функция глаз в условиях 7-суточной “сухой” иммерсии с применением компенсатора опорной разгрузки. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2004. Т. 38. № 6. С. 41–48.
- Кремнева Е. И., Саенко И. В., Черникова Л. А., Червяков А. В., Коновалов Р. Н., Козловская И. Б. Особенности активации зон коры головного мозга при стимуляции опорных рецепторов в норме и при очаговых поражениях ЦНС. *Физиология человека*. 2013. Т. 39. № 5. С. 86–92. DOI: 10.7868/S0131164613050093
- Левченкова В. Д., Семенова К. А. Современные представления о морфологической основе детского церебрального паралича. *Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова*. 2012. Т. 112. № 7–2. С. 4–8.
- Мельник К. А., Артамонов А. Л., Миллер Т. Ф., Воронов А. В. Влияние механической стимуляции опорных зон стоп во время 7-суточной “сухой” иммерсии на кинематические параметры локомоций человека. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2006. Т. 40. № 5. С. 59–65.
- Миллер Т. Ф., Саенко И. В., Попов Д. В., Виноградова О. Л., Козловская И. Б. Влияние безопорности и стимуляции опорных зон стоп на характеристики поперечной жесткости и электромиограммы покоя мышц голени. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2010. Т. 44. № 6. С. 13–17.
- Огнева И. В., Шенкман Б. С., Козловская И. Б. Содержание десмина и альфа-актинина-1 в камбаловидной мышце человека после 7-суточной “сухой” иммерсии. *Доклады Академии наук*. 2011. Т. 436. № 5. С. 709–711.

- Петрова Н. В., Трусов В. А., Киселев Н. П., Макиев Е. А. Возможности современных технологий нейрореабилитации в лечении последствий ЧМТ. *Вестник Совета молодых ученых и специалистов Челябинской области*. 2019. Т. 1. № 4. С. 43–46.
- Притыко А. Г., Чебаненко Н. В., Зыков В. П. и др. Опыт применения проприоцептивного моделирования ходьбы у детей раннего возраста с двигательными расстройствами. *Русский журнал детской неврологии*. 2019. Т. 14. № 3. С. 16–27. DOI: 10.17650/2073–8803–2019–14–3–16–27
- Свешников А. А., Смотров Л. А., Овчинников Е. Н. Механизмы деминерализации костной ткани. *Генный ортопедии*. 2005. № 2. С. 95–99.
- Саенко И. В., Кремнева Е. И., Глебова О. В. и др. Новые подходы в реабилитации больных с поражениями ЦНС, базирующиеся на гравитационных механизмах. *Физиология человека*. 2017. Т. 43. № 5. С. 118–128. DOI: 10.7868/S0131164617050137
- Серова Н. Ю., Тищенко М. К., Никишов С. О. Применение метода пневматической имитации опорной нагрузки при переломах костей голени у детей. *Вопросы современной педиатрии*. 2012. Т. 11. № 4. С. 74–80. DOI: 10.15690/vsp.v11i4.362
- Соловьева А. А., Седова Е. А., Томиловская Е. С., Шигуева Т. А., Афонин Б. В. Функциональная активность печени в условиях иммерсии и влияние на нее средств профилактики. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2014. Т. 48. № 2. С. 16–23.
- Титаренко Н. Ю., Левченкова В. Д., Семенова К. А., Батышева Т. Т., Доценко В. И. Современные нехирургические подходы к коррекции двигательных нарушений у больных церебральным параличом детей: обзор литературы. *Детская и подростковая реабилитация*. 2015. № 2. С. 71–79.
- Толстая С. И., Иванова Г. Е., Дуров О. В. и др. Реабилитация больных с заболеваниями и травмой шейного отдела позвоночника в раннем и позднем послеоперационном периоде (анализ российских и зарубежных рекомендаций). *Клиническая практика*. 2023. Т. 14. № 2. С. 54–65. DOI: 10.17816/clinpract472096
- Томиловская Е. С., Мошонкина Т. Р., Городничев Р. М. и др. Механическая стимуляция опорных зон стоп: неинвазивный способ активации генераторов шагательных движений у человека. *Физиология человека*. 2013. Т. 39. № 5. С. 34. DOI: 10.7868/S0131164613050159
- Томиловская Е. С., Шенкман Б. С., Козловская И. Б. Гипогравитационный двигательный синдром: природа и механизмы развития. *Новые подходы к изучению проблем физиологии экстремальных состояний*. 2021. С. 77.
- Фомина Е. В., Лысова Н. Ю., Савинкина А. О. и др. Роль стимуляции рецепторов опоры в локомоторных тренировках для профилактики гипогравитационных нарушений. *Физиология человека*. 2021. Т. 47. № 3. С. 88–97. DOI: 10.31857/S013116462103005X
- Хорошун А. А., Пирадов М. А., Черникова Л. А. Новые технологии нейрореабилитации: имитатор опорной нагрузки при синдроме Гийена–Барре. *Анналы клинической и экспериментальной неврологии*. 2012. Т. 6. № 1. С. 20–24.
- Черникова Л. А., Кремнева Е. И., Червяков А. В. и др. Новые подходы в изучении механизмов нейропластических процессов у больных с поражениями центральной нервной системы. *Физиология человека*. 2013. Т. 39. № 3. С. 54–60. DOI: 10.7868/S0131164613030053
- Шапкова Е. Ю., Емельяников Д. В., Ларионова Ю. Е. Сенсомоторные и локомоторные перестройки при хроническом посттравматическом поражении взрослого спинного мозга человека как свидетельство активность-зависимой нейропластичности. *Физиология человека*. 2021. Т. 47. № 4. С. 5–16. DOI: 10.31857/S0131164621040147
- Шапкова Е. Ю., Штырина Е. В., Саенко И. В., Козловская И. Б. Электростимуляция локомоторной зоны спинного мозга и пневмостимуляция опорной части стопы для восстановления локомоторных способностей при нижних параплегиях. *“Поленовские чтения”: материалы XII научно-практической конференции*. 2013. С. 418.
- Шварков С. Б., Титова Е. Ю., Мизиева З. М., Матвеева О. С., Бобровская А. Н. Применение методов комплексной проприоцептивной коррекции в восстановлении двигательных функций у больных инсультом. *Клиническая практика*. 2011. Т. 2. № 3. С. 3–8.
- Шенкман Б. С., Виноградова О. Л., Мазин М. Г. и др. Физиологическая стоимость физической нагрузки и объем митохондрий рабочих мышц у людей в условиях длительной гипокинезии. Эффекты резистивных локальных нагрузок. *Физиология человека*. 2003. Т. 29. № 2. С. 75–80.
- Шенкман Б. С., Григорьев А. И., Козловская И. Б. Гравитационные механизмы в тонической двигательной системе. Нейрофизиологические и мышечные аспекты. *Физиология человека*. 2017. Т. 43. С. 104–117. DOI: 10.7868/S0131164617050149
- Шенкман Б. С., Мирзоев Т. М., Козловская И. Б. Тоническая активность и гравитационный контроль постральной мышцы. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2020. Т. 54. № 6. С. 58–72.
- Шигуева Т. А., Закирова А. З., Томиловская Е. С., Козловская И. Б. Влияние опорной разгрузки на порядок рекрутирования двигательных единиц. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2013. Т. 47. № 3. С. 50–53.

- Шкловский В. М., Фукалов Ю. А., Мамичева Е. Д. *Отчет о применении подошвенного имитатора опорной нагрузки (модель "КОРВИТ"). Центр патологии и нейрореабилитации ДЗ г. Москвы.* URL: <https://korvit.org/wp-content/uploads/2022/06/otzyv-czprin.pdf>
- Эрнандес Корво Р., Козловская И. Б., Крейдич Ю. В. и др. Эксперимент "Суппорт". *Исследование влияния 7-суточного космического полета на структуру и функцию опорного аппарата человека.* Гавана; Москва, 1981.
- Amirova L. E., Navasiolava N. M., Bareille M. P. et al. Effects of plantar stimulation on cardiovascular response to orthostatism. *European journal of applied physiology.* 2016. V. 116. P. 2257–2266.
- Bastani A., Hadian M. R., Talebian S., Bagheri H., Olyae G. R. Modulation of the ipsilateral and contralateral H reflexes following ipsilateral mechanical pressure of the foot in normal subjects // *Electromyography and Clinical Neurophysiology.* 2010. V. 50. P. 251–256.
- Brognara L., Cauli O. Mechanical plantar foot stimulation in Parkinson's disease: a scoping review. *Diseases.* 2020. V. 8. P. 12. DOI: 10.3390/diseases8020012
- De-Doncker L., Picquet F., Falempin M. Effects of cutaneous receptor stimulation on muscular atrophy developed in hindlimb unloading condition. *Journal of Applied Physiology.* 2000. V. 89(6). P. 2344–2351. DOI: 10.1152/jappl.2000.89.6.2344.
- De Witt J. K., Ploutz-Snyder L. L. Ground reaction forces during treadmill running in microgravity. *Journal of biomechanics.* 2014. V. 47. P. 2339–2347.
- Fomina E. V., Savinkina A. O., Yarmanova E. N. Ground reaction force values in cosmonauts during locomotor exercises on board the International space station. *Hum. Physiol.* 2017. V. 43. P. 542–548. DOI:10.1134/S0362119717050048
- Gerasimenko Y., Gad P., Sayenko D. et al. Integration of sensory, spinal, and volitional descending inputs in regulation of human locomotion. *Journal of neurophysiology.* 2016. V. 116. P. 98–105. DOI:10.1152/jn.00146.2016
- Gurfinkel V. S., Levik Yu. S., Kazennikov O. V., Selionov V. A. Locomotor-like movements evoked by leg muscle vibration in humans. *European Journal of Neuroscience.* 1998. V. 10. P. 1608–1612. DOI: 10.1046/j.1460–9568.1998.00179.x
- Khusnutdinova D., Netreba A., Kozlovskaya I. Mechanical stimulation of the soles support zones as a countermeasure of the contractile properties decline under microgravity conditions. *J. Gravit. Physiol.* 2004. V. 11. P. 141–2.
- Kozlovskaya I. B., Sayenko I. V., Miller T. F. Erratum to: New approaches to counter measures of the negative effects of micro-gravity in long-term space flights: [Acta Astronautica 59 (2006) 13–19]. *Acta Astronautica.* 2007a. V. 60. P. 783–789. DOI: 10.1016/j.actaastro.2006.09.038
- Kozlovskaya I. B., Sayenko I. V., Sayenko D. G. et al. Role of support afferentation in control of the tonic muscle activity. *Acta Astronautica.* 2007b. V. 60. P. 285–294. DOI: 10.1016/j.actaastro.2006.08.010
- Kyparos A., Feeback D. L., Layne C. S., Martinez D. A., Clarke M. S. Mechanical stimulation of the plantar foot surface attenuates soleus muscle atrophy induced by hindlimb unloading in rats. *J. Appl. Physiol.* 2005. V. 99. P. 739–746. DOI: 10.1152/japplphysiol.00771.2004
- Labriffe M., Annweiler C., Amirova L. E. et al. Brain activity during mental imagery of gait versus gait-like plantar stimulation: a novel combined functional MRI paradigm to better understand cerebral gait control. *Frontiers in Human Neuroscience.* 2017. V. 11. P. 106. DOI: 10.3389/fnhum.2017.00106
- Layne C. S., Forth K. E. Plantar stimulation as a possible countermeasure to microgravity-induced neuromotor degradation. *Aviation, space, and environmental medicine.* 2008. V. 79(8). P. 787–794. DOI: 10.3357/ASEM.2293.2008
- Leelachutidej O., Srisawasdi G., Chadchavalpanichaya N., Sukthomya S. Influence of Textured Surface Insoles on Postural Control in Older Adults. *Journal of The Department of Medical Services.* 2023. V. 48. P. 45.
- Litvinova K. S., Vikhlyantsev I. M., Kozlovskaya I. B., Podlubnaya Z. A., Shenkman B. S. Effects of artificial support stimulation on fiber and molecular characteristics of soleus muscle in men exposed to 7-day dry immersion. *J. Gravit. Physiol.* 2004. V. 11. P. 131–2.
- Maurer C., Mergner T., Bolha B., Hlavacka F. Human balance control during cutaneous stimulation of the plantar soles. *Neuroscience Letters.* 2001. V. 302. P. 45–48. DOI: 10.1016/S0304–3940(01)01655-X
- Miller T., Ivanov O., Galanov D., Guekht A., Sayenko I. Mechanical stimulation of the foot support zones as a way to maintain activity of the tonic muscular system during functional support deprivation. *J. Gravit. Physiol.* 2005. V. 12. P. 149–150.
- Miller T. F., Saenko I. V., Popov D. V., Vinogradova O. L., Kozlovskaya I. B. Effect of mechanical stimulation of the support zones of soles on the muscle stiffness in 7-day dry immersion. *J. Gravit. Physiol.* 2004. V. 11. P. 135–136.
- Moore S. T., Dilda V., Morris T. R. et al. Long-duration spaceflight adversely affects post-landing operator proficiency. *Scientific reports.* 2019. V. 9. P. 2677. DOI: 10.1038/s41598–019–39058–9
- Motanova E., Bekreneva M., Rukavishnikov I. et al. Application of space technologies aimed at proprioceptive correction in terrestrial medicine in Russia. *Frontiers*

- in Physiology*. 2022. V. 13. P. 921862. DOI: 10.3389/fphys.2022.921862
- Moukhina A., Shenkman B., Blottner D., Nemirovskaya T. et al. Effects of support stimulation on human soleus fiber characteristics during exposure to “dry” immersion // *J. Gravit. Physiol.* 2004. V. 11. P. 137–138.
- Nemirovskaya T. L., Shenkman B. S. Effect of support stimulation on unloaded soleus in rat. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2002. V. 87. P. 120–126. DOI: 10.1007/s00421-002-0603-7
- Nordin N., Xie S. Q., Wünsche B. Assessment of Movement Quality in Robot-Assisted Upper Limb Rehabilitation after Stroke: A Review. *J. NeuroEngineering Rehabilitation*. 2014. V. 11. P. 1–23. DOI: 10.1186/1743-0003-11-137
- Orlov O. I., Belakovskiy M. S., Kussmaul A. R., Tomilovskaya E. S. Using the Possibilities of Russian Space Medicine for Terrestrial Healthcare. *Front. Physiol.* 2022. V. 13. P. 921487. DOI: 10.3389/fphys.2022.921487
- Pandiarajan M., Hargens A. R. Ground-based analogs for human spaceflight. *Frontiers in physiology*. 2020. V. 11. P. 716. DOI: 10.3389/fphys.2020.00716
- Pechenkova E., Nosikova I., Rumshiskaya A. et al. Alterations of functional brain connectivity after long-duration spaceflight as revealed by fMRI. *Frontiers in Physiology*. 2019. V. 10. P. 761. DOI: 10.3389/fphys.2019.00761
- Popov D. V., Saenko I. V., Vinogradova O. L., Kozlovskaya I. B. Mechanical stimulation of foot support zones for preventing unfavourable effects of gravitational unloading. *J. Gravit. Physiol.* 2003 V. 10. P. 59–60.
- Qiu F., Cole M. H., Davids K. W. et al. Effects of textured insoles on balance in people with Parkinson's disease. *PLoS One*. 2013. V. 8. P. e83309. DOI: 10.1371/journal.pone.0083309
- Ratushnyy A. Y., Buravkova L. B. Microgravity Effects and Aging Physiology: Similar Changes or Common Mechanisms?. *Biochemistry (Moscow)*. 2023. V. 88. P. 1763–1777.
- Saveko A., Bekreneva M., Ponomarev I. et al. Impact of different ground-based microgravity models on human sensorimotor system. *Frontiers in Physiology*. 2023. V. 14. P. 1085545. DOI: 10.3389/fphys.2023.1085545
- Saveko A., Brykov V., Kitov V., Shpakov A., Tomilovskaya E. Adaptation in gait to lunar and martian gravity unloading during long-term isolation in the ground-based space station model. *Frontiers in human neuroscience*. 2022. V. 15. P. 742664. DOI: 10.3389/fnhum.2021.742664
- Sayenko I. V., Vinogradova O. L., Sayenko D. G. et al. Simulated support as a countermeasure against motor disorders during dry immersion // *In: Proc. International Congress “Motor control”*. Sofia. 2003.
- Shapkova E., Emeljannikov D., Shtyrina E., Mushkin A. Neurological Complications of Multisegmental Spine Reconstruction in Children: Post-Op Spinal Cord Electrical Stimulation (SCES) and Training Decrease Motor Deficit. *Global Spine Journal*. 2016. V. 6(1\_suppl). P. s-0036–1582657. DOI: 10.1055/s-0036-1582657
- Sharlo K., Lvova I., Turtikova O. et al. Plantar stimulation prevents the decrease in fatigue resistance in rat soleus muscle under one week of hindlimb suspension. *Archives of biochemistry and biophysics*. 2022. V. 718. P. 109150. DOI: 10.1016/j.abb.2022.109150
- Shenkman B. S., Litvinova K. S., Nemirovskaya T. L. et al. Afferent and peripheral control of muscle fiber properties during gravitational unloading. // *J. Gravit. Physiol.* 2004a. V. 11. P. 111–114.
- Vinogradova O. L., Popov D. V., Saenko I. V., Kozlovskaya I. B. Muscle transverse stiffness and venous compliance under conditions of simulated supportlessness. *Life in Space for Life on Earth*. 2002. V. 501. P. 65–67.
- Shenkman B. S., Podlubnaya Z. A., Vihlyantsev I. M. et al. Contractile characteristics and sarcomeric cytoskeletal proteins of human soleus fibers in muscle unloading: role of mechanical stimulation from the support surface. *Biophysics*. 2004b. V. 49. P. 881–890.
- Tomilovskaya E., Shigueva T., Sayenko D., Rukavishnikov I., Kozlovskaya I. Dry immersion as a ground-based model of microgravity physiological effects. *Frontiers in physiology*. 2019. V. 10. P. 284. DOI: 10.3389/fphys.2019.00284
- Tyganov S. A., Mochalova E. P., Melnikov I. Y. et al. NOS-dependent effects of plantar mechanical stimulation on mechanical characteristics and cytoskeletal proteins in rat soleus muscle during hindlimb suspension. *The FASEB Journal*. 2021. V. 35. P. e21905. DOI: 10.1096/fj.202100783R
- Widrick J. J., Knuth S. T., Norenberg K. M. et al. Effect of a 17 day spaceflight on contractile properties of human soleus muscle fibres. *The Journal of physiology*. 1999. V. 516. P. 915–930. DOI: 10.1111/j.1469-7793.1999.0915u.x
- Wikstrom E. A., Song K., Lea A., Brown N. Comparative effectiveness of plantar-massage techniques on postural control in those with chronic ankle instability. *Journal of the Athletic Training*. 2017. V. 52. P. 629–635. DOI: 10.4085/1062-6050-52.4.02
- Yumin T. E., Simsek T. T., Sertel M., Ankarali H., Yumin M. The effect of foot plantar massage on balance and functional reach in patients with type II diabetes. *Physiotherapy Theory and Practice*. 2017. V. 33. P. 115–123. DOI: 10.1080/09593985.2016.1271849

# MECHANICAL STIMULATION OF THE SOLES SUPPORT ZONES AS A COUNTERMEASURE OF NEGATIVE EFFECTS OF MOTOR UNLOADING

**M.P. Bekreneva<sup>a,\*</sup>, A.A. Saveko<sup>a</sup>, O.E. Kurbanova<sup>a</sup>, A.M. Riabova<sup>a</sup>, T.A. Shigueva<sup>a</sup>,  
E.S. Tomilovskaya<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> State Scientific Center of the Russian Federation – Institute of Biomedical Problems of RAS,  
123007 Moscow, Khoroshovskoe highway, 76A, Russia

\*E-mail: mbekreneva@gmail.com

Phenomena that occur in response to a decrease in support afferentation, such as a reflex decrease in muscle tone, structural changes in the muscular periphery, and impaired coordination of movements, were observed both in microgravity and in ground-based models of its physiological effects, as well as in immobilized patients and the elderly. The discovery of the concept of the trigger role of support afferentation in the activity of postural-tonic muscle system led to the development of methods of the support stimulation as a countermeasure for the motor unloading negative consequences. This review aims to discuss the results of applying the method of mechanical stimulation of the soles support zones to mitigate negative consequences of the support and motor unloading in space and ground-based medical practice.

**Keywords:** support afferentation, support stimulation, motor unloading, microgravity, rehabilitation

## REFERENCES

- Vissarionov S. V., Solokhina I. Yu., Ikoeva G. A. et al. Motor rehabilitation of patients with consequences of spinal cord injury using noninvasive electrical stimulation of the spinal cord combined with mechanotherapy. *Hirurgia pozvonochnika* [Spinal surgery]. 2016. V. 13. P. 8–12. DOI: 10.14531/ss2016.1.8–12 (in Russian).
- Glebova O. V., Maksimova M. Yu., Chernikova L. A. Mekhanicheskaya stimulyatsiya opornykh zon stop v ostrom periode sredne-tyazhelogo i tyazhelogo insulta [Mechanical stimulation of the supporting zones of the feet in the acute period of moderate and severe stroke]. *Vestnik vosstanovitel'noi meditsiny* [Bulletin of Restorative Medicine]. 2014. V. 1. P. 71–75 (in Russian).
- Grigoriev A. I., Kozlovskaya I. B., Shenkman B. S. The role of support afferents in organisation of the tonic muscle system. *Rossiiskii fiziologicheskii zhurnal im. I. M. Sechenova* [I. M. Sechenov Russian Journal of Physiology]. 2004. V. 74. P. 675–675 (in Russian).
- Egorova O. V. Iz istorii rossiisko-kubinskogo sotrudnichestva v kosmose [From the history of Russian-Cuban cooperation in space.]. *Institut istorii estestvoznaniya i tekhniki im. S. I. Vavilova. Godichnaya nauchnaya konferentsiya, 2010* [Institute of the History of Natural Sciences and Technology named after S. I. Vavilova. Annual Scientific Conference, 2010]. 2011. P. 553–556 (in Russian).
- Zakirova A. Z., Shigueva T. A., Tomilovskaya E. S., Kozlovskaya I. B. Effects of Mechanical Stimulation of the Soles' Support Zones on H-reflex Characteristics under Support Unloading Condition. *Fiziologiya Cheloveka* [Human Physiology]. 2015. V. 41. P. 46–52. DOI: 10.7868/S0131164615020174 (in Russian).
- Kirenskaia A. V., Kozlovskaya I. B., Sirota M. G. Effect of immersion hypokinesia on the characteristics of the rhythmic activity of the motor units of the soleus muscle. *Fiziologiya cheloveka*. 1986. V. 12(4). P. 627–632 (in Russian).
- Kozlovskaya I. B. Gravity and the tonic postural motor system. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* [Aerospace and environmental medicine]. 2017. V. 51. P. 5–21. DOI: 10.21687/0233–528X-2017–51–3–5–21 (in Russian).
- Kozlovskaya I. B. Opornaya afferentatsiya v kontrole tonicheskoi myshechnoi aktivnosti [Support afferentation in the control of tonic muscle activity]. *Rossiiskii fiziologicheskii zhurnal im. I. M. Sechenova* [I. M. Sechenov Russian Journal of Physiology]. 2004. V. 90. P. 418–419 (in Russian).
- Kornilova L. N., Alekhina M. I., Temnikova V. V., Azarov K. A. Pursuit function of the eye during 7-day dry immersion without and with a support stimulator. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* [Aerospace and environmental medicine]. 2004. V. 38. P. 41–48 (in Russian).
- Kremneva E. I., Saenko I. V., Chernikova L. A. et al. Specifics of Activation of Cortex by Stimulation of Support Receptors in Healthy Subjects and in Patients with Lesions of CNS. *Fiziologiya Cheloveka* [Human Physiology]. 2013. V. 39. P. 86–92. DOI: 10.7868/S0131164613050093 (in Russian).
- Levchenkova V. D., Semjonova K. A. Contemporary views of the morphological basis of infant cerebral palsy. *Zhurnal nevrologii i psikiatrii im. S. S. Korsakova* [Journal of Neurology and Psychiatry named after S. S. Korsakov.]. 2012. V. 112. P. 4–8 (in Russian).
- Melnik K. A., Artamonov A. A., Miller T. F., Voronov A. V. Effects of mechanic stimulation of the foot support zones



- on locomotion kinematics during 7-day dry immersion. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* [Aerospace and Environmental Medicine]. 2006. V. 40. P. 59–65 (in Russian).
- Miller T. F., Saenko I. V., Popov D. V., Vinogradova O. L., Kozlovskaya I. B. Effect of support deprivation and stimulation of the feet support zones on the characteristics of cross stiffness and electromyogram of resting muscles of the calf in 7-day immersion. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* [Aerospace and Environmental Medicine]. 2010. V. 44. P. 13–17 (in Russian).
- Ogneva I. V., Shenkman B. S., Kozlovskaya I. B. Soderzhanie desmina i al'fa-aktinina-1 v kambalovidnoi myshtse cheloveka posle 7-sutochnoi "sukhoi" immersii [The content of desmin and alpha-actinin-1 in human flounder muscle after 7-day "dry" immersion]. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences]. 2011. V. 436. P. 709–711 (in Russian).
- Petrova N. V., Trusov V. A., Kislov N. P., Makiev E. A. Modern neurorehabilitation technologies in traumatic brain injury consequences. *Vestnik Soveta molodykh uchenykh i spetsialistov Chelyabinskoi oblasti* [Bulletin of the Council of Young Scientists and Specialists of the Chelyabinsk region]. 2019. V. 1. P. 43–46 (in Russian).
- Prityko A. G., Chebanenko N. V., Zykov V. P. et al. Experience of application of proprioceptive modeling of walking in children of early age with motor disorders. *Russkiy zhurnal detskoy nevrologii* [Russian Journal of Child Neurology]. 2019. V. 14(3). P. 16–27. DOI: 10.17650/2073–8803–2019–14–3–16–27 (in Russian).
- Sveshnikov A. A., Smotrova L. A., Ovchinnikov E. N. Mekhanizmy demineralizatsii kostnoi tkani [Mechanisms of bone demineralization.]. *Genii ortopedii* [The genius of orthopedics.]. 2005. № 2. P. 95–99 (in Russian).
- Saenko I. V., Kremneva E. I., Glebova O. V. et al. New Approaches in the Rehabilitation of Patients with Central Nervous System Lesions Based on the Gravitational Mechanisms. *Fiziologiya Cheloveka* [Human Physiology]. 2017. V. 43. P. 118–128. DOI: 10.7868/S0131164617050137 (in Russian).
- Serova N. J., Tishchenko M. K., Nikishov S. J. The method of pneumatic imitation of weight-bearing in children with shin fractures. *Current Pediatrics*. 2012. V. 11. P. 74–80. DOI: 10.15690/vsp.v11i4.362 (in Russian).
- Solovieva A. A., Sedova E. A., Tomilovskaya E. S., Shigueva T. A., Afonin B. V. Functional activity of the liver in immersion and effects of the countermeasures. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* [Aerospace and Environmental Medicine]. 2014. V. 48. P. 16–23 (in Russian).
- Titarenko N. Yu., Levchenkova V. D., Semenova K. A., Batysheva T. T., Dotsenko V. I. Current non-surgical approaches to correct motion disorders in cerebral palsy children: the literature review. 2015. *Detskaya i podrostkovaya reabilitatsiya* [Child. Adolesc. Rehabil.]. V. 2. P. 71–79 (in Russian).
- Tolstaya S. I., Ivanova G. E., Durov O. V. et al. Rehabilitation of spinal patients with diseases and injury of the cervical spine in the early and late postoperative period (analysis of russian and foreign recommendations). *Journal of Clinical Practice*. 2023. V. 14. P. 54–65. DOI: 10.17816/clinpract472096 (in Russian).
- Tomilovskaya E. S., Shigueva T. A., Zakirova A. Z. et al. Mechanical Stimulation of Soles' Support Zones: Non-Invasive Method of Activation of Generators of Stepping Movements in Man. *Fiziologiya Cheloveka* [Human Physiology]. 2013. V. 39. P. 34. DOI: 10.7868/S0131164613050159 (in Russian).
- Tomilovskaya E. S., Shenkman B. S., Kozlovskaya I. B. Gipogravitatsionnyi dvigatel'nyi sindrom: priroda i mekhanizmy razvitiya [Hypogravitational motor syndrome: the nature and mechanisms of development]. *Novye podkhody k izucheniyu problem fiziologii ekstremal'nykh sostoyanii* [New approaches to the study of the problems of the physiology of extreme conditions]. 2021. P. 77 (in Russian).
- Fomina E. V., Lysova N. Y., Savinkina A. O. et al. Role of Support Receptor Stimulation in Locomotor Training for the Prevention of Hypogravitational Disorders. *Fiziologiya Cheloveka* [Human Physiology]. 2021. V. 47(3). P. 88–97. DOI: 10.31857/S013116462103005X (in Russian).
- Khoroshun A. A., Piradov M. A., Chernikova L. A. New technologies in rehabilitation: plantar imitator of bearing load for patients with Guillain-Barre syndrome. *Annaly klinicheskoi i eksperimental'noi nevrologii* [Annals of Clinical and Experimental Neurology]. 2012. V. 6(1). P. 20–24 (in Russian).
- Chernikova L. A., Kremneva E. I., Chervyakov A. V. et al. New Approaches in the Study of Neuroplasticity Process in Patients with Central Nervous System Lesion. *Fiziologiya Cheloveka* [Human Physiology]. 2013. V. 39. P. 54–60. DOI: 10.7868/S0131164613030053 (in Russian).
- Shapkova E. Y., Emelyannikov D. V., Larionova Y. E. Sensorimotor and Locomotor Adjustments in the Chronic Post-Traumatic Spinal Cord Damage in Human Adults as Evidence of Activity-Dependent Neuroplasticity. *Fiziologiya Cheloveka* [Human Physiology]. 2021. V. 47. P. 5–16. DOI: 10.31857/S0131164621040147 (in Russian).
- Shapkova E. Y., Shtyrina E. V., Saenko I. V., Kozlovskaya I. B. Elektrostimulyatsiya lokomotornoj zony spinnogo mozga i pnevmostimulyatsiya opornoj chasti stopy dlya vosstanovleniya lokomotornykh sposobnostei pri nizhnikh paraplegiyakh [Electrical stimulation of the locomotor zone of the spinal cord and pneumostimulation of the supporting part of the foot to restore locomotor abilities in lower paraplegia.]. *"Polenovskie chteniya": materialy XII nauchno-prakticheskoi konferentsii* ["Polenov readings": materials of the XII scientific and practical conference]. 2013. P. 418 (in Russian).

- Shvarkov S. B., Titova E. U., Mizieva Z. M., Matveeva O. S., Bobrovskaya A. N. Application of integrated proprioceptive correction in motor recovery in patients with stroke. *Klinicheskaya praktika* [Clinical practice]. 2011. V. 2. P. 3–8 (in Russian).
- Shenkman B. S., Vinogradova O. L., Mazin M. G. et al. Fiziologicheskaya stoimost' fizicheskoy nagruzki i ob'em mitokhondrij rabochikh myshc u lyudej v usloviyakh dlitel'noj gipokinezii. Effekti rezistivnykh lokal'nykh nagruzok. [The physiological value of physical activity and the volume of mitochondria of working muscles in people with prolonged hypokinesia. Effects of resistive local loads]. *Fiziologiya cheloveka* [Human Physiology]. 2003. V. 29. P. 75–80 (in Russian).
- Shenkman B. S., Grigoriev A. I., Kozlovskaya I. B. Gravity Mechanisms in Tonic Motor System. Neurophysiological and Muscle Aspects. *Fiziologiya Cheloveka* [Human Physiology]. 2017. V. 43. P. 104–117. DOI: 10.7868/S0131164617050149 (in Russian).
- Shenkman B. S., Mirzoev T. M., Kozlovskaya I. B. Tonic activity and gravitational control of the postural muscle. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* [Aerospace and Environmental Medicine]. 2020. V. 54. P. 58–72 (in Russian).
- Shigueva T. A., Zakirova A. Z., Tomilovskaya E. S., Kozlovskaya I. B. Effect of support deprivation on the sequence of motor units recruiting. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* [Aerospace and Environmental Medicine]. 2013. V. 47. P. 50–53 (in Russian).
- Shklovsky B. M., Fukalov Yu. A., Mamicheva E. D. *Otchet o primenении podoshvennogo imitatora opornoj nagruzki (model' "KORVIT")*. Tsentral'noy patologii i neiroreabilitatsii DZ g. Moskvy. [Report on the use of a plantar support load simulator (KORVIT model). Center of Speech Pathology and Neurorehabilitation]. 2022. URL: <https://korvit.org/wp-content/uploads/2022/06/otzyv-czprin.pdf> (in Russian).
- Ernandes Korvo R., Kozlovskaya I. B., Kreidich Yu. V. et al. Eksperiment "Support". Issledovanie vliyaniya 7-sutochnogo kosmicheskogo poleta na strukturu i funktsiyu opornogo apparata cheloveka [The "Support" study. Study of the effects of 7-day space flight on the structure and function of the human support apparatus]. Havana; Moscow, 1981. (in Russian).
- Amirova L. E., Navasiolava N. M., Bareille M. P. et al. Effects of plantar stimulation on cardiovascular response to orthostatism. *European journal of applied physiology*. 2016. V. 116. P. 2257–2266.
- Bastani A., Hadian M. R., Talebian S., Bagheri H., Olyaei G. R. Modulation of the ipsilateral and contralateral H reflexes following ipsilateral mechanical pressure of the foot in normal subjects. *Electromyography and Clinical Neurophysiology*. 2010. V. 50. P. 251–256.
- Brognara L., Cauli O. Mechanical plantar foot stimulation in Parkinson's disease: a scoping review. *Diseases*. 2020. V. 8(2). P. 12. DOI: 10.3390/diseases8020012
- De-Doncker L., Picquet F., Falempin M. Effects of cutaneous receptor stimulation on muscular atrophy developed in hindlimb unloading condition. *Journal of Applied Physiology*. 2000. V. 89(6). P. 2344–2351. DOI: 10.1152/jappl.2000.89.6.2344
- De Witt J. K., Ploutz-Snyder L. L. Ground reaction forces during treadmill running in microgravity. *Journal of biomechanics*. 2014. V. 47. P. 2339–2347.
- Fomina E. V., Savinkina A. O., Yarmanova E. N. Ground reaction force values in cosmonauts during locomotor exercises on board the International space station. *Hum. Physiol.* 2017. V. 43. P. 542–548. DOI:10.1134/S0362119717050048
- Gerasimenko Y., Gad P., Sayenko D. et al. Integration of sensory, spinal, and volitional descending inputs in regulation of human locomotion. *Journal of neurophysiology*. 2016. V. 116. P. 98–105. DOI:10.1152/jn.00146.2016
- Gurfinkel V. S., Levik Yu. S., Kazennikov O. V., Selionov V. A. Locomotor-like movements evoked by leg muscle vibration in humans. *European Journal of Neuroscience*. 1998. V. 10. P. 1608–1612. DOI: 10.1046/j.1460-9568.1998.00179.x
- Khusnutdinova D., Netreba A., Kozlovskaya I. Mechanical stimulation of the soles support zones as a countermeasure of the contractile properties decline under microgravity conditions. *J. Gravit. Physiol.* 2004. V. 11. P. 141–2.
- Kozlovskaya I. B., Sayenko I. V., Miller T. F. Erratum to: New approaches to counter measures of the negative effects of micro-gravity in long-term space flights: [Acta Astronautica 59 (2006) 13–19]. *Acta Astronautica*. 2007a. V. 60. P. 783–789. DOI: 10.1016/j.actaastro.2006.09.038
- Kozlovskaya I. B., Sayenko I. V., Sayenko D. G. et al. Role of support afferentation in control of the tonic muscle activity. *Acta Astronautica*. 2007b. V. 60. P. 285–294. DOI: 10.1016/j.actaastro.2006.08.010
- Kyparos A., Feedback D. L., Layne C. S., Martinez D. A., Clarke M. S. Mechanical stimulation of the plantar foot surface attenuates soleus muscle atrophy induced by hindlimb unloading in rats. *J. Appl. Physiol.* 2005. V. 99. P. 739–746. DOI: 10.1152/japplphysiol.00771.2004
- Labriffe M., Annweiler C., Amirova L. E. et al. Brain activity during mental imagery of gait versus gait-like plantar stimulation: a novel combined functional MRI paradigm to better understand cerebral gait control. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2017. V. 11. P. 106. DOI: 10.3389/fnhum.2017.00106
- Layne C. S., Forth K. E. Plantar stimulation as a possible countermeasure to microgravity-induced neuromotor degradation. *Aviation, space, and environmental medicine*. 2008. V. 79. P. 787–794. DOI: 10.3357/ASEM.2293.2008

- Leelachutidej O., Srisawasdi G., Chadchavalpanichaya N., Sukthomya S. Influence of Textured Surface Insoles on Postural Control in Older Adults. *Journal of The Department of Medical Services*. 2023. V. 48. P. 45.
- Litvinova K. S., Vikhlyantsev I. M., Kozlovskaya I. B., Podlubnaya Z. A., Shenkman B. S. Effects of artificial support stimulation on fiber and molecular characteristics of soleus muscle in men exposed to 7-day dry immersion. *J. Gravit. Physiol.* 2004. V. 11. P. 131–2.
- Maurer C., Mergner T., Bolha B., Hlavacka F. Human balance control during cutaneous stimulation of the plantar soles. *Neuroscience Letters*. 2001. V. 302. P. 45–48. DOI: 10.1016/S0304–3940(01)01655-X
- Miller T., Ivanov O., Galanov D., Guekht A., Sayenko I. Mechanical stimulation of the foot support zones as a way to maintain activity of the tonic muscular system during functional support deprivation. *J. Gravit. Physiol.* 2005. V. 12. P. 149–150.
- Miller T. F., Saenko I. V., Popov D. V., Vinogradova O. L., Kozlovskaya I. B. Effect of mechanical stimulation of the support zones of soles on the muscle stiffness in 7-day dry immersion. *J. Gravit. Physiol.* 2004. V. 11. P. 135–136.
- Moore S. T., Dilda V., Morris T. R. et al. Long-duration spaceflight adversely affects post-landing operator proficiency. *Scientific reports*. 2019. V. 9. P. 2677. DOI: 10.1038/s41598–019–39058–9
- Motanova E., Bekreneva M., Rukavishnikov I. et al. Application of space technologies aimed at proprioceptive correction in terrestrial medicine in Russia. *Frontiers in Physiology*. 2022. V. 13. P. 921862. DOI: 10.3389/fphys.2022.921862
- Moukhina A., Shenkman B., Blottner D. et al. Effects of support stimulation on human soleus fiber characteristics during exposure to “dry” immersion. *J. Gravit. Physiol.* 2004. V. 11. P. 137–138.
- Nemirovskaya T. L., Shenkman B. S. Effect of support stimulation on unloaded soleus in rat. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2002. V. 87. P. 120–126. DOI: 10.1007/s00421–002–0603–7
- Nordin N., Xie S. Q., Wünsche B. Assessment of Movement Quality in Robot- Assisted Upper Limb Rehabilitation after Stroke: A Review. *J. NeuroEngineering Rehabilitation*. 2014. V. 11. P. 1–23. DOI: 10.1186/1743–0003–11–137
- Orlov O. I., Belakovskiy M. S., Kussmaul A. R., Tomilovskaya E. S. Using the Possibilities of Russian Space Medicine for Terrestrial Healthcare. *Frontiers in physiology*. 2022. V. 13. P. 921487. DOI: 10.3389/fphys.2022.921487
- Pandiarajan M., Hargens A. R. Ground-based analogs for human spaceflight. *Frontiers in Physiology*. 2020. V. 11. P. 716. DOI: 10.3389/fphys.2020.00716
- Pechenkova E., Nosikova I., Rumshiskaya A. et al. Alterations of functional brain connectivity after long-duration spaceflight as revealed by fMRI. *Frontiers in Physiology*. 2019. V. 10. P. 761. DOI: 10.3389/fphys.2019.00761
- Popov D. V., Saenko I. V., Vinogradova O. L., Kozlovskaya I. B. Mechanical stimulation of foot support zones for preventing unfavourable effects of gravitational unloading. *J. Gravit. Physiol.* 2003 V. 10(1). P. 59–60. Qiu F., Cole M. H., Davids K. W., Hennig E. M., Silburn P. A., Netscher H., Kerr G. K. Effects of textured insoles on balance in people with Parkinson's disease. *PLoS One*. 2013. V. 8. P. e83309. DOI: 10.1371/journal.pone.0083309
- Ratushnyy A. Y., Buravkova L. B. Microgravity Effects and Aging Physiology: Similar Changes or Common Mechanisms? *Biochemistry (Moscow)*. 2023. V. 88. P. 1763–1777.
- Saveko A., Bekreneva M., Ponomarev I. et al. Impact of different ground-based microgravity models on human sensorimotor system. *Frontiers in Physiology*. 2023. V. 14. P. 1085545. DOI: 10.3389/fphys.2023.1085545
- Saveko A., Brykov V., Kitov V., Shpakov A., Tomilovskaya E. Adaptation in gait to lunar and martian gravity unloading during long-term isolation in the ground-based space station model. *Frontiers in human neuroscience*. 2022. V. 15. P. 742664. DOI: 10.3389/fnhum.2021.742664
- Sayenko I. V., Vinogradova O. L., Sayenko D. G. et al. Simulated support as a countermeasure against motor disorders during dry immersion. In: Proc. International Congress “Motor control”. Sofia. 2003.
- Shapkova E., Emeljannikov D., Shtyrina E., Mushkin A. Neurological Complications of Multisegmental Spine Reconstruction in Children: Post-Op Spinal Cord Electrical Stimulation (SCES) and Training Decrease Motor Deficit. *Global Spine Journal*. 2016. V. 6. P. s-0036–1582657. DOI: 10.1055/s-0036–1582657
- Sharlo K., Lvova I., Turtikova O. et al. Plantar stimulation prevents the decrease in fatigue resistance in rat soleus muscle under one week of hindlimb suspension. *Archives of biochemistry and biophysics*. 2022. V. 718. P. 109150. DOI: 10.1016/j.abb.2022.109150
- Shenkman B. S., Litvinova K. S., Nemirovskaya T. L. et al. Afferent and peripheral control of muscle fiber properties during gravitational unloading. *J. Gravit. Physiol.* 2004a. V. 11. P. 111–114.
- Vinogradova O. L., Popov D. V., Saenko I. V., Kozlovskaya I. B. Muscle transverse stiffness and venous compliance under conditions of simulated supportlessness. *Life in Space for Life on Earth*. 2002. V. 501. P. 65–67.
- Shenkman B. S., Podlubnaya Z. A., Vihlyantsev I. M. et al. Contractile characteristics and sarcomeric cytoskeletal proteins of human soleus fibers in muscle unloading: role of mechanical stimulation from the support surface. *Biophysics*. 2004b. V. 49. P. 881–890.
- Tomilovskaya E., Shigueva T., Sayenko D., Rukavishnikov I., Kozlovskaya I. Dry immersion as a ground-based

- model of microgravity physiological effects. *Frontiers in Physiology*. 2019. V. 10. P. 284. DOI: 10.3389/fphys.2019.00284
- Tyganov S. A., Mochalova E. P., Melnikov I. Y., Vikhlyantsev I. M., Ulanova A. D., Sharlo K. A., Mirzoev T. M., Shenkman B. S. NOS-dependent effects of plantar mechanical stimulation on mechanical characteristics and cytoskeletal proteins in rat soleus muscle during hind-limb suspension. *The FASEB Journal*. 2021. V. 35(10). P. e21905. DOI: 10.1096/fj.202100783R.
- Widrick J. J., Knuth S. T., Norenberg K. M. et al. Effect of a 17 day spaceflight on contractile properties of human soleus muscle fibres. *The Journal of physiology*. 1999. V. 516. P. 915–930. DOI: 10.1111/j.1469–7793.1999.0915u.x
- Wikstrom E. A., Song K., Lea A., Brown N. Comparative effectiveness of plantar-massage techniques on postural control in those with chronic ankle instability. *Journal of the Athletic Training*. 2017. V. 52. P. 629–635. DOI: 10.4085/1062–6050–52.4.02
- Yumin T. E., Simsek T. T., Sertel M., Ankarali H., Yumin M. The effect of foot plantar massage on balance and functional reach in patients with type II diabetes. *Physiotherapy Theory and Practice*. 2017. V. 33. P. 115–123. DOI: 10.1080/09593985.2016.1271849.

УДК: 612.858.4 + 616-092.11

## ВОДОПРОВОД УЛИТКИ И ЕГО ЗНАЧЕНИЕ В ПАТОЛОГИИ СЛУХА. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И СОБСТВЕННОЕ НАБЛЮДЕНИЕ

© 2024 Л. В. Торопчина

ГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Министерства здравоохранения Российской Федерации, 125993, Москва, ул. Баррикадная, д. 2/1, стр.1, Россия

E-mail: [liyatoropchina@yandex.ru](mailto:liyatoropchina@yandex.ru)

Поступила в редакцию 19.08.2024

После доработки 10.09.2024

Принята в публикацию 17.09.2024

В статье представлен обзор литературы о водопроводе улитки человека. Приведены особенности анатомии водопровода улитки, ставшие доступными при использовании высокоразрешающей компьютерной томографии височных костей, методы оценки размеров водопровода улитки, типы водопроводов улитки и причины иногда встречающегося отсутствия визуализации водопровода улитки на компьютерных томограммах. Анализируются критерии и правомерность понятий “широкий” и “узкий” водопровод улитки, проходимость водопровода улитки и ее изменения с возрастом, роль водопровода улитки в возникновении гнойного воспаления в структурах лабиринта внутреннего уха, перилимфатической гипертензии и временной перилимфатической гипотензии. Данные литературы показывают, что возможно существование анатомически и функционального широкого, а точнее, излишне проходимого водопровода улитки. Обсуждаются патологические состояния водопровода улитки и его взаимодействие с соседними анатомическими структурами. Приведено клиническое наблюдение односторонней флюктуирующей тугоухости, при котором на компьютерной томограмме была выявлена врожденная аномалия развития внутреннего уха – дегисценция между аномально крупной луковичей яремной вены и водопроводом улитки. Чтобы оценить вклад водопровода в патологию внутреннего уха, требуется большее внимание к этой анатомической структуре и дальнейшее накопление данных.

**Ключевые слова:** широкий и узкий водопровод улитки, перилимфатический gusher, тугоухость, компьютерная томография височных костей, дегисценция между луковичей яремной вены и водопроводом улитки

**DOI:** 10.31857/S0235009224040026 **EDN:** ADGJHY

### ВВЕДЕНИЕ

Водопровод улитки (ВУ) был открыт французским анатомом Гишаром Жозефом Дю Верни в 1683 г. (Du Verney, 1683) и детально описан итальянским анатомом и хирургом Доменико Котуньо в 1761 г. (Cotunnii, 1761). Однако клиническое значение этой анатомической структуры до сих пор остается недостаточно понятным.

В научной литературе обсуждаются следующие вопросы.

1. Размеры ВУ в норме, правомерность существования понятий “широкого” и “узкого” ВУ.

2. Проходимость ВУ у человека и его роль в развитии гнойных осложнений, перилимфатического гидропса и временной перилимфатической гипотензии.

3. Патологические состояния ВУ и их влияние на состояние слуха.

4. Взаимодействие ВУ с соседними анатомическими структурами.

Цель работы – анализ данных литературы и описание собственного наблюдения пациента с аномальным состоянием ВУ.

Водопровод улитки (*aquaeductus cochleae*) – костный канал в каменистой части височной кости, в котором находится перилимфатический проток (*ductus perilymphaticus*), соединяющий перилимфатическое пространство базального завитка улитки (барабанную лестницу) с субарахноидальным пространством задней черепной ямки. Латеральное, узкое отверстие ВУ (внутренняя апертура) начинается в барабанной лестнице базального завитка улитки, в непосредственной близости от круглого окна улитки, у основания внутренней поверхности гребешка окна улитки (*crista*). Медиальное (краниальное, воронкообразное) отверстие открывается на задней поверхности пирамиды у нижнего ее края, ниже отверстия внутреннего слухового прохода (Калина, 1960; Костевич и др., 2021).

Понятие “перилимфатический” (периотический) проток относится к содержимому ВУ. В отличие от водопровода преддверия, ВУ не содержит настоящего протока, выстланного эпителием. С эндостального покрытия барабанной лестницы в просвет ВУ продолжается соединительная ткань (Anson et al., 1965). С краниального конца в ВУ на различное расстояние простирается твердая мозговая оболочка (Goren et al., 1997).

Параллельно ВУ всегда проходит канал, содержащий нижнюю улитковую вену (канал Котуньо) (Atturo et al., 2018). Существует также непостоянный дополнительный костный канал, идущий параллельно каналу нижней улитковой вены от гипотимпанума барабанной полости до задней черепной ямки (Костевич и др., 2021).

### Нормальные размеры ВУ, правомерность понятий “широкий” и “узкий” ВУ

Компьютерная томография (КТ) височных костей высокого разрешения позволила разделить ВУ на четыре сегмента (Jackler, Hwang, 1993) – латеральное узкое отверстие в базальном завитке улитки, сегмент ушной капсулы, сегмент верхушки пирамиды височной кости и воронкообразное медиальное отверстие (рис. 1).

При описании анатомии ВУ ряд авторов (Rask-Andersen et al., 1977; Jackler, Hwang, 1993; Li et al., 2018; Bachor et al., 1999) использовали такие параметры, как длина ВУ, ширина наружной аперттуры (устье барабанной лестницы) и ширина внутренней аперттуры (воронкообразного

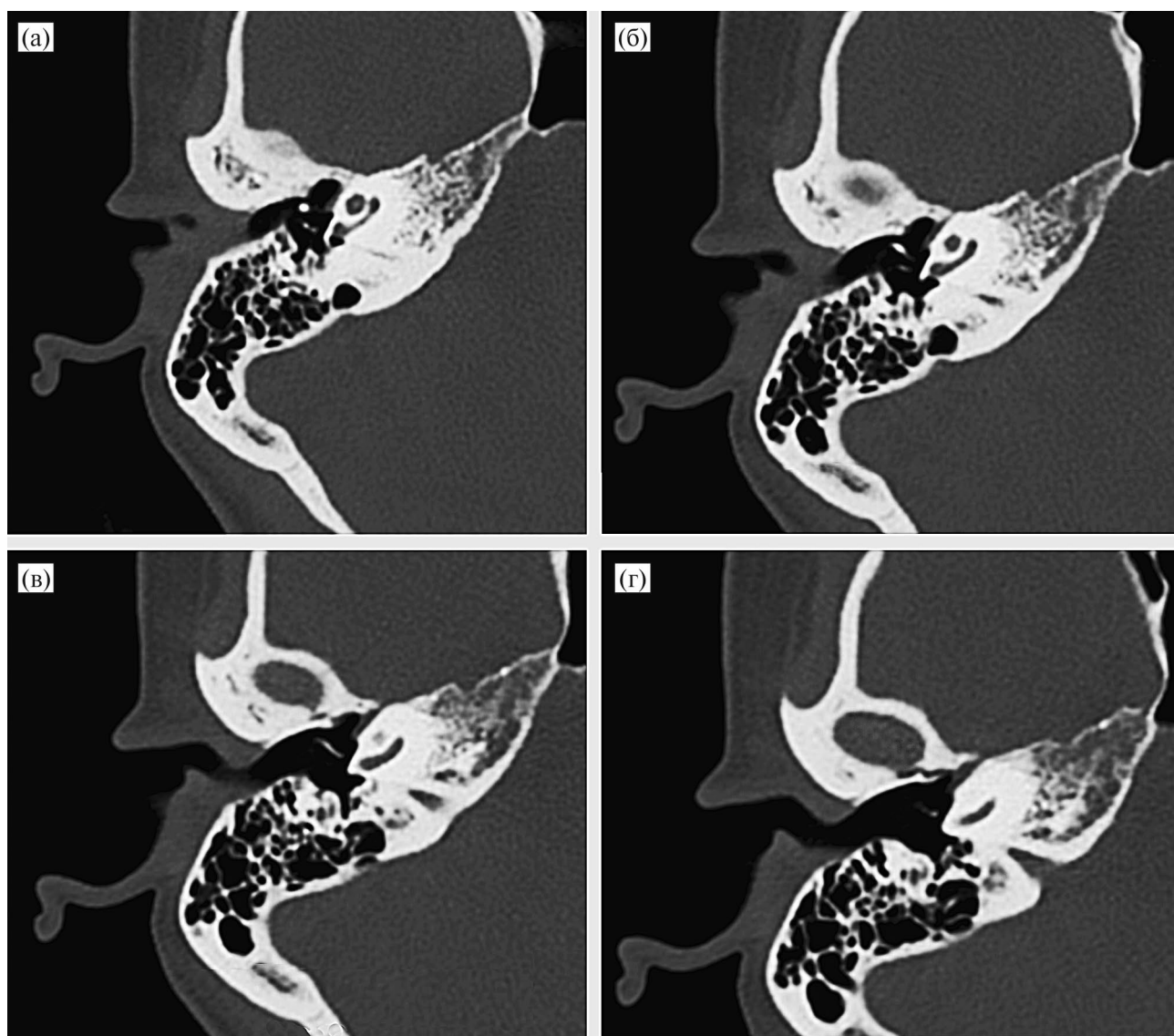


Рис. 1. Водопровод улитки в норме. Женщина 35 лет. Аксиальная проекция, шаг томографа 0.625 мм.

наружного отверстия) (краниальный конец ВУ). Для измерения размеров ВУ они применяли высокоразрешающую КТ височных костей, микро-КТ сканирование, микродиссекцию (микро-Д), пластическое формование (ПФ). Результаты измерений представлены в табл. 1.

Нимеш и соавт. (Nimesh et al., 2023) при описании ВУ использовали такие критерии, как осевая длина ВУ, диаметр на середине длины, воронка медиального отверстия, длина и ширина воронки медиального отверстия.

Джеклер и Хванг (Jackler, Hwang, 1993), изучив нормальную КТ анатомию ВУ, показали, что диаметр ВУ непостоянен и зависит от конкретного изучаемого сегмента. Наиболее видимой частью ВУ, по мнению, авторов является медиальное отверстие, которое было выявлено у 97% пациентов и имело средний диаметр 4,5 мм (диапазон от 0 до 11 мм).

Миригов и Кронеберг (Migirov, Kroneberg, 2005) проанализировали 502 КТ височных костей в аксиальной проекции и выделили 4 КТ типа ВУ. При 1-м типе ВУ визуализировался полностью, а его часть в сегменте слуховой капсулы была видна в виде тонкой полости (менее 1 мм). При 2-м типе были видны медиальные 2/3 канала, но терялась порция около капсулы улитки. При 3-м типе было видно только наружное отверстие канала и/или его медиальная треть. При 4-м типе ВУ не определялся.

Основными причинами отсутствия визуализации ВУ являются: 1) ширина просвета менее 0,1 мм, 2) высокая яремная ямка, 3) изгиб ВУ, направленный назад (10%), 4) костная облитерация (4%) (Rask-Andersen et al., 1977).

Таким образом, несколько изогнутая форма ВУ и воронкообразное расширение на его

медиальном конце создают трудности для определения его нормального, узкого или расширенного состояния и принятия единых критериев оценки.

Иногда наличие широкого венозного канала, проходящего параллельно с ВУ, а также наличие до трех сопровождающих венозных каналов, может рентгенологически имитировать широкий ВУ (Muren et al., 1985).

Мукерджи и соавт. (Mukherji et al., 1998) описали широкий ВУ на одном ухе (диаметр в самой узкой части был 1.2 мм) у глухого ребенка 1.5 лет, который имел двустороннюю врожденную аномалию развития внутреннего уха, включающую мальформацию улитки по типу общей полости, дисплазию полукружных каналов и одностороннюю облитерацию улиткового поля. При этом водопроводы преддверия не были изменены.

Расширенный ВУ может быть причиной фонтанирующего истечения перилимфы (gusher) при кохлеостомии для кохлеарной имплантации (Bianchin et al., 2016).

Сатер и соавт. (Sater et al., 2021) описали случай, который привел их к гипотезе о том, что увеличенный ВУ может вызывать фонтанирование спинномозговой жидкости при хирургии стремени и что форма и диаметр медиального отверстия ВУ важны для этого прогноза. Повторная оценка предоперационной КТ показала, что передне-задний и верхне-нижний диаметры медиальной апертуры ВУ составляли 11,7 мм и 2,87 мм на стороне gusher-синдрома стремени по сравнению с 2,95 мм и 1,88 мм на другой стороне соответственно. Форма ВУ со стороны gusher-синдрома стремени также отличалась от формы с другой стороны.

Таким образом, можно предполагать, что “перилимфатический gusher” бывает обусловлен не

**Таблица 1.** Размеры структур водопровода улитки по данным разных исследователей

Параметры	Авторы			
	Rask-Andersen H. et al. (1977)	Jackler R.K., Hwang P.H.(1993)	Li Z et al (2018)	Bachor E. et al (1999)
Число височных костей	—	100	30	32, дети от 0 до 9 лет
Метод исследования	КТ, микроД, ПФ	КТ	Микро-КТ сканирование	Микроскопия гистологических срезов
Длина ВУ	12.9 мм	—	12,31 ±3,60 мм	4,19 мм (1,7–10,7 мм)
Ширина внутреннего отверстия	0.14 мм	Не более 2 мм, не виден в 56% случаев	2,88 ±1,06 мм	1323 мкм (1699-2344 мкм)
Ширина наружного отверстия	4.2 мм	4.5 мм (0–11 мм)	4.65 ±2.42 мм	435 мкм (225-869 мкм)

только gusher-синдромом стремени вследствие аномалии дна внутреннего слухового прохода, но и широким ВУ, обеспечивающим легкий доступ цереброспинальной жидкости в перилимфатическое пространство.

Баст (Bast, 1946) отмечал, что в некоторых случаях истечение перилимфы может быть настолько сильным, что заставляет прекратить операцию.

### Проходимость ВУ

Келлерхальс (Kellerhals, 1979) считает, что перилимфа образуется вследствие поступления спинномозговой жидкости в лабиринт из субарахноидального пространства через ВУ, что подтверждается схожим составом ликвора и перилимфы.

Имеются убедительные доказательства того, что ВУ в норме проходимо у людей и имеет относительно постоянный размер. В пользу наличия открытого сообщения между ВУ и ликворным пространством свидетельствуют работы, указывающие на возможность измерения колебаний внутричерепного давления с помощью регистрации отоакустической эмиссии (Traboulsi, Avan, 2007), позиционной тимпанометрии (Телешова и др., 2018), регистрации ипсилатерального акустического рефлекса до и после люмбальных пункций (Onder, 2022).

По данным многих авторов (Carlborg et al., 1982; Ritter, Lawrence, 1965; Lempert et al., 1952; Arnvig, 1963), ВУ функционирует как регулятор давления и отвечает за гидродинамический баланс между спинномозговой жидкостью и перилимфой, а также оказывает влияние на давление в эндолимфатическом пространстве.

Считается, что ВУ, хотя и проницаемо для жидкости, из-за своей узости служит буфером, защищающим структуры уха от широких колебаний внутричерепного давления (Bhimani et al., 1984).

Скорость потока жидкости через трубки является линейной функцией давления, вязкости и длины трубки, но наиболее важным фактором, определяющим скорость потока, является радиус. Небольшие изменения размера ВУ могут вызвать очень большие колебания скорости потока через него (Allen, 1987).

Относительно большие и быстрые изменения давления спинномозговой жидкости могут быть вызваны повседневными событиями, такими как кашель (около 175 мм солевого раствора) и чихание (около 250 мм солевого раствора). Узость ВУ и механическая податливость окон улитки, вероятно, являются важными факторами в ограничении величины стресса и, следовательно,

возможного повреждения, которое может произойти с улиткой при резком изменении давления в ликворной системе (Marchbanks, Reid, 1990).

По данным Гопена и соавт. (Gopen et al., 1997), твердая мозговая оболочка, плотно прилежащая к костям черепа, в области медиального воронкообразного отверстия ВУ разрыхляется и простирается в него на различное расстояние. Остальная часть ВУ заполнена сеткой из рыхлой соединительной ткани, идентичной по составу твердой мозговой оболочке. Авторы на основании изучения 101 анатомического препарата височной кости людей, умерших в возрасте от 0 до 100 лет (19 височных костей — от 0 до 1 года и 10 костей — от 90 до 100 лет) отметили четыре типа проходимости ВУ: центральный просвет на всем протяжении ВУ (34%), просвет заполнен рыхлой соединительной тканью (59%), просвет перекрыт костью (4%) и облитерация ВУ (3%). Среднее значение ( $\pm$ SD) самой узкой части составляло 138 ( $\pm$ 58) мкм, которая находилась на расстоянии 200–300 мкм от улиткового конца ВУ. Корреляции между возрастом и наименьшим диаметром, а также между возрастом и категорией проходимости выявлено не было.

По данным гистологических исследований 250 височных костей, проведенных Влодыка (Wlodyka, 1978), у новорожденных и у плодов отмечалась 100% проходимость ВУ, которая с возрастом уменьшается — от 40 до 59 лет до 50%, а после 60 лет — до 30%. Автор считает, что исчезновение проходимости ВУ — прогрессирующее явление, отражающее биологический процесс старения организма. Проходимость ВУ делает возможным двустороннее распространение инфекции из спинномозговой жидкости во внутреннее ухо и наоборот, ликворную отореею и внезапное сенсоневральное нарушение слуха за счет повышения ликворного давления, а при отсутствии проходимости — накопление вредных продуктов обмена в перилимфе губительно действует на чувствительные элементы внутреннего уха.

Однако Раск-Андерсен и соавт. (Rask-Andersen et al., 1977), проведя морфологические исследования 82 человеческих височных костей, только в трех случаях (3,6%) обнаружили облитерацию ВУ; найденные изменения не зависели от возрастных критериев.

Отсутствие визуализации ВУ при КТ не обязательно свидетельствует о его непроходимости (Rask-Andersen et al., 1977). По мнению Джеклер и Хванг (Jackler, Hwang, 1993), даже рентгенологически нормальный ВУ может быть чрезмерно проходимым. Теоретически возможно, что увеличение потока жидкости является следствием либо недостатков внутрипросветных мембранных



перегородок, либо небольшого субмиллиметрового увеличения диаметра канала, которое на сегодняшний день не может быть выявлено на КТ.

### Патологические состояния ВУ и их влияние на слух

Открытый ВУ может быть причиной перилимфореи при стапедэктомии по поводу отосклероза (Ritter, Lawrence, 1965) и тяжелого лабиринтита, развившегося вторично на фоне менингита (Henneford, Lindsay, 1968).

Данные литературы свидетельствуют о том, что гидродинамика перилимфы, возможно, зависит от внелабиринтного влияния на нее спинномозговой жидкости в виде изменения давления, оказываемого снаружи на эндолимфатический мешок, точнее на ту его часть, которая выступает в субарахноидальное пространство. Ряд авторов сообщают, что при повышении или понижении внутричерепного давления ликвор может непосредственно через ВУ влиять на внутрилабиринтные жидкости и тем самым изменять микромеханику улитки (Иванец и др., 2009).

Снижение давления спинномозговой жидкости, например, после люмбальной пункции, может привести к внезапной сенсоневральной потере слуха. Вероятно, люмбальная пункция вызывает потерю объема ликвора с последовательным снижением внутричерепного давления, что вызывает движение перилимфатической жидкости в субарахноидальное пространство. Последствие — потеря объема перилимфатического пространства и дисбаланс давления между перилимфой и эндолимфой, что может привести к компенсаторному расширению (водянке) эндолимфатического пространства (Walsted, 2000; Pogodzinski et al., 2008).

Такой же эффект “временной перилимфатической гипотонии” с последующим восстановлением порогов слуха может оказывать установка шунта по поводу внутричерепной гипертензии различной этиологии (на оба уха) (Guillaume et al., 2012), удаление акустической невриномы (на контралатеральное здоровое ухо) (Walsted et al., 1991).

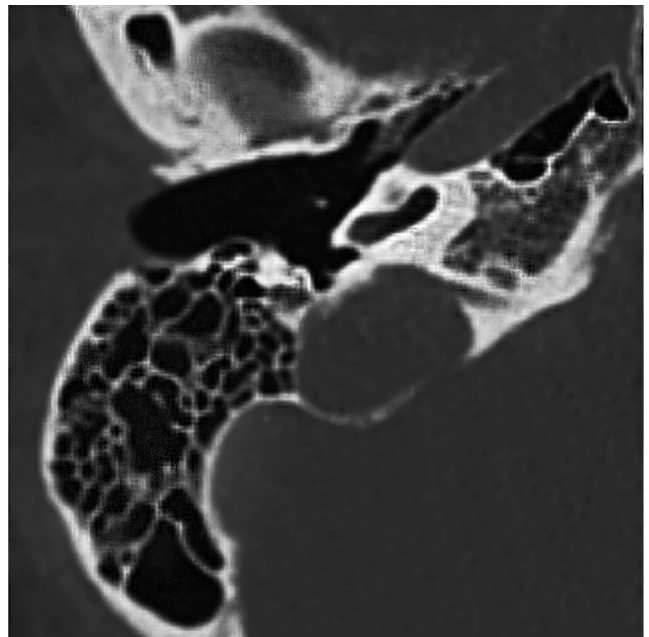
Кумар и соавт. (Kumar et al., 2011) описали случай резкого падения слуха до глухоты на одно ухо во время полета в самолете у 16-летней пациентки с неотягощенным отологическим анамнезом, которое возникло вместе с ушной болью при снижении самолета. Шума в ухе и головокружения не отмечалось. После посадки самолета боль в ухе прошла, но осталась глухота. Проведенное лечение (кортикостероиды, ацикловир, карбоген) эффекта не дало, однако через два месяца слух

внезапно восстановился до нормы при катании на американских горках, при въезде в туннель. Авторы связывают восстановление слуха с открытым ВУ.

### Взаимосвязь ВУ с другими структурами внутреннего уха

Взаимосвязь ВУ с другими структурами внутреннего уха при их патологическом состоянии в медицинской литературе описана недостаточно. Приводим также клиническое наблюдение, показывающее роль ВУ в структуре патологии внутреннего уха.

П., 22 года, обратилась с жалобами на снижение слуха на правое ухо и периодически возникающее ухудшение слуха на правом ухе при эмоциональном волнении и стрессовых ситуациях. Впервые такое состояние возникло в возрасте 18 лет. Аудиологическое обследование выявило правостороннюю тугоухость 2 степени, с костно-воздушным интервалом преимущественно на низких частотах при тимпанограмме типа А на обоих ушах. На КТ височных костей была выявлена аномально крупная луковица яремной вены справа (до 20 мм) в сочетании с дегисценцией на границе с ВУ. Отсутствие костных стенок между ВУ и ЯВ при повышении внутричерепного давления вызывало компрессию перилимфатического протока (рис. 2).



**Рис. 2.** КТ-картина компрессии водопровода улитки гигантской луковицей яремной вены. Срез на уровне дегисценции между водопроводом улитки и луковицей яремной вены. Аксиальная проекция.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные литературы показывают, что возможно существование анатомически и функционального широкого, а точнее, излишне проходимого ВУ. Возможны и другие аномалии ВУ. Чтобы оценить вклад ВУ в патологию внутреннего уха, требуется больше внимания к этой анатомической структуре и дальнейшее накопление данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Иванец И. В., Левина Ю. В., Еремеева Н. В. Внутричерепная гипертензия и ее роль в возникновении кохлеовестибулярных нарушений. *Вестник оториноларингологии*. 2009. № 3. С. 61–65.
- Калина В. О. Эмбриология и анатомия уха. *Руководство по оториноларингологии, том 1*. М.: Медгиз, 1960. С. 154–156.
- Костевич И. В., Кузовков В. Е., Лиленко А. С., Сугарова С. Б. Значение микроанатомии водопровода улитки для проведения кохлеарной имплантации. *Вестник оториноларингологии*. 2021. Т. 86. С. 42–47. DOI:10.17116/otorino20218605142
- Телешова Е. Г., Семенова Ж. Б., Рошаль Л. М., Капитанов Д. Н. Возможности использования позиционной тимпанометрии в качестве метода оценки внутричерепного давления у детей. *Российская оториноларингология*. 2018. 5. С. 97–101. DOI: 10.18692/1810–4800–2018–5–97–101
- Allen G. W. Fluid flow in the cochlear aqueduct and cochlea-hydrodynamic considerations in perilymph fistula, stapes gusher, and secondary endolymphatic hydrops. *Am J Otol*. 1987. V. 8. P. 319–322.
- Anson B.J., Donaldson J.A., Warpeha K.L., Winch T. R. The vestibular and cochlear aqueducts: their variational anatomy in the adult human ear. *Trans Am Laryngol Rhinol Otol Soc*. 1965. V. 75(8). P. 1203–1233. DOI: 10.1288/00005537-196508000-00001
- Arnvig J. Transitory decrease of hearing after lumbar puncture. *Arch Otolaryngol*. 1963. V. 56(2-6). P. 699–705.
- Atturo F., Scharf-Morén N., Larsson S., Rask-Andersen H., Li H. The Human Cochlear Aqueduct and Accessory Canals: a Micro-CT Analysis Using a 3D Reconstruction Paradigm. *Otol Neurotol*. 2018. V. 39. P. 429–435. DOI: 10.1097/MAO.0000000000001831.
- Bachor E., Byahatti S., Karmody C. S. New aspects in the histopathology of the cochlear aqueduct in children. *Am J Otol*. 1999. V. 20. P. 612–620.
- Bast T. H. Development of the aqueductus cochleae and its contained periotic duct and cochlear vein in human embryos. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 1946. V. 55(2). P. 278–297.
- Bhimani S., Virapongse C., Sarwar M. High-Resolution Computed Tomographic Appearance of Normal Cochlear Aqueduct. *Am J Neuroradiol*. 1984. V. 5. P. 751–720.
- Bianchin G., Polizzi V., Formigoni P., Russo C., Tribi L. Cerebrospinal Fluid Leak in Cochlear Implantation: Enlarged Cochlear versus Enlarged Vestibular Aqueduct (Common Cavity Excluded). *International Journal of Otolaryngology*. 2016. Article 6591684. P. 1–9. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6591684>
- Carlborg B., Densert B., Densert O. Functional patency of the cochlear aqueduct. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 1982. V. 91. P. 209–215. DOI: 10.1177/000348948209100219
- Cotunnii D. *De aquaeductibus auris humanae internae anatomica dissertation*. Neapoli, ex typographia Simoniana, 1761. Du Verney. *Traité de l'organe de l'ouïe*. Paris, 1683.
- Gopen Q., Rosowski J. J., Merchant S. N. Anatomy of the normal human cochlear aqueduct with functional implications. *Hear Res*. 1997. V.107. P. 9–22. DOI: 10.1016/S0378–5955(97)00017–8
- Guillaume D. J., Knight K., Marquez C. et al. Cerebrospinal fluid shunting and hearing loss in patients treated for medulloblastoma. *J Neurosurg Pediatr*. 2012. V. 9. P. 421–427. DOI: 10.3171/2011.12.PEDS11357
- Henneford G.E., Lindsay J. R. Deaf mutism due to meningogenic labyrinthitis. *Laryngoscope*. 1968. V. 78(2). P. 251–261.
- Jackler R.K., Hwang P. H. Enlargement of the cochlear aqueduct: fact or fiction? *Otolaryngol Head Neck Surg*. 1993. V. 109. P. 14–25. DOI: 10.1177/019459989310900104
- Kellerhals B. Perilymph production and cochlear blood flow. *Acta Otolaryngol*. 1979. V. 87. P. 370–374.
- Kumar A., Sinha A., Al-Waa A. M. Resolution of Sudden Sensorineural Hearing Loss Following a Roller Coaster Ride. *Indian J Otolaryngol Head Neck Surg*. 2011. V. 63. P. 104–106. DOI: 10.1007/s12070–011–0216–8
- Lempert J., Meltzer P. E., Wever E. G., Lawrence M., Rambo J. H.T. Structure and function of cochlear aqueduct. *Arch Otolaryngol*. 1952. V. 55 (2). P. 134–145.
- Li Z., Shi D., Li H. et al. Micro-CT study of the human cochlear aqueduct. *Surg Radiol Anat*. 2018. V. 40. P. 713–720. DOI: 10.1007/s00276–018–2020–6
- Marchbanks R.J., Reid A. Cochlear and cerebrospinal fluid pressure: their inter-relationship and control mechanisms. *Br J Audiol*. 1990. V. 24. P. 179–187. DOI: 10.3109/03005369009076554
- Migirov L., Kronenberg J. Radiology of the cochlear aqueduct. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 2005. V. 114. P. 863–866. DOI:10.1177/000348940511401110
- Mukherji S.K., Baggett H.C., Alley J., Carrasco V. H. Enlarged cochlear aqueduct. *AJNR Am J Neuroradiol*. 1998. V. 19. P. 330–332.
- Muren C., Vignaud J., Wilbrand H., Wilbrand S. Patency of the cochlear aqueduct. *Acta Radiol Diagn (Stockh)*. 1985. V. 26. P. 543–550. DOI: 10.1177/028418518502600508
- Nagururu N. V., Jung D., Hui F. et al. Cochlear Aqueduct Morphology in Superior Canal Dehiscence Syndrome. *Audiol. Res*. 2023. V. 13(3). P. 367–377. DOI:10.3390/audiolres13030032

- Onder H. The Potential Significance of Reversed Stapes Reflex in Clinical Practice in Idiopathic Intracranial Hypertension. *Annals of Indian Academy of Neurology*. 2022. V. 25 (2). P. 214–217. DOI: 10.4103/aian.aian\_379\_21.
- Pogodzinski M. S., Shalloo J. K., Sprung J., Weingarten T. N., Wong G. Y., McDonald T. J. Hearing loss and cerebrospinal fluid pressure: case report and review of the literature. *Ear, Nose and Throat Journal*. 2008. V. 87 (3). P. 144–147.
- Rask-Andersen H., Stahle J., Wilbrand H. Human cochlear aqueduct and its accessory canals. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 1977. V. 86(42). P. 1–16. DOI: 10.1177/00034894770860s501.
- Ritter F. N., Lawrence M. A histological and experimental study of cochlear aqueduct patency in the adult human. *Laryngoscope*. 1965. V. 75(8). P. 1224–1233.
- Satar B., Genc H., Meral S. C. Why did we encounter gusher in a stapes surgery case? Was it enlarged medial aperture of the cochlear aqueduct? *Surg Radiol Anat*. 2021. V. 43. P. 225–229. DOI: 10.1007/s00276–020–02602–8
- Traboulsi R., Avan P. Transmission of infrasonic pressure waves from cerebrospinal to intralabyrinthine fluids through the human cochlear aqueduct: Non-invasive measurements with otoacoustic emissions. *Hear Res*. 2007. V. 233. P. 30–39. DOI: 10.1016/j.heares.2007.06.012
- Walsted A. Effects of cerebrospinal fluid loss on hearing. *Acta Oto-Laryngologica, Supplement*. 2000. V. 543. P. 95–98. DOI: 10.1080/000164800454099
- Walsted A., Salomon G., Thomsen J., Tos M. Hearing decrease after loss of cerebrospinal fluid. A new hydrops model? *Acta Otolaryngol*. 1991. V. 111. P. 468–476. DOI: 10.3109/00016489109138371
- Wlodyka J. Studies on cochlear aqueduct patency. *Ann Otolaryngol*. 1978. V. 87. P. 22–28.

## THE COCHLEAR AQUEDUCT AND ITS SIGNIFICANCE IN HEARING PATHOLOGY. LITERATURE REVIEW AND CLINICAL CASE

**L. V. Toropchina**

*FBSEI APE Russian Medical Academy of Continuous Professional Education  
of the Ministry of Healthcare of Russia, Moscow, Russia, 125993, Moscow, st. Barrikadnaya, 2/1, building 1.  
E-mail: liyatoropchina@yandex.ru*

The article presents a literature review on the human cochlear aqueduct. It describes the anatomy of the cochlear aqueduct that became available using high-resolution computed tomography of the temporal bones, methods for assessing the size of the cochlear aqueduct, types of cochlear aqueducts, and reasons for the occasional lack of visualization of the cochlear aqueduct on computed tomograms. The criteria and validity of the concepts of “wide” and “narrow” cochlear aqueduct, the patency of the cochlear aqueduct and its changes with age, the role of the cochlear aqueduct in the development of purulent inflammation in the structures of the labyrinth of the inner ear, perilymphatic hypertension, and temporary perilymphatic hypotension are analyzed. The literature data show that the existence of an anatomically and functionally wide, or more precisely, excessively patent, cochlear aqueduct is possible. Pathological conditions of the cochlear aqueduct and its interaction with adjacent anatomical structures are discussed. A clinical case of unilateral fluctuating hearing loss is presented, in which a congenital anomaly of the inner ear development was detected on a CT scan – dehiscence between the abnormally large bulb of the jugular vein and the cochlear aqueduct. To assess the contribution of the aqueduct to the pathology of the inner ear, more attention to this anatomical structure and further accumulation of data are required.

**Keywords:** wide and narrow cochlear aqueduct, perilymphatic gusher, hearing loss, computed tomography of the temporal bones, dehiscence between the jugular bulb and the cochlear aqueduct

### REFERENCES

- Ivanets I. V., Levina Iu.V., Eremeeva N. V. Intracranial hypertension and its role in the development of cochleovestibular disorders. *Vestnik otorinolaringologii*. 2009. № 3. P. 61–65. (in Russian).
- Kalina V. O. *Embriologiya i anatomiya ukha. Rukovodstvo po otorinolaringologii, tom 1*. Moscow: Medgiz, 1960. P. 154–156. (in Russian).
- Kostevich I. V., Kuzovkov V. E., Lilenko A. S., Sugarova S. B. The significance of microanatomy of the round window in terms of cochlear implantation. *Vestnik otorinolaringologii*. 2021. V. 86. P. 42–47. DOI:10.17116/otorino20218605142 (in Russian).
- Teleshova E. G., Semenova Zh. B., Roshal' L. M., Kapitanov D. N. Vozmozhnosti ispol'zovaniya pozitsionnoi timpanometrii v kachestve metoda otsenki vnutricherepnogo davleniya u detei. *Rossiiskaya otorinolaringologiya*. 2018. V. 5. P. 97–101. DOI: 10.18692/1810–4800–2018–5–97–101 (in Russian).
- Allen G. W. Fluid flow in the cochlear aqueduct and cochlea-hydrodynamic considerations in perilymph fistula, stapes gusher, and secondary endolymphatic hydrops. *Am J Otol*. 1987. V. 8. P. 319–322.
- Anson B.J., Donaldson J.A., Warpeha K.L., Winch T. R. The vestibular and cochlear aqueducts: their variational anatomy in the adult human ear. *Trans Am Laryngol Rhinol Otol Soc*. 1965. V. 75(8). P. 1203–1233.

- Arnvig J. Transitory decrease of hearing after lumbar puncture. *Arch Otolaryngol*. 1963. V. 56(2-6). P. 699–705.
- Atturo F., Schart-Morén N., Larsson S., Rask-Andersen H., Li H. The Human Cochlear Aqueduct and Accessory Canals: a Micro-CT Analysis Using a 3D Reconstruction Paradigm. *Otol Neurotol*. 2018. V. 39(6). P. 429–435. DOI: 10.1097/MAO.0000000000001831.
- Bachor E., Byahatti S., Karmody C. S. New aspects in the histopathology of the cochlear aqueduct in children. *Am J Otol*. 1999. V.20(5). P. 612–620.
- Bast T. H. Development of the aqueductus cochleae and its contained periotic duct and cochlear vein in human embryos. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 1946. V. 55(2). P. 278–297.
- Bhimani S., Virapongse C., Sarwar M. High-Resolution Computed Tomographic Appearance of Normal Cochlear Aqueduct. *Am J Neuroradiol*. 1984. V. 5(6). P. 751–720.
- Bianchin G., Polizzi V., Formigoni P., Russo C., Tribi L. Cerebrospinal Fluid Leak in Cochlear Implantation: Enlarged Cochlear versus Enlarged Vestibular Aqueduct (Common Cavity Excluded). *International Journal of Otolaryngology*. 2016. 2016. Article 6591684. P. 1–9. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6591684>
- Carlborg B., Densert B., Densert O. Functional patency of the cochlear aqueduct. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 1982. V.91(2 Pt 1). P. 209–215. DOI: 10.1177/000348948209100219.
- Cotunnii D. *De aquaeductibus auris humanae internae anatomica dissertation*. Neapoli, ex typographia Simoniana, 1761. Du Verney. *Traité de l'organe de l'ouïe*. Paris, 1683.
- Gopen Q., Rosowski J. J., Merchant S. N. Anatomy of the normal human cochlear aqueduct with functional implications. *Hear Res*. 1997. V. 107(1–2). P. 9–22. DOI: 10.1016/s0378–5955(97)00017–8.
- Guillaume D. J., Knight K., Marquez C., Kraemer D. F., Bardo D. M.E., Neuwelt E. A. Cerebrospinal fluid shunting and hearing loss in patients treated for medulloblastoma. *J Neurosurg Pediatr*. 2012. V. 9(4). P. 421–427. DOI: 10.3171/2011.12.PEDS11357.
- Henneford G. E., Lindsay J. R. Deaf mutism due to meningogenic labyrinthitis. *Laryngoscope*. 1968. V. 78(2). P. 251–261.
- Jackler R.K., Hwang P. H. Enlargement of the cochlear aqueduct: fact or fiction? *Otolaryngol Head Neck Surg*. 1993. V. 109(1). P. 14–25. DOI: 10.1177/019459989310900104.
- Kellerhals B. Perilymph production and cochlear blood flow. *Acta Otolaryngol*. 1979. V. 87 (3–4). P. 370–374.
- Kumar A., Sinha A., Al-Waa A. M. Resolution of Sudden Sensorineural Hearing Loss Following a Roller Coaster Ride. *Indian J Otolaryngol Head Neck Surg*. 2011. V. 63. P. 104–106. DOI: 10.1007/s12070–011–0216–8
- Lempert J., Meltzer P. E., Wever E. G., Lawrence M., Rambo J. H.T. Structure and function of cochlear aqueduct. *Arch Otolaryngol*. 1952. V. 55 (2). P. 134–145.
- Li Z., Shi D., Li H. et al. Micro-CT study of the human cochlear aqueduct. *Surg Radiol Anat*. 2018. V. 40. P. 713–720. DOI: 10.1007/s00276–018–2020–6
- Marchbanks R.J., Reid A. Cochlear and cerebrospinal fluid pressure: their inter-relationship and control mechanisms. *Br J Audiol*. 1990. V. 24. P. 179–187. DOI: 10.3109/03005369009076554
- Migirov L., Kronenberg J. Radiology of the cochlear aqueduct. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 2005. V. 114. P. 863–866. DOI:10.1177/000348940511401110
- Mukherji S.K., Baggett H.C., Alley J., Carrasco V. H. Enlarged cochlear aqueduct. *AJNR Am J Neuroradiol*. 1998. V. 19. P. 330–332.
- Muren C., Vignaud J., Wilbrand H., Wilbrand S. Patency of the cochlear aqueduct. *Acta Radiol Diagn (Stockh)*. 1985. V. 26. P. 543–550. DOI: 10.1177/028418518502600508
- Nagururu N. V., Jung D., Hui F. et al. Cochlear Aqueduct Morphology in Superior Canal Dehiscence Syndrome. *Audiol. Res*. 2023. V. 13(3). P. 367–377. DOI:10.3390/audiolres13030032
- Onder H. The Potential Significance of Reversed Stapes Reflex in Clinical Practice in Idiopathic Intracranial Hypertension. *Annals of Indian Academy of Neurology*. 2022. V. 25. P. 214–217. DOI: 10.4103/aian.aian\_379\_21
- Pogodzinski M. S., Shalloo J. K., Sprung J. et al. Hearing loss and cerebrospinal fluid pressure: case report and review of the literature. *Ear, Nose and Throat Journal*. 2008. V. 87. P. 144–147.
- Rask-Andersen H., Stahle J., Wilbrand H. Human cochlear aqueduct and its accessory canals. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 1977. V. 86(42). P. 1–16. DOI: 10.1177/00034894770860s501
- Ritter F. N., Lawrence M. A histological and experimental study of cochlear aqueduct patency in the adult human. *Laryngoscope*. 1965. V. 75(8). P. 1224–1233.
- Satar B., Genc H., Meral S. C. Why did we encounter gusher in a stapes surgery case? Was it enlarged medial aperture of the cochlear aqueduct? *Surg Radiol Anat*. 2021. V. 43. P. 225–229. DOI: 10.1007/s00276–020–02602–8
- Traboulsi R., Avan P. Transmission of infrasonic pressure waves from cerebrospinal to intralabyrinthine fluids through the human cochlear aqueduct: Non-invasive measurements with otoacoustic emissions. *Hear Res*. 2007. V. 233. P. 30–39. DOI: 10.1016/j.heares.2007.06.012
- Walsted A. Effects of cerebrospinal fluid loss on hearing. *Acta Oto-Laryngologica, Supplement*. 2000. V. 543. P. 95–98. DOI: 10.1080/000164800454099
- Walsted A., Salomon G., Thomsen J., Tos M. Hearing decrease after loss of cerebrospinal fluid. A new hydrops model? *Acta Otolaryngol*. 1991. V. 111. P. 468–476. DOI: 10.3109/00016489109138371.
- Wlodyka J. Studies on cochlear aqueduct patency. *Ann Oto-laryngol*. 1978. V. 87. P. 22–28.

УДК 612.85

## ВЛИЯНИЕ СЕНСОРНО-КОГНИТИВНЫХ УПРАЖНЕНИЙ НА ПОКАЗАТЕЛИ ВОСПРИЯТИЯ, ВНИМАНИЯ И ПАМЯТИ У ЛИЦ ПОЖИЛОГО ВОЗРАСТА

© 2024 г. И. С. Медведев, С. П. Пак, Е. А. Огородникова\*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физиологии им. И.П. Павлова Российской академии наук,  
199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 6

\*E-mail: [ogorodnikova@infran.ru](mailto:ogorodnikova@infran.ru)

Поступила в редакцию 05.05.2024

После доработки 28.05.2024

Принята к публикации 15.06.2024

В работе представлено исследование влияния сенсорно-когнитивных упражнений на показатели восприятия, внимания и памяти у лиц пожилого и старческого возраста. В экспериментальную группу вошли 16 испытуемых-добровольцев пожилого и старческого возраста (средний возраст  $73 \pm 1.7$  лет), не имеющих в анамнезе выраженных возраст-зависимых сенсорных и неврологических проблем (данные опроса). Все испытуемые прошли курс сенсорно-когнитивных упражнений в течение 4-х недель, а также психофизическое тестирование и оценку ресурсов психологического здоровья до начала занятий и после их окончания.

Показано достоверное улучшение целевых сенсорно-когнитивных показателей (восприятие, внимание, память) в группе обследования и приведена динамика ряда индивидуально-психологических характеристик (тревожности, иерархии в системе ценностей, жизнестойкости и жизнерадостности). Результаты позволяют сделать вывод о том, что разработанный курс сенсорно-когнитивных упражнений способствует актуализации как потенциала сенсорно-когнитивных процессов, так и ресурсов психологического здоровья пожилых людей. Это свидетельствует о профилактической важности функционального тренинга в контексте снижения возрастных рисков развития деменции и достижения целей активного долголетия.

**Ключевые слова:** сенсорно-когнитивный тренинг, возрастные сенсорно-когнитивные дисфункции, восприятие, внимание, память, психологические ресурсы здоровья, пожилой и старческий возраст

**DOI:** 10.31857/S0235009224040037 **EDN:** ADGHRN

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что актуальными возраст-зависимыми рисками выступают проявления сенсорных и когнитивных дисфункций (Deary et al., 2009; Whitson et al., 2018; Гусев, Боголепова, 2019; Ge et al., 2021; Dumassais et al., 2024). Одной из Наиболее распространенной из них является снижение слуха и сопутствующее ухудшение речевой коммуникации (Nyams et al., 2018; Голованова и др., 2019). При этом протезирование с использованием слуховых аппаратов не всегда обеспечивает полноценное восстановление слухового восприятия, что связано с проявлениями изменений не только на периферии, но и в центральных отделах слуховой системы, а также с общим ухудшением когнитивных процессов, в первую очередь, внимания и памяти (Musiek, Chermak, 2014; Бобошко и др., 2015; Nyams et al., 2018; Голованова и др., 2020).

В то же время, как показывают многочисленные исследования, потеря слуха у лиц пожилого возраста может существенно усугублять когнитивную дисфункцию (Lin et al., 2013; Su et al., 2017; Cuoco et al., 2021; Fu et al., 2021). Это относится и к практике отказа от слуховых аппаратов (Amieva et al. 2015; Wallhagen, Strawbridge, 2016). Данные обширного лонгитюдного исследования (25 лет, 4000 участников) свидетельствуют, что у пациентов с тугоухостью гериатрического профиля, не использовавших слуховые аппараты, риск развития деменции и депрессивных состояний возрастает в 2–3 раза (Amieva et al. 2015). При этом отмечается, что ряд аудиологических тестов обладает большей чувствительностью к субклиническому когнитивному дефициту по сравнению со скрининговыми когнитивными тестами (Полушин и др., 2020; Gates et al., 2011; Moulin et al., 2019; Голованова и др., 2023).

В целом, когнитивные (познавательные) функции представляют наиболее сложные функции головного мозга, с помощью которых обеспечивается целенаправленное взаимодействие человека с окружающим миром и его познание. Это взаимодействие включает весь комплекс обработки информации — от ее получения и первичного анализа с помощью сенсорных систем до сохранения в долговременной памяти и передачи посредством устной и письменных форм речи (Lin et al., 2013; Гусев, Боголепова, 2018; Ge et al., 2021). Это взаимодействие затрагивает также и высшие уровни психофизиологической регуляции жизнедеятельности организма и активации ресурсов здоровья. Соответственно, проявления проблем могут наблюдаться в любой из этих областей. В первую очередь, это касается сенсорных нарушений и легких/умеренных когнитивных расстройств, которые характеризуются ухудшением основных показателей восприятия, внимания, памяти, ориентации, выходящими за рамки возрастной нормы, но не приводящими к утрате самостоятельности в повседневной жизни. Более тяжелые нарушения связаны с проявлениями деменции — синдрома, при котором происходит деградация памяти, мышления, поведения и способности человека выполнять обычные бытовые действия. Наиболее распространенными формами деменции выступают: болезнь Альцгеймера (60–70% случаев); деменция с тельцами Леви; лобно-височная дегенерация; сосудистая деменция и их различные смешанные формы (Livingston et al., 2017; Гусев, Боголепова, 2018).

В настоящее время число людей с деменцией быстро растет. По данным ВОЗ, если в 2020 году в мире насчитывалось около 50 млн человек с деменцией, то к 2050 году их число, согласно прогнозам, может увеличиться до 152 млн ([www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/dementia](http://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/dementia)). Это, главным образом, связано с ростом продолжительности жизни в большинстве стран мира и возрастными рисками проявлений деменции у людей старше 65 лет (Livingston et al., 2017). В то же время, в ряде развитых стран (США, Великобритания, Швеция, Нидерланды, Канада) в последние годы отмечают и тенденцию к снижению распространенности возрастной деменции. В качестве факторов, модифицирующих риски ее развития, рассматриваются: повышение уровня образования, борьба с курением, своевременное выявление и коррекция нарушений слуха, новые подходы к лечению артериальной гипертензии, повышение физической активности и др. (Livingston et al., 2017; Whitson et al., 2018). Ряд исследований свидетельствует и о положительном влиянии сенорно-когнитивных тренировок, которое выражено на этапе профилактики, когда

существенные нарушения в когнитивной сфере пожилого человека еще не проявляются (Gates et al., 2011; Park, Bischof, 2013). Это означает, что при “нормальном старении” ухудшение познавательных функций может быть до определенной степени скорректировано на физиологическом и психологическом уровнях (Shahabi, Piri, 2019). В то же время в России недостаточность диагностики и профилактики когнитивных дисфункций среди пожилого населения остается достаточно серьезной проблемой, которая во многом определяется сохранением подхода к ухудшению сенсорно-когнитивных функций как к естественному процессу, не поддающемуся профилактическим и корректирующим воздействиям, включая и функциональные упражнения (Соловьев и др., 2015).

С учетом приведенных данных, а также имеющегося у авторов опыта подготовки программ слухоречевого тренинга у пациентов с тугоухостью разного возраста (Огородникова и др., 2017; Королева и др., 2023) и актуальности целей “активного долголетия” было выбрано основное направление настоящей работы — организация курса сенсорно-когнитивных упражнений для лиц пожилого возраста с оценкой его влияния на показатели восприятия, внимания и памяти. При этом особенностью работы стала ориентация на минимизацию участия экспериментатора и используемых аппаратных средств (самостоятельные занятия на базе персонального компьютера), а также включение в анализ результатов не только комплексных психофизических измерений, но и данных, связанных с оценкой изменений в ресурсах психологического здоровья (жизнестойкость, ценностно-смысловые ориентации, потенциал самоизменений личности). Предполагалось, что в трудных жизненных ситуациях, к которым в определенной степени можно отнести и старение человека, активация этих ресурсов будет способствовать сохранению психологического здоровья, социальной активности и благополучия личности, в противовес факторам физиологического угасания и негативного влияния внешней среды (Леонтьев, 2016; Сахарова, 2020).

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

*Испытуемые.* В исследовании приняли участие 16 испытуемых — добровольцев (4 мужчины и 12 женщин) пожилого (69%) и старческого (31%) возраста. Средний возраст в группе составил  $73 \pm 1.7$  лет. Большинство испытуемых (94%) имели высшее образование, 50% из них продолжали работать. Все испытуемые обладали навыками работы с компьютером: от начальных

(пользователь офисных программ и электронной почты) до работы в Интернете. У испытуемых отсутствовали серьезные жалобы на зрение и слух. Их сенсорно-когнитивные показатели, по данным первичного обследования и анкетирования, находились в пределах возрастной нормы. Однако 68% участников отвечали, что замечают тенденцию к их ухудшению. В целом согласно полученным субъективным оценкам, 75% испытуемых в группе были полностью удовлетворены состоянием своего здоровья.

Большинство испытуемых (88%) придерживалось мнения, что состояние их здоровья и когнитивных функций в наибольшей степени зависят от наследственности. В то же время все участники выразили заинтересованность в прохождении курса сенсорно-когнитивных упражнений и подтвердили свое добровольное согласие на участие в комплексном тестировании с оценкой сенсорно-когнитивных показателей и ресурсов психологического здоровья.

*Оценка сенсорно-когнитивных показателей.* Для оценки сенсорно-когнитивных показателей использовали комплекс психофизических измерений и тестов, который применяли до начала занятий и после их окончания. В комплекс вошли: слуховой дихотический тест; тест с имитацией сложной коммуникативной сцены в условиях голосовой конкуренции (“речевой коктейль”); оценка различения ритмических последовательностей; кратковременной (цифровые ряды Джекобса), оперативной (тест PASAT) и речевой (тест Лурия) памяти; внимания (корректурная проба); выделения фигуры из фона с оценкой степени полезависимости (фигуры Готтшальдта); распознавания неполных фрагментированных изображений (Голлин-тест).

Их краткая оценка позволит лучше понять направленность измерений. Слуховой дихотический тест рассматривали в контексте характеристик межполушарного взаимодействия и латерального предпочтения при восприятии речи, а также показателей кратковременной памяти в условиях межушной конкуренции речевой стимуляции. Согласно процедуре теста через головные телефоны синхронно на правое и левое ухо испытуемого подавались 3 пары разных слов, произнесенных одним диктором (мужской голос). Общее число слов для одного предъявления равнялось 6 (3 слова × 2 канала), общее число измерений (предъявлений пар в тесте) — 30. Задача слушателя состояла в фиксации (запись в протоколе) всех распознанных им слов независимо от канала предъявления (левое/правое ухо).

Тест “речевой коктейль” имитировал эффект “вечеринки” с одновременным говорением разных

людей. Он использовался для оценки селективного внимания и способности к разделению (сегрегации) “речевых потоков” в условиях голосовой конкуренции (Огородникова и др., 2022). Задача испытуемого состояла в распознавании целевых стимулов — гласных звуков, произнесенных определенным голосом (мужской/женский), при их синхронном диотическом предъявлении через головные телефоны.

При восприятии ритма тестировали слуховое различение ритмических последовательностей, состоящих из трех тональных посылок разной длительности (300 и 600 мс) в разных сочетаниях (6 ритмических паттернов). Результаты рассматривались в контексте оценки процессов сегментации звуковых сигналов и обработки их временных характеристик в слуховой системе. Тест также входит в диагностический комплекс для выявления центральных расстройств слуха (Musiek, Chermak, 2014). Как и тест “речевой коктейль”, он был реализован в рамках специальной компьютерной программы, фиксирующей правильные ответы и время реакции испытуемого.

Тест на запоминание цифровых рядов (тест Джекобса) предназначался для оценки объема слуховой кратковременной памяти в условиях произвольного запоминания (Миронова, 2006). В процессе тестирования испытуемому последовательно предъявляли ряды простых цифр (от 0 до 9). Тестовый блок объединял 7 рядов с постепенным увеличением их длины — от 4 до 10 цифр соответственно. Вся процедура тестирования включала прохождение не менее 4-х тестовых блоков. Задача испытуемого состояла в письменной фиксации каждого из рядов цифр сразу после его прослушивания.

На оценку устойчивости слухового внимания и оперативной памяти был направлен тест PASAT. Его результаты представляли данные последовательного сложения чисел в условиях их диотического предъявления через головные телефоны. Числа от 1 до 9 подавались в случайном порядке, образуя непрерывный ряд из 60 стимулов и пауз (3 с) между ними. Такой темп подачи соответствовал условиям в клинической практике диагностики неврологических расстройств (Tombaugh, 2006). Задача испытуемого состояла в последовательном (без перерыва) выполнении операции сложения двух соседних цифр с записью текущих результатов в специальном протоколе.

Тест Лурия использовали для оценки динамики запоминания 10 односложных слов в процессе их повторения экспериментатором (1 слово в секунду). Методика широко применяется для оценки состояния слухоречевой памяти, произвольного внимания и его истощаемости у больных

с нервно-психическими заболеваниями, а также для контроля за эффективностью их медикаментозной терапии (Лурия, 2023).

Корректорную пробу, или тест Бурдона, использовали для анализа показателей концентрации, устойчивости и утомляемости зрительного внимания (Миронова, 2006). Тест предполагает просматривание испытуемым несвязного текста из 34 строк, каждая из которых содержит 22 буквы русского алфавита, напечатанные без пробелов в случайном порядке. Задача испытуемого – максимально быстро выделить и последовательно вычеркнуть заданные буквы (например, “А” или “Е”) в каждой из строк текста. В процессе тестирования экспериментатор делает временные отметки через каждые 60 с. При обработке данных на их основе рассчитывается темп работы испытуемого. Фиксировалось также общее время выполнения теста, число правильных вычеркиваний, ошибок, пропусков цели.

С помощью перцептивного теста “Фигура Готтшальдта” оценивали когнитивный стиль восприятия испытуемых в отношении проявлений полнезависимости – полнезависимости при решении зрительных задач (Panek et al., 1980). Выполнение теста предполагало выделение целевых фигур из сложных геометрических изображений (фона). Задание состояло из нескольких блоков, в каждом из которых был предоставлен весь набор возможных ответов для выбора испытуемым своего решения. По результатам тестирования оценивали степень преобладания процессов анализа (полнезависимость) или синтеза (полнезависимость) в зрительном восприятии испытуемого.

С решением зрительной задачи был связан и Голлин-тест (Foreman, Hemmings, 1987). По его результатам оценивали способность к распознаванию неполных фрагментированных изображений (сложные условия восприятия). Процедура теста рассматривалась как экспериментальная модель эвристического (инсайтного) решения сенсорно-когнитивной задачи. В процессе тестирования путем дискретного нарастания числа проявляющихся фрагментов контура снижалась степень перцептивной неопределенности изображения. Порогом его распознавания считался процент контурных элементов, при котором испытуемый называл воспринимаемый объект. При этом дополнительно выделялись правильные ответы и ошибки распознавания, темп выполнения задания. Процедуры фрагментирования изображений и предъявления элементов контура (от 5 до 100% контура) в случайном порядке, как и фиксация ответов, были реализованы с помощью русифицированной программы тестирования,

разработанной в лаборатории зрения Института физиологии им. И.П. Павлова РАН.

*Оценка ресурсов психологического здоровья.* Для первичной (до занятий) и вторичной (после курса занятий) оценки ресурсов психологического здоровья были выбраны 3 методики. Первая – тест жизнестойкости в модификации Е.Н. Осина и Е.И. Рассказовой, направленный на оценку показателей вовлеченности, контроля, принятия риска и общей жизнестойкости (Осин, Рассказова, 2013). Их выраженность позволяет характеризовать отношение человека к своей деятельности и ее результатам, степень его внутреннего напряжения и способности преодолевать его в стрессовых ситуациях.

Вторая методика была представлена опросником “Потенциал самоизменений”, включающего 4 шкалы: “потребность в самоизменениях”, “способность к осознанным самоизменениям”, “вера в возможности самоизменений”, “возможность самоизменений” (Манукян и др., 2020). Итоговый показатель отражает потенциал человека в отношении самоизменений, а также готовности к ним. Еще одним инструментом стала методика ценностных ориентаций М. Рокича (Леонтьев, 1992). Она позволяет определить два основных класса ценностей, среди которых выделяются терминальные (ценности-цели) и инструментальные (ценности-средства). Их ранжирование дает возможность оценить иерархию жизненных целей и представлений человека о нормах поведения, которые он рассматривает в качестве эталона.

*Анкетирование.* Анкетирование испытуемых, как и оценку сенсорно-когнитивных и индивидуально-психологических показателей, проводили до и после курса упражнений. Содержание анкеты было разработано авторами с целью получения информации об условиях проживания испытуемого, его круге общения, состоянии психических процессов, отношении к проблематике здоровья и мотивированности к участию в эксперименте. При повторном обследовании опрос был дополнен субъективной оценкой результатов прохождения курса занятий испытуемыми.

*Комплекс сенсорно-когнитивных упражнений.* Для проведения занятий был подготовлен комплекс упражнений из “слухоречевого”, “зрительного” и “моторного” условных блоков.

“Слухоречевые” упражнения включали задания на обнаружение паузы в звуковом сигнале, оценку направления движения высоты, различение тембров музыкальных сигналов; распознавание речевых сигналов и интонации (в тишине и на фоне шумовых помех); выделение голоса или музыкального инструмента в условиях конкуренции; запоминание последовательностей



неречевых и речевых сигналов со слуха; воспроизведение рядов цифр в прямом и обратном порядке; акустическую ориентацию (локализация источника звука и его виртуального движения); слухо-двигательную координацию и межполушарную интеграцию (дихотическое восприятие, комбинации речевых и моторных команд); прослушивание и изложение текстов, воспроизведение коротких мелодий.

В “зрительный” блок вошли упражнения на зрительное внимание, выделение фигуры из фона (поиск различий, скрытых изображений, цифр и т.д.), восприятие двойственных фигур, особенностей поля зрения; зрительную память (текстовые стимулы, геометрические фигуры разного размера, цвета и ориентации); воспроизведение изображений по памяти; зрительно-моторную координацию и межполушарную интеграцию; зрительно-речевое взаимодействие (чтение цветных слов, запоминание письменных текстов, составление рассказов по картинкам, решение филвордов, составление слов из набора букв и/или слогов).

“Моторный” блок рассматривался как дополнительный и включал ограниченный комплекс двигательных упражнений, большинство из которых относилось к тренировке мелкой моторики (синхронные и асинхронные движения пальцев и кистей правой и левой руки, рисование одной и двумя руками), ритмические повторы заданных движений.

Большинство упражнений представляли оригинальные разработки, часть из которых была подготовлена совместно со специалистами СПб-НИИЛОР Минздрава России и НИЦ ПСПбГМУ им. акад. И.П. Павлова (Огородникова и др., 2017; Королева и др., 2023). Остальные упражнения были заимствованы из открытых интернет-источников и методических рекомендаций для специального образования.

*Общая схема организации работы.* Первым этапом исследования выступало начальное обследование испытуемых (анкетирование, тестирование). По его завершению проводилась консультация и подготовка испытуемых к самостоятельным занятиям. Для этого им были предоставлены наборы упражнений, подготовленные в формате “рабочих презентаций”. Презентации содержали инструкции, стимульный материал и проверочную информацию к каждому из заданий. Испытуемым также выдали индивидуальные “дневники самонаблюдений” для отчета о выполнении программы упражнений и фиксации своих впечатлений и возникающих вопросов. Сопровождение занятий осуществлялось экспериментатором дистанционно.

Полный курс тренировки составил 4 недели и проводился в режиме индивидуальных упражнений в течение 40–60 мин, не менее 3-х раз в неделю. Помимо упражнений, 2 раза в неделю (по 30 мин) испытуемые прослушивали классическую музыку (Бах, Моцарт, Вивальди). Для каждой недели подготавливали по 3 презентации. В них были равномерно представлены упражнения из основных блоков: слухоречевого, зрительного и моторного. При этом встречающиеся в презентациях однотипные задания опирались на использование разного стимульного материала. Поэтому наборы стимулов не повторялись ни в тренировочных упражнениях, ни на этапах тестирования, которые испытуемые проходили до и после курса занятий. Тестирование проводилось в специальном рабочем помещении при отсутствии внешних помех или фоновых шумов.

При первом прохождении всех тестов проводили краткое обучение испытуемого, включая знакомство со стимулами, или пробное тестирование, направленное на исключение процедурных ошибок, связанных с непониманием инструкции. Все параметры стимуляции соответствовали комфортным для испытуемых условиям. В случае дискомфорта они могли быть урегулированы экспериментатором.

*Анализ результатов.* Для сравнительного анализа полученных результатов использовали непараметрический критерий Вилкоксона для зависимых выборок. В качестве порога значимости различий рассматривался уровень достоверности  $p < 0.05$ . В процессе обработки использовали сервис для автоматизированного расчета и описания статистики в социальных науках (URL: <https://stanly.statpsy.ru/all>) и программу для статистической обработки данных SPSS Statistics 26. Информация о средних показателях выборки соответствовала формату  $M \pm m$  (среднее и стандартная ошибка среднего). Основными объектами сравнения выступали сенсорно-когнитивные и индивидуально-психологические показатели испытуемых. Также учитывались субъективные оценки участников эксперимента.

Все процедуры измерений и тестирования с участием испытуемых, проведенные в рамках исследования, соответствовали требованиям Этического комитета Института физиологии им. И.П. Павлова РАН и Хельсинкской декларации 1964 г. с ее последующими изменениями.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные свидетельствовали о положительных изменениях в целевых показателях восприятия, внимания и памяти, которые в разной степени наблюдались у большинства испытуемых в группе после прохождения курса занятий (табл. 1). При этом основная часть выявленных изменений была значимой по критерию Вилкоксона.

Важно отметить, что позитивные сдвиги затронули не только содержательные показатели выполнения тестовых заданий (рост числа правильных ответов и т.д.), но и характеристики психодинамики испытуемых — время реакции, темп работы, устойчивость внимания. Такой результат может рассматриваться не только в контексте улучшения сенсорно-когнитивных процессов под влиянием направленных упражнений, но и повышения общей работоспособности участников эксперимента. Подчеркнем, что оба направления улучшений были зафиксированы и у самого возрастного участника, которому до начала занятий исполнилось 92 года.

Дополнительно можно выделить низкие результаты различения звуковых ритмических последовательностей до начала занятий. Они могут рассматриваться как первичные проявления центральных слуховых расстройств (Бобошко и др., 2015), которые еще имеют потенциал функционального преодоления (результат курса упражнений).

В целом эта часть результатов хорошо согласуется с опытом слухоречевых тренировок и реабилитации пациентов после кохлеарной имплантации разного возраста (Огородникова и др., 2017; Королева и др., 2023) и с данными сенсорно-когнитивного тренинга, полученными в других работах (Gates et al., 2011; Park, Bischof, 2013; Livingston et al., 2017). Новым моментом при этом была ориентация на самостоятельные занятия испытуемых. Она также получила положительную оценку участников исследования (данные анкетирования) и способствовала развитию творческой инициативы в отношении подготовки упражнений для возможного продолжения занятий.

Несмотря на достаточно ограниченную длительность курса (4 недели) влияние упражнений наблюдалось и в отношении целевых индивидуально-психологических характеристик участников. Так, у 44% испытуемых отмечено снижение уровня тревожности и повышение показателя “потенциал самоизменений”, а также связанных с ним оценок — “потребность в самоизменениях”

(31%) и “вера в возможность самоизменений” (38%). У 38% участников после курса занятий увеличился показатель жизнестойкости.

В целях детального анализа результатов для этого показателя испытуемые были разделены на 2 группы согласно их отношению к жизненному предназначению: 1 — “поиск своего пути”, “наличие жизненных задач” ( $n = 11$ ); 2 — “не задумывался”, “не всем дано найти свое предназначение” ( $n = 5$ ). Изменения в итоговой оценке “жизнестойкости” после курса занятий в этих группах оказались различными. При этом в 1-й группе (69% испытуемых) они были значимо выше ( $p < 0.05$  по критерию Вилкоксона). Этот результат можно отнести к подтверждению гипотезы о влиянии сенсорно-когнитивного тренинга на актуализацию ресурсов психологического здоровья.

Сходный результат был получен и в отношении показателей “ценностные ориентации”. После занятий у 50% испытуемых наблюдалось иерархическое повышение для двух ценностей: терминальной (“познание”) и инструментальной (“смелость в отстаивании своего мнения”). У 44% участников были отмечены положительные изменения в позициях “активная деятельная жизнь”, “эффективность в делах”; “развитие”, “жизнерадостность”. При этом для терминальной (“активная деятельная жизнь”) и инструментальной (“жизнерадостность”) ценностей показатели роста после курса занятий превысили уровень значимости ( $p < 0.05$  по критерию Вилкоксона). Такие изменения в иерархии ценностей могут быть обусловлены положительными эмоциями, вызванными динамикой успешности сенсорно-когнитивных занятий и их продуктивностью, что подтверждают данные анкетирования. Большинство испытуемых (88%) оценили участие в исследовании как положительный и интересный опыт, который способствовал формированию у них нового взгляда на себя и свои возможности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, у пожилых людей получена положительная динамика как характеристик слухового и зрительного восприятия, внимания и памяти, так и ряда индивидуально-психологических показателей (снижение тревожности, значимые изменения в системе ценностей, повышение жизнестойкости и жизнерадостности), свидетельствующих о влиянии курса упражнений на состояние сенсорно-когнитивных процессов и психологическую устойчивость участников тренировок, а также о профилактической важности функциональных тренировок в отношении снижения рисков развития старческой деменции.

**Таблица 1.** Сенсорно-когнитивные показатели группы участников до и после курса занятий

Тест	Средние значения			Значимость различий (тест Вилкоксона)	Доля улучшений в группе, %
	Показатель	До	После		
Ритм	Время реакции (с)	5.32 ±0.37	5.06 ±0.32	p < 0.05	75
	Число правильных ответов (%)	58.1 ±4.45	72.2 ±4.64	p < 0.01	81
Речевой коктейль	Время реакции (с)	2.68 ±0.23	2.19 ±0.15	p < 0.01	81
	Число правильных ответов (%)	79.2 ±5.00	90.6 ±3.37	p < 0.01	75
Дихотический тест	Время выполнения	11.9 ±0.67	11.5 ±0.48	-	50
	Число правильных запоминаний (%)	55.7 ±1.9	61.8 ±1.15	p < 0.01	100
Корректурная проба	Темп выполнения (знаков/сек)	7.8 ±0.36	9.0 ±0.54	p < 0.05	88
	Число правильных выделений (%)	92 ±1.35	95 ±1.06	-	69
Тест Лурия	Число повторов	5 ±0.5	3 ±0.3	p < 0.01	75
	% запоминания (средний по кривой запоминания)	83.3 ±3.18	90.6 ±3.56	p < 0.01	94
Тест Джекобса	% запоминания (средний по рядам)	37 ±9.16	47 ±9.34	p < 0.05	75
	Коэффициент объема памяти (кратковременной)	5.5 ±0.34	6.3 ±0.30	p < 0.01	94
Тест PASAT	Число ошибок (%) в 1-й половине теста	9.4 ±2.39	5.7 ±0.97	p < 0.05	69
	Число ошибок (%) во 2-й половине теста	20.0 ±5.8	8.9 ±2.1	p < 0.01	81
	Число правильных ответов (%)	81 ±4.5	94 ±2.3	p < 0.01	94
Голлин-тест	Число (%) элементов при опознании	18.4 ±1.1	16.5 ±1.0	p < 0.05	88
	Число правильных опознаний (%)	85.4 ±1.9	86.9 ±2.1	—	63
Тест “Фигуры Готтшальдта”	Коэффициент полнезависимости	1.4 ±0.15	1.7 ±0.17	p < 0.05	81

Результаты подтверждены данными комплекса психофизических и психологических тестов. При этом впервые вместе с сенсорно-когнитивными показателями рассмотрены изменения, которые наблюдаются в системе жизненных ценностей лиц гериатрического профиля. Полученные изменения позволяют сделать вывод о том, что разработанный курс сенсорно-когнитивных упражнений способствует актуализации как потенциала сенсорно-когнитивных процессов, так и ресурсов психологического здоровья пожилых людей.

Результаты работы не только имеют теоретическое междисциплинарное значение, но и создают практическую основу для продолжения исследования, а также для развития программ сенсорно-когнитивного тренинга с большей вовлеченностью в процесс самих участников занятий. Они также подчеркивают важность мониторинга не только психофизических показателей восприятия, внимания, памяти, но и ценностно-смысловых ориентаций, которые могут выступать в роли дополнительных ресурсов, обеспечивающих психологическое здоровье, благополучие личности и качества жизни пожилого человека.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана средствами Программы создания и развития НЦМУ Павловский центр “Интегративная физиология — медицине, высокотехнологичному здравоохранению и технологиям стрессоустойчивости” на 2020–2025 гг. (соглашение с Минобрнауки № 075–15–2022–303 от 21.04.2022 г.).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

#### ВКЛАД АВТОРОВ

Сбор данных литературы (И.С.М., С.П.П.), подготовка методики (С.П.П., Е.А.О., И.С.М.), проведение тестирования (И.С.М., Е.А.О.), сопровождение курса занятий (И.С.М.), обработка и анализ результатов (И.С.М., С.П.П., Е.А.О.), подготовка рукописи (И.С.М., Е.А.О., С.П.П.).

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность кандидату психологических наук, доценту кафедры клинической психологии СПбГИПСР Анисимову

Алексее Игоревичу за помощь в выборе методик оценки ресурсов психологического здоровья и в анализе результатов, полученных на основе их применения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бобошко М. Ю., Жилинская Е. В., Огородникова Е. А., Пак С. П., Салахбеков М. А. Анализ временных параметров звуковых сигналов в норме и при нарушениях слуха. *Folia Otorhinolaryngologiae et Pathologiae Respiratoriae*. 2015. V. 21. С. 47–54.
- Голованова Л. Е., Бобошко М. Ю., Квасов Е. А., Лаптева Е. С. Тугоухость у взрослого населения старших возрастных групп. *Успехи геронтологии*. 2019. Т. 32. № 1–2. С. 166–173.
- Голованова Л. Е., Бобошко М. Ю., Лаптева Е. С., Огородникова Е. А. Аудиологическое тестирование в комплексной гериатрической оценке пациентов. *Успехи геронтологии*. 2023. Т. 36. № 4. С. 525–531. DOI: 10.34922/AE.2023.36.4.010
- Голованова Л. Е., Огородникова Е. А., Лаптева Е. С., Бобошко М. Ю. Возрастные аспекты качества жизни пациентов с нарушениями слуха. *Успехи геронтологии*. 2020. Т. 33. № 5. С. 885–892. DOI: 10.34922/AE.2020.33.5.008
- Гусев Е. И., Боголепова А. Н. *Когнитивные нарушения и деменция*. М.: Ремедиум, 2019. 120 с. ISBN: 978–5–906499–44–8
- Королева И. В., Балякова А. А., Столярова Э. И., Пак С. П., Огородникова Е. А. Развитие процессов слухового анализа у пользователей кохлеарных имплантов с применением программных средств. *Российский психологический журнал*. 2023. Т. 20. № 3. С. 188–205. DOI: 10.21702/rpj.2023.3.10
- Леонтьев Д. А. *Методика изучения ценностных ориентаций*. М.: Смысл, 1992.
- Леонтьев Д. А. Саморегуляция, ресурсы и личностный потенциал. *Сибирский психологический журнал*. 2016. № 62. С. 18–37.
- Лурия А. Р. *Основы нейропсихологии*. 8-е изд. СПб: Питер, 2023. 384 с. ISBN: 978–5–4461–1899–1
- Манукян В. Р., Муртазина И. Р., Гришина Н. В. Опросник для диагностики потенциала самоизменений личности. *Консультативная психология и психотерапия*. 2020. № 4. С. 35–58.
- Миронова Е. Е. *Сборник психологических тестов. Часть II*. Минск, 2006. 146 с.
- Огородникова Е. А., Лабутина О. В., Пак С. П. Имитация сложной акустической сцены при стимуляции через

- головные телефоны. *Вестник психофизиологии*. 2022. № 2. С. 140–146. DOI: 10.34985/o0640–6924–4290-f
- Огородникова Е. А., Балякова А. А., Жилинская Е. В., и др. Слуховая тренировка как метод реабилитации пациентов с нарушениями слуха и речи. *Folia Otorhinolaryngologiae et Pathologiae Respiratoriae*. 2017. Т. 23. № 1. С. 33–42.
- Осин Е. Н., Рассказова Е. И. Краткая версия теста жизнестойкости: психометрические характеристики и применение в организационном контексте. *Вестник Московского университета. Сер.: 14. (Психология)*. 2013. № 2. С. 147–165.
- Полушин А. Ю., Бобошко М. Ю., Гарбарук Е. С., Кожемякина М. В., Полушин Ю. С. Аудиологические методы исследования в диагностике послеоперационных нарушений когнитивных функций. *Российский неврологический журнал*. 2020. Т. 25. № 1. С. 43–51. URL: <https://doi.org/10.30629/2658-7947-2020-25-1-43-51>
- Сахарова Т. С. Смысло-жизненные ориентации людей пожилого возраста. *Развитие личности*. 2020. № 2. С. 193–203.
- Соловьев А. Г., Новикова И. А., Местечко В. В. *Профилактика когнитивных и эмоциональных нарушений (рекомендации для лиц пожилого возраста и их родственников)*. Архангельск: Северный государственный медицинский университет, 2015. 25 с.
- Amieva H., Ouvrard C., Giulioli C. et al. Self-reported hearing loss, hearing aids, and cognitive decline in elderly adults: a 25-year study. *J Am Geriatr Soc*. 2015. V. 63. P. 2099–2104. DOI: 10.1111/jgs.13649
- Cuoco S., Cappiello A., Scarpa A. et al. Neuropsychological profile of hearing-impaired patients and the effect of hearing aid on cognitive functions: an exploratory study. *Sci. Rep.* 2021. V. 11. P. 9384. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88487-y>
- Deary I. J., Corley J., Gow A. J. et al. Age-associated cognitive decline. *Br Med Bull*. 2009. V. 92. P. 135–152. DOI: 10.1093/bmb/ldp033
- Dumassais S., Pichora-Fuller M.K., Guthrie D. et al. Strategies used during the cognitive evaluation of older adults with dual sensory impairment: a scoping review. *Age and Ageing*. 2024. V. 53. Article afae051. URL: <https://doi.org/10.1093/ageing/afae051>
- Foreman N., Hemmings R. The Gollin Incomplete Figures Test: A Flexible, Computerised Version. *Perception*. 1987. V. 16. P. 543–548. URL: <https://doi.org/10.1068/p160543>
- Fu X., Liu B., Wang S. et al. The relationship between hearing loss and cognitive impairment in a Chinese elderly population: the baseline analysis. *Front. Neurosci.* 2021. V. 26. Article 749273. URL: <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.749273>
- Gates N. J., Sachdev P. S., Fiatarone Singh M. A., Valenzuela M. Cognitive and memory training in adults at risk of dementia: a systematic review. *BMC Geriatr*. 2011. V. 11. P. 55. DOI: 10.1186/1471-2318-11-55
- Ge S., McConnell E., Wu B. et al. Longitudinal association between hearing loss, vision loss, dual sensory loss, and cognitive decline. *J. Am. Geriatr. Soc.* 2021. V. 69 P. 644–650. DOI: 10.1111/jgs.16933
- Hyams A. V., Hay-McCutcheon M., Scogin F. Hearing and quality of life in older adults. *J. clin. Psychol.* 2018. V. 74. P. 1874–1883. URL: <https://doi.org/10.1002/jclp.22648>
- Lin F. R., Yaffe K., Xia J. et al. Hearing loss and cognitive decline in older adults. *JAMA Intern. Med.* 2013. V. 173. P. 293–299. DOI: 10.1001/jamainternmed.2013.1868
- Livingston G., Sommerlad A., Orgeta V. et al. Dementia prevention, intervention, and care. *Lancet*. 2017. 3902673–2734. DOI: 10.1016/S0140-6736(17)31363-6
- Moulin A., Vergne J., Gallego S., Micheyl C. A new speech, spatial, and qualities of hearing scale short-form: Factor, cluster, and comparative analyses. *Ear and Hearing*. 2019. V. 40(4). P. 938–950. URL: <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000675>
- Musiek F. E., Chermak G. D. *Handbook of central auditory processing disorder*. San Diego. Plural Publishing. 2014. V.1. Auditory neuroscience and diagnosis. 768 p.
- Panek P. E., Funk L. G., Nelson P. K. Reliability and validity of the group embedded figures test across the life span. *Perceptual and Motor Skills*. 1980. V. 50. P. 1171–1174.
- Park D. C., Bischof G. N. The aging mind: neuroplasticity in response to cognitive training. *Dialogues in Clinical Neuroscience*. 2013. V. 15.
- Shahabi S. R., Piri R. Normal Cognitive Aging: Age Related Cognitive Changes in Elderly. *Journal of Aging Psychology*. 2019. V. 5. P. 101–116. DOI: 10.22126/jap.1970.1179
- Su P., Hsu C. C., Lin H. C. et al. Age-related hearing loss and dementia: a 10-year national population-based study. *Eur Arch. Otorhinolaryngol.* 2017. V. 274. P. 2327–2334. URL: <https://doi.org/10.1007/s00405-017-4471-5>
- Tombaugh T. N. A comprehensive review of the Paced Auditory Serial Addition Test (PASAT). *Arch Clin Neuropsychol*. 2006. V. 21. P. 53–76. DOI: 10.1016/j.acn.2005.07.006
- Wallhagen M. I., Strawbridge W. J. Association Between Hearing Aid Use and Cognitive Decline. *J Am Geriatr Soc*. 2016. V. 64. P. 1147–1148. DOI: 10.1111/jgs.14122
- Whitson H. E., Cronin-Golomb A., Cruickshanks K. J. et al. Aging Bench-to-Bedside Conference: Sensory Impairment and Cognitive Decline in Older Adults. *J Am Geriatr Soc*. 2018. V. 66. P. 2052–2058. DOI: 10.1111/jgs.15506

# THE EFFECT OF SENSORY-COGNITIVE TRAINING ON PERCEPTION, ATTENTION AND MEMORY IN ELDERLY PEOPLE

I. S. Medvedev, S. P. Pak, E. A. Ogorodnikova\*

*Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences,*

*199034, Makarov emb., 6, St. Petersburg, Russia*

*\*E-mail: ogorodnikovaea@infran.ru*

The effect of sensory-cognitive training on features of perception, attention and memory in elderly and senile people was studied. The experimental group included 16 elderly and senile volunteer subjects (average age  $73 \pm 1.7$  years) who did not have a history of significant age-related sensory and neurological problems (survey data). All subjects underwent a course of sensory-cognitive exercises for 4 weeks, as well as psychophysical testing and assessment of psychological health resources before and after the training.

A significant improvement in target sensory-cognitive indicators (perception, attention, memory) in the experimental group and the dynamics of a number of individual psychological characteristics (anxiety, hierarchy in the value system, vital durability and cheerfulness) were shown. The results allow us to conclude that the developed course of sensory-cognitive training helps to update both the potential of sensory-cognitive processes and the psychological health resources of older people. This indicates the preventive importance of functional training in the context of reducing the age-related risks of developing dementia and achieving the goals of active aging.

**Keywords:** sensory-cognitive training, age-related sensory-cognitive dysfunctions, perception, attention, memory, psychological health resources, elderly and senile age

## REFERENCES

- Boboshko M. Yu., Zhilinskaia E. V., Ogorodnikova E. A., Pak S. P., Salakhebekov M. A. Analiz vremennykh parametrov zvukovykh signalov v norme i pri narusheniyakh slukha [Temporal processing of signals in patients with normal hearing and hearing loss]. *Folia Otorhinolaryngologiae et Pathologiae Respiratoriae*. 2015. V. 21. P. 47–54. (in Russian).
- Golovanova L. E., Boboshko M. Yu., Kvasov E. A., Lapteva E. S. Tugoukhost' u vzroslogo naseleniya starshikh vozrastnykh grupp. [Hearing loss in the adult population of older age groups]. *Uspekhi gerontologii*. 2019. V. 32. P. 166–173. (in Russian).
- Golovanova L. E., Ogorodnikova E. A., Belokurova N. S., Lapteva E. S., Boboshko M. Yu. Audiologicheskoye testirovaniye v kompleksnoy geriatricheskoy otsenke patsiyentov [Audiological correlates of age-related manifestations of auditory disorders]. *Uspekhi gerontologii*. 2023. V. 36. P. 525–531. DOI: 10.34922/AE.2023.36.4.010. (in Russian).
- Golovanova L. E., Ogorodnikova E. A., Lapteva E. S., Boboshko M. Yu. Vozrastnyye aspekty kachestva zhizni patsiyentov s narusheniyami slukha [Age-related issues of the quality of life in hearing impaired patients]. *Uspekhi gerontologii*. 2020. V. 33. P. 885–892. DOI: 10.34922/AE.2020.33.5.008. (in Russian).
- Gusev E. I., Bogolepova A. N. *Kognitivnyye narusheniya i dementsiya* [Cognitive impairment and dementia] Publisher: Remedium, 2019. 120 p. (in Russian).
- Koroleva I. V., Balyakova A. A., Stolyarova E. I., Pak S. P., Ogorodnikova E. A. Razvitiye protsessov slukhovogo analiza u pol'zovateley kokhlearnykh implantov s primeneniye programmykh sredstv [Development of auditory analysis processes in cochlear implant users using software tools]. *Rossiyskiy psikhologicheskii zhurnal*. 2023. V. 20. P. 188–205. DOI: 10.21702/rpj.2023.3.10. (in Russian).
- Leontyev D. A. *Metodika izucheniya tsennostnykh oriyentatsiy* [Methodology for studying value orientations] M.: Smysl, 1992. (in Russian).
- Leontyev D. A. Samoregulyatsiya, resursy i lichnostnyy potentsial [Self-regulation, resources and personal potential]. *Sibirskiy psikhologicheskii zhurnal*. 2016. № 62. P. 18–37. (in Russian).
- Luria A. R. *Osnovy neyropsikhologii*. 8 izd. [Fundamentals of neuropsychology (8th ed.)] Piter, 2023. 384 c. ISBN: 978–5–4461–1899–1. (in Russian).
- Manukyan V. R., Murtazina I. R., Grishina N. V. Oprosnik dlya diagnostiki potentsiala samoizmeneniya lichnosti [Questionnaire for diagnosing the potential for personality self-change]. *Konsul'tativnaya psikhologiya i psikhoterapiya*. 2020. V. 4. P. 35–58. (in Russian).
- Mironova E. E. *Sbornik psikhologicheskikh testov. Chast' II* [Collection of psychological tests. Part II]. Minsk, 2006. 146 p. (in Russian).
- Ogorodnikova E. A., Labutina O. V., Pak S. P. Imitatsiya slozhnoy akusticheskoy stsiny pri stimulyatsii cherez golovnyye telefony [Simulation of a complex acoustic scene when stimulated through headphones]. *Vestnik psikhofiziologii*. 2022. № 2. P. 140–146. DOI: 10.34985/o0640–6924–4290-f. (in Russian).
- Ogorodnikova E. A., Balyakova A. A., Zhilinskaya E. V. et al. Slukhovaya trenirovka kak metod reabilitatsii patsiyentov s narusheniyami slukha i rechi [Auditory training as a method of rehabilitation of patients with

- hearing and speech impairments]. *Folia Otorhinolaryngologiae et Pathologiae Respiratoriae*. 2017. V. 23. P. 33–42. (in Russian).
- Osin E. N., Rasskazova E. I. Kratkaya versiya testa zhiznestoykosti: psikhometricheskiye kharakteristiki i primeneniye v organizatsionnom kontekste [Short version of the resilience test: psychometric characteristics and application in an organizational context]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 14 (Psikhologiya)*. 2013. № 2. P. 147–165. (in Russian).
- Polushin A. Yu., Boboshko M. Yu., Garbaruk E. S., Kozhemyakina M. V., Polushin Yu. S. Audiologicheskiye metody issledovaniya v diagnostike posleoperatsionnykh narusheniy kognitivnykh funktsiy [Audiological research methods in the diagnosis of postoperative cognitive impairment]. *Rossiyskiy nevrologicheskiy zhurnal*. 2020. № 25. P. 43–51. URL: <https://doi.org/10.30629/2658-7947-2020-25-1-43-51>. (in Russian).
- Sakharova T. S. Smyslo-zhiznennyye oriyentatsii lyudey pozhilogo vozrasta [Meaningful and life orientations of older people]. *Razvitiye lichnosti*. 2020. № 2. P. 193–203. (in Russian).
- Soloviev A. G., Novikova I. A., Mestechko V. V. *Profilaktika kognitivnykh i emotsional'nykh narusheniy (rekommendatsii dlya lits pozhilogo vozrasta i ikh rodstvennikov)* [Prevention of cognitive and emotional disorders (recommendations for older people and their relatives)]. Arkhangel'sk: Northern State Medical University, 2015. 25 p. (in Russian).
- Amieva H., Ouvrard C., Giulioli C. et al. Self-reported hearing loss, hearing aids, and cognitive decline in elderly adults: a 25-year study. *J Am Geriatr Soc*. 2015. V. 63. P. 2099–2104. DOI: 10.1111/jgs.13649.
- Cuoco S., Cappiello A., Scarpa A. et al. Neuropsychological profile of hearing-impaired patients and the effect of hearing aid on cognitive functions: an exploratory study. *Sci. Rep*. 2021. V. 11. P. 9384. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88487-y>
- Deary I. J., Corley J., Gow A. J. et al. Age-associated cognitive decline. *Br Med Bull*. 2009. V. 92. P. 135–152. DOI:10.1093/bmb/ldp033
- Dumassais S., Pichora-Fuller M.K., Guthrie D. et al. Strategies used during the cognitive evaluation of older adults with dual sensory impairment: a scoping review. *Age and Ageing*. 2024. V. 53. Article afae051. URL: <https://doi.org/10.1093/ageing/afae051>
- Foreman N., Hemmings R. The Gollin Incomplete Figures Test: A Flexible, Computerised Version. *Perception*. 1987. V. 16. P. 543–548. URL: <https://doi.org/10.1068/pl160543>
- Fu X., Liu B., Wang S. et al. The relationship between hearing loss and cognitive impairment in a Chinese elderly population: the baseline analysis. *Front. Neurosci*. 2021. V. 26. Article 749273. URL: <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.749273>
- Gates N. J., Sachdev P. S., Fiatarone Singh M. A., Valenzuela M. Cognitive and memory training in adults at risk of dementia: a systematic review. *BMC Geriatr*. 2011. V. 11. P. 55. DOI: 10.1186/1471-2318-11-55
- Ge S., McConnell E., Wu B. et al. Longitudinal association between hearing loss, vision loss, dual sensory loss, and cognitive decline. *J. Am. Geriatr. Soc*. 2021. V. 69 P. 644–650. DOI: 10.1111/jgs.16933
- Hyams A. V., Hay-McCutcheon M., Scogin F. Hearing and quality of life in older adults. *J. clin. Psychol*. 2018. V. 74. P. 1874–1883. URL: <https://doi.org/10.1002/jclp.22648>
- Lin F. R., Yaffe K., Xia J. et al. Hearing loss and cognitive decline in older adults. *JAMA Intern. Med*. 2013. V. 173. P. 293–299. DOI: 10.1001/jamainternmed.2013.1868
- Livingston G., Sommerlad A., Orgeta V. et al. Dementia prevention, intervention, and care. *Lancet*. 2017. 3902673–2734. DOI: 10.1016/S0140-6736(17)31363-6
- Moulin A., Vergne J., Gallego S., Micheyl C. A new speech, spatial, and qualities of hearing scale short-form: Factor, cluster, and comparative analyses. *Ear and Hearing*. 2019. V. 40. P. 938–950. URL: <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000675>
- Musiek F. E., Chermak G. D. *Handbook of central auditory processing disorder*. San Diego. Plural Publishing. 2014. V. 1. Auditory neuroscience and diagnosis. 768 p.
- Panek P. E., Funk L. G., Nelson P. K. Reliability and validity of the group embedded figures test across the life span. *Perceptual and Motor Skills*. 1980. V. 50. P. 1171–1174.
- Park D. C., Bischof G. N. The aging mind: neuroplasticity in response to cognitive training. *Dialogues in Clinical Neuroscience*. 2013. V. 15.
- Shahabi S. R., Piri R. Normal Cognitive Aging: Age Related Cognitive Changes in Elderly. *Journal of Aging Psychology*. 2019. V. 5. P. 101–116. DOI: 10.22126/jap.1970.1179
- Su P., Hsu C. C., Lin H. C. et al. Age-related hearing loss and dementia: a 10-year national population-based study. *Eur Arch. Otorhinolaryngol*. 2017. V. 274. P. 2327–2334. URL: <https://doi.org/10.1007/s00405-017-4471-5>.
- Tombaugh T. N. A comprehensive review of the Paced Auditory Serial Addition Test (PASAT). *Arch Clin Neuropsychol*. 2006. V. 21. P. 53–76. DOI: 10.1016/j.acn.2005.07.006
- Wallhagen M. I., Strawbridge W. J. Association Between Hearing Aid Use and Cognitive Decline. *J Am Geriatr Soc*. 2016. V. 64. P. 1147–1148. DOI: 10.1111/jgs.14122
- Whitson H. E., Cronin-Golomb A., Cruickshanks K. J. et al. Aging Bench-to-Bedside Conference: Sensory Impairment and Cognitive Decline in Older Adults. *J Am Geriatr Soc*. 2018. V. 66. P. 2052–2058. DOI: 10.1111/jgs.15506

УДК 612.821

## ЛОКАЛИЗАЦИЯ ЗВУКОВОГО СИГНАЛА В УСЛОВИЯХ МАСКИРОВКИ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

© 2024 М. Ю. Агаева

*Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН,  
199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 6**E-mail: agamu\_1@mail.ru*

Поступила в редакцию 10.07.2024

После доработки 05.09.2024

Принята к публикации 10.09.2023

Исследовано влияние маскера на локализацию звукового сигнала в вертикальной сагиттальной плоскости в условиях маскировки: одновременной и в парадигме эффекта предшествования. В первом случае неподвижные сигнал и маскер предъявлялись одновременно, во втором – начало сигнала сдвигалось относительно начала маскера. Величина сдвига (задержка) составляла 2, 4, 8, 20, 40, 80 и 200 мс. В качестве сигнала и маскера были использованы некоррелированные шумовые посылки с шириной полосы от 5 до 18 кГц. Длительность шумовых посылок – 1 с. Маскер всегда предъявлялся под углом 90° элевации (над головой слушателя), а сигнал из положения 7.5° элевации (перед слушателем относительно межушной линии). Воспринимаемое угловое положение сигнала в условиях маскировки сравнивалось с пространственными оценками того же сигнала при его изолированном предъявлении (без маскера), аналогично локализация маскера в условиях маскировки сравнивалась с воспринимаемым положением изолированного маскера (без сигнала). Показано, что под действием маскировки вероятность обнаружения сигнала уменьшалась. При задержках от 0 до 40 мс слушатели в основном показывали воспринимаемое положение маскера, которое было смещено в сторону сигнала независимо от величины задержки и достоверно отличалось от воспринимаемого положения одиночного маскера. Вероятность локализации сигнала при этих задержках составляла не больше 8%. При задержках от 80 мс и выше вероятность локализации сигнала увеличивалась и составляла 92% и выше. Воспринимаемое положение сигнала не зависело от величины задержки и достоверно не отличалось от положения одиночного сигнала.

*Ключевые слова:* вертикальная плоскость, локализация звукового сигнала, маскировка

**DOI:** 10.31857/S0235009224040048 **EDN:** ADFOZS

### ВВЕДЕНИЕ

Маскировкой называется явление, заключающееся в ухудшении восприятия одного стимула (сигнал) в присутствии другого стимула (маскера) (Blauert, 1997). В обычной жизни человеку и животным часто приходится определять положение источника одного звука на фоне других. Решая эту задачу, слуховая система должна вычислить и разделить дирекционные признаки сигнала и маскера – угловое положение по горизонтали (азимут) и вертикали (элевация), а также расстояние до источника звука. В последние 20 лет появились работы, в которых было показано, что при одновременном предъявлении сигнала и маскера, расположенных в вертикальной сагиттальной плоскости, испытуемые локализуют один звуковой образ (ЗО) на основе взвешенного усреднения их угловых положений (Best et al., 2004; Bremen et al., 2010; Bentum et al., 2017). В вертикальной плоскости локализация

основана на изменениях в спектре сигнала. Изменения в спектре дирекционно зависимы и создаются ушными раковинами (Van Opstal et al., 2017; Yao et al., 2020). За счет отражения звуковых волн на бугорках и впадинах ушных раковин и их интерференции в зависимости от угла элевации происходят изменения в спектре сигнала в диапазоне от 4–5 кГц и выше. Если два сигнала звучат одновременно, то, помимо интерференции на ушных раковинах, происходит интерференция между сигналами. Как было показано в трех работах (Bremen et al., 2010; Bentum et al., 2017; Ege et al., 2018), если сигнал и маскер предъявить одновременно, то испытуемые локализуют один звуковой образ на основе средневзвешенного значения их угловых положений. Например, в работе (Ege et al., 2018) в качестве маскера использовалась широкополосная посылка гауссова шума (ширина полосы 0,5–20 кГц) длительно-стью 100 мс, а сигналом была шумовая посылка



с тем же амплитудно-частотным спектром длительностью 20 мс, повторенная 5 раз, что делало звучание сигнала похожим на звук зуммера. На основе полученных результатов было высказано предположение, что вследствие интерференции двух стимулов на ушных раковинах слуховая система не может разделить их дирекционные признаки (Bremen et al., 2010; Bentum et al., 2017). Однако полученные данные довольно противоречивы. В одной из работ было отмечено влияние пространственного разделения между сигналом и маскером на определение положения стимула (Bremen et al., 2010). В том случае, когда маскер и сигнал были разнесены в пространстве больше чем на  $45^\circ$  и предъявлялись одновременно, испытуемые показывали или положение сигнала, или положение маскера, несмотря на то, что их просили отмечать только сигнал и игнорировать маскер. Авторы (Bremen et al., 2010) назвали подобное распределение ответов бимодальным. Если сигнал и маскер были разнесены в пространстве на расстояние меньше  $45^\circ$ , бимодального распределения ответов не наблюдалось и испытуемые показывали средневзвешенное положение ЗО. Следовательно, слуховая система была способна частично выделить информацию, приходящую от двух стимулов, но этого было недостаточно, чтобы полностью отделить один стимул от другого и определить положение сигнала. Однако в последующих исследованиях (Bentum et al., 2017; Ege et al., 2018) влияние разделения стимулов на их восприятие в вертикальной плоскости не было получено. Например, в работе (Ege et al., 2018) наблюдалось, что при задержках меньше 40 мс слушатели показывали средневзвешенное положение ЗО вместо воспринимаемого положения маскера. В этом исследовании расстояние между сигналом и маскером менялось от  $10^\circ$  до  $80^\circ$ , и для всех расстояний между стимулами было получено средневзвешенное положение ЗО.

В исследовании (Johnson et al. 2015) было отмечено, что при внесении дополнительной низкочастотной модуляции в сигнал улучшалась его локализация. Однако в работе Бентума с соавторами (Bentum et al., 2017) не удалось обнаружить влияние частотной модуляции на восприятие сигнала.

Введение задержки, т.е. асинхронности начала двух сигналов (эффект предшествования), не приводило к улучшению локализации ни маскера, ни сигнала (Ege et al., 2018). Только при задержке более 320 мс слушатели локализовали прямой сигнал (маскер) в области его нахождения (Ege et al., 2018). В основе эффекта предшествования лежит механизм выделения дирекционной информации от первых звуковых волн, идущих прямо от источника звука (прямой звук), и подавления

дирекционной информации об отраженных звуковых волнах (эхо-сигналы), приходящих с некоторой задержкой (Brown et al., 2015). Однако, согласно имеющимся в литературе данным, проявление эффекта предшествования было слабее в вертикальной плоскости, чем в горизонтальной (Litovsky, et al., 1999; Dizon, Litovsky, 2004; Агаева, Альтман, 2009).

В целом взаимодействие сигнала и маскера в вертикальной плоскости остается малоизученным. Целью настоящей работы было изучение эффектов маскировки при большом разнесении маскера и сигнала (на  $86^\circ$ ) относительно друг друга. В качестве сигнала и маскера использовались длительные (1 с) некоррелированные шумовые послышки с одинаковой огибающей. Такая комбинация стимулов моделирует звуки, приходящие от двух независимых источников со сходными частотно-временными характеристиками. Тем самым мы попытаемся ответить на вопрос, может ли слуховая система выделить дирекционные признаки из спектров маскера и сигнала для длительных шумовых стимулов, разнесенных на большое расстояние, а также оценить влияние задержки сигнала относительно маскера на локализацию.

## МЕТОДИКА

*Условия эксперимента и испытуемые.* В исследовании участвовало 8 испытуемых (7 женщин и 1 мужчина). Все испытуемые были с нормальным слухом в возрасте от 20 до 42 лет. Исследование состояло из двух серий. Длительность каждой серии составляла 20–25 мин. В один день один испытуемый принимал участие в одной серии.

Эксперименты проводили в анэхоидной камере размером  $3 \times 3 \times 4.5$  м. В камере установлена полукруглая поворотная дуга радиусом 1 м, на которой располагались 49 громкоговорителей (Visaton SC5.9) с близкими частотными характеристиками. Различия амплитудно-частотных характеристик громкоговорителей не превышали  $\pm 4$  дБ в полосе 0.2–18 кГц. Угловое расстояние между ними составляло  $3.75^\circ$ .

Дуга была установлена в вертикальной плоскости. Испытуемого располагали в кресле таким образом, что его сагиттальная плоскость совпадала с плоскостью дуги, и голова находилась в центре полукруглости дуги. Два крайних громкоговорителя, первый и последний, находились на уровне головы испытуемого. Координаты громкоговорителя, находящегося впереди напротив головы испытуемого, были  $0^\circ$  по азимуту относительно средней линии головы и  $0^\circ$  элевации относительно межушной линии (рис. 1а). Координаты

громкоговорителя, расположенного позади испытуемого, были  $180^\circ$  по азимуту относительно средней линии головы и  $180^\circ$  элевации относительно межшумной линии. Голову испытуемого не фиксировали, но во время предъявления звуковых сигналов просили не двигаться и не менять положение головы относительно дуги.

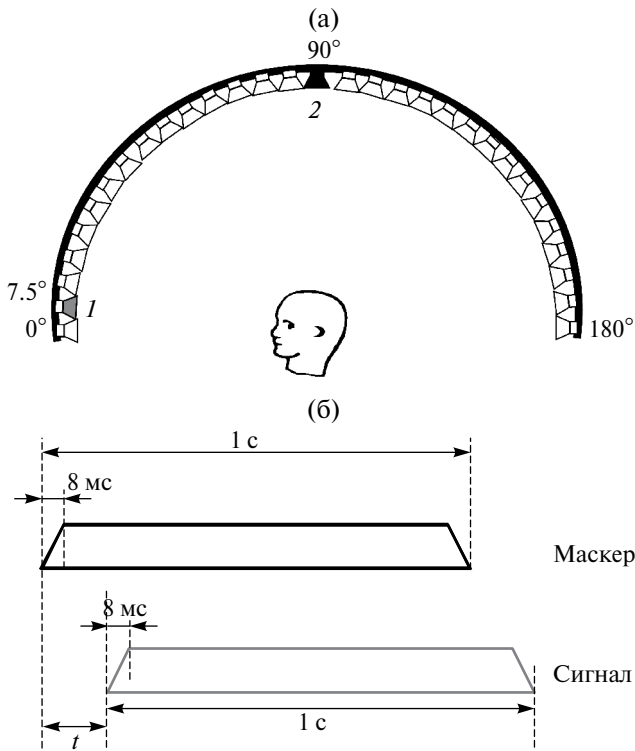


Рис. 1. Схема предъявления звуковых стимулов.

а — схема расположения источников звука относительно испытуемого: 1 — сигнал, 2 — маркер;

б — схематичное представление порядка предъявления маскира и сигнала во времени;

$t$  — задержка начала звучания сигнала относительно начала маскира.

**Стимулы.** В качестве звукового сигнала использовались широкополосные шумовые посылки с частотной полосой — 5–18 кГц, синтезированные цифровым способом с частотой дискретизации 44.1 кГц. Снизу частотная полоса определялась фильтром, характеристики которого были подобраны таким образом, чтобы на 5 кГц заглушение составляло 100 дБ, а на 6 кГц — 0 дБ. Сверху частотная полоса сигнала была ограничена характеристиками динамиков на 18 кГц. Для экспериментов было синтезировано множество шумовых посылок с одинаковой полосой пропускания длительностью 12 с. Из них была выбрана пара посылок, у которых

коэффициент корреляции Спирмана был минимальным ( $K_{\text{корр}} = 0,0003$ ). Одна посылка из этой пары использовалась как исходник для маскером, а другая — сигналом.

В основных экспериментальных сериях каждый звуковой стимул состоял из двух шумовых посылок длительностью по 1 с. Фронт нарастания-спада был 8 мс. Временная задержка между началами шумовых посылок составляла 0, 2, 4, 8, 20, 40, 80, 200 мс. Таким образом, шумовые посылки подавались либо одновременно, либо вторая сдвигалась относительно начала первой на величину задержки (см. рис. 1б). Далее первая шумовая посылка будет рассматриваться как маскер, а вторая — как сигнал. С помощью специально разработанного программного обеспечения из них в случайные моменты времени в каждой пробе формировались пары маскер-сигнал с заданной длительностью, фронтами и отставлением.

В естественных условиях обычно интенсивность отраженных сигналов (эхо-сигналов) меньше на 7–10 дБ, чем прямых (Litovsky et al., 1999), поэтому в наших экспериментах интенсивность маскира составляла 54 дБ УЗД (уровень звукового давления), а сигнала — 45.3 дБ УЗД. Акустические измерения проводились с помощью аппаратуры Брюэль и Кьер (Дания) в точке расположения центра головы испытуемого.

Чтобы сравнить локализацию сигнала как в присутствии маскира, так и без него, в каждую серию были включены контрольные пробы. В них испытуемым предъявлялся сигнал, идущий от одного источника, т.е. один сигнал без маскира или один маскер без сигнала. Маскер всегда предъявлялся под углом  $90^\circ$ , а сигнал был расположен  $7.5^\circ$  элевации. Угловое расстояние между маскером и сигналом составляло  $82.5^\circ$ . Для предотвращения того, что испытуемые будут показывать только воспринимаемые положения сигнала и маскира, также были добавлены 5 проб, в которых изолированный сигнал шел из положения 42, 78, 108, 138,  $172^\circ$  по элевации относительно средней линии по одной пробе для каждого положения сигнала. Эти 5 проб подавались в случайном порядке в течение одной серии.

В основных экспериментальных сериях испытуемые могли слышать либо сигнал и маскер, либо звуковой образ, который возникал, когда маскер и сигнал перцептивно сливались. Воспринимаемое положение ЗО могло располагаться в области нахождения маскира, если дирекционная информация о положении сигнала полностью подавлялась, или ниже на дуге, если происходило взвешенное усреднение. Интенсивность маскира была выше интенсивности сигнала на 8.87 дБ,

поэтому вклад маскера в взвешенное усреднение был больше, чем сигнала, и положение ЗО могло сместиться в сторону маскера. Испытуемого просили отмечать положение второго (отсроченного) сигнала, если он его слышит. В инструкции говорилось, что воспринимаемое положение стимулов будет меняться. В случае, если испытуемый слышал только один ЗО, он должен был указать воспринимаемое положение ЗО. В контрольных пробах испытуемый получал инструкцию определять положение единственного звучащего сигнала.

*Процедура эксперимента.* В начале каждого эксперимента проводилась предварительная тренировка длительностью 3–5 мин, в которой были использованы задержки 0, 2, 4, 8, 20, 40, 80, 200, 300, 600, 1200 мс. Тренировку всегда начинали с максимальной задержки 1200 мс. Все испытуемые при такой задержке слышали два последовательно звучащих стимула: первый – сверху дуги над головой, второй – впереди напротив головы испытуемого. Задержку последовательно уменьшали до 0 мс, затем меняли в случайном порядке от 0 до 1200 мс, а затем переходили к основной экспериментальной серии, в которой задержка изменялась в пределах от 0 до 200 мс. Во время тренировки у испытуемого после каждого предъявления стимула и получения ответа на него всегда спрашивали: сколько сигналов испытуемый слышал. Таким образом, в тренировочных экспериментах определялась картина того, как локализуются сигнал и ЗО.

В основной экспериментальной серии каждый стимул, состоящий из двух шумовых посылок с определенной задержкой, а также контрольные стимулы, состоящие из одной шумовой посылки, предъявляли по 2 раза с интервалом 1 с, после чего регистрировался ответ испытуемого. Если испытуемому было недостаточно двух раз для выполнения задания, по его просьбе стимул повторяли еще 2 раза. Ответы испытуемых регистрировали при помощи графического планшета Genius G-pen 450, на рабочей поверхности которого была схематически изображена дуга. После прослушивания звуковых стимулов испытуемый должен был спроецировать на схему воспринимаемое положение сигнала и затем отметить его на ней. Угловые координаты выбранных точек определялись автоматически с помощью специально разработанной компьютерной программы. Стимулы предъявлялись в 2 сериях. В каждой серии каждая задержка предъявлялась 12 раз, контрольные пробы предъявлялись в каждой серии также по 12 раз. Стимулы с разными задержками и контрольные пробы чередовались в псевдослучайном порядке.

*Анализ данных.* В контрольных пробах для каждого испытуемого было вычислено усредненное воспринимаемое положение изолированного сигнала и маскера. Для количественной оценки локализации сигнала в условиях маскировки была рассчитана “вероятность получения ответа на сигнал в присутствии маскера”, далее для краткости мы будем это называть вероятностью локализации. За “локализацию воспринимаемого положения сигнала” принимали пробы, в которых испытуемые показывали положение сигнала, не выходящее за пределы  $\pm 2^{\circ}$  СО, где СО – стандартное отклонение от усредненного значения локализации изолированного сигнала для каждого испытуемого отдельно. В дальнейшем этот диапазон будет называться областью восприятия изолированного сигнала. Было определено процентное количество проб, в которых испытуемые локализовали сигнал от всего количества предъявленных проб для данной задержки, и была рассчитана вероятность его локализации в зависимости от задержки для каждого испытуемого. Вероятность 100% соответствовала тому, что во всех пробах испытуемые показывали воспринимаемое положение сигнала в области восприятия изолированного сигнала; менее 100% – слушатели локализовали сигнал только в некоторой части проб; 0% – испытуемые совсем не локализовали сигнал в области восприятия изолированного сигнала. Аналогичным образом рассчитывалась вероятность локализации маскера. Среднее воспринимаемое положение сигнала и маскера вычислялось по тому количеству проб, которое было отнесено к соответствующему типу по итогам классификации, и это количество различалось в разных условиях. Далее воспринимаемое положение сигнала и воспринимаемое положение маскера анализировалось по отдельности.

Воспринимаемое положение сигнала и маскера варьировало у разных испытуемых даже при предъявлении их по отдельности в контрольных пробах, поэтому для количественного анализа пространственных эффектов взаимодействия сигнала и маскера и унификации размерности были рассчитаны относительные единицы воспринимаемого положения ЗО или сигнала в каждой пробе по формуле:

$$Y/M_{cp} = Y_o, \quad (1)$$

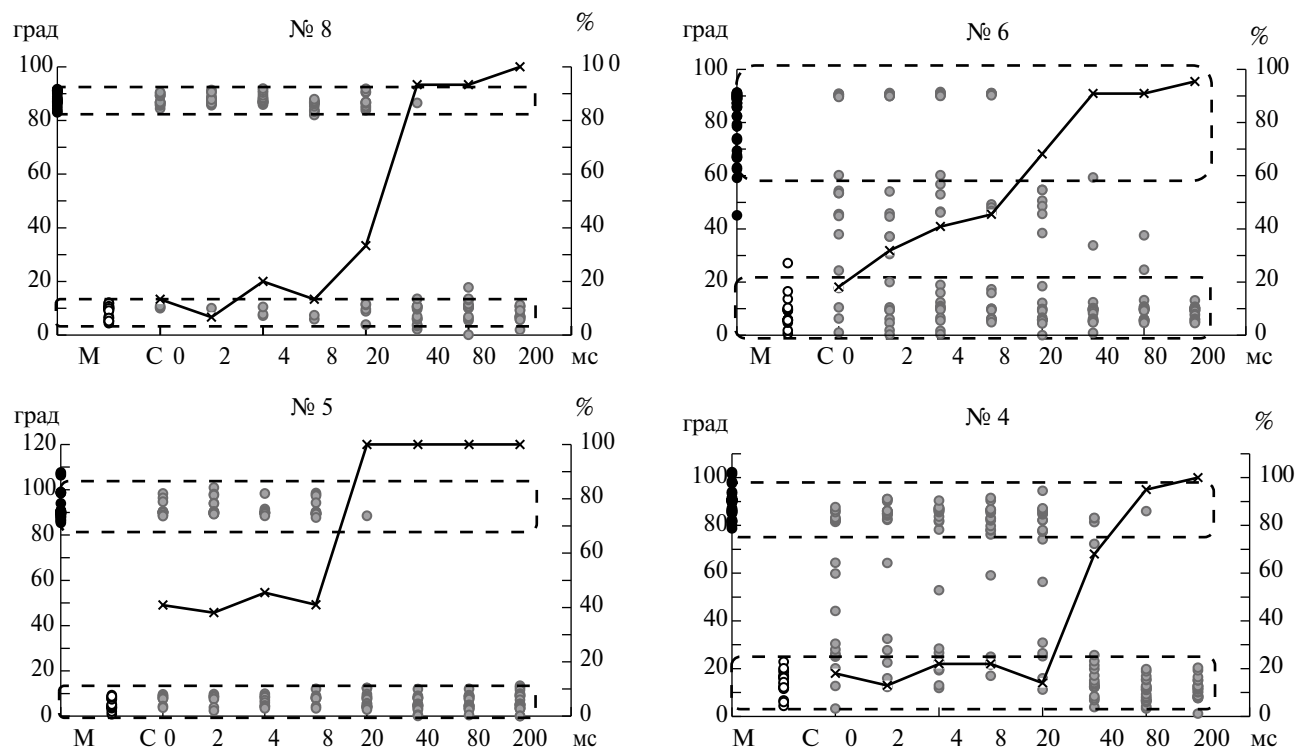
где  $Y$  воспринимаемое угловое положение ЗО или сигнала в градусах элевации,  $M_{cp}$  – усредненное воспринимаемое угловое положение маскера у данного испытуемого при его изолированном предъявлении в контрольных пробах, а  $Y_o$  – воспринимаемое положение ЗО или сигнала в относительных единицах.  $Y_o$  рассчитывалось

для ответов в каждой пробе, индивидуально для каждого испытуемого. После такого преобразования 0 соответствовал началу дуги напротив испытуемого, а 1 — воспринимаемому положению маскира вверх над головой испытуемого в контрольных пробах. Воспринимаемое положение ЗО или сигнала в относительных единицах варьировало в пределах от 0 до 1 либо могло быть незначительно больше 1, если испытуемый локализовал ЗО выше или позади относительно воспринимаемого положения маскира в контрольных пробах.

Статистическую оценку данных проводили посредством дисперсионного однофакторного анализа, сравнивали положение изолированного сигнала и сигнала в условиях маскировки [фактор **условие** (сигнал без маскира, маскир + сигнал с задержкой 0, 2, 4, 8, 20, 40, 80 и 200 мс)] с поправкой Шеффе ( $p < 0.05$ ), для ответов, сгруппированных в области воспринимаемого положения сигнала. Отдельно — для ответов, сгруппированных в области воспринимаемого положения маскира с фактором **условие** (маскир без сигнала, маскир + сигнал с задержкой 0, 2, 4, 8, 20, 40) с поправкой Шеффе ( $p < 0.05$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В условиях маскировки ответы у шести из восьми испытуемых группировались либо в области расположения изолированного маскира, либо в области расположения изолированного сигнала. На рис. 2 приводится пример подобного распределения ответов на примере двух испытуемых — № 8 и № 5. Нижний пунктирный прямоугольник показывает область восприятия изолированного сигнала, а верхний — область восприятия изолированного маскира. Воспринимаемое положение сигнала и маскира показано на левой оси ординат. На рисунке показана кривая вероятности локализации сигнала, ее значения указаны на правой оси ординат. Как видно из рис. 2, у испытуемого № 8 количество проб, в которых он показывал воспринимаемое положение сигнала в области изолированного сигнала, составляло от 7 до 20% для задержек от 0 до 8 мс. При дальнейшем увеличении задержки количество проб, в которых испытуемый показывал положение сигнала, увеличивалось. Таким образом, для задержек от 0 до 20 мс испытуемый показывал в основном положение ЗО



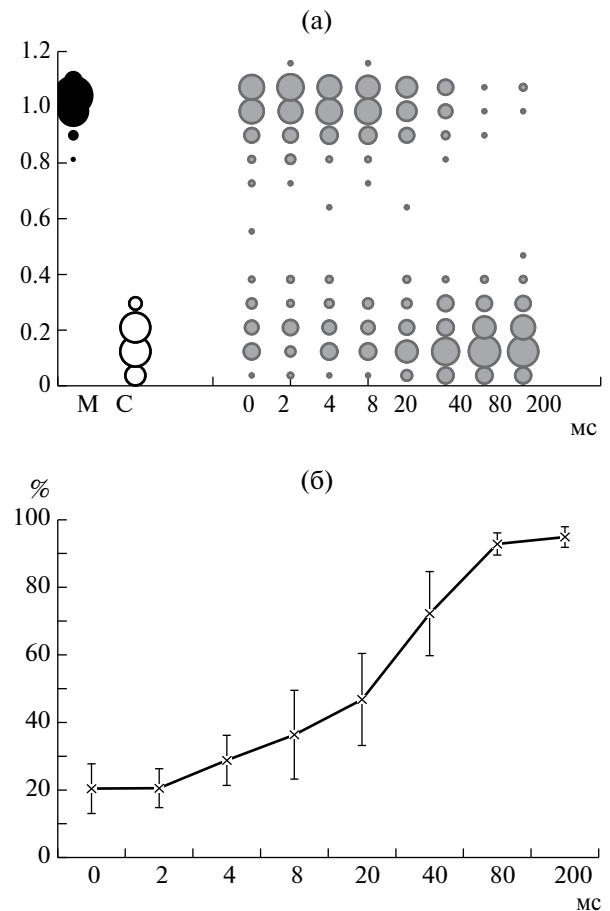
**Рис. 2.** Воспринимаемое положение звуковых стимулов в условиях маскировки и вероятность локализации сигнала для четырех испытуемых отдельно: по оси абсцисс — время задержки в мс; левая ось ординат — воспринимаемое положение звуковых стимулов в градусах; правая ось ординат — вероятность локализации сигнала, рассчитанная для каждой задержки; воспринимаемое положение одиночных стимулов, полученное в контрольных сериях, обозначено буквами С (положение сигнала) и М (положение маскира).

в области положения изолированного маскера, а при задержках от 40 мс и выше — воспринимаемое положение сигнала. Подобная картина наблюдалась у четырех слушателей из упомянутых выше шести испытуемых. У оставшихся двух из шести испытуемых ответы группировались в области изолированного сигнала в 40–54% проб для задержек от 0 до 4 мс, и 95–100% при задержке 20 мс. В качестве примера подобного распределения ответов на рис. 2 приведено распределение ответов у испытуемого № 5. Как видно из рисунка, ответы испытуемого также группировались либо в области расположения изолированного маскера, либо в области изолированного сигнала, как и у испытуемого № 8.

У оставшихся двух из восьми испытуемых наблюдались ответы в области, расположенной между положением изолированного сигнала и изолированного маскера. У одного испытуемого ответы группировались в большей степени в области расположения маскера, в меньшей — в области сигнала, а некоторая часть ответов была расположена между воспринимаемыми положениями изолированного сигнала и маскера (на рис. 2 — испытуемый № 4). У второго испытуемого (на рис. 2 — испытуемый № 6) ответы были диффузно распределены между воспринимаемыми положениями изолированного сигнала и маскера при задержках от 0 до 40 мс (на рис. 2 — испытуемый № 6). В анализе данных полученные значения испытуемого № 6, у которого наблюдалось диффузное распределение ответов, не учитывались. Таким образом, полученные данные отражают большие межиндивидуальные различия в локализации сигнала в условиях маскировки.

Для унификации размерности были рассчитаны относительные единицы. На рис. 3а показана диаграмма рассеяния ответов в относительных единицах по семи испытуемым. На рисунке область воспринимаемого положения изолированного маскера показана кружками серого цвета, а изолированного сигнала — кружками белого цвета. Как видно из рисунка, в условиях одновременной маскировки и при задержках начала звучания сигнала относительно начала маскера от 2 до 8 мс большая часть ответов группировалась в области расположения изолированного маскера, а меньшая — в области расположения изолированного сигнала. Начиная с задержки 20 мс, большая часть ответов группировалась в области расположения сигнала. Лишь незначительная часть ответов располагалась в промежуток между сигналом и маскером, выходя за пределы диапазона двух стандартных отклонений вокруг среднего значения изолированного сигнала или маскера. Такие ответы в дальнейшем

анализе не учитывались. Воспринимаемое положение 3О в области расположения маскера рассчитывалось для задержек до 40 мс включительно, для задержек от 80 мс и выше не вычислялось по причине недостаточного количества данных. На рис. 3б показана усредненная по семи испытуемым кривая вероятности локализации сигнала. Как видно из рисунка, на задержках более 80 с вероятность локализации сигнала достигает 92%-ного уровня.

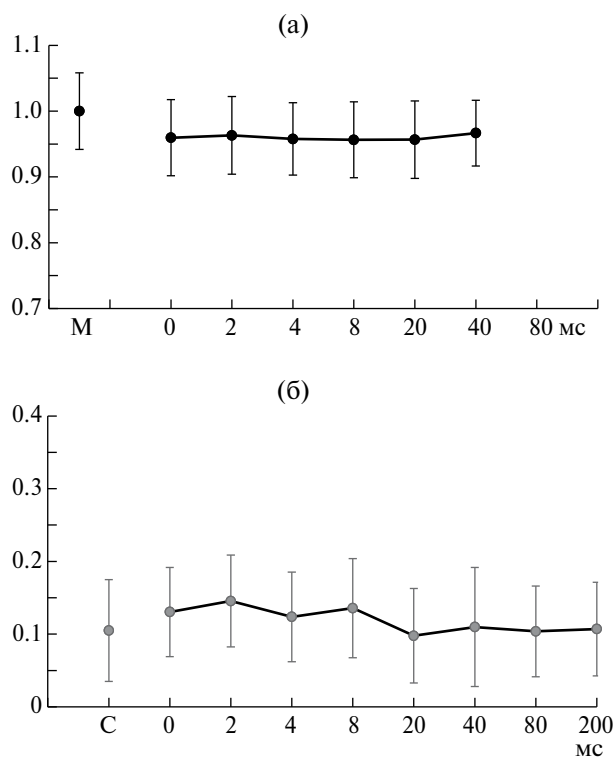


**Рис. 3.** Распределения ответов по всем испытуемым в зависимости от задержки: а — распределение ответов в относительных единицах в пузырьковой диаграмме; б — вероятность локализации сигнала; по оси абсцисс — время задержки в мс; по оси ординат — 3а воспринимаемое положение звуковых стимулов в град в относительных единицах; 3б — вероятность локализации сигнала, рассчитанная в процентах, относительно общего количества проб; условные обозначения — как на рис. 2; вертикальные линии — стандартная ошибка среднего.

На рис. 4а показано усредненное по семи испытуемым воспринимаемое положение 3О в области расположения маскера (в относительных единицах). Воспринимаемые положения 3О в условиях маскировки для задержек от 0 до 40 мс



лежат почти на одном уровне, незначительно ниже значений воспринимаемого положения изолированного маскера, что соответствует смещению воспринимаемого положения маскера в сторону сигнала. Сравнение воспринимаемых положений ЗО в области расположения маскера в условиях маскировки и изолированного маскера проводилось для задержек от 0 до 40 мс, так как при задержках от 80 мс и выше воспринимаемое ЗО в среднем по 7 испытуемым составляло меньше 7% от всех проб. Сравнение относительных значений при помощи однофакторного дисперсионного анализа показало зависимость воспринимаемого положения от условия стимуляции ( $F(6, 735) = 13.071$ ,  $p < 0,01$ ). Парные сравнения выявили достоверные различия ( $p < 0,05$ ) между величинами воспринимаемого положения изолированного маскера от воспринимаемых положений ЗО в условиях маскировки для всех использованных при сравнении задержек. Между величинами воспринимаемого положения ЗО в области расположения маскера при разных задержках различий не наблюдалось ( $p > 0,05$ ).



**Рис. 4.** Усредненное значение положения стимулов по 7 испытуемым: а – воспринимаемое положение ЗО в области расположения маскера; б – сигнала; по оси абсцисс – время задержки в мс; по оси ординат – воспринимаемое положение звуковых стимулов в относительных единицах; вертикальные линии – стандартное отклонение; условные обозначения – как на рис. 2.

На рис. 4б показано усредненное по всем испытуемым воспринимаемое положение сигнала в условиях маскировки для всех задержек от 0 до 200 мс (серые кружочки) и в условиях предъявления изолированного сигнала (отдельный кружок). Как видно из рисунка, при одновременной маскировке (задержка 0 мс) и при задержках от 2 до 8 мс воспринимаемое положение сигнала немного выше воспринимаемого положения изолированного сигнала, а при задержках от 20 мс и выше они почти не различаются. Согласно однофакторному статистическому анализу, воспринимаемое положение сигнала в условиях маскировки для всех задержек и воспринимаемое положение изолированного сигнала не показало достоверных различий ( $F(8, 741) = 1.85$ ,  $p = 0,064$ ). Парные сравнения также не показали значимых различий между воспринимаемым положением изолированного сигнала и сигнала в условиях маскировки, а также между воспринимаемыми положениями сигналов в зависимости от задержки сигнала относительно маскера. В отличие от воспринимаемого положения ЗО, воспринимаемое положение сигнала в условиях маскировки находилось в области изолированного сигнала в данных экспериментальных условиях.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Ухудшение локализации звуковых стимулов в условиях маскировки проявлялось в уменьшении вероятности получения ответа на сигнал в присутствии маскера. Наши результаты показывают, что при задержках до 40 мс задача разделить в пространстве сигнал и маскер, расположенные в сагиттальной плоскости, и локализовать сигнал вызывала затруднения у испытуемых. Начиная с задержки 40 мс и выше, процент проб, в которых испытуемые показывали сигнал в области локализации изолированного сигнала, увеличился от 72% и выше (см. рис. 3б). Это подтверждают данные исследования (Ege et al., 2018), где было показано, что для задержек до 40 мс сигнал и маскер одинаковой интенсивности сливались в один ЗО в вертикальной плоскости, который локализовался на основе средневзвешенного значения их угловых положений. Длительность маскера и сигнала была 100 мс. При увеличении задержки количество проб, в которых наблюдалась локализация, основанная на взвешенном усреднении, постепенно уменьшалась и полностью прекращалось при задержках больше 160 мс (Ege et al., 2018). В нашей работе при задержке 80 мс испытуемые могли пространственно разделить сигнал и маскер и локализовать сигнал с вероятностью 90% (см. рис. 3б). В нашей работе сигнал и маскер были некоррелированными

шумовыми посылками длительностью 1 с и по звучанию были похожи. Можно предположить, что некоррелируемые сигнал и маскер и большая длительность стимулов в нашем эксперименте облегчала задачу слуховой системы выделить сигнал из комплекса “сигнал + маскер”, т.е. решить, что приходит от одного источника, а что — от разных источников. Предположение о том, что сегрегация звукового потока может зависеть от продолжительности звука, высказывал Брегман (Bregman, 1990).

В отличие от вертикальной плоскости, в горизонтальной плоскости локализация сигнала при маскировании некоррелированным маскером при большом пространственном разнесении стимулов не вызывала затруднений у всех испытуемых, независимо от задержки (Агаева, Петропавловская, 2023). По-видимому, это обусловлено различными признаками локализации, осуществляемой в вертикальной плоскости за счет интерференции звуковых волн на ушных раковинах, а в горизонтальной — за счет бинауральных различий по времени или интенсивности (Yost, Dorman, 2020). Точная локализация в вертикальной сагиттальной плоскости требует нескольких десятков миллисекунд акустической стимуляции (Vliegen, Van Opstal, 2004; Dizon, Litovsky, 2004), в отличие от локализации в горизонтальной плоскости, где для локализации достаточна длительность стимула в 1 мс. Если предполагать, что для локализации одиночного источника в вертикальной плоскости требуется несколько десятков миллисекунд, то для локализации сигнала в условиях маскировки требуется как минимум столько же времени или больше.

Воспринимаемое положение ЗО, возникающее, когда маскер и сигнал перцептивно сливались, находилось немного ниже области воспринимаемого положения маскера, т.е. было смещено в сторону сигнала (рис. 4а). Нельзя исключать возможность того, что испытуемые могли показывать воспринимаемое положение сигнала рядом с положением маскера, а не воспринимаемое положение ЗО. Это могло повлиять на усредненный результат. Однако, при всех задержках от 0 до 40 мс положение ЗО статистически не различалось. Это косвенно свидетельствует о том, что испытуемые показывали в основном воспринимаемое положение ЗО. Поскольку с увеличением длительности задержки количество проб, в которых испытуемые показывали сигнал вблизи маскера, будет различным. Косвенным подтверждением того, что при задержках до 40 мс маскер и сигнал одинаковой интенсивности сливаются в один ЗО, являются данные, полученные в работе Иджа с коллегами (Ege et al., 2018), где слушатели показывали средневзвешенное

положение ЗО для задержек до 40 мс, а не маскер и не сигнал. Было выдвинуто предположение, что в вертикальной сагиттальной плоскости при действии стимула (“маскер + сигнал”) наблюдается действие обратной маскировки (Ege et al., 2018). Феномен обратной маскировки состоит в том, что при последовательном предъявлении двух сигналов с небольшим интервалом между ними второй сигнал маскирует первый. Можно предположить, что в нашем случае сигнал, поданный с небольшой задержкой относительно начала звучания маскера, влияет на его воспринимаемое положение.

Воспринимаемое положение сигнала в условиях маскировки достоверно не отличалось от положения изолированного сигнала (см. рис. 4б). Можно отметить небольшую тенденцию: при задержках от 0 до 8 мс воспринимаемое положение было немного выше изолированного сигнала, т.е. немного смещено в сторону маскера. При дальнейшем увеличении задержки воспринимаемое положение, усредненное по группе испытуемых, было либо немного ниже, либо равно усредненному по группе испытуемых значению изолированного сигнала (см. рис. 4б). Можно предположить, что сигнал, находящийся в области “наилучшей” локализации, имел больший вес, чем маскер, расположенный над головой.

Нами получены сильные межиндивидуальные различия (см. рис. 2). Большие индивидуальные различия были отмечены также и в других исследованиях (Ege et al., 2018; Bremen et al., 2010). В первом исследовании (Ege et al., 2018) отмечалось, что полученное воспринимаемое положение ЗО имело большую вариабельность: стандартное отклонение среднего положения ЗО было приблизительно в 3 раза больше, чем при локализации изолированного маскера. Во второй работе (Bremen et al., 2010) испытуемые разделились на две группы при одновременном предъявлении сигнала и маскера одинаковой интенсивности в вертикальной плоскости, разнесенных в пространстве больше чем на 45°. У одной группы испытуемых наблюдалось средневзвешенное воспринимаемое положение ЗО. В другой группе испытуемые локализовали либо сигнал, либо маскер (Bremen et al., 2010). Можно предположить, что за счет интерференции сигнала и маскера на ушных раковинах воспринимаемое положение становилось более “размытым” в пространстве, или что за счет интерференции возникал новый сигнал с новым спектром (Bremen et al., 2010). Вероятно, слуховая система сравнивает полученный спектр с имеющейся копией на основе взаимной корреляции (Hofman, Van Opstal, 1998; Bremen et al., 2010; Zonooz et al., 2019), или сравнивает только определенные спектральные

производные для конкретных частот (Zonoos et al., 2019; Baumgartner et al., 2014). Предполагается, что определение спектра сигнала происходит уже на уровне дорсального кохлеарного ядра, а стадия вычисления взаимной корреляции полученного спектра с имеющимся копиями на уровне среднего мозга (Zonoos et al., 2019). Возможно, из-за неопределенности, возникающей вследствие интерференции, слуховая система при сравнении шаблона и полученного нового спектра подбирает наиболее вероятное воспринимаемое положение, которое может меняться от одной пробы к другой. Например, как полученное нами распределение ответов у испытуемых № 6 и № 4 (см. рис. 2). Однако все полученные результаты нельзя объяснить только интерференцией звуковых волн на ушных раковинах. Можно предположить, что нейронные взаимодействия внутри тонотопически организованных слуховых путей также влияют на локализацию сигнала в условиях маскировки (Best et al., 2005; Lee et al., 2009). Результатом этого взаимодействия является “притягивание ЗО” к сигналу.

### ВЫВОДЫ

При расположении не коррелируемых стимулов длительностью 1с в сагиттальной плоскости (сигнала и маскира — 7,5 и 90 град по элевации относительно межшумной линии, соответственно) наблюдалось подавление пространственных признаков сигнала маскером, которое проявлялось в уменьшении вероятности получения ответа на сигнал в присутствии маскира. Вероятность получения ответа (локализации сигнала в области его расположения) для задержек от 0 до 40 мс составляла не больше 8%. При задержках больше 80 вероятность локализации сигнала была от 90% и выше.

Воспринимаемое положение ЗО в который маскер и сигнал перцептивно сливались в условиях маскировки не зависело от величины задержки (от 0 до 40 мс) и было расположено немного ниже положения изолированного маскира. Положение ЗО достоверно отличалось от воспринимаемого положения изолированного маскира. Воспринимаемое положение сигнала в условиях маскировки в отличие от маскира не зависело от величины задержки (от 0 до 200 мс).

### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана средствами федерального бюджета в рамках государственного задания ФГБУН Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН (№ 1021062411653—4—3.1.8).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агаева М. Ю., Альтман Я. А. Пороги обнаружения эха для серии шумовых посылок в вертикальной сагиттальной плоскости. *Сенсорные системы*. 2009. Т. 23. № 3 С. 181—185.
- Агаева М. Ю., Петропавловская Е. А. Локализация в горизонтальной плоскости коррелированных и некоррелированных звуковых сигналов в условиях маскировки. *Физиология человека*. 2023. Т. 49. № 1. С 52—63. DOI: 10.31857/S0131164622700138
- Baumgartner R., Majdak P. Laback B. Modeling sound-source localization in sagittal planes for human listeners. *J Acoust Soc Am*. 2014. V. 136. P. 791—802. DOI 10.1121/1.4887447.
- Van Bentum G. C., Van Opstal A. J., Van Aartrijk C. M. M., Van Wanrooij M. M. Level-weighted averaging in elevation to synchronous amplitude-modulated sounds. *J Acoust Soc Am*. 2017. V.142. P. 3094—3103. DOI: 10.1121/1.5011182
- Best V., van Schaik A., Carlile S. Separation of concurrent broadband sound sources by human listeners. *J Acoust Soc Am*. 2004. V. 115. P. 324—336. DOI: 10.1121/1.1632484
- Blauert J. *Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization*. Harvard, MA: MIT Press, 1997 504 p.
- Bregman A. S. *Auditory Scene Analysis: The Perceptual Organization of Sound*. Cambridge, MA: MIT Press, 1990. 792 p.
- Bremen P., Van Wanrooij M. M., Van Opstal A. J. Pinna cues determine orienting response modes to synchronous sounds in elevation. *J. Neurosci*. 2010. V. 30. P. 194—204. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2982—09.2010
- Brown A. D., Stecker G. C., Tollin D. J. The precedence effect in sound localisation. *J Assoc Res Otolaryngol*. 2015. V. 16. P. 1—28. DOI: 10.1007/s10162—014—0496—2
- Dizon R. M., Litovsky R. Y. Localisation dominance in the median-sagittal plane: effect of stimulus duration. *J. Acoust. Soc. Am*. 2004. V. 115. P. 3142—3155. DOI: 10.1121/1.1738687
- Ege R., van Opstal A. J., Bremen P., van Wanrooij M. M. Testing the Precedence Effect in the Median Plane Reveals Backward Spatial Masking of Sound. *Sci Rep*. 2018. V. 8:8670. P. 1—10. DOI:10.1038/s41598—018—26834—2
- Johnson O. S., O'Connor K.N., Sutter M. Segregating two simultaneous sounds in elevation using temporal envelope: Human psychophysics and a physiological model. *J. Acoust. Soc. Am*. 2015. V. 138. № 1. P 33—43. DOI: 10.1121/1.4922224
- Lee A. K., Deane-Pratt A., Shinn-Cunningham B. G. Localization interference between components in an auditory



- scene. *J. Acoust. Soc. Am.* 2009. V. 126. P. 2543–2555. DOI: 10.1121/1.3238240
- Litovsky R. Y., Colburn H. S., Yost W. A., Guzman S. J. The precedence effect. *J. Acoust. Soc. Am.* 1999. V. 106. P. 1633–1654. DOI: 10.1121/1.427914
- Van Opstal A. J., Vliegen J., Van Esch T. Reconstructing spectral cues for sound localisation from responses to rippled noise stimuli. *Plos One*. 2017. V. 12. № 3. P. e0174185. DOI: 10.1371/journal.pone.0174185
- Vliegen J., Van Opstal A. J. The influence of duration and level on human sound localisation. *J. Acoust. Soc. Am.* 2004. V. 115. P. 1705–1713. DOI: 10.1121/1.1687423
- Yao D., Li J., Xia R., Yan Y. The role of spectral cues in vertical plane elevation perception. *Acoust. Sci. & Tech.* 2020. V. 41. № 1. P. 435–438. DOI: 10.1250/ast.41.435
- Yost W. A., Pastore M. T., Dorman M. F. Sound source localization is a multisystem process. *Acoust Sci Technol*. 2020. V. 41. P. 113. DOI: 10.1250/ast.41.113

## LOCALIZATION OF A SOUND SIGNAL IN THE VERTICAL PLANE UNDER MASKING CONDITIONS

**M. Yu. Agaeva**

*I.P. Pavlov Institute of Physiology RAS199034, St. Petersburg, Makarova emb., 6*

*E-mail: agamu\_1@mail.ru*

The effect of masker on the localization of a sound source in vertical sagittal plane was investigated in simultaneous masking conditions and in the precedence effect paradigm. In the first case, the stationary signal and the masker were presented simultaneously while in the second case the signal onset was delayed relative to the masker onset. The delay was 2, 4, 8, 20, 40, 80 and 200 ms. The signal and the masker were created from two different uncorrelated noise bursts with a bandwidth of 5 to 18 kHz. Duration of noise bursts were 1 s. The masker was placed above the listeners head at an angle of 90 deg and the signal was placed in front of the listener at an angle of 7.5 deg. Perceived positions of signals under masking conditions were compared with those single of the signal or masker presented separately. It is shown that under the masking conditions the probability of detecting a signal decreased. Listeners could localize the signal at the delay of 80 ms and higher. The probability of detecting the signal at 80 ms delay was 92%. The perceived position of signal in masking condition did not significantly differ from the perceived position of single signal. At delays ranging from 0 to 40 ms, listeners mainly showed a perceived masker position that was shifted toward the signal. The shifted position was significantly different from the perceived position of a single masker.

**Keywords:** vertical plane, sound signal localization, masking

### REFERENCES

- Agaeva M. Ju., Al'tman Ja. A. Porogi obnaruzheniya jeha dlja serii shumovyh posylok v vertikal'noj sagittal'noj ploskosti [Echo Threshold Value for Series of Noise Bursts in Vertical Plane]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2009. V. 23(3). P. 181–185. (in Russian).
- Agaeva M. Yu., Petropavlovskaja E. A. Localization of Correlated and Uncorrelated Audio Signals in the Horizontal Plane under Masking Conditions. *Human Physiology*. 2023. V. 49. № 1. P. 44–54. DOI: 10.1134/S0362119722100012
- Baumgartner R., Majdak P., Laback B. Modeling sound-source localization in sagittal planes for human listeners. *J Acoust Soc Am*. 2014. V. 136. P. 791–802. DOI: 10.1121/1.4887447.
- Van Bentum G. C., Van Opstal A. J., Van Aartrijk C. M. M., Van Wanrooij M. M. Level-weighted averaging in elevation to synchronous amplitude-modulated sounds. *J Acoust Soc Am*. 2017. V. 142. P. 3094–3103. DOI: 10.1121/1.5011182
- Best V., van Schaik A., Carlile S. Separation of concurrent broadband sound sources by human listeners. *J Acoust Soc Am*. 2004. V. 115. P. 324–336. DOI: 10.1121/1.1632484
- Blauert J. *Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization*. Harvard, MA: MIT Press., 1997. 504 p.
- Bregman A. S. *Auditory Scene Analysis: The Perceptual Organization of Sound*. Cambridge, MA: MIT Press.; 1990. 792 p.
- Bremen P., Van Wanrooij M. M., Van Opstal A. J. Pinna cues determine orienting response modes to synchronous sounds in elevation. *J. Neurosci*. 2010. V. 30. P. 194–204. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2982–09.2010
- Brown A. D., Stecker G. C., Tollin D. J. The precedence effect in sound localisation. *J Assoc Res Otolaryngol*. 2015. V. 16. P. 1–28. DOI: 10.1007/s10162–014–0496–2
- Dizon R. M., Litovsky R. Y. Localisation dominance in the median-sagittal plane: effect of stimulus duration. *J. Acoust. Soc. Am.* 2004. V. 115. P. 3142–3155. DOI: 10.1121/1.1738687
- Ege R., van Opstal A. J., Bremen P., van Wanrooij M. M. Testing the Precedence Effect in the Median Plane Reveals

- Backward Spatial Masking of Sound. *Sci Rep.* 2018. V. 8:8670. P. 1–10. DOI:10.1038/s41598-018-26834-2
- Johnson O. S., O'Connor K.N., Sutter M. Segregating two simultaneous sounds in elevation using temporal envelope: Human psychophysics and a physiological model. *J. Acoust. Soc. Am.* 2015. V. 138. № 1. P. 33–43. DOI: 10.1121/1.4922224
- Lee A. K., Deane-Pratt A., Shinn-Cunningham B. G. Localization interference between components in an auditory scene. *J. Acoust. Soc. Am.* 2009. V. 126. P. 2543–2555. DOI: 10.1121/1.3238240
- Litovsky R. Y., Colburn H. S., Yost W. A., Guzman S. J. The precedence effect. *J. Acoust. Soc. Am.* 1999. V. 106. P. 1633–1654. DOI: 10.1121/1.427914
- Van Opstal A. J., Vliegen J., Van Esch T. Reconstructing spectral cues for sound localisation from responses to rippled noise stimuli. *Plos One.* 2017. V. 12. № 3. P. e0174185. DOI: 10.1371/journal.pone.0174185
- Vliegen J., Van Opstal A. J. The influence of duration and level on human sound localisation. *J. Acoust. Soc. Am.* 2004. V. 115. P. 1705–1713. DOI: 10.1121/1.1687423
- Yao D., Li J.; Xia R., Yan Y. The role of spectral cues in vertical plane elevation perception. *Acoust. Sci. & Tech.* 2020. V. 41. № 1. P. 435–438. DOI: 10.1250/ast.41.435
- Yost W. A., Pastore M. T., Dorman M. F. Sound source localization is a multisystem process. *Acoust Sci Technol.* 2020. V. 41. P. 113. DOI: 10.1250/ast.41.113

УДК 612.858.4+612.858.7

## СОСТОЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СЛУХА ПРИ СИММЕТРИЧНОЙ СЕНСОНЕВРАЛЬНОЙ ТУГОУХОСТИ 1-Й И 2-Й СТЕПЕНИ ПО ДАННЫМ ОПРОСНИКА SHQ

© 2024 Е. А. Клишова, Л. Е. Голованова, И. Г. Андреева

Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН, 194223, Санкт-Петербург, пр. Тореза, д. 44

E-mail: ig-andreeva@mail.ru

Поступила в редакцию 25.06.2024

После доработки 31.07.2024

Принята к публикации 08.08.2024

Исследовано состояние пространственного слуха у пациентов с симметричной хронической сенсоневральной тугоухостью (СНТ) 1-й и 2-й степени с применением русскоязычной версии опросника пространственного слуха. Обследован 141 пациент в возрасте от 47 до 82 лет. Сравнительный анализ выполняли в группах возрастной нормы слуха, СНТ 1-й и 2-й степени. Показано достоверное ухудшение пространственного восприятия, выявленное по результатам опроса в обеих группах с СНТ, причем по ряду показателей группы 1-й и 2-й степени достоверно различались. Ухудшение пространственного восприятия, выявленное при анализе подшкал опросника, и количественные оценки пространственного и временного разрешения, полученные ранее при СНТ 1-й и 2-й степени, находились в хорошем соответствии. При СНТ 2-й степени достоверно были снижены оценки всех четырех подшкал опросника. В клинической практике этот опросник можно применять в качестве скринингового метода оценки пространственного слуха у пациентов с СНТ.

**Ключевые слова:** слуховое восприятие, пространственный слух, высокочастотный бинауральный механизм, опросник SHQ, сенсоневральная тугоухость

**DOI:** 10.31857/S0235009224040059 **EDN:** ADBTWO

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее распространенных форм патологии слуха является сенсоневральная тугоухость (СНТ). Она проявляется в снижении слуха вплоть до полной утраты, при котором поражаются различные участки звуковоспринимающей системы слухового анализатора, начиная от рецепторного аппарата улитки (Альтман, Таварткиладзе, 2003; Moore, 2007). Снижение слуха при СНТ может затрагивать весь диапазон частот или преимущественно высокочастотную область слышимости – нисходящая аудиограмма (Бабияк, Накатис, 2005; Королева, 2012). Последний тип нарушения, наряду с феноменом усиленного нарастания громкости, характерен для возрастной тугоухости (пресбиакузиса).

При нисходящем типе аудиограммы высокочастотный механизм бинаурального слуха работает существенно хуже. Наряду с этим дирекциональный слух, который может до известной степени компенсировать недостаток бинаурального слуха, также неэффективен, поскольку дирекциональный слух задействует преимущественно

высокочастотную область. При существенном снижении доли высоких частот в слышимом диапазоне можно ожидать снижение разрешающей способности по азимуту, так как оба механизма будут неэффективны.

Помимо повышения порогов слуха, существенным фактором изменения восприятия при СНТ может выступать нарушение кодирования надпороговых сигналов (Moore, King, 1999; Tyler et al., 2014) или феномен усиленного нарастания громкости (ФУНГ, рекруитмент), который приводит к сжатию шкалы громкости, что не только ухудшает разборчивость речи, но и затрудняет оценку удаленности источника звука и его радиального движения. Таким образом, как бинауральные, так и монауральные механизмы, используемые слуховой системой для оценки расстояния от слушателя до источника звука, при сенсоневральной тугоухости могут функционировать иначе, чем при нормальном слухе (Akeroyd, 2014; Kolarik et al., 2016; Zheng et al., 2022).

Согласно данным мировой литературы, степень утраты пространственного слуха может быть различной у пациентов с одинаковыми

диагнозами и сходными результатами обследования с применением стандартных аудиологических методов (Middlebrooks, 2015; Coudert et al., 2021). Вместе с тем, ухудшение пространственного восприятия может вызывать серьезный психологический дискомфорт и снижение ощущения безопасности, которые связаны с изменением условий сенсорного мониторинга заднего полупространства человека, осуществляемого преимущественно слуховой системой (Spence et al. 2020; Aggius-Vella et al., 2022).

Количественная оценка показателей пространственного слуха на сегодня выполняется исключительно в научных целях (Ogorodnikova et al., 2024), тогда как в клинике применяют опросники пространственного слуха (Jung et al., 2023; Sepehrnejad et al., 2022). Такие опросники позволяют получить представление о функциональных возможностях пациента в различных бытовых ситуациях, когда необходимо использовать пространственный слух. В результате их применения, преимущественно после кохлеарной имплантации, можно выявить эффективность слуховой коррекции техническими средствами и оценить течение реабилитации. Опыт применения опросников в различных странах показал их эффективность (Ou et al., 2016; Potvin et al., 2011; Çildir et al., 2021), но широкого применения они пока не получили. Использование опросников при снижении слуха показало их эффективность и в этом случае. Были выявлены различия в состоянии пространственного слуха в группах нормы и при снижении слуха уни- или билатерально (версия SSQ5 на португальском, Assef et al., 2022). Применение турецкой версии опросника SHQ выявило различие в состоянии пространственного слуха у молодых испытуемых с нормальным слухом и при снижении слуха в группе пациентов с СНТ пожилого возраста (Çildir et al., 2021). С использованием русифицированной версии показаны достоверные различия в группе пациентов СНТ 1–4-й степени по сравнению с группой нормы слуха (Владимирова и др., 2023).

Целью настоящего исследования было выяснить, какие перцептивные задачи с использованием пространственного слуха вызывают затруднения при СНТ 1-й и 2-й степени, и проанализировать результаты, сравнив их с данными временного и пространственного разрешения по слуху. С этой целью применяли опросник SHQ (Tyler et al., 2009).

#### МЕТОДИКА

С применением опросника SHQ был обследован 141 пациент в возрасте от 47 до 82 лет (средний возраст  $63 \pm 6.0$  лет), из них 88 женщин и 53

мужчины. Все пациенты были осмотрены врачом сурдологом-оториноларингологом: собраны жалобы, анамнез, осмотрены ЛОР-органы, проведена тональная пороговая аудиометрия и импедансометрия. По результатам осмотра для исключения центральных слуховых расстройств 22 пациентам были проведены речевые тесты на разборчивость односложных и разнотональных слов в тишине и в речевом шуме. Никто из пациентов на момент обследования не был слухопротезирован.

По аудиометрическим данным пациенты были разделены на три группы. Первая группа включала в себя 39 пациентов со слухом в пределах возрастной нормы (рис. 1а). Средние акустические пороги слуха на основных речевых частотах – 500, 1000, 2000, 4000 Гц – были менее 25 дБ. Во вторую группу вошли пациенты с симметричной двусторонней хронической сенсоневральной тугоухостью 1-й степени. Средние акустические пороги слуха на основных речевых частотах были в пределах от 25 до 40 дБ (рис. 1б). Эта группа включала 55 человек. Третья группа состояла из 47 лиц с симметричной хронической СНТ 2-й степени. Средние акустические пороги слуха на основных речевых частотах находились в пределах от 41 до 55 дБ. Во всех трех группах разница средних порогов на основных речевых частотах между лучше слышащим и хуже слышащим ухом не превышала 8.75 дБ.

В группы обследуемых не вошли следующие лица:

- имеющие кондуктивный компонент тугоухости любой этиологии;
- с заведомо известными нарушениями слуха центрального генеза, т.е. с патологическими состояниями в анамнезе – острое нарушение мозгового кровообращения, острый инфаркт миокарда, черепно-мозговые травмы средней и тяжелой степени тяжести.

Все обследованные пациенты подтвердили свое согласие на участие в этом эксперименте путем подписания информированного согласия. Все выполненные нами исследования соответствовали требованиям этического комитета Института эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова Российской академии наук (протокол № 02–02 от 01.02.2024), этического комитета Санкт-Петербургского государственного бюджетного учреждения здравоохранения “Городской гериатрический медико-социальный центр” (протокол № 2 от 29.02.2024) и Хельсинкской декларации 1964 г. с ее последующими изменениями.

Состояние пространственного слуха определяли с применением оригинального опросника Spatial Hearing Questionnaire (SHQ) (Tyler et al., 2009), который был переведен, валидирован

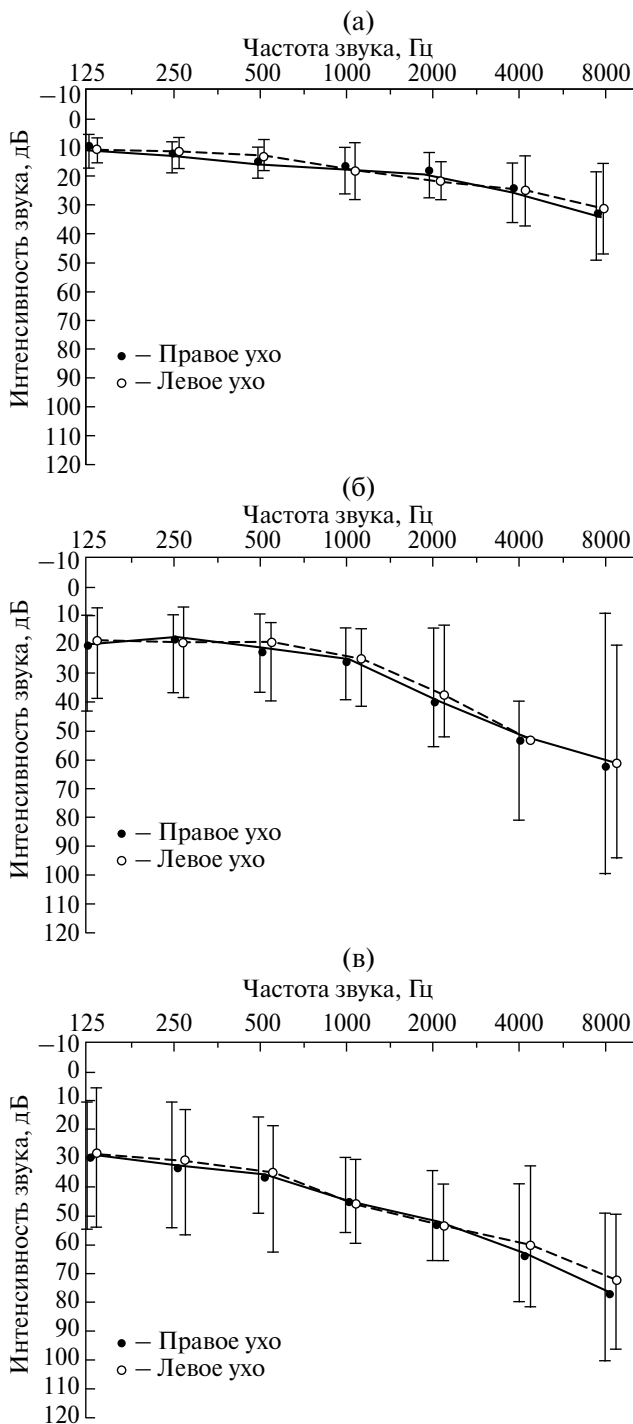
и верифицирован Владимировой и др. (Владимирова и др., 2023). Этот опросник состоит из 24 вопросов с инструкцией по заполнению. Каждый вопрос оценивается от очень сложного (0) до очень простого (100). Чем выше балл, тем лучше пространственный слух. Опросник позволяет оценить общее функциональное состояние бинаурального слуха и отдельные его характеристики: понимание речи для мужского, женского и детского голосов; локализация их источников; локализация источников музыки и технических устройств (транспортных средств); понимание речи в тишине.

Для проверки статистической значимости групповых различий использовали *t*-критерий для независимых выборок и U-критерий Манна–Уитни. Для оценки взаимосвязей количественных признаков применяли корреляционный анализ Пирсона. Критерии Кайзера–Майера–Олкина и Бартлетта позволили оценить возможность применения факторного анализа, после чего выявили факторы методом выделения главных компонент и осуществили вращение факторов методом варимакс с нормализацией Кайзера. С помощью коэффициента  $\alpha$ -Кронбаха провели анализ надежности опросника и выделенных в нем факторов. Расчеты статистических критериев проводили с применением программы IBM SPSS Statistics 22.0.0.0.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Воспроизводимость опросника SHQ оценивалась путем вычисления коэффициентов  $\alpha$ -Кронбаха и общих коэффициентов корреляции в группах с возрастной нормой слуха и при СНТ 1-й и 2-й степени (табл. 1). Коэффициент  $\alpha$ -Кронбаха во всех трех группах составил более 0.9, что свидетельствовало о внутренней согласованности результатов применения опросника SHQ. Коэффициенты корреляции Пирсона находились в диапазоне 0.33–0.87, показывая хорошую корреляцию для балльных оценок каждого из 24 вопросов со средними значениями, полученными для всего опросника SHQ. Итак, полученные значения обоих критериев для всех групп свидетельствовали о надежности и валидности данных, полученных в результате выполненного в группах пациентов опроса.

Критерий адекватности выборки Кайзера–Майера–Олкина определяет возможность применения факторного анализа для интерпретации данных опросника. Факторный анализ применим к данным, если этот критерий близок к 1. Полученные значения КМО оказались выше 0.6 (табл. 1), что позволило провести факторный анализ для всех групп. Другой критерий, указанный



**Рис. 1.** Средние значения порогов стандартной тональной воздушной аудиограммы в группах испытуемых: а – возрастная норма слуха (N = 39), б – СНТ 1-я степени (N = 55), в – СНТ 2-й степени (N = 47). Вертикальными линиями показаны стандартные отклонения.

**Таблица 1.** Статистические критерии надежности и валидности данных опросника SHQ, полученные для трех групп пациентов

Статистический критерий выборки	Начальная степень СНТ (возрастная норма слуха), N = 39	1-я степень СНТ, (N = 55)	2-я степень СНТ, (N = 47)
КМО <sup>1</sup>	0.64	0.80	0.76
Критерий Бартлетта	1329**	2146**	1957**
α-Кронбаха	0.93	0.96	0.96
Коэффициенты корреляции Пирсона	0.33–0.87*	0.57–0.86**	0.52–0.85**

Примечание. <sup>1</sup>мера адекватности выборки Кайзера–Майера–Олкина (КМО). \* $p < 0.05$ ; \*\* $p < 0.01$

в таблице 1 (критерий сферичности Бартлетта), проверяет гипотезу о том, что наблюдаемая корреляционная матрица является единичной матрицей. Его значимость для обследованных групп составила  $p < 0.01$ . Таким образом, оба критерия подтвердили возможность использования факторного анализа.

Применение метода выделения главных компонент показало пять собственных значений, величина которых была выше 1.0 для группы с нормальным слухом и четыре – для групп с СНТ. При сопоставлении данных групп пациентов мы ограничились четырьмя факторами, т.е. сгруппированными результатами балльных ответов на вопросы (табл. 2). Эти четыре фактора позволяют объяснить более 75% дисперсии в каждой из них, причем первый фактор имеет вклад в дисперсию при норме слуха 40%, а при СНТ – более 50%. Вклад трех других факторов оказался совокупно меньше, чем первого.

По результатам факторного анализа, выполненного в каждой из трех опрошенных групп,

было осуществлено вращение факторов методом варимакс с нормализацией Кайзера. Сопоставление матриц вращения позволило выявить структуру факторов. Фактор 1, который вносил наибольший вклад в дисперсию данных, определялся вопросами о локализации источника звука речевого диапазона (вопросы № 13–20). Следующий по значимости фактор 2 включал вопросы с №№ 5 по 12, которые характеризовали речь в шуме. Фактор 3 состоял из вопросов о речи в условиях тишины (№ 1–4), а последний фактор 4 включал вопросы о локализации источников шума с ритмической структурой (№ 20–24).

Сопоставление результатов балльной оценки по четырем выделенным подшкалам в группе с возрастной нормой слуха и групп с СНТ 1-й и 2-й степени показало, что при СНТ 1-й степени по двум подшкалам – речь в тишине и локализация звука речевого диапазона – достоверно снижена балльная оценка, как и для общего результата опросника (таблица 3). При СНТ 2-й степени выявлены достоверные различия по всем подшкалам и по общему результату. Таким

**Таблица 2.** Результаты факторного анализа для трех групп пациентов: собственные значения матрицы и суммарный процент дисперсии, представленные для четырех факторов.

Фактор	Начальная степень СНТ (возрастная норма слуха) (N = 39)		1-я степень СНТ (N = 55)		2-я степень СНТ (N = 47)	
	НСЗ	С%	НСЗ	С%	НСЗ	С%
1	9.65	40	13.23	55	12.49	52
2	3.67	55	3.09	68	3.54	67
3	3.08	68	1.70	75	2.68	78
4	1.83	76	0.99	79	1.03	82

НСЗ – начальное собственное значение  
С% – суммарный процент дисперсии

**Таблица 3.** Средние результаты подшкал опросника SHQ для трех групп пациентов

Подшкалы	Начальная степень СНТ (возрастная норма слуха)	1-я степень СНТ	2-я степень СНТ
Речь в тишине (1–4)	95.7 (5.9; 1.0)	88.6 (12.8; 1.7)**	77.3 (15.3; 2.2)**
Речь в шуме (5–12)	68.1 (14.8; 2.4)	68.5 (16.3; 2.2)	56.1 (21.4; 3.1)**
Локализация источника звука речевого диапазона (13–20)	76.4 (14.5; 2.4)	64.6 (16.1; 2.2)**	56.3 (15.4; 2.2)**
Локализация источника шума с ритмической структурой (21–24)	78.4 (10.2; 1.7)	74.7 (17.3; 2.3)	61.3 (19.3; 2.8)**
Общий результат (1–24)	78.9 (9.0; 1.5)	72.6 (13.4; 1.8)*	61.4 (14.7; 2.1)**

Примечание. Указаны среднее значение (стандартное отклонение; ошибка среднего). Достоверные различия в балльных оценках при сравнении с группой возрастной нормы слуха показаны \* $p < 0.05$ ; \*\* $p < 0.001$  (U-критерий Манна–Уитни).

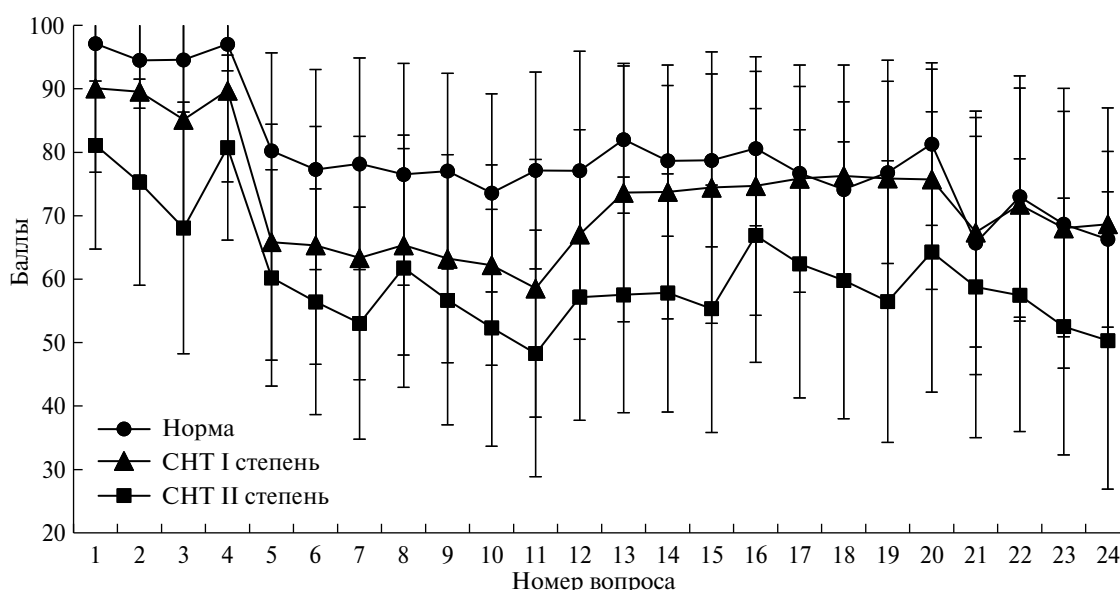
образом, применение опросника к этим категориям пациентов показало его информативность.

Сравнивая балльные оценки при ответах на отдельные вопросы в контрольной группе и группе с СНТ 1-й степени, получили достоверные различия для 1–13-го вопросов ( $p < 0.01$  для всех, кроме 2-го и 13-го вопросов, для них  $p < 0.05$ ). Что свидетельствовало о трудности в восприятии сигналов речевого диапазона для таких пациентов.

При сопоставлении ответов контрольной группы и пациентов с СНТ 2-й степени различия по балльным оценкам выявили для всех вопросов,

кроме вопроса № 21 (о местонахождении летящего самолета). Эта группа пациентов испытывала трудности со всеми категориями вопросов, наиболее низкие оценки (трудные ситуации) касались локализации источника звука речевого диапазона и восприятия речи в шуме, что указывает на очевидные проблемы с коммуникацией.

Сравнение балльных оценок пациентов с СНТ 1-й и 2-й групп показало достоверные различия в ответах на вопросы № 1–4, 6–7, 10–15, 17–20, 22–24 ( $p < 0.05$ ). Это означало, что при СНТ 2-й степени дополнительные сложности возникают



**Рис. 2.** Средние для контрольной группы и групп с СНТ 1-й и 2-й степени балльные оценки ответов на каждый из вопросов опросника SHQ. Вертикальными линиями показаны стандартные отклонения.

у пациентов при восприятии речи в тишине, при локализации источников речевого сигнала в шуме и при локализации источников шума ритмической структуры.

Таким образом, все вопросы, кроме № 21, оказались информативными для оценки пространственного слуха при СНТ 1-й и 2-й степени.

Зависимость общего (среднего) балла опросника от возраста не была выявлена ( $R^2$  для групп нормы, СНТ 1-й и 2-й степеней был менее 0.01, 0.01 и 0.14 соответственно).

## ОБСУЖДЕНИЕ

В работе впервые применили русскоязычную версию опросника SHQ для сравнительного анализа состояния пространственного слуха в группах пациентов с СНТ 1-й и 2-й степени. На больших объемах выборок была подтверждена надежность и валидность полученных данных. Опросник был разработан для оценки пространственного слуха пациентов с кохлеарными имплантами (Tyler et al., 2009), что подразумевало более грубые нарушения пространственного слуха. Последующее использование опросника SHQ в группах с частичной потерей слуха не подразумевало оценку градаций в степени потери слуха, за исключением работы (Delphi et al., 2015), в которой группы были небольшими и авторы указывали на пилотный характер исследования. В ней были даны только различия в общем балле, по которому группы с СНТ 1-й и 2-й степени не различались, тогда как при сравнении всех других степеней СНТ получили достоверные различия.

СНТ с аудиограммой нисходящего типа, как правило, развивается с возрастом, начиная с 45–50 лет. Поэтому в контрольную группу в нашем исследовании вошли испытуемые той же возрастной категории. Средние по четырем частотам пороги группы нормы и группы с СНТ 1-й степени различались на 14.5 дБ (18.9 и 33.5 дБ соответственно). Заметим, что возрастная норма слуха по средним данным соответствовала начальным явлениям СНТ (Gordon-Salant, 2005; Divenyi et al., 2005). Возрастная норма слуха у контрольной группы привела к снижению нормативных данных по сравнению с результатами (Perrau et al., 2014), которые получили нормативные данные на группе со средним возрастом 34 года и порогами слуха не хуже 20 дБ на всех аудиометрических частотах. Средняя балльная оценка в нашей работе составила 78.9 по сравнению с 86.6 в цитируемой работе. Применение группы с возрастной нормой слуха было более корректным потому, что исследование слуха при пресбиакузисе предполагает его дифференцировку как заболевания от

естественных изменений слуха в пределах нормы. Исследования возрастных изменений пространственной разрешающей способности у испытуемых с возрастной нормой слуха, выполненные в последние годы, демонстрируют ее снижение в старших группах (Dobрева et al., 2011; Freigang et al., 2014; Xiong et al., 2022). Выраженные возрастные изменения при выполнении задач латерализации, локализации, обнаружения сигналов в шуме были показаны в поведенческих и в электрофизиологических измерениях (обзор Eddins et al., 2018). Эти изменения объясняют снижением нейронной синхронности и уменьшением центрального торможения с возрастом.

В группы с СНТ нами были подобраны пациенты с симметричным слухом, без слухопротезирования и в соответствии с общепринятой классификацией тугоухости, что позволило сформировать более однородные группы по потере слуха. В то время как имеющийся опыт в области применения опросника SHQ при СНТ был основан на выводах для пациентов с асимметричным слухом (Potvin et al., 2011), с разным опытом слухопротезирования (Çildir et al., 2021), а также сравнением групп разного возрастного состава (Assef et al., 2022), что значительно увеличивало вариативность результатов состояния пространственного слуха.

Выделение факторов для трех групп пациентов в нашей работе полностью совпало с результатами факторного анализа в группе с нормой слуха (Perrau et al., 2014), включая ту особенность, что основной вклад в дисперсию вносил фактор 1. Небольшие количественные различия состояли в том, что нормативные данные у создателей опросника SHQ для фактора 1 составили 47.6% дисперсии, а, по нашим данным, для возрастной нормы – 40%, в группах с СНТ 1-й и 2-й степени – 55% и 52% соответственно (табл. 2).

Авторы опросника SHQ (Tyler et al., 2009) выделяют восемь подшкал, четыре из которых характеризуют восприятие детской, женской и мужской речи, а также музыки. В повседневном общении женские и мужские голоса могут случайным образом в разной степени быть сходными по частоте основного тона и интенсивности голоса. Детские голоса для этой возрастной когорты могут оказаться преимущественно голосами подростков, т.е. лежащими в более низкочастотной области. Поэтому такое деление по категориям голосов представляется нам избыточным, тем более что по данным разных авторов балльные оценки по этим четырем подшкалам различаются незначительно (Владимирова и др., 2023; Potvin et al., 2011; Tyler et al., 2009), что свидетельствует об их низкой информативности. Заметим, что в ряде исследований,



цитируемых выше, применяют только общий балл опросника. Мы ограничились четырьмя подшкалами, результаты которых с достаточной полнотой описывали состояние пространственного слуха у исследованных категорий пациентов.

После выделения подшкал и сравнения балльных оценок отдельных вопросов в норме и при СНТ 1-й степени было обнаружено ухудшение пространственного слуха для двух категорий вопросов – речь в тишине и локализация источников звука речевого диапазона. Таким образом, можно считать применение опросника SHQ возможным для выявления снижения функции пространственного слуха уже на ранней стадии тугоухости. Заметим, что работа иранских коллег (Delphi et al., 2015) не позволяла выявить различие для пациентов 1-й и 2-й групп, так как выводы основывались только на общем балле. Выполненные ранее количественные исследования оценок временной разрешающей способности показали, что разрешающая способность по расстоянию для неподвижных источников звука не изменяется по сравнению с нормой, тогда как при их движении пороги по расстоянию и времени для оценки направления движения у примерно половины пациентов существенно увеличиваются (Andreeva et al., 2020). При оценке движения источников звука по азимуту временная разрешающая способность по средним данным также увеличивалась в несколько раз по сравнению с нормой слуха (Клишова и др., 2021). Коммуникация в реальных условиях редко происходит при неподвижном положении головы диктора, поэтому при ухудшении локализации движущегося источника звука и, как следствие, снижении способности к фокусированию пространственного слухового внимания в динамике общения, затрудняется понимание речи. Таким образом, количественные оценки пространственного и временного разрешения и ухудшение пространственного восприятия, полученное при двух подшкалах опросника, находятся в хорошем соответствии между собой.

Сравнение данных пациентов СНТ 1-й и 2-й степени показало достоверное различие в оценках 19 из 24 вопросов, относящихся ко всем четырем категориям. Этот результат демонстрирует возможность на основе опросника устанавливать степень потери пространственного слуха категориально, причем по сравнению с нормой слуха пациенты достоверно снижали балльную оценку во всех четырех подшкалах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение русскоязычной версии опросника пространственного слуха показало его эффективность при оценке снижения пространственного

слуха при сенсоневральной тугоухости 1-й и 2-й степени. Получены контрольные данные, характеризующие снижение слуха при норме и при СНТ. Если при 1-й степени достоверные изменения по сравнению с возрастной нормой касались только двух подшкал опросника, то при 2-й степени оценки всех четырех подшкал, или групп перцептивных задач с участием пространственного слуха, оказались снижены. Полученный результат подтверждается снижением временного и пространственного разрешения по слуху, полученного нами ранее (Andreeva et al., 2020; Клишова и др., 2021). В клинической практике этот опросник можно применять в качестве скринингового метода оценки пространственного слуха при пресбиакузисе.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование поддержано средствами Российского научного фонда, проект № 24–25–00346.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альтман Я. А., Таварткиладзе Г. А. *Руководство по аудиологии*. М.: ДМК Пресс, 2003. 360 с.
- Бабяк В. И., Накатис Я. А. *Клиническая оториноларингология: Руководство для врачей*. СПб.: Гиппократ. 2005. 800 с.
- Владимирова Т. Ю., Мартынова А. Б., Барбашева С. С. Валидация и перспективы применения русскоязычной версии опросника пространственного слуха (SHQ). *Аспирантский вестник Поволжья*. 2023. Т. 23. № 1. С. 15–20. DOI: 10.55531/2072–2354.2023.23.1.15–20
- Королева И. В. *Введение в аудиологию и слухопротезирование*. СПб.: КАРО. 2012. 343 с.
- Aggius-Vella E., Gori M., Campus C. et al. Auditory distance perception in front and rear space. *Hearing Research*. 2022. V. 417. Article 108468. DOI: 10.1016/j.heares.2022
- Akeroyd M. A. An overview of the major phenomena of the localization of sound sources by normal-hearing, hearing-impaired, and aided listeners. *Trends in Hearing*. 2014. V. 18. Article 2331216514560442. DOI: 10.1177/2331216514560442
- Akeroyd M. A., Whitmer W. M. Spatial hearing and hearing aids. *Hearing Aids*, eds G. R. Popelka, B. C. J. Moore, R. R. Fay, and A. N. Popper. Cham. Springer International Publishing, 2016. 181–215. DOI: 10.1007/978–3–319–33036–5\_7
- Andreeva I. G., Gvozdeva A. P., Sitdikov V. M. et al. Comparative assessment of spatial and temporal resolutions in the localization of an approaching and receding broadband noise source in healthy subjects and patients with first-degree symmetric sensorineural hearing

- loss. *Human Physiology*. 2020. V. 46. P. 465–472. DOI: 10.1134/S0362119720040039
- Assef R. A., Almeida K., Miranda-Gonzalez E.C.D. Sensitivity and specificity of the Speech, Spatial and Qualities of Hearing Scale (SSQ5) for screening hearing in adults. In *CoDAS*. 2022. № 34. P. e20210106. DOI: 10.1590/2317–1782/20212021106
- Briley P. M., Summerfield A. Q. Age-related deterioration of the representation of space in human auditory cortex. *Neurobiology of aging*. 2014. V. 35. P. 633–644. DOI: 10.1016/j.neurobiolaging.2013.08.033
- Çildir B., Tokgöz-Yılmaz S., Sennaroğlu G. Spatial Hearing Questionnaire: Psychometric Properties of Turkish Version and Correlations with Hearing Skills. *Archives Of Acoustics*. 2021. V. 46. P. 249–258. DOI: 10.24425/aoa.2021.136579
- Coudert A., Gaveau V., Gatel J. et al. Spatial Hearing Difficulties in Reaching Space in Bilateral Cochlear Implant Children Improve With Head Movements. *Ear & Hearing*. 2021. V. 43. P. 192–205. DOI: 10.1097/AUD.0000000000001090
- Courtois G., Grimaldi V., Lissek H., Estoppey P., Georganti E. Perception of Auditory Distance in Normal-Hearing and Moderate-to-Profound Hearing-Impaired Listeners. *Trends in Hearing*. 2019. V. 23. P. 1–18. DOI: 10.1177/2331216519887615
- Davidson A., Souza P. Relationships Between Auditory Processing and Cognitive Abilities in Adults: A Systematic Review. *Journ Speech Lang Hear R*. 2024. V. 67. P. 296–345. DOI: 10.1044/2023\_JSLHR-22–00716
- Delphi M., Abdolahi F. Z., Tyler R. et al. Validity and reliability of the Persian version of spatial hearing questionnaire. *Medical journal of the Islamic Republic of Iran*. 2015. V. 29. P. 231.
- Divenyi P. L., Stark P. B., Haupt K. M. Decline of speech understanding and auditory thresholds in the elderly. *J Acoust Soc Am*. 2005. V. 118. P. 89–100. DOI: 10.1121/1.1953207
- Dobrev M. S., O'Neill W.E., Paige G. D. Influence of aging on human sound localization. *Journal of neurophysiology*. 2011. V. 105. P. 2471–2486. DOI: 10.1152/jn.00951.2010
- Eddins A. C., Ozmeral E. J., Eddins D. A. How aging impacts the encoding of binaural cues and the perception of auditory space. *Hearing research*. 2018. № 369. P. 79–89. DOI: 10.1016/j.heares.2018.05.001
- Gordon-Salant S. Hearing loss and aging: new research findings and clinical implications. *J Rehabil Res Dev*. 2005. V. 42. P. 9–24. DOI: 10.1682/jrrd.2005.01.0006
- Freigang C., Schmiedchen K., Nitsche I., Rübsamen R. Free-field study on auditory localization and discrimination performance in older adults. *Experimental brain research*. 2014. № 232. P. 1157–1172. DOI: 10.1007/s00221–014–3825–0.
- Jung W. W., Yun J. S., Lee J. H. Validity and reliability of the Korean version of the Spatial Hearing Questionnaire in cochlear implant users. *Audiology and Speech Research*. 2023. № 19. P. 261–273. DOI: 10.21848/asr.230121
- Klishova E. A., Gvozdeva A. P., Golovanova L. E., Andreeva I. G. Temporal Characteristics of Azimuthally Moving Sound Source Localization in Patients with Mild and Moderate Sensorineural Hearing Loss. *J Evol Biochem Phys*. 2021. V. 57. P. 1499–1510. DOI: 10.1134/S0022093021060260
- Kolarik A. J., Moore B. C.J., Zahorik P., Cirstea S., Pardhan S. Auditory distance perception in humans: a review of cues, development, neuronal bases, and effects of sensory loss. *Atten. Percept. Psychophys*. 2016. V. 78. P. 373–395. DOI: 10.3758/s13414–015–1015–1
- Kong T. H., Park Y. A., Bong J. P., Park S. Y. Validation of the Korean version of the spatial hearing questionnaire for assessing the severity and symmetry of hearing impairment. *Yonsei medical journal*. 2017. V. 58. P. 842. DOI: 10.3349/ymj.2017.58.4.842
- Koroleva I. V., Ogorodnikova E. A. Chapter 30: Modern achievements in cochlear and brainstem auditory implantation. *Neural Networks and Neurotechnologies*. ds. Yu. Shelepin, E. Ogorodnikova, N. Solovyev, E. Yakimova. SPb.: Publish by VVM, 2019. P. 231–249.
- Maneesriwongul W., Dixon J. K. Instrument translation process: a methods review. *Journ Adv Nurs*. 2004. V. 48. P. 175–186. DOI: 10.1111/j.1365–2648.2004.03185.x
- Middlebrooks J. C. Sound localization. *Handbook of clinical neurology*. 2015. V. 129. P. 99–116. DOI: 10.1016/B978–0–444–62630–1.00006–8
- Moulin A., Richard C. Validation of a French-language Version of the Spatial Hearing Questionnaire, Cluster Analysis and Comparison with the Speech, Spatial, and Qualities of Hearing Scale. *Ear Hear*. 2016. V. 37. P. 412–423. DOI: 10.1097/AUD.0000000000000269
- Moore B. C.J. *Cochlear hearing loss: Physiological, psychological, and technical issues* (2nd ed.). Wiley, 2007. 332 p.
- Moore D. R., King A. J. Auditory perception: The near and far of sound localization. *Current Biology*. 1999. V. 9. P. R361–R363. DOI: 10.1016/S0960–9822(99)80227–9
- Ogorodnikova E. A., Klishova E. A., Andreeva I. G. Experimental Approaches to the Study of Sound Source Localization by Distance in Hearing Pathology. *Neuroscience and Behavioral Physiology*. 2024. P. 1–11. DOI: 10.1007/s11055–024–01617–7.
- Ou H., Wen B., Perreau A., Kim E., Tyler R. Validation of the Chinese Translation of the Spatial Hearing Questionnaire and Its Short Form. *Am J Audiol*. 2016. V. 25. P. 25–33. DOI: 10.1044/2015\_AJA-15–0056
- Perreau A. E., Spejcher B., Ou H., Tyler R. The Spatial Hearing Questionnaire: Data from individuals with

- normal hearing. *Am Journ Audiol*. 2014. V. 23. P. 173–181. DOI: 10.1044/2014\_AJA-13–0049
- Potvin J., Punte A. K., Van de Heyning P. Validation of the Dutch version of the Spatial Hearing Questionnaire. *B-ENT*. 2011. V. 7. P. 235–244.
- Sepehrnejad M., Rahimi F., Rahbar N., Nilforoush M. H., Frajadi Rad F. Standardization (translating and evaluating the validity and reliability) of the Speech, Spatial, and Qualities of Hearing Scale Questionnaire-12 (SSQ12) to the Persian language. *Journal of Rehabilitation Sciences & Research*. 2022. V. 9. P. 84–88. DOI: 10.30476/jrsr.2022.93116.1223
- Spence C., Lee J., Van der Stoep N. Responding to sounds from unseen locations: crossmodal attentional orienting in response to sounds presented from the rear. *Eur. J. Neurosci*. 2020. V. 51 P. 1137–1150. DOI: 10.1111/ejn.13733.
- Tyler R. S., Perreau A. E., Ji H. Validation of the Spatial Hearing Questionnaire. *Ear Hear*. 2009. V. 30. P. 466–474. DOI: 10.1097/AUD.0b013e3181a61efe
- Tyler R. S., Pienkowski M., Roncancio E. R. et al. A review of hyperacusis and future directions: Part I. Definitions and manifestations. *Am J Audiol*. 2014. V. 23. P. 402. DOI: 10.1044/2014\_AJA-14–0010
- Whitmer W. M., Wright-Whyte K.F., Holman J. A., Akeroyd M. A. Hearing Aid Validation. *Hearing Aids, Springer Handbook of Auditory Research* 56. Eds. G. R. Popelka et al. Springer International Publishing Switzerland, 2016. P. 291–321.
- Xiong Y. Z., Addleman D. A., Nguyen N. A., Nelson P. B., Legge G. E. Visual and auditory spatial localization in younger and older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*. 2022. V. 14. Article 838194. DOI: 10.3389/fnagi.2022.838194
- Zhang J., Tyler R., Ji H. et al. Speech, Spatial and Qualities of Hearing Scale (SSQ) and Spatial Hearing Questionnaire (SHQ) Changes Over Time in Adults With Simultaneous Cochlear Implants. *Am J Audiol*. 2015. V. 24. P. 84–97. DOI: 10.1044/2015\_AJA-14–0074
- Zheng Y., Swanson J., Koehnke J., Guan J. Sound Localization of Listeners With Normal Hearing, Impaired Hearing, Hearing Aids, Bone-Anchored Hearing Instruments, and Cochlear Implants: A Review. *American Journal of Audiology (AJA)*. 2022. V. 31. P. 819–834. DOI: 10.1044/2022\_AJA-22–00006

## THE SPATIAL HEARING DISABILITY MEASURED BY THE SPATIAL HEARING QUESTIONNAIRE IN CLINICALLY NORMAL-HEARING AND IN MILD OR MODERATE SENSORINEURAL HEARING LOSS PERSONS

**E. A. Klishova, L. E. Golovanova, I. G. Andreeva**

*Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry of RAS, St. Petersburg, Russia*

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

The spatial hearing in patients with mild and moderate symmetrical chronic sensorineural hearing loss (SNHL) was studied using the Russian-language version of the Spatial hearing questionnaire (SHQ). 141 patients aged 47 to 82 years were examined. The comparative analysis was performed in the groups of age-related normal hearing, mild SNHL, moderate SNHL. A significant deterioration in spatial perception was shown, revealed by the results of the survey in both groups with SNHL, and the mild and moderate hearing loss groups significantly differed in some indicators. The deterioration of spatial perception revealed by the analysis of the subscales of the questionnaire and the quantitative estimates of spatial and temporal resolution obtained earlier with mild and moderate degrees SNHL were in good agreement. With moderate SNHL, the scores of all four subscales of the questionnaire were significantly reduced. In clinical practice, this questionnaire can be used as a screening method for assessing spatial hearing in patients with SNHL.

**Keywords:** auditory perception, spatial hearing, speech perception, age, SHQ questionnaire

### REFERENCES

- Altman J. A., Tavartkiladze G. A. *Rukovodstvo po audiologii*. [Handbook of Audiology]. M.: DMK Press, 2003. 360 p. (in Russian).
- Babiyak V. I., Nakatis J. A. *Klinicheskaya otorinolaringologiya: Rukovodstvo dlya vrachei*. [Clinical Otolaryngology: A Guide for Physicians]. SPb.: Hippocrates, 2005. 800 p. (in Russian).
- Vladimirova T. Y., Martynova A. B., Barbasheva S. S. Validatsiya i perspektivy primeneniya russkoyazychnoj versii oprosnika prostranstvennogo sluha (SHQ). [Validation and prospects for the use of the Russian version of the Spatial Hearing Questionnaire (SHQ)]. *Aspirantskij vestnik Povolzh'ya*. [Postgraduate bulletin of the Volga

- Region]. 2023. V. 23. № 1. P. 15–20. (in Russian). DOI: 10.55531/2072–2354.2023.23.1.15–20
- Koroleva I. V. *Vvedenie v audiologiyu i slukhoprotezirovanie*. [Introduction to Audiology and Hearing Aid Fitting]. SPb.: KARO, 2012. 343 p. (in Russian).
- Aggius-Vella E., Gori M., Campus C. et al. Auditory distance perception in front and rear space. *Hearing Research*. 2022. V. 417. Article 108468. DOI: 10.1016/j.heares.2022
- Akeroyd M. A. An overview of the major phenomena of the localization of sound sources by normal-hearing, hearing-impaired, and aided listeners. *Trends in Hearing*. 2014. V. 18. Article 2331216514560442. DOI: 10.1177/2331216514560442
- Akeroyd M. A., Whitmer W. M. Spatial hearing and hearing aids. *Hearing Aids*, eds G. R. Popelka, B. C. J. Moore, R. R. Fay, and A. N. Popper. Cham. Springer International Publishing, 2016. 181–215. DOI: 10.1007/978–3–319–33036–5\_7
- Andreeva I. G., Gvozdeva A. P., Sitdikov V. M. et al. Comparative assessment of spatial and temporal resolutions in the localization of an approaching and receding broadband noise source in healthy subjects and patients with first-degree symmetric sensorineural hearing loss. *Human Physiology*. 2020. V. 46. P. 465–472. DOI: 10.1134/S0362119720040039
- Assef R. A., Almeida K., Miranda-Gonzalez E.C.D. Sensitivity and specificity of the Speech, Spatial and Qualities of Hearing Scale (SSQ5) for screening hearing in adults. In *CoDAS*. 2022. № 34. P. e20210106. DOI: 10.1590/2317–1782/20212021106
- Briley P. M., Summerfield A. Q. Age-related deterioration of the representation of space in human auditory cortex. *Neurobiology of aging*. 2014. V. 35. P. 633–644. DOI: 10.1016/j.neurobiolaging.2013.08.033
- Çildir B., Tokgöz-Yılmaz S., Sennaroğlu G. Spatial Hearing Questionnaire: Psychometric Properties of Turkish Version and Correlations with Hearing Skills. *Archives Of Acoustics*. 2021. V. 46. P. 249–258. DOI: 10.24425/aoa.2021.136579
- Coudert A., Gaveau V., Gatel J. et al. Spatial Hearing Difficulties in Reaching Space in Bilateral Cochlear Implant Children Improve With Head Movements. *Ear & Hearing*. 2021. V. 43. P. 192–205. DOI: 10.1097/AUD.0000000000001090
- Courtois G., Grimaldi V., Lissek H., Estoppey P., Georganti E. Perception of Auditory Distance in Normal-Hearing and Moderate-to-Profound Hearing-Impaired Listeners. *Trends in Hearing*. 2019. V. 23. P. 1–18. DOI: 10.1177/2331216519887615
- Davidson A., Souza P. Relationships Between Auditory Processing and Cognitive Abilities in Adults: A Systematic Review. *Journ Speech Lang Hear R*. 2024. V. 67. P. 296–345. DOI: 10.1044/2023\_JSLHR-22–00716
- Delphi M., Abdolahi F. Z., Tyler R. et al. Validity and reliability of the Persian version of spatial hearing questionnaire. *Medical journal of the Islamic Republic of Iran*. 2015. V. 29. P. 231.
- Divenyi P. L., Stark P. B., Haupt K. M. Decline of speech understanding and auditory thresholds in the elderly. *J Acoust Soc Am*. 2005. V. 118. P. 89–100. DOI: 10.1121/1.1953207
- Dobrev M. S., O'Neill W.E., Paige G. D. Influence of aging on human sound localization. *Journal of neurophysiology*. 2011. V. 105. P. 2471–2486. DOI: 10.1152/jn.00951.2010
- Eddins A. C., Ozmeral E. J., Eddins D. A. How aging impacts the encoding of binaural cues and the perception of auditory space. *Hearing research*. 2018. № 369. P. 79–89. DOI: 10.1016/j.heares.2018.05.001
- Gordon-Salant S. Hearing loss and aging: new research findings and clinical implications. *J Rehabil Res Dev*. 2005. V. 42. P. 9–24. DOI: 10.1682/jrrd.2005.01.0006
- Freigang C., Schmiedchen K., Nitsche I., Rübsamen R. Free-field study on auditory localization and discrimination performance in older adults. *Experimental brain research*. 2014. № 232. P. 1157–1172. DOI: 10.1007/s00221–014–3825–0
- Jung W. W., Yun J. S., Lee J. H. Validity and reliability of the Korean version of the Spatial Hearing Questionnaire in cochlear implant users. *Audiology and Speech Research*. 2023. 19. P. 261–273. DOI: 10.21848/asr.230121
- Klishova E. A., Gvozdeva A. P., Golovanova L. E., Andreeva I. G. Temporal Characteristics of Azimuthally Moving Sound Source Localization in Patients with Mild and Moderate Sensorineural Hearing Loss. *J Evol Biophys*. 2021. V. 57. P. 1499–1510. DOI: 10.1134/S0022093021060260
- Kolarik A. J., Moore B. C.J., Zahorik P., Cirstea S., Pardhan S. Auditory distance perception in humans: a review of cues, development, neuronal bases, and effects of sensory loss. *Atten. Percept. Psychophys*. 2016. V. 78. P. 373–395. DOI: 10.3758/s13414–015–1015–1
- Kong T. H., Park Y. A., Bong J. P., Park S. Y. Validation of the Korean version of the spatial hearing questionnaire for assessing the severity and symmetry of hearing impairment. *Yonsei medical journal*. 2017. V. 58. P. 842. DOI: 10.3349/ymj.2017.58.4.842
- Koroleva I. V., Ogorodnikova E. A. Chapter 30: Modern achievements in cochlear and brainstem auditory implantation. *Neural Networks and Neurotechnologies*. Eds. Yu. Shelepin, E. Ogorodnikova, N. Solov'yev, E. Yakimova. SPb.: Publish by VVM, 2019. P. 231–249.
- Maneesriwongul W, Dixon J. K. Instrument translation process: a methods review. *Journ Adv Nurs*. 2004. V. 48. P. 175–186. DOI: 10.1111/j.1365–2648.2004.03185.x
- Middlebrooks J. C. Sound localization. *Handbook of clinical neurology*. 2015. V. 129. P. 99–116. DOI: 10.1016/B978–0–444–62630–1.00006–8.

- Moulin A., Richard C. Validation of a French-language Version of the Spatial Hearing Questionnaire, Cluster Analysis and Comparison with the Speech, Spatial, and Qualities of Hearing Scale. *Ear Hear.* 2016. V. 37. P. 412–423. DOI: 10.1097/AUD.0000000000000269
- Moore B. C.J. *Cochlear hearing loss: Physiological, psychological, and technical issues* (2nd ed.). Wiley, 2007. 332 p.
- Moore D. R., King A. J. Auditory perception: The near and far of sound localization. *Current Biology.* 1999. V. 9. P. R361–R363. DOI: 10.1016/S0960–9822(99)80227–9
- Ogorodnikova E. A., Klishova E. A., Andreeva I. G. Experimental Approaches to the Study of Sound Source Localization by Distance in Hearing Pathology. *Neuroscience and Behavioral Physiology.* 2024. P. 1–11. DOI: 10.1007/s11055–024–01617–7
- Ou H., Wen B., Perreau A., Kim E., Tyler R. Validation of the Chinese Translation of the Spatial Hearing Questionnaire and Its Short Form. *Am J Audiol.* 2016. V. 25. P. 25–33. DOI: 10.1044/2015\_AJA-15–0056
- Perreau A. E., Spejcher B., Ou H., Tyler R. The Spatial Hearing Questionnaire: Data from individuals with normal hearing. *Am Journ Audiol.* 2014. V. 23. P. 173–181. DOI: 10.1044/2014\_AJA-13–0049
- Potvin J., Punte A. K., Van de Heyning P. Validation of the Dutch version of the Spatial Hearing Questionnaire. *B-ENT.* 2011. V. 7. P. 235–244.
- Sepehrnejad M., Rahimi F., Rahbar N., Nilforoush M. H., Frajadi Rad F. Standardization (translating and evaluating the validity and reliability) of the Speech, Spatial, and Qualities of Hearing Scale Questionnaire-12 (SSQ12) to the Persian language. *Journal of Rehabilitation Sciences & Research.* 2022. V. 9. P. 84–88. DOI: 10.30476/jrsr.2022.93116.1223
- Spence C., Lee J., Van der Stoep N. Responding to sounds from unseen locations: crossmodal attentional orienting in response to sounds presented from the rear. *Eur. J. Neurosci.* 2020. V. 51 P. 1137–1150. DOI: 10.1111/ejn.13733
- Tyler R. S., Perreau A. E., Ji H. Validation of the Spatial Hearing Questionnaire. *Ear Hear.* 2009. V. 30. P. 466–474. DOI: 10.1097/AUD.0b013e3181a61efe
- Tyler R. S., Pienkowski M., Roncancio E. R. et al. A review of hyperacusis and future directions: Part I. Definitions and manifestations. *Am J Audiol.* 2014. V. 23. P. 402. DOI: 10.1044/2014\_AJA-14–0010
- Whitmer W. M., Wright-Whyte K.F., Holman J. A., Akeroyd M. A. Hearing Aid Validation. *Hearing Aids, Springer Handbook of Auditory Research* 56. Eds. G. R. Popelka et al. Springer International Publishing Switzerland, 2016. P. 291–321.
- Xiong Y. Z., Addleman D. A., Nguyen N. A., Nelson P. B., Legge G. E. Visual and auditory spatial localization in younger and older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience.* 2022. V. 14. Article 838194. DOI: 10.3389/fnagi.2022.838194
- Zhang J., Tyler R., Ji H. et al. Speech, Spatial and Qualities of Hearing Scale (SSQ) and Spatial Hearing Questionnaire (SHQ) Changes Over Time in Adults With Simultaneous Cochlear Implants. *Am J Audiol.* 2015. V. 24 (3). P. 84–97. DOI: 10.1044/2015\_AJA-14–0074.
- Zheng Y., Swanson J., Koehnke J., Guan J. Sound Localization of Listeners With Normal Hearing, Impaired Hearing, Hearing Aids, Bone-Anchored Hearing Instruments, and Cochlear Implants: A Review. *American Journal of Audiology (AJA).* 2022. V. 31. P. 819–834. DOI: 10.1044/2022\_AJA-22–00006

## ПРЕДСТАВЛЕННОСТЬ СЕРДЕЧНЫХ СОКРАЩЕНИЙ В СЛУХОВЫХ ОТДЕЛАХ ВИСОЧНОЙ КОРЫ У НЕНАРКОТИЗИРОВАННОЙ КОШКИ

© 2024 Н. Г. Бибиков<sup>1, 2\*</sup>, И. Н. Пигарев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева,  
117036, Москва, ул. Шверника, д. 4, Россия

<sup>2</sup> Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН,  
127051, Москва, пер. Большой Каретный, д. 19, Россия

\*E-mail: nbibikov1@yandex.ru

Поступила в редакцию 3.06.2024 г.

После доработки 12.07.2024 г.

Принята к публикации 21.07.2024 г.

Исследование того, как корковые нейроны реагируют на интероцептивные сигналы, остается сложной задачей, имеющей решающее значение для понимания самосознания у развитых млекопитающих, включая человека. Фундаментальный аспект, находящийся под пристальным вниманием исследователей, заключается в том, могут ли нейронные сети в коре головного мозга животных точно отражать внутренние состояния организма, особенно сердечную деятельность. Чтобы выяснить это, мы провели исследование нейронов височной коры бодрствующих и спящих кошек, используя уникальную установку, позволяющую непрерывно регистрировать локальные потенциалы и активность одиночных нейронов в определенных областях коры, а также отслеживать различные физиологические параметры животного, включая кардиограмму. Результаты показали, что в первичной слуховой коре (AI) активность, синхронизированная с сердцебиением, либо отсутствовала, либо проявлялась крайне слабо. В то же время вторичные слуховые зоны височной коры, локализованные в передней эктосильвиевой борозде и в задней эктосильвиевой извилине, демонстрировали синхронизацию с частотой сердечных сокращений. Эта синхронизация была особенно очевидна в локальных потенциалах, однако некоторые одиночные нейроны, отвечающие на звуковые сигналы, также проявляли ритмическую активность, синхронную с сокращениями сердца. Форма фазовых гистограмм, построенных на периоде кардиограммы, предполагает, что эта синхронизация обеспечивает получение корой информации о состоянии внутренней среды организма. Эти данные побуждают к рассмотрению гипотезы о возникновении первичного самосознания вследствие динамического взаимодействия нейронных ансамблей, представляющих соответственно внешнюю сенсорную информацию и информацию от внутренних органов, прежде всего от сердца. Такое взаимодействие может лежать в основе чувства собственного “Я” у высокоразвитых организмов.

**Ключевые слова:** кора головного мозга, кошка, сердцебиение, самосознание, слуховое восприятие, локальный потенциал, нейроны

**DOI:** 10.31857/S0235009224040068 **EDN:** ACYGEU

На протяжении жизни любого человека и животного сердце непрерывно и циклически посылает афферентную импульсацию в мозг. Уже давно была выявлена взаимозависимость частоты сердечных сокращений с высшими проявлениями мозговой деятельности. Философы античности предполагали, что сердце является тем центром, в котором располагаются понятие “Я” и телесное самосознание (Clarke, 1963, Gross, 1995). Довольно неожиданно в последние годы такой подход оказался вполне востребованным. В ряде публикаций высказывалось мнение, что интеграция интероцептивных сигналов играет ключевую

роль в субъективных переживаниях, определяющих самосознание (Azzalini et al., 2019; Park et al., 2018; Park, Blanke, 2019, Tallon-Baudry et al., 2018; Candia-Rivera, 2022). Обсуждается возможная связь восприятия интероцепции с самосознанием вплоть до того предположения, что именно взаимодействие интероцептивных афферентов, поступающих в мозг от сердца, с потоком эфферентов из мозга, возможно, и составляют основу того, что называют восприятием собственного “Я” (Candia-Rivera, 2022; Seth, Tsakiris, 2018; Tallon-Baudry et al., 2018; Frewen et al., 2020). Во всех этих исследованиях в качестве объекта выступал человек.

В течение длительного времени в качестве возможных корковых акцепторов интрарецептивной сенсорной информации обычно рассматривали инсулярную и медиальную префронтальную кору (Yu, 2014) и иногда гиппокамп. Также обычно предполагали, что эти же зоны определяют и кортикальное влияние на сердечный ритм. И сейчас есть все основания считать, что инсулярная кора играет важную роль в определении динамики сердечного ритма как у человека (Chouchou et al., 2019), так и у животных (Yasui et al., 1991; Verberne, Owens, 1998; Oppenheimer, Cechetto, 2016).

Однако в настоящее время выясняется, что у человека взаимодействие интра- и экстра-рецептивной информации занимает весьма обширные зоны коры. Электрические потенциалы, синхронизированные с ритмом сердца (ПСРС), легко выделяются при синхронном усреднении любых ЭЭГ по периоду сердечных сокращений (Lechinger et al., 2015; Coll et al., 2021; Gray et al., 2007). При обычной регистрации ЭЭГ поверхностными электродами наиболее заметным является ответ, полностью синхронный с пиком R кардиограммы, который явно определяется прямым электротоническим затеканием токов, возникающих в сердечной мышце. Эту электрическую активность, генерируемую непосредственно в сердце, можно регистрировать практически в любой точке тела, включая скальп или поверхность коры. Естественно рассматривать ее как артефакт, требующий удаления (Dai et al., 2019; Tong et al., 2001; Perez et al., 2005; Arnau, et al., 2023).

После удаления этого артефакта даже в суммарной ЭЭГ все еще удастся выделить ПСРС, которые могут определяться рядом причин, далеко не всегда легко обнаруживаемых. В частности, активность барорецепторов, локализованных на стенке аорты, через несколько синаптических переключений может достичь головного мозга, закончившись в инсулярной зоне или в некоторых отделах поясной коры. Кроме того, непосредственно в сердце имеются хемо- и механорецепторы, возбуждение которых сравнительно быстро (в пределах 100 мс после пика R) может достичь коры. Третий возможный соматосенсорный путь определяется возбуждением кожных рецепторов на поверхности груди, которые также реагируют в ритме сердечных сокращений. Таким образом, физиологические источники ПСРС на ЭЭГ человека могут иметь различное происхождение, потенциально объясняя то, почему его компоненты наблюдаются только в некоторых областях коры, причем с разными задержками относительно пиков ЭКГ (Lechinger et al., 2015; Winston, Rees, 2014).

Еще одной возможной причиной появления дополнительных пиков ПСРС в суммарной ЭЭГ

могла бы являться механическая пульсовая волна (волна артериального давления в близлежащих от места регистрации сосудах) (Lechinger et al., 2015, см. Whalley, 2024). Следует отметить, что, если эта информация реально кодируется нейронными структурами, то она, независимо от происхождения, может быть использована для любых жизненно важных организму целях.

В последнее время широкое распространение получили методики, позволяющие неинвазивно оценивать состояние локальных участков коры головного мозга человека с помощью магнитной томографии. Локальные магнитные потенциалы, синхронизированные с сердцебиениями, наиболее активно исследовали в тех областях коры, которые, по мнению исследователей, связаны с так называемой нервной сетью по умолчанию, когда человек занят мыслями или воображениями, никак не проявляя это наружно (Babo-Rebelo et al., 2016; Andrews-Hanna et al., 2014).

В работах (Babo-Rebelo et al., 2016, 2019) было обнаружено, что в некоторых высших зонах коры головного мозга человека (вентральное предклинье — зоны Бродмана 1–3 и вентромедиальная префронтальная кора — зоны Бродмана 10–14, 25, 32) вызванный магнитный ответ на сердцебиение прямо зависел от того, рассматривает ли испытуемый себя как субъект или как бы со стороны. Эти исследователи полагают также, что корковая обработка афферентных сигналов от сердца может играть важную роль во многих эмоциональных и познавательных процессах.

Важное наблюдение, демонстрирующее роль интерорецепции в восприятии собственного “Я”, было сделано при регистрации магнитного аналога ПСРС, возникающего в антериовентральной поясной коре в короткий интервал времени, непосредственно предшествующий тому моменту, когда испытуемому предъявлялся зрительный сигнал, обнаруживаемый человеком примерно в половине попыток (Park et al., 2014; 2019). Выяснилось, что компонент ЭЭГ, синхронизированный с сердцебиениями, возникающий примерно через 300 мс после пика T кардиограммы, достоверно меняется в зависимости от того, успешно или нет испытуемый после этого решает задачу обнаружения стимула.

Примерно на той же фазе сердечного цикла наблюдали пик ПСРС, который достоверно изменялся при наблюдении ночных кошмаров во время сна с быстрыми движениями глаз (Perogamvros et al., 2019). Была также обнаружена зависимость субъективного ответа на тактильный стимул от фазы его предъявления на периоде сердцебиений. Испытуемые оказались существенно более чувствительными к таким сигналам, если они

предъявлялись в фазе диастолы, а не систолы (Al et al., 2021).

Также существует множество вполне очевидных фактов обратного воздействия сенсорных сигналов на внутренние органы. Например, в классических опытах И.П. Павлова звуковой сигнал вызывал у собаки выделение слюны, т.е. реакцию, видимо, не воспринимаемую животным сознательно.

В экспериментах на людях, подвергавшихся внутричерепной операции в связи с эпилепсией, пытались выявить связь частоты сердечных сокращений с частотой следования спайков в нейронах сингулярной и парагиппокампальной коры (Kim et al 2019). Такая достоверная связь на самом деле выявлялась у 16.7% клеток. При этом она могла быть как положительной, так и отрицательной, но имелась тенденция положительной корреляции частоты спайков с частотой сердцебиений. В этой работе приводились отдельные примеры распределения спайков на периоде сердцебиения, однако, заметной синхронизации между этими процессами продемонстрировано не было.

Существует несомненный контраст между интенсивностью исследования взаимодействия сердца с головным мозгом у человека и у лабораторных животных. Если у человека эта проблема изучается в последнее время весьма активно, то сведения по вопросу взаимодействия сердечной деятельности с активностью нейронов головного мозга лабораторных животных весьма скудны.

Хорошо известно, что существуют различные анатомические пути, по которым в кору животных может поступать информация о сердечном ритме. Эти пути никак не ограничиваются блуждающим нервом. Например, у кошек в латеральном коленчатом теле, обеспечивающем основной вход в зрительные зоны коры, были выявлены многочисленные афференты от ретикулярных холинергических ядер ствола мозга, которые, в частности, могут передавать информацию о частоте пульса (Erisir et al., 1997). Что касается вентрального ядра медиального коленчатого тела (МКТ), обеспечивающего основной таламический вход в первичную слуховую кору, то там представленность входов из ретикулярных ядер нижних отделов ствола мозга существенно ниже, хотя и была выявлена уже сравнительно давно (Fitzpatrick et al., 1989).

Однако, кроме вентрального ядра МКТ, обеспечивающего основной вход в первичную слуховую кору, существует ряд иных таламических ядер, входящих или не входящих в МКТ, но имеющих афферентные связи с висцеральными

органами и при этом снабжающих различные отделы височной коры соответствующей информацией.

Несмотря на то, что входы, которые могут передавать ритм сердцебиений в кору мозга животных, анатомически установлены, работ, посвященных подробному исследованию ПСРС как в суммарной ЭЭГ, так и в локальных потенциалах коры лабораторных млекопитающих, крайне мало. В нескольких публикациях они скорее рассматривались как артефакты ЭЭГ. Исключение составляют работы, выполненные под руководством академиков Черниговского и Быкова (Мусящикова, Черниговский, 1973), которые в дальнейшем подвергались критике в связи с тем, что в экспериментах использовали глубоко наркотизированных животных.

Не так давно в Институте проблем передачи информации РАН под руководством И.Н. Пигарева была осуществлена работа по выявлению ПСРС в суммарной эпидуральной ЭЭГ височно-теменной зоны коры мозга кошек (Лаврова и др., 2019). При усреднении ЭЭГ по периоду сердцебиений у ненаркотизированных кошек были описаны, по крайней мере, три типа волн, синхронных с сокращениями сердца. Как и у человека, на ЭЭГ кошки регистрировались потенциалы, полностью синхронизованные с кардиограммой и определяемые, скорее всего, простым затеканием токов. Второй тип ответов имел вид медленных волн, следующих с частотой сердечных сокращений. Его генез не очевиден, но не исключено, что эти колебания отражают механические смещения, связанные с пульсацией крови в мелких сосудах. Эти два типа волн проявлялись нерегулярно как во сне, так и в бодрствовании. Наибольший интерес представляли ответы с экстремумом, задержанным относительно пика R на 100–150 мс. Приведенные в работе примеры свидетельствовали, что такой ответ может быть выражен сильнее тогда, когда кошка находилась в состоянии медленноволнового сна по сравнению с активным бодрствованием, что вполне соответствовало постулатам висцеральной теории (Pigarev, 2014). При проведении наших экспериментов мы, как и в работе (Лаврова и др., 2019), фиксировали ПСРС в электроэнцефалограмме, зарегистрированной макроэлектродом, расположенным эпидурально над фронтальной корой. Однако основное наше внимание было уделено анализу представленности ритма сердечных сокращений в локальных потенциалах, регистрируемых между двумя близко расположенными микроэлектродами, находящимися в разных точках височной коры кошки. Данная методика, предложенная и широко используемая в работах И.Н. Пигарева, (Pigarev et al, 2009),



позволяет получить разность потенциалов между двумя электродами в весьма ограниченной области мозга. Этот потенциал, синхронно суммируемый на периоде ЭКГ, будем называть локальным кардиообусловленным вызванным потенциалом (ЛКВП). Той же парой электродов обычно удается зарегистрировать и импульсацию одиночных нейронов, выделяемую из всей широкополосной биоактивности путем частотной фильтрации и последующего анализа формы спайка.

В данной работе будут описаны результаты, полученные при нескольких вертикальных проходах пары электродов в височной коре одной кошки. Первая проходка позволила регистрировать ЛКВП и импульсную активность клеток, локализованных внутри передней эктосильвиевой борозды. Здесь располагается одна вторичная слуховая зона (FAES), а также некоторые мультисенсорные зоны, в которых отмечалась активность, вызванная слуховыми, зрительными и соматосенсорными стимулами. Три следующих погружения были локализованы в слуховой коре, причем первое из них проходило в первичной зоне, где оптимальными являлись частоты в районе 11–16 кГц, а два других были локализованы более каудально, соответствуя низкочастотной области поля А1, где это поле смыкается с дорсальной частью задней эктосильвиевой извилины.

Совершенно очевидно, что выраженность локальных корковых реакций на сердцебиения зависит от целостного состояния организма, в частности от состояния бодрствования и сна. Однако такая связь может оказаться достаточно сложной, меняя свою полярность (Lechinger et al., 2015; Пигарев, Бибигов, 2022). Поэтому в данной работе мы не будем подробно останавливаться на этой проблеме, ограничившись только наиболее яркими ее проявлениями.

Некоторые результаты работы были кратко изложены ранее (Бибигов и др., 2021; Пигарев, Бибигов, 2022).

## МЕТОДИКА

### Подготовка животного

Перед началом экспериментов животное прошло процедуру магнитно-резонансного сканирования головы (во фронтальной и сагиттальной плоскостях) и тела (сагиттально). Это дало возможность получить индивидуальную стереотаксическую карту мозга, что значительно повысило точность и эффективность погружений электродов и позволило исключить процедуру морфологического контроля, связанного с умерщвлением животного. Все методические аспекты работы

получили одобрение этической комиссии Института проблем передачи информации.

Во время операции, проводимой под общим наркозом, поверхность черепа животного, закрепленного в стереотаксическом аппарате, освобождали от мягких тканей. В кости черепа на расстоянии примерно 15 мм от осевой линии вкручивали маленькие винтики из нержавеющей стали, выполняющие функцию соединения костей черепа с акриловой пластмассой, тонким слоем которой покрывали винтики и всю поверхность черепа внутри рамки. С помощью той же пластмассы к винтикам приклеивали расположенную в горизонтальной стереотаксической плоскости предварительно изготовленную рамку. Перед операцией также из акриловой пластмассы на арматуре из тонкой стальной проволоки была отформована кольцевая рамка со съемным купольным шлемом из тонкой нержавеющей стали. За эту рамку голову животного можно было безболезненно фиксировать в станке на все время экспериментов, длящихся от шести до восьми часов. Съемный купольный шлем обеспечивал экранировку от электрических помех во время эксперимента и защищал все системы от повреждений между опытами.

В ходе той же операции в кости черепа просверливали маленькое отверстие для электрода, регистрирующего электроэнцефалограмму. Электрод, изготовленный из сплава Elgiloy, помещали на поверхность твердой мозговой оболочки и закрепляли акриловой пластмассой. Второй электрод – винтик из нержавеющей стали, располагали около медиальной линии черепа над теменной корой. Этот электрод служил как заземляющий электрод и как второй электрод для отведения ЭЭГ.

Практически все эти методические приемы были разработаны Иваном Николаевичем Пигаревым для хронических экспериментов на обезьянах (Pigarev et al., 2009) и в течение длительного времени с успехом использовались в экспериментах на кошках.

Через неделю после операции кошку начали приучать к станку, в котором она должна была находиться с закрепленной головой, принимая пищу в таком положении. Процесс приучения кошки к проведению эксперимента занял две с половиной недели.

### Регистрация

Во время записи голова кошки была фиксирована в специально изготовленной раме, а ее тело было обернуто полотенцем. Поскольку непосредственно перед началом экспериментальной

работы животное в течение нескольких недель специально приучали к такому положению, видимых признаков дискомфорта не наблюдалось. Кошка пассивно слушала слуховые стимулы, время от времени впадая в дремотное состояние или даже погружаясь в типичный медленный сон. По окончании экспериментального сеанса, длящегося 6–8 часов, животное получало порцию еды и переводилось в вольер.

Значительную часть времени животное по своим ЭЭГ показателям находилось в дремотном состоянии. В настоящей работе мы не будем специально останавливаться на особенностях, характерных для периодов явного бодрствования и выраженного глубокого медленноволнового сна. Вновь следует подчеркнуть, что во время регистрации животное не подвергалось наркотическим воздействиям, заведомо искажающим нейрональные ответы коры (см. Bibikov, 2021).

Для регистрации локальной нейронной активности использовали биполярное отведение от двух вольфрамовых микроэлектродов, изолированных лаком, и перемещаемых параллельно друг другу. Диаметр регистрирующего кончика каждого из этих электродов был 10–15 мкм, их сопротивление на частоте 1000 Гц составляло 1–2 МОм, а расстояние между кончиками – 300–500 мкм. Такие электроды безболезненно прокалывали твердую мозговую оболочку. Фиксацию и перемещение микроэлектродов осуществляли микроманипуляторами, закрепляемыми непосредственно на кольцевой рамке. Это позволяло сохранять микроэлектроды в ткани мозга на весь период многодневного дорзо-вентрального погружения в одной проходке, проводя по мере надобности их небольшие (100–200 мкм) сдвиги в вентральном направлении. Постоянное нахождение микроэлектродов в ткани мозга и их перемещение в процессе эксперимента манипулятором, также закрепленным на голове животного, обеспечивало стабильность регистрации и снижало ее травматичность.

Усиление дифференциального сигнала от двух микроэлектродов производили предусилителями (производство компании Neurobiolab), расположенными непосредственно на выводах микроэлектродов. В результате получали локальный потенциал данного небольшого участка мозга. Эту полную версию биоэлектрической активности коры, зарегистрированную с частотой выборки 10 кГц, использовали для выявления связи локальных потенциалов с ритмом сердечных сокращений.

Кроме того, с целью анализа поведения отдельных нейронных элементов из полученной биоактивности выделяли ее высокочастотную

часть, отфильтровывая все составляющие ниже 300 Гц. Далее путем анализа основных компонент формы сигнала в окне шириной 2 мс, реализуемого программой Spike 2–6, проводили выделение активности одиночных нейронов.

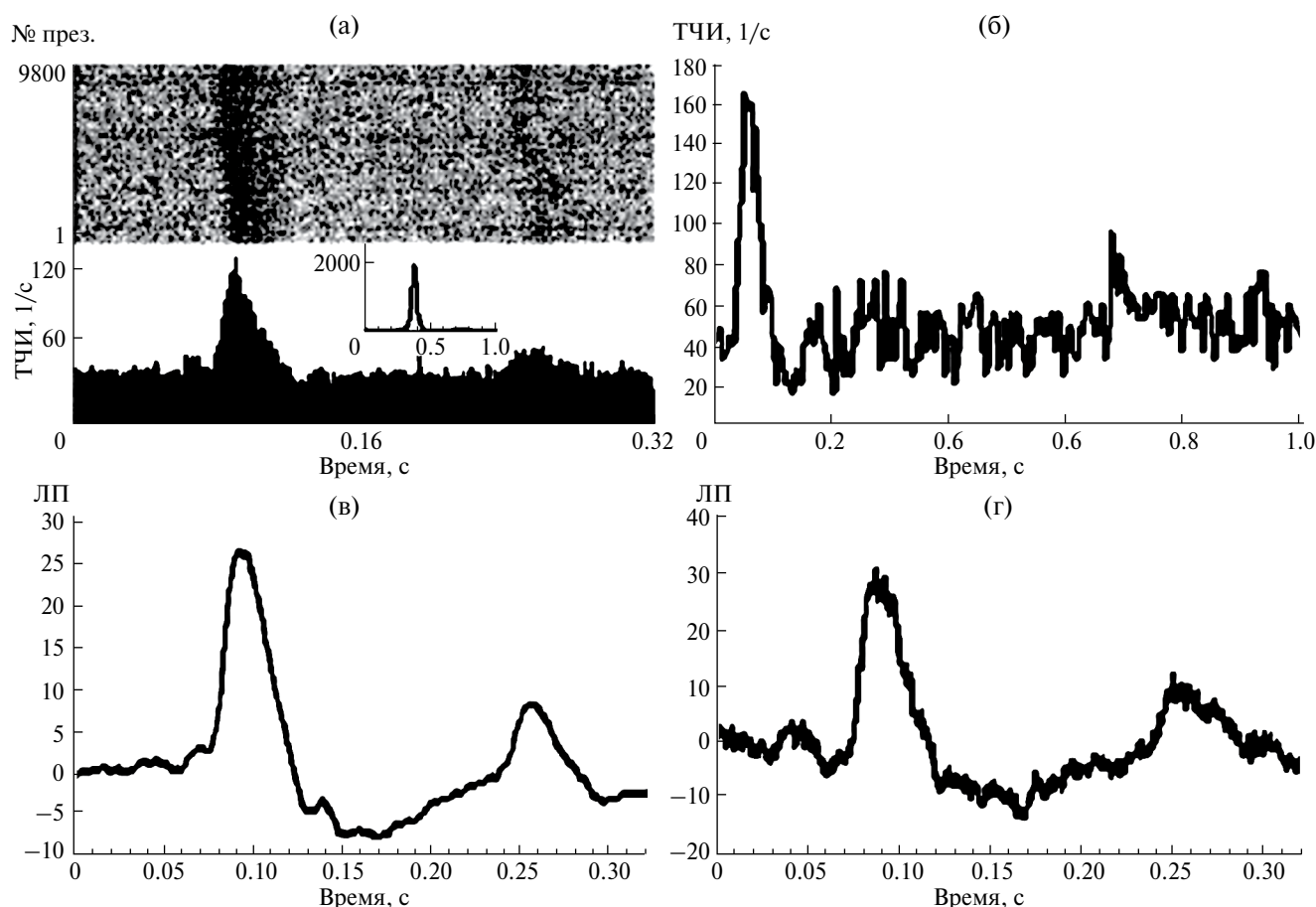
В ходе всего эксперимента электродом, расположенным в районе грудной клетки животного, регистрировали кардиограмму (ЭКГ). Наряду с этим контролировали дыхание животного и электрическую активность желудочно-кишечного тракта. Непосредственно перед головой кошки была установлена видеокамера, которая позволяла следить за открытием глаз животного. Однако данные, связанные с представленностью в исследованных нами точках коры интерорецепторных входов от желудочно-кишечного тракта, а также от дыхательной и глазодвигательной моторики, в настоящей работе использовались только для общего контроля за состоянием животного.

При изучении реакции на звуковые сигналы разнообразные звуки предъявляли через высокочастотный излучатель, расположенный прямо перед мордой животного на расстоянии 15 см. Уровень сигнала регистрировали микрофоном в точке, близкой к внешнему отверстию слухового прохода.

### Обработка результатов

На первом этапе во всех случаях из кардиограммы получали гистограмму распределения временных интервалов между сердцебиениями (R–R). Для этого использовали программу Spike 2, установив порог на уровне 80–90% от максимального значения пика R ЭКГ с последующей визуальной проверкой и удалением артефактов. Маркеры ЭКГ контролировались путем построения распределения интервалов R–R и принимались в работу, если не менее 90–95% интервалов были в диапазоне 0.33–0.5 с (врезка на рис. 1а). Эти маркеры использовались как синхронимпульсы для осуществления синхронного суммирования локальных кардиообусловленных вызванных потенциалов (ЛКВП) и текущей частоты импульсации выделенных одиночных нейронов коры.

Для интересующих нас параметров нейронной активности (ЛКВП и текущая частота импульсации корковых нейронов) строили фазовые гистограммы на интервале 0–0.32 с после пика R (см. рис. 1б). Таким образом, получаемые функции характеризовали временную связь исследуемых параметров именно с пиком R систолы сердечного сокращения. Выборочные оценки показали только незначительные изменения гистограммы при увеличении усредняемого периода, притом что это могло приводить



**Рис. 1.** Результаты регистрации биоактивности в одной фиксированной точке первого погружения в район передней эктосильвиевой борозды: а – распределение текущей частоты импульсации одиночного нейрона в зависимости от фазы сердечного ритма и растровая запись этой активности. На врезке приведено распределение временных интервалов между пиками R кардиограммы в секундах; б – постстимульная гистограмма реакции этого нейрона при действии тона оптимальной частоты длительностью 0.2 с; в – локальные кардиосинхронизованные вызванные потенциалы (ЛКВП), зарегистрированные в данной точке на протяжении всего времени измерения (5400 с); г – ЛКВП, полученные во время действия тона (40 с); ТЧИ – текущая частота импульсации одного из нейронов, зарегистрированных в данной точке расположения электродов, ЛП – локальный потенциал, зарегистрированный в данной точке, в относительных единицах; № през. – номер последовательно суммируемых сердцебиений.

к уменьшению числа проанализированных сокращений. Кроме того, остается невыясненным, зависят ли исследуемые параметры биоактивности от фазы периода сердцебиений или именно от временной задержки после пика систолы. Предположение о том, что выделяемые особенности ответа определяются предшествующими сокращениями сердца, представляется крайне маловероятным.

Дальнейшая обработка полученных распределений осуществлялась путем векторной суммации по периоду с вычислением длины и направления суммарного вектора. Достоверность отличия этого распределения от случайного

выборочно определяли с использованием алгоритмов круговой статистики.

В число функций, для которых анализировали связь с сердцебиениями, входили: 1) суммарная ЭЭГ, зарегистрированная эпидурально; 2) локальный потенциал в местах коркового расположения электродной пары (ЛКВП); 3) динамика мгновенной плотности импульсации одиночных нейронов, зарегистрированных той же электродной парой, но впоследствии изолированных с помощью программы Spike 2. Некоторые методические аспекты работы были специально рассмотрены ранее (Бибиков и др., 2020).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Вначале кратко остановимся на результатах, полученных при регистрации суммарной эпидуральной ЭЭГ. Поскольку эта регистрация в ходе всего эксперимента осуществлялась в одной точке коры и фактически воспроизводила условия, описанные в работе (Лаврова и др. 2019), мы можем только подтвердить данные, полученные этими авторами, на другом животном. Основной вклад в вызванный ответ такой ЭЭГ определялся прямым затеканием тока от ЭКГ, и его максимум совпадал во времени с пиком R кардиограммы. В некоторых опытах также отмечалось колебание потенциала с периодом ЭКГ, возможно, связанное с гемодинамикой, а иногда наблюдали и локальный экстремум через 0.1–0.15 с после пика R.

Более информативными оказались результаты, получаемые нами при анализе ЛКВП отдельных точек височной коры. В течение 2019–2021 гг. было осуществлено несколько погружений пары электродов в височную кору головного мозга одной кошки, идущих приблизительно в дорзо-вентральном направлении. Треку электродов придавали только незначительный (обычно 7–10°) латеральный наклон с тем, чтобы регистрируемые участки все время проходки оставались в зоне, представленной слоями клеток коры. Каждое погружение занимало обычно месяцы работы и включало от 6 до 20 точек регистрации.

Первое погружение проходило в зоне, расположенной антериорно по отношению к первичной слуховой зоне коры. Как по стереотаксическим координатам, так и по характерным особенностям нейрональной активности (большой латентный период, ярко выраженная вариабельность импульсации) был сделан вывод, что траектория электродов шла через вторичную слуховую зону коры, локализованную в глубине передней эктосильвиевой борозды.

Второе погружение проходило примерно в середине первичной слуховой зоны (AI), там, где большинство нейронов при действии слабых тоновых отрезков предпочтительно реагировали на частоты в районе 12–15 кГц. Возможно, в самом начале электроды локализовались в дорсальном слуховом поле, а в конце погружения вошли в зону AII, расположенную вентральнее области AI.

Третье и четвертое погружения электродов были локализованы более каудально, проходя через низкочастотную каудальную область первичной слуховой коры и, возможно, через вторичную слуховую зону, локализованную в задней эктосильвиевой извилине.

Прежде всего, следует указать, что во всех ЛКВП, регистрируемых дифференциально парой микроэлектродов в различных точках височной коры, не было выявлено компонент, обусловленных прямым затеканием токов сердечной мышцы и полностью синхронизированных с ЭКГ. Кроме того, регистрируемые потенциалы критически зависели от локализации точки отведения, т.е. являлись подлинно локальными, отражая процессы, происходящие в локальном участке нейронных сетей непосредственно вблизи точки регистрации.

Наиболее яркие ответы на сердечную деятельность наблюдались в процессе первого, наиболее антериорного погружения электродов. Остановимся на свойствах этой активности, зафиксированной в одном из экспериментов, когда электроды находились в районе максимального ответа на сердцебиения (см. рис. 1).

Заметим, что в данном эксперименте, как и в большинстве других опытов, почти все интервалы между пиками ЭКГ были сосредоточены в диапазоне 0.3–0.4 с (врезка рис. 1а). ЛКВП суммировали на интервале длительностью 0.32 с, начинающемся с момента максимума пика R ЭКГ, усредняя по нескольким тысячам сердцебиений. Полученная в этом эксперименте форма ЛКВП, демонстрировала выраженную синхронизацию биоэлектрической активности височной коры с сердечной деятельностью (см. рис. 1а). Можно отметить положительный максимум через 0.08–0.1 с после пика R, следующее за ним медленное отрицательное отклонение, а также небольшой дополнительный максимум примерно через 0.25 с.

Гистограмма фоновой импульсации зарегистрированного в этой же точке одиночного нейрона (см. рис. 1б), также построенная на периоде сердцебиений, оказалась близка к усредненной форме ЛКВП с теми же максимумами через 0.1 с и 0.26 с после пика R. Обратим внимание, что при растровом представлении реакции можно выделить участки, на которых синхронизация с сердцебиениями оказывается достоверно различной как по степени выраженности, так и по своим временным особенностям. В частности, заметно уменьшение задержки максимума гистограммы в процессе длительной регистрации.

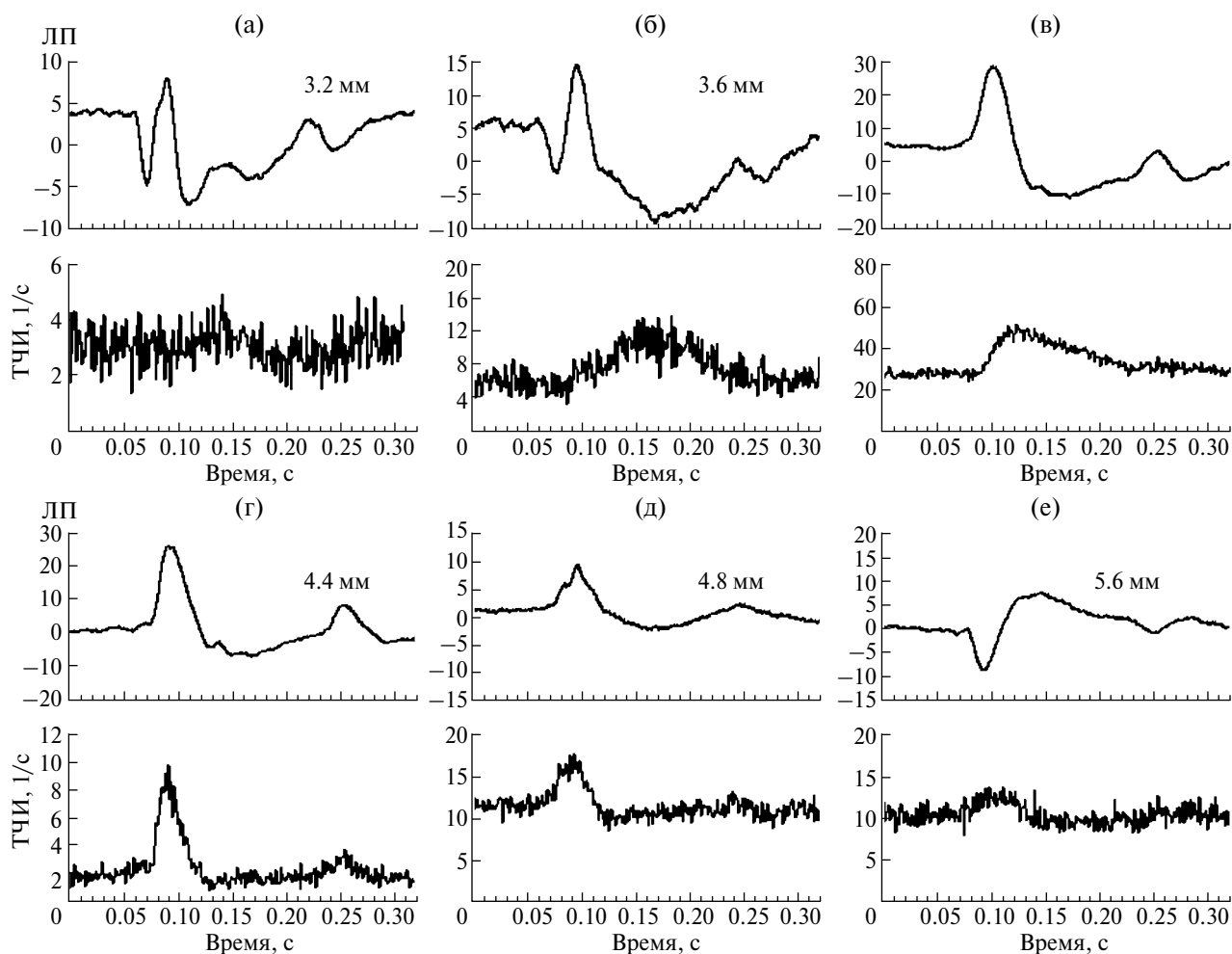
При действии тоновых отрезков частотой 5 кГц и уровнем 60 дБ УЗД эта клетка реагировала оп-ответом без выраженного торможения в процессе или после действия стимула (см. рис. 1в). Форма ЛКВП в периоды предъявления звука не претерпевала выраженных изменений по сравнению с фоновой активностью (см. рис. 1г).

Форма ЛКВП и фазовых гистограмм импульсации нейронов, выделенных в процессе этого

погружения, критически зависели от глубины расположения электродов, что иллюстрируется на рис. 2. При небольшом погружении пары микроэлектродов (3.2 мм после прокола твердой мозговой оболочки) широкополосный ЛКВП имел сложную форму (см. рис. 2а, вверху). При избранной полярности можно было отметить длительное отрицательное отклонение разности потенциалов, начинающееся примерно через 60 мс после пика систолы. На 100 мс это отклонение было прервано короткой, но резко выраженной положительностью. Негативность, прослеживаемая от окончания этого пика до конца гистограммы, прерывалась небольшими положительными отклонениями при задержках 150 и 220 мс. При этом в клетках, зарегистрированных в данной точке траектории, нам не удалось выявить активности одиночных нейронов, которая были бы четко синхронизована с сердечной

ритмикой. Только у одного из нейронов, характеризующегося невысоким уровнем фоновой активности, имелся небольшой максимум фазовой гистограммы, слабо синхронизованный с формой ЛКВП (см. рис. 2а, внизу)

При смещении регистрирующих электродов в вентральном направлении на 0.4 мм амплитуда ЛКВП несколько возрастала, а его форма претерпела заметные изменения. В частности, на участке спада отрицательного ЛКВП осталось только одно выраженное положительное отклонение, задержанное относительно пика R ЭКГ примерно на 250 мс (см. рис. 2б, вверху). Ответ нейрона, выделенного нами в этой новой точке, был существенно лучше коррелирован с ЭКГ (см. рис. 2б, внизу). Дальнейший сдвиг электродов в вентральном направлении вновь привел к изменению реакции (см. рис. 2в). Начальный отрицательный сдвиг ЛКВП пропал, а положительное



**Рис. 2.** Шесть примеров локальных кардиосинхронизованных вызванных потенциалов (ЛКВП) — (вверху) и гистограмм импульсной активности, зарегистрированных в данной точке одиночных нейронов, построенных, также на периоде сердечного ритма (под ними) для шести характерных точек первого (антериорного) погружения регистрирующей пары электродов. Глубина погружения указана на каждом графике ЛКВП. Обозначения как на рис. 1.

отклонение возросло по амплитуде и стало существенно шире. Импульсация одиночного нейрона, зарегистрированного в этой точке, была уже совершенно очевидно синхронизована с сердечным ритмом. У этой клетки временной участок нарастания мгновенной плотности импульсации примерно совпадал с основным положительным отклонением ЛКВП.

Данные, приведенные на рис. 2г, соответствуют локусу наиболее выраженной реакции этой области коры на сердечный ритм. Они были зарегистрированы в точке, весьма близкой к той, где были получены данные, иллюстрированные рис. 1. Форма ЛКВП изменилась незначительно, но его амплитуда возросла. Ответ регистрируемого при этом нейрона воспроизводил форму ЛКВП с выделением двух максимумов импульсации задержанных относительно пика R кардиограммы соответственно на 150 и 270 мс. Именно вблизи этой точки регистрации мы наблюдали существенное усиление синхронности ответов нейронов с ритмом сердцебиений в состоянии медленноволнового сна (Пигарев, Бибииков, 2022). Это наблюдение полностью соответствовало предложенной одним из авторов работы висцеральной теории сна (Pigarev, 2014).

При дальнейших сдвигах электродов в вентральном направлении амплитуда ЛКВП начала постепенно уменьшаться, хотя ответ некоторых регистрируемых клеток все еще был синхронизован с ЛКВП (см. рис. 2д). При сдвиге положения электродов от 4.8–5.6 мм произошла реверсия знака ЛКВП. При этом корреляция зарегистрированной в этой точке нейронной активности с ритмом сердцебиений хотя и была ослаблена, однако не изменила своей полярности (см. рис. 2е).

При еще больших последующих перемещениях электродов в вентральном направлении незначительная, но достоверная корреляция ЛКВП и импульсации некоторых клеток с кардиограммой и между собой также могла быть отмечена, хотя постепенно продолжала уменьшаться.

Отметим, что у большинства клеток, зарегистрированных при данной проходке электродов и иллюстрированных на рис. 2, можно было вызвать ответ на использованные нами звуковые сигналы. Пример реакции, иллюстрированной на рис. 1в, был достаточно типичен, хотя у других нейронов можно было наблюдать и тоническое торможение реакции в течение действия тональных отрезков, и ответ, продолжающийся все время воздействия. При воздействии сложных стимулов нередко отмечалась синхронизация мгновенной плотности импульсации нейронов с особенностями огибающей сигнала. При этом почти никогда мы не наблюдали резкого

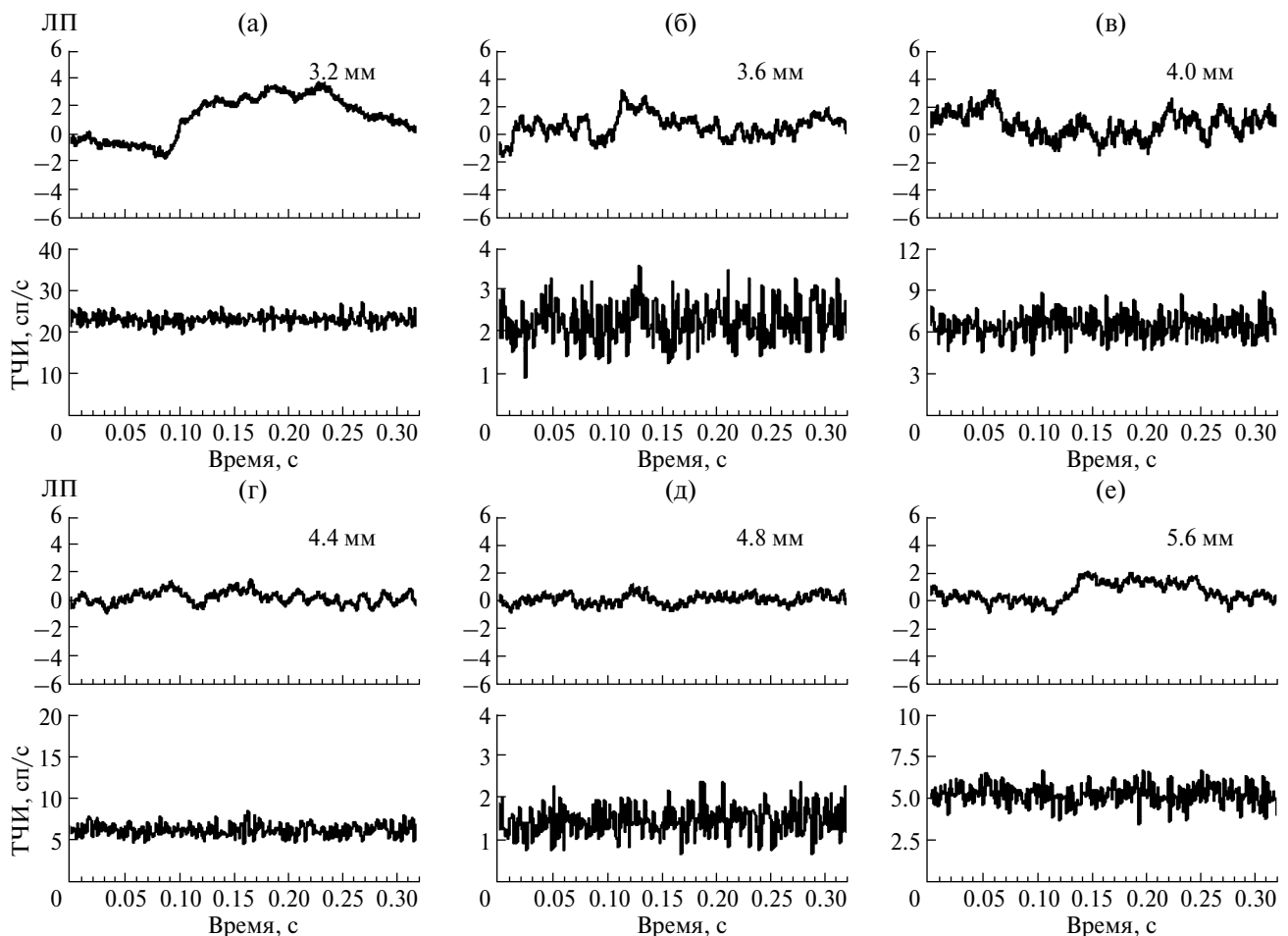
возрастания средней частоты следования спайков во время действия звука.

Второе погружение пары электродов, осуществляемое на протяжении нескольких месяцев, в своей основной части проходило через центральную зону первичной слуховой коры. Практически все регистрируемые в этом проходе нейроны реагировали на предъявление звуковых сигналов. Описание особенностей этих реакций не входит в задачу данной работы. В то же время в резком контрасте с результатами первой проходки в подавляющем большинстве из исследованных 24 точек регистрации ЛКВП полностью отсутствовал.

Только в нескольких начальных точках этой проходки можно было выделить достаточно четкий ЛКВП (рис. 3а, б). Ответ состоял из сравнительно медленного положительного отклонения с максимумом при задержке относительно пика около 150 мс (верхний график на рис. 3а). У одного из нейронов, зарегистрированных в этой точке, наблюдался весьма слабый максимум фазовой гистограммы, построенной на периоде сердцебиений (нижний график, рис. 3а). Уже незначительное вертикальное смещение электродов привело к уменьшению амплитуды и к временному сдвигу максимума ЛКВП (см. рис. 3б). В последующем мы регистрировали ЛКВП в течение трех месяцев во всех оставшихся точках этой проходки. Хорошо выраженных локальных потенциалов, синхронизованных с сердцебиениями, обнаружить не удалось. Только вблизи окончания проходки слабые ответы могли быть выявлены. При этом достоверные экстремумы ЛКВП отмечались только после усреднения нескольких десятков тысяч сердцебиений и иногда даже при суммировании результатов, полученных в нескольких близко расположенных точках отведения (см. рис. 3в, г).

На протяжении всей этой проходки осуществлялись выборочные регистрации фазовых гистограмм на периоде ЭКГ для более чем 80 выделенных одиночных нейронов. Ни у одной из этих клеток четкой синхронности импульсации с ЭКГ выявить не удалось.

Локусы, в которых биоэлектрическая активность хотя бы слабо отражала сердечные сокращения, отмечались либо в самом начале проходки, там, где имелась вероятность того, что электроды располагались во вторичной дорзальной зоне слуховой коры (He, Hashikawa, 1998; Kok et al., 2015), не получающей прямых таламических слуховых входов, либо вблизи ее окончания, где было возможно достижение вторичной слуховой зоны АП. Можно констатировать, что в первичной слуховой зоне височной коры кошки нам не удалось обнаружить выраженных ЛКВП.



**Рис. 3.** Шесть примеров локальных кардиосинхронизованных вызванных потенциалов (ЛКВП) — (верхние кривые) и гистограмм импульсной активности, зарегистрированных в данной точке одиночных нейронов, построенных также на периоде сердечного ритма (нижние кривые) для шести точек погружения регистрирующей пары электродов через первичную слуховую зону коры кошки. Обозначения как на рис. 1.

Среди нейронов этой зоны, которые в подавляющем большинстве активно реагировали на звуковые сигналы, также не было отмечено импульсации, синхронизированной с ритмом сердечных сокращений.

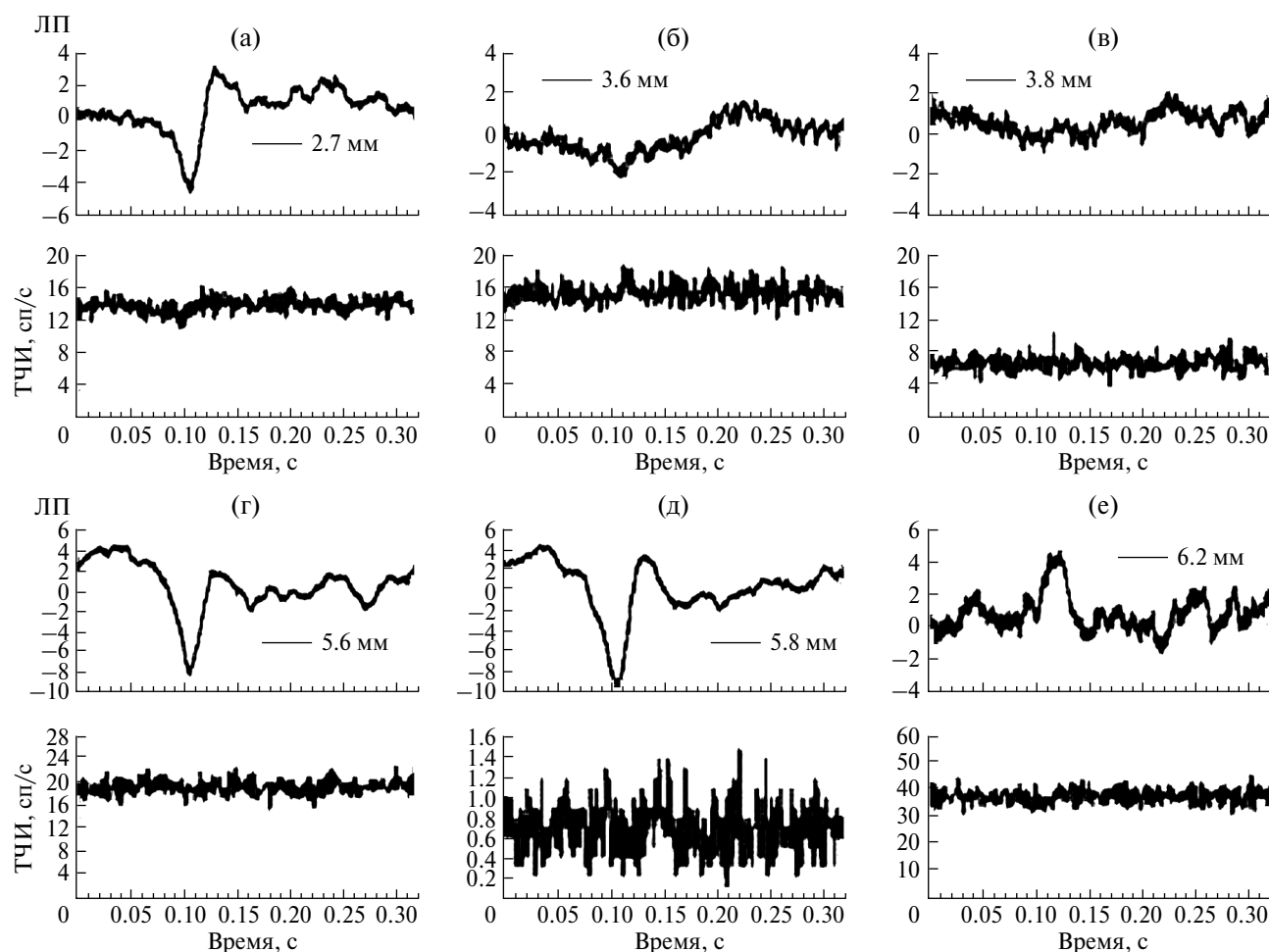
В двух последних проходах электродной пары, локализованных существенно каудальнее двух первых и недалеко друг от друга, ЛКВП нередко можно было отметить. В обоих проходах электродов наиболее выраженные ответы обнаруживались в начальных точках регистрации, где наблюдалось резкое отрицательное отклонение с максимумом, задержанным примерно на 100 мс относительно пика R ЭКГ (рис. 4а, г, д). При дальнейшем погружении микроэлектродов этот пик ЛКВП мог резко расшириться, уменьшаясь по амплитуде (рис. 4б, в), или даже изменить свою полярность (рис. 4е). Что касается активности одиночных нейронов этой зоны коры, то она

весьма редко проявляла выраженную причинную связь с сердцебиениями, и эти изменения обычно были весьма незначительными.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Вопрос о роли и значении воспроизведения кардиоритма в коре головного мозга весьма далек от своего решения. Отвлекаясь от ассоциаций с гипотезами античных философов, можно констатировать, что этот вопрос до настоящего времени оставался недостаточно изученным и ЭЭГ ответы на сердечные сокращения у животных обычно рассматривали как артефакт, требующий удаления. Как уже указывалось выше, только в последние годы к этому вопросу обратились специалисты, использующие ЭЭГ и более пространственно локализованную МРТ человека для оценки состояния мозга. При этом обнаружили множественные корреляции между сознательным





**Рис. 4.** Локальные кардиосинхронизованные вызванные потенциалы (ЛКВП) — верхние кривые и гистограммы импульсной активности одиночных нейронов, построенные также на периоде сердечного ритма (нижние кривые) для трех точек третьего (а–в) и четвертого (г–е) погружений. Обозначения как на рис. 1.

восприятием стимула и выраженностью реакции на сердечные сокращения.

Однако очевидно, что, как у животных, так и у человека, основной вклад в ответ суммарной ЭЭГ, регистрируемой макроэлектродом от поверхности головы или эпидурально и усредняемой по периоду кардиограммы, определяется прямым затеканием токов, возникающих непосредственно в сердечной мышце. Естественно, что этот ответ был приблизительно одним и тем же за все время регистрации, причем его анализ, осуществленный в работе (Лаврова и др., 2019), был подтвержден и в наших экспериментах. Кроме того, эти авторы выявили отклонение ЭЭГ, смещенное относительно пика R кардиограммы примерно на 70–120 мс. В нашей работе именно на этом участке кардиограммы мы чаще, чем на других, наблюдали выраженные экстремумы ЛКВП и особенности фазовых гистограмм одиночных нейронов (см. рис 1, 2, 4).

Хотя в большинстве исследований, выполненных как на наркотизированных, так и на бодрствующих животных, не уделялось специального внимания возможной связи реакции нейронов коры с сердечными сокращениями, такие корреляции все же были отмечены в нескольких публикациях. Так, у одной из клеток передней поясной коры кошки колебания с частотой сердечных сокращений наблюдались в автокорреляционной функции импульсации в отсутствие контролируемых стимулов. Вид функции зависел от состояния животного, причем наиболее четкая синхронизация с сердцебиениями имела место в состоянии глубокого сна (Frysinger, Nager, 1986, см. рис. 4 в указанной публикации). В других публикациях также отмечались корковые или таламические нейроны, импульсация которых была синхронизована с сердечным ритмом, причем авторы по-разному трактовали это явление. Так, в работе (Massimini et al., 2000) авторы предпочли исключить подобные нейроны из рассмотрения, предположив их



возможную зависимость от локальных процессов, в частности, от чувствительности клеток к изменению тонуса близлежащих сосудов. Хотя нельзя полностью исключить эту возможность, в случае наших наблюдений она представляется маловероятной хотя бы вследствие выраженной избирательности ответов по отношению к точке регистрации и сложности их временной формы, особенно очевидной при регистрациях, полученных при первой проходке электродов (см. рис. 1, 2). При анализе активности мозга человека подобная трактовка этих потенциалов в последние годы также не находит каких-либо подтверждений. Однако совсем недавно нейроны, импульсация которых была синхронизована с ритмом сердца, но зависела от тонуса близкорасположенных сосудов, были описаны в обонятельной зоне коры крыс (Salameh et al., 2024). Заметим, что мы, как и авторы данной статьи, не рассматриваем такие ответы в качестве артефактов, поскольку они могут быть включены в ансамбли, сопоставляющие внешние сигналы с сигналами от внутренней среды организма.

В наших экспериментах наиболее часто выраженные локальные пики ЛКВП и максимумы активности одиночных нейронов наблюдались во временном интервале 80–150 мс после пика R ЭЭГ. Этот участок соответствует и пику, выявленному при суммации общей ЭЭГ, зарегистрированной над лобно-теменной областью коры кошки в работе (Лаврова и др., 2019). Если принять во внимание различие частоты сердцебиений у кошки и у человека, можно отметить, что фазы экстремумов функции у этих двух объектов обычно довольно близки, составляя около половины периода после пика систолы (Lechinger et al., 2005). Однако в некоторых точках коры кошки экстремумы ЛКВП и мгновенной плотности импульсации одиночных клеток могли находиться и на других участках периода сердцебиений, что косвенно свидетельствует о сложности и специфичности обработки информации о сердечной активности в коре ненаркотизированных животных.

Наиболее выраженные ответы, синхронизированные с сердцебиениями, были отмечены нами при первой, антериорной проходке электродов в височной коре исследуемого животного. Поскольку мы не проводили постмортального исследования положения электродов, мы можем судить об их локализации только по данным магнитореzonансной томографии, осуществленной до проведения экспериментов, координатам точки начала трека и исходя из особенностей регистрируемых ответов.

С большой долей вероятности при выбранной локализации начальной точки мы могли бы попасть в первичную переднюю зону слуховой коры,

получающую прямые проекции из вентрального ядра медиального коленчатого тела. Однако сам ход изменений ответов при этой проходке и свойства зарегистрированных здесь одиночных нейронов не позволяют принять это предположение. Прежде всего, в этой проходке электродов мы не наблюдали выраженных акустических ответов с латентными периодами менее 20 мс, которые характерны для первичных отделов слуховой коры. Наблюдаемые свойства зарегистрированной биоактивности никак не противоречат предположению о том, что электроды располагались в глубине передней эктосильвиевой борозды кошки, содержащей вторичную зону слуховой рецепции — FAES. В пользу этого свидетельствуют следующие особенности проходки: поздний и очень резкий вход в серое вещество мозга, инверсия вызванного потенциала на определенном участке погружения и сравнительно позднелатентные и нередко тормозные реакции одиночных нейронов.

Все авторы, исследовавшие эту зону коры кошки (Clarey, Irvine, 1990a, b; Meredith, Clemo, 1989; Las et al., 2008; Mellott et al., 2010; Jiang et al., 2000; Meredith et al., 2018), подчеркивали ее весьма сложную и вариабельную геометрию. В частности, указывалось, что вентральный и дорсальный края борозды нередко сливаются, образуя дополнительный замкнутый карман, находящийся внутри коры.

Интересно, что эфференты этой вторичной зоны идут, главным образом, в переднее двухолмие, формируя таким образом очевидную связь зрительного и слухового восприятия (Clarey, Irvine, 1990b; Meredith, Clemo, 1989). При некоторых видах наркоза слуховая активность зоны FAES подавлена полностью, но при кетамин-уретановой анестезии ответы часто продолжают в течение всех 100 мс действия широкополосного стимула (Jiang et al., 2000; Las et al., 2008). Подробного описания реакций, возникающих в ответ на звуковые сигналы, в этой области мозга не проводилось, но все авторы отмечали отсутствие тонотопической организации и наличие широкого набора реакций на шумовые и тональные сигналы. Именно в данной зоне нами наблюдались особенно яркие примеры ответов нейронов височной зоны одновременно и на звуки, и на висцеральную активацию, а конкретно — на сокращение сердечной мышцы.

В настоящее время мы не в состоянии определять реальный генез разнообразных экстремумов ЛКВП, регистрируемых в исследованных точках коры. Более того, нам не вполне ясно, почему в большинстве локусов, в которых достаточно четко можно выявить ЛКВП, реакция регистрируемых одиночных клеток часто не проявляет такой синхронизации. Эти вопросы остаются открытыми. Однако выявленные существенные различия

в степени выраженности и в форме ЛКВП в разных точках височной коры, несомненно, свидетельствуют о том, что сердечная деятельность реально воспроизводится в нейрональной активности этой зоны мозга. Укажем, что примененный метод дифференциальной регистрации потенциалов прямо свидетельствует о возникновении специфического ответа на сердцебиения именно в локальной области мозга между двумя электродами.

Специальный интерес представляет тот факт, что связь с ЭКГ фактически отсутствует в первичной слуховой зоне, получающей прямые таламические сенсорные входы. В то же время она выражена вполне четко во вторичных сенсорных зонах, богато иннервируемых наряду со слуховыми мультисенсорными афферентами. Естественно допустить, что такие зоны более тесно связаны с ощущением собственного “Я” и понятием самосознания.

Представляется, что антропоцентричность наших подходов к проблеме ощущения собственного “Я” весьма ярко проявляется в литературе, исследующей взаимодействие этого понятия с интерорецептивными сенсорными входами. Характерно, что в обзоре (Frewen et al., 2020), в котором тщательно анализируется роль интерорецепции в самосознании, практически ничего не говорится про животных, а в обзоре, озаглавленном: “Самосознание животных” (Edelman, 2009), вообще не упомянуто слово “сердце”.

Нельзя не согласиться с подразделением ощущения собственного “Я” на два уровня, определяемых многими авторами как первичное и вторичное самосознание. Первое из них соответствует непосредственному восприятию субъектом внешних (или внутренних) сигналов. Иногда предполагается, что первичное сознание может присутствовать у многих представителей фауны, включая даже беспозвоночных. Вторичное самосознание, непосредственно связанное с памятью, предвидением и даже мышлением, вероятнее всего, существует только у немногих представителей животного мира. При этом часто считается, что вторичное сознание базируется на первичном и не может существовать без него. Этот тезис в настоящее время представляется не очевидным. Именно вторичное сознание демонстрируют развитые системы искусственного интеллекта, притом что первичное у них, вероятно, все-таки отсутствует. Есть основания полагать, что взаимодействие центральной нервной системы с ритмикой сердца имеет прямое отношение именно к первичному самосознанию как у человека, так и у животных. Наличие первичного сознания у многих представителей животного мира активно обсуждается в последние годы, что нашло отражение в Нью-йоркской декларации о самосознании у животных (Andrews,

2024). Нам представляется, что изучение ЛКВП и синхронизированных с сердцем нейрональных ответов в различных отделах коры головного мозга животных является перспективным методом для анализа этой проблемы.

Эксперименты, на которых основывается публикация, поддерживались грантами РФФИ.

Н.Г. Бибиков выражает глубокую благодарность рецензентам статьи за ценные замечания и подчеркивает свою личную ответственность за ее возможные ошибки.

## ВКЛАД АВТОРОВ

Н.Г. Бибиков — постановка задачи, проведение экспериментов, обработка результатов, написание статьи. И.Н. Пигарев — постановка задачи, создание установки, подготовка объекта, обеспечение работы, проведение основных экспериментов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бибиков Н. Г., Низамов С. В., Пигарев И. Н. Нейронные реакции коры мозга кошки на звуки, поступающие с фронтального направления (методические аспекты). *Труды всероссийской акустической конференции*. СПб: Политех-Пресс, 2020. С. 281–284. ISBN 978–5–7422–7029–4
- Лаврова В. Д., Бусыгина И. И., Пигарев И. Н. Отражение активности сердца в электроэнцефалограмме кошек в периоды медленного сна. *Сенсорные системы*. 2019. Т. 33. С. 70–76. DOI: 10.1134/S0235009219010086
- Мусящикова С. С., Черниговский В. Н. *Кортикальное и субкортикальное представительство висцеральных систем*. Л.: Наука, 1973. 288 с.
- Пигарев И. Н., Бибиков Н. Г. Исследование вовлечения “слуховых” зон височной коры мозга кошки в период сна в анализ информации, поступающей от висцеральных органов. *Тезисы IX Международного форума “Сон-2022”*. М.: “Сам полиграфист”. С. 6. ISBN: 978–5–00166–638–7
- Al E., Iliopoulos F., Nikulin V. V., Villringer A. Heartbeat and somatosensory perception. *NeuroImage*. 2021. V. 238. Article 118247. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage>
- Andrews-Hanna J.R., Smallwood J., Spreng R. N. The default network and self-generated thought: component processes, dynamic control, and clinical relevance. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 2014. V. 1316. P. 29–52. URL: <https://doi.10.1111/nyas.12360>.
- Andrews K., Birch J., Sebo J., Sims T. *Background to the New York Declaration on Animal Consciousness*. 2024. URL: <https://nydeclaration.com>

- Arnau S., Sharifian F., Wascher E., Larra M. Removing the cardiac field artifact from the EEG using neural network regression. *Psychophysiology*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1111/psyp.14323>
- Azzalini D., Rebollo I., Tallon-Baudry C. Visceral signals shape brain dynamics and cognition. *Trends in Cognit. Sci.* V. 23. P. 488–509. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tics.2019.03.007>
- Babo-Rebelo M., Richter C. G., Tallon-Baudry C. Neural responses to heartbeats in the default network encode the self in spontaneous thoughts. *J. Neurosci.* 2016. V.36. P. 7829–7840. URL: <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0262–16.2016>
- Babo-Rebelo M., Buot A., Tallon-Baudry C. Neural responses to heartbeats distinguish self from other during imagination. *NeuroImage*. 2019. V. 191. P. 10–20. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.02.012>
- Bibikov N. G. Functional studies of the primary auditory cortex in the cat. *Neurosci. Behav. Physiol.* 2021. V. 51. P. 1169–1189. URL: <https://doi.org/10.1007/s11055–021–01177–0>
- Candia-Rivera D. Brain-heart interactions in the neurobiology of consciousness. *Current Res. Neurobiol.* 2022. V.3. Article 100050. URL: <https://doi.org/10.1016/j.crneur.2022.100050>
- Chouchou F., Mauguière F., Vallayer O. et al. How the insula speaks to the heart: Cardiac responses to insular stimulation in humans. *Human Brain Mapping*. 2019. V. 40. URL: <https://doi.org/10.1002/hbm.24548>
- Clarey J. C., Irvine D. R. The anterior ectosylviansulcal auditory field in the cat: I. An electrophysiological study of its relationship to surrounding auditory cortical fields. *J. Comp. Neurol.* 1990a. V. 301. P. 289–303. URL: <https://doi.org/10.1002/cne.903010211>
- Clarey J. C., Irvine D. R. The anterior ectosylviansulcal auditory field in the cat: II. A horseradish peroxidase study of its thalamic and cortical connections. *J. Comp. Neurol.* 1990b. V. 301. P. 304–324. URL: <https://doi.org/10.1002/cne.903010212>
- Clarke E. L. Aristotelian concepts of the form and function of the brain. *Bull. Hist. Medicine*. 1963. V. 37. P. 1–14.
- Coll M. P., Hobson H., Bird G., Murphy J. Systematic review and meta-analysis of the relationship between the heartbeat-evoked potential and interoception. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2021. V. 122. P. 190–200. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.12.012>
- Dai C., Wang J., Xie J. et al. Removal of ECG artifacts from EEG using an effective recursive least square notch filter. *IEEE Access*. 2019. V. 7. P. 158872–158880. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2949842>
- Edelman D. B. Animal Consciousness // William P. Banks, (Editor), *Encyclopedia of Consciousness*. 2009. Oxford: Elsevier. V. 1. P. 23–36.
- Erisir A., Van Horn S. C., Sherman S. M. Relative numbers of cortical and brainstem inputs to the lateral geniculate nucleus. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 1997. V. 94. P. 1517–1520. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.94.4.1517>
- Fitzpatrick D., Diamond I. T., Raczkowski D. Cholinergic and monoaminergic innervation of the cat's thalamus: comparison of the lateral geniculate nucleus with other principal sensory nuclei. *J. Comp. Neurol.* 1989. V. 288. P. 647–675. URL: <https://doi.org/10.1002/cne.902880411>
- Frewen P., Northoff G., Riva G. et al. Neuroimaging the consciousness of self: review, and conceptual-methodological framework. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2020. V. 112. P. 164–212. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.01.023>
- Frysinger R., Harper R. Cardiac and respiratory relationships with neural discharge in the anterior cingulate cortex during sleep-waking states. *Exp. Neurol.* 1986. V. 94. P. 247–263. URL: [https://doi.org/10.1016/0014–4886\(86\)90100–7](https://doi.org/10.1016/0014–4886(86)90100–7)
- Gray M. A., Taggart P., Sutton P. M. et al. A cortical potential reflecting cardiac function. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 2007. V. 104. P. 6818–6823. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.0609509104>
- Gross C. G. Aristotle and the brain. *Neuroscientist*. 1995. V.1. P. 245–250. <https://doi.org/10.1177/107385849500100408>
- He J., Hashikawa T. Connections of the dorsal zone of cat auditory cortex. *J. Comp. Neurol.* 1998. V. 400. P. 334–448. URL: [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096–9861\(19981026\)400:3<334::aid-cne4>3.0.co;2–9](https://doi.org/10.1002/(sici)1096–9861(19981026)400:3<334::aid-cne4>3.0.co;2–9)
- Jiang H., Lepore F., Poirier P., Guillemot J. P. Responses of cells to stationary and moving sound stimuli in the anterior ectosylvian cortex of cats. *Hear. Res.* 2000. V. 139. P. 69–85. URL: [https://doi.org/10.1016/S0378–5955\(99\)00176–8](https://doi.org/10.1016/S0378–5955(99)00176–8)
- Kim K., Ladenbauer J., Babo-Rebelo M. et al. Resting-state neural firing rate is linked to cardiac-cycle duration in the human. *J. Neurosci.* 2019. V. 39. P. 3676–3686. URL: <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2291–18.2019>
- Kok M. A., Stolzberg D., Brown T. A., Lomber S. G. Dissociable influences of primary auditory cortex and the posterior auditory field on neuronal responses in the dorsal zone of auditory cortex. *J. Neurophysiol.* 2015. V. 113. P. 475–486. URL: <https://doi.org/10.1152/jn.00682.2014>
- Las L., Shapira A. H., Nelken I. Functional gradients of auditory sensitivity along the anteriorectosylvian sulcus of the cat. *J. Neurosci.* 2008. V. 28. P. 3657–3667. URL: <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4539–07.2008>
- Lechinger J., Heib D. P., Gruber W., Schabus M., Klimesch W. Heartbeat-related EEG amplitude and phase modulations from wakefulness to deep sleep: Interactions with sleep spindles and slow oscillations. *Psychophysiol.* 2015. V. 52. P. 1441–1450. URL: <https://doi.org/10.1111/psyp.12508>
- Massimini M., Porta A., Mariotti M., Malliani A., Montano N. Heart rate variability is encoded in the spontaneous discharge of thalamic somatosensory neurones in cat. *J. Physiol.* 2000. V. 526. P. 387–396. DOI: 10.1111/j.1469–7793.2000.t01–1–00387.x
- Mellott J. G., Van der Gucht E., Lee C. C. et al. Areas of cat auditory cortex as defined by neurofilament proteins

- expressing SMI-32. *Hear. Res.* 2010. V. 267. P. 119–136. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2010.04.003>
- Meredith M. A., Clemo H. R. Auditory cortical projection from the anterior ectosylvian sulcus (Field AES) to the superior colliculus in the cat: an anatomical and electrophysiological study. *J. Comp. Neurol.* 1989. V. 289. P. 687–707. <https://doi.org/10.1002/cne.902890412>
- Meredith M. A., Wallace M. T., Clemo H. R. Do the different sensory areas within the cat anterior ectosylvian sulcal cortex collectively represent a network multisensory hub? *Multisens. Res.* 2018. V. 3. P. 793–823. URL: <https://doi.org/10.1163/22134808–20181316>
- Oppenheimer S., Cechetto D. The insular cortex and the regulation of cardiac function. *Comprehen. Physiol.* 2016. V. 6. P. 1081–1133. URL: <https://doi.org/10.1002/cphy.c140076>
- Park H. D., Correia S., Ducorps A., Tallon-Baudry C. Spontaneous fluctuations in neural responses to heartbeats predict visual detection. *Nat. Neurosci.* 2014. V. 17. P. 612–618. URL: <https://doi.org/10.1038/nn.3671>
- Park H. D., Bernasconi F., Salomon R., Tallon-Baudry C., Spinelli L., Seeck M., Schaller K., Blanke O. Neural sources and underlying mechanisms of neural responses to heartbeats, and their role in bodily self-consciousness: an intracranial EEG study. *Cereb. Cortex.* 2018. V. 28. P. 2351–2364. URL: <https://doi.org/10.1093/cercor/bhx136>
- Park H-D., Blanke O. Heartbeat-evoked cortical responses: Underlying mechanisms, functional roles, and methodological considerations. *NeuroImage.* 2019. V. 197. P. 502–511. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.04.081>
- Perez J. J., Guijarro E., Barcia J. A. Suppression of the cardiac electric field artifact from the heart action evoked potential. *Med. Biol. Eng. Comput.* 2005. V. 43. P. 572–581. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02351030>
- Pigarev I. N. The visceral theory of sleep. *Neurosci. Behav. Physiol.* 2014. V. 44. P. 421–434. URL: <https://doi.org/10.1007/s11055–014–9928-z>
- Pigarev I. N., Saalman Y. B., Vidyasagar T. R. A minimally invasive and reversible system for chronic recordings from multiple brain sites in macaque monkeys. *J. Neurosci. Methods.* 2009. V. 181. P. 151–158. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2009.04.024>
- Salameh L., Bitzenhofer S., Hanganu-Opatz I., Dutschmann M., Egger V. Blood pressure pulsations modulate central neuronal activity via mechanosensitive ion channels. *Science (New York, N.Y.)*. 2024. V. 383. P. eadk8511. URL: <https://doi.org/10.1126/science.adk8511>
- Seth A. K., Tsakiris M., Being a beast machine: the somatic basis of selfhood. *Trends Cognit. Sci.* 2018. V. 22. P. 969–981. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.08.008>
- Tallon-Baudry C., Campana F., Park H-D., Babo-Rebelo M. The neural monitoring of visceral inputs, rather than attention, accounts for first-person perspective in conscious vision. *Cortex.* V. 102. P. 139–149. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2017.05.019>
- Tong S., Bezerianos A., Paul J., Zhu Y., Thakor N. Removal of ECG interference from the EEG recordings in small animals using independent component analysis. *J. Neurosci. Methods.* 2001. V. 108. P. 11–17. URL: [https://doi.org/10.1016/S0165–0270\(01\)00366–1](https://doi.org/10.1016/S0165–0270(01)00366–1). PMID: 11459613.
- Verberne A. J., Owens M. Cortical modulation of the cardiovascular system. *Progress in Neurobiol.* 1998. V. 54. P. 149–168. URL: [https://doi.org/10.1016/S0301–0082\(97\)00056–7](https://doi.org/10.1016/S0301–0082(97)00056–7)
- Whalley K. Olfactory neurons can feel the (heart) beat. *Nat. Rev. Neurosci.* 2024. V. 25. P. 210. URL: <https://doi.org/10.1038/s41583–024–00801–5>
- Winston J., Rees G. Following your heart. *Nat. Neurosci.* 2014. V. 17. P. 482–483. URL: <https://doi.org/10.1038/nn.3677>
- Yasui Y., Breder C. D., Saper C. B., Cechetto D. F. Autonomic responses and efferent pathways from the insular cortex in the rat. *J. Comp. Neurol.* 1991. V. 303. P. 355–374. URL: <https://doi.org/10.1002/cne.903030303>
- Yu X. L., Zhang C., Zhang J. B. Causal interactions between the cerebral cortex and the autonomic nervous system. *Sci. China Life Sci.* 2014. V. 57. P. 532–538. URL: <https://doi.org/10.1007/s11427–014–4627–0>

## THE REPRESENTATION OF HEART CONTRACTIONS IN SOME AUDITORY PARTS OF THE TEMPORAL CORTEX IN A NON-ANESTHETIZED CAT

N. G. Bibikov<sup>1, 2\*</sup>, I. N. Pigarev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> JSC N.N. Andreev Acoustic Institute,

4 Shvernika str., Moscow, 117036, Russia

<sup>2</sup> A.A. Kharkevich Institute of Information Transmission Problems of the Russian Academy of Sciences

19 Bolshoy Karetny Lane, Moscow, 127051, Russia

\*Email: nbibikov1@yandex.ru

The inquiry into how cortical neurons respond to interoceptive signals remains a complex puzzle, central to understanding self-awareness in advanced mammals, including humans. A fundamental aspect under scrutiny is whether neural networks in the cerebral cortex of animals can accurately reflect internal bodily states, particularly cardiac activity. To investigate this, we conducted a study on neurons within the temporal cortex of awake and sleeping cat, employing a unique setup enabling continuous differential recording of local potentials in specific cortical regions, alongside monitoring the cardiogram. Our findings revealed intriguing insights. While the

primary auditory cortex (AI) exhibited minimal cellular activity synchronized with heartbeats, the secondary auditory zones within the temporal cortex – the anterior ectosylvian sulcus and the posterior ectosylvian gyrus – displayed synchronization with heart rate. This synchronization was particularly evident in local potentials, with certain neurons within these zones responding to sounds and also exhibiting rhythmic activity aligned with heart contractions. Notably, the complexity of phase histograms derived from the cardiogram period suggests that this synchronization is not attributable to artifacts but rather represents genuine neural responses. Our observations prompt consideration of a hypothesis regarding primary self-awareness in both humans and animals. We propose that this phenomenon emerges from the dynamic interaction of two neural ensembles: one representing external sensory input and the other reflecting interoceptive signals, notably from the heart. This interplay between external and internal stimuli may underpin the fundamental experience of the consciousness of self in highly developed organisms.

**Keywords:** cerebral cortex, cat, heartbeat, self-awareness, auditory perception, local potential, neurons

## REFERENCES

- Bibikov N. G., Nizamov S. V., Pigarev I. N. Neyronnyye reakzii kory mozga koshki na zvuki, postupayushchiye s frontal'nogo napravleniya (metodicheskiye aspekty) [Neural reactions of the cat's cerebral cortex to sounds coming from the frontal direction (methodological aspects)]. *Trudy vserossiyskoy akusticheskoy konferentsii. Politekh-Press Sankt-Peterburg* [Proceedings of the All-Russian Acoustic Conference. Polytechnic Press. St. Petersburg 2020]. 2020. P. 281–284. ISBN978–5–7422–7029–4. (in Russian).
- Lavrova V. D., Busygina I. I., Pigarev I. N. Otrazheniye serdechnoy aktivnosti v elektroentsefalogramme koshek v periody medlennogo sna u koshek [Reflection of heart activity in the electroencephalogram of cats during periods of slow sleep in cats]. *Sensornyye systemy*. [Sensory systems]. 2019. V. 33. P. 70–76. URL: <https://doi.org/10.1134/S0235009219010086> (in Russian).
- Musyashchikova S. S., Chernigovskiy V. N. *Kortikal'noye i subkortikal'noye predstavitel'stvo vistseral'nykh system* [Cortical and subcortical representation of visceral systems]. Leningrad: Nauka, 1973. 288 p. (in Russian).
- Pigarev I. N., Bibikov N. G. Issledovaniye obrabotki “slukhovyykh” zon visochnoy kory mozga koshki v period sna v analize informatsii, postupayushchey ot vistseral'nykh organov [A study of the involvement of the “auditory” zones of the temporal cortex of the cat's brain during sleep in the analysis of information coming from visceral organs.]. *Sbornik IX mezhdunarodnogo foruma “Son” 2022* [Proceedings of the IX International forum “Sleep” 2022.]. Moscow: “Sam poligrafist”. 2022. P. 6. ISBN: 978–5–00166–638–7 (in Russian).
- Al E., Iliopoulos F., Nikulin V. V., Villringer A. Heartbeat and somatosensory perception. *NeuroImage*. 2021. V.238. Article 118247. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage>
- Andrews-Hanna J.R., Smallwood J., Spreng R. N. The default network and self-generated thought: component processes, dynamic control, and clinical relevance. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 2014. V. 1316. P. 29–52. URL: <https://doi.org/10.1111/nyas.12360>
- Andrews K., Birch J., Sebo J., Sims T. *Background to the New York Declaration on Animal Consciousness*. 2024. [nydeclaration.com](http://nydeclaration.com)
- Arnau S., Sharifian F., Wascher E., Larra M. Removing the cardiac field artifact from the EEG using neural network regression. *Psychophysiology*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1111/psyp.14323>
- Azzalini D., Rebollo I., Tallon-Baudry C. Visceral signals shape brain dynamics and cognition. *Trends in Cognit. Sci.* V. 23. P. 488–509. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tics.2019.03.007>
- Babo-Rebelo M., Richter C. G., Tallon-Baudry C. Neural responses to heartbeats in the default network encode the self in spontaneous thoughts. *J. Neurosci.* 2016. V. 36. P. 7829–7840. URL: <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0262–16.2016>
- Babo-Rebelo M., Buot A., Tallon-Baudry C. Neural responses to heartbeats distinguish self from other during imagination. *NeuroImage*. 2019. V. 191. P. 10–20. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.02.012>
- Bibikov N. G. Functional studies of the primary auditory cortex in the cat. *Neurosci. Behav. Physiol.* 2021. V. 51. P. 1169–1189. URL: <https://doi.org/10.1007/s11055–021–01177–0>
- Candia-Rivera D. Brain-heart interactions in the neurobiology of consciousness. *Current Res. Neurobiol.* 2022. V. 3. Article 100050. URL: <https://doi.org/10.1016/j.crneur.2022.100050>
- Chouchou F., Mauguière F., Vallayer O. et al. How the insula speaks to the heart: Cardiac responses to insular stimulation in humans. *Human Brain Mapping*. 2019. V. 40 (9). URL: <https://doi.org/10.1002/hbm.24548>
- Clarey J. C., Irvine D. R. The anterior ectosylvian sulcal auditory field in the cat: I. An electrophysiological study of its relationship to surrounding auditory cortical fields. *J. Comp. Neurol.* 1990a. V. 301. P. 289–303. URL: <https://doi.org/10.1002/cne.903010211>
- Clarey J. C., Irvine D. R. The anterior ectosylvian sulcal auditory field in the cat: II. A horseradish peroxidase study of its thalamic and cortical connections. *J. Comp. Neurol.* 1990b. V. 301. P. 304–324. URL: <https://doi.org/10.1002/cne.903010212>

- Clarke E. L. Aristotelian concepts of the form and function of the brain. *Bull. Hist. Medicine*. 1963. V. 37. P. 1–14.
- Coll M. P., Hobson H., Bird G., Murphy J. Systematic review and meta-analysis of the relationship between the heartbeat-evoked potential and interoception. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2021. V. 122. P. 190–200. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.12.012>
- Dai C., Wang J., Xie J. et al. Removal of ECG artifacts from EEG using an effective recursive least square notch filter. *IEEE Access*. 2019. V. 7. P. 158872–158880. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2949842>
- Edelman D. B. Animal Consciousness. In: William P. Banks, (Editor), *Encyclopedia of Consciousness*. 2009. Oxford: Elsevier. V. 1. P. 23–36.
- Erisir A., Van Horn S. C., Sherman S. M. Relative numbers of cortical and brainstem inputs to the lateral geniculate nucleus. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 1997. V. 94 (4). P. 1517–1520. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.94.4.1517>
- Fitzpatrick D., Diamond I. T., Raczkowski D. Cholinergic and monoaminergic innervation of the cat's thalamus: comparison of the lateral geniculate nucleus with other principal sensory nuclei. *J. Comp. Neurol.* 1989. V. 288. P. 647–675. URL: <https://doi.org/10.1002/cne.902880411>
- Frewen P., Northoff G., Riva G. et al. Neuroimaging the consciousness of self: review, and conceptual-methodological framework. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2020. V. 112. P. 164–212. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.01.023>
- Frysinger R., Harper R. Cardiac and respiratory relationships with neural discharge in the anterior cingulate cortex during sleep-waking states. *Exp. Neurol.* 1986. V. 94. P. 247–263. URL: [https://doi.org/10.1016/0014-4886\(86\)90100-7](https://doi.org/10.1016/0014-4886(86)90100-7)
- Gray M. A., Taggart P., Sutton P. M. et al. A cortical potential reflecting cardiac function. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 2007. V. 104. P. 6818–6823. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.0609509104>
- Gross C. G. Aristotle and the brain. *Neuroscientist*. 1995. V. 1. P. 245–250. URL: <https://doi.org/10.1177/107385849500100408>
- He J., Hashikawa T. Connections of the dorsal zone of cat auditory cortex. *J. Comp. Neurol.* 1998. V. 400. P. 334–448. URL: [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9861\(19981026\)400:3<334::aid-cne4>3.0.co;2-9](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9861(19981026)400:3<334::aid-cne4>3.0.co;2-9)
- Jiang H., Lepore F., Poirier P., Guillemot J. P. Responses of cells to stationary and moving sound stimuli in the anterior ectosylvian cortex of cats. *Hear. Res.* 2000. V. 139. P. 69–85. URL: [https://doi.org/10.1016/S0378-5955\(99\)00176-8](https://doi.org/10.1016/S0378-5955(99)00176-8)
- Kim K., Ladenbauer J., Babo-Rebelo M. et al. Resting-state neural firing rate is linked to cardiac-cycle duration in the human. *J. Neurosci.* 2019. V. 39. P. 3676–3686. URL: <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2291-18.2019>
- Kok M. A., Stolzberg D., Brown T. A., Lomber S. G. Dissociable influences of primary auditory cortex and the posterior auditory field on neuronal responses in the dorsal zone of auditory cortex. *J. Neurophysiol.* 2015. V. 113. P. 475–486. URL: <https://doi.org/10.1152/jn.00682.2014>
- Las L., Shapira A. H., Nelken I. Functional gradients of auditory sensitivity along the anterior ectosylvian sulcus of the cat. *J. Neurosci.* 2008. V. 28. P. 3657–3667. URL: <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4539-07.2008>
- Lechinger J., Heib D. P., Gruber W., Schabus M., Klimesch W. Heartbeat-related EEG amplitude and phase modulations from wakefulness to deep sleep: Interactions with sleep spindles and slow oscillations. *Psychophysiol.* 2015. V. 52(11). P. 1441–1450. URL: <https://doi.org/10.1111/psyp.12508>
- Massimini M., Porta A., Mariotti M., Malliani A., Montano N. Heart rate variability is encoded in the spontaneous discharge of thalamic somatosensory neurones in cat. *J. Physiol.* 2000. V. 526. P. 387–396. DOI: 10.1111/j.1469-7793.2000.t01-1-00387.x
- Mellott J. G., Van der Gucht E., Lee C. C. et al. Areas of cat auditory cortex as defined by neurofilament proteins expressing SMI-32. *Hear. Res.* 2010. V. 267. P. 119–136. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heares.2010.04.003>
- Meredith M. A., Clemo H. R. Auditory cortical projection from the anterior ectosylvian sulcus (Field AES) to the superior colliculus in the cat: an anatomical and electrophysiological study. *J. Comp. Neurol.* 1989. V. 289. P. 687–707. URL: <https://doi.org/10.1002/cne.902890412>
- Meredith M. A., Wallace M. T., Clemo H. R. Do the different sensory areas within the cat anterior ectosylvian sulcal cortex collectively represent a network multisensory hub? *Multisens. Res.* 2018. V. 31(8). P. 793–823. URL: <https://doi.org/10.1163/22134808-20181316>
- Oppenheimer S., Cechetto D. The insular cortex and the regulation of cardiac function. *Comprehen. Physiol.* 2016. V. 6. P. 1081–1133. URL: <https://doi.org/10.1002/cphy.c140076>
- Park H. D., Correia S., Ducorps A., Tallon-Baudry C. Spontaneous fluctuations in neural responses to heartbeats predict visual detection. *Nat. Neurosci.* 2014. V. 17. P. 612–618. URL: <https://doi.org/10.1038/nn.3671>
- Park H. D., Bernasconi F., Salomon R. et al. Neural sources and underlying mechanisms of neural responses to heartbeats, and their role in bodily self-consciousness: an intracranial EEG study. *Cereb. Cortex.* 2018. V. 28. P. 2351–2364. URL: <https://doi.org/10.1093/cercor/bhx136>
- Park H.-D., Blanke O. Heartbeat-evoked cortical responses: Underlying mechanisms, functional roles, and methodological considerations. *NeuroImage*. 2019. V. 197. P. 502–511. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.04.081>
- Perez J. J., Guijarro E., Barcia J. A. Suppression of the cardiac electric field artifact from the heart action evoked potential. *Med. Biol. Eng. Comput.* 2005. V. 43. P. 572–581. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02351030>

- Pigarev I. N. The visceral theory of sleep. *Neurosci. Behav. Physiol.* 2014. V. 44. P. 421–434. URL: <https://doi.org/10.1007/s11055-014-9928-z>
- Pigarev I. N., Saalman Y. B., Vidyasagar T. R. A minimally invasive and reversible system for chronic recordings from multiple brain sites in macaque monkeys. *J. Neurosci. Methods.* 2009. V. 181. P. 151–158. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2009.04.024>
- Salameh L., Bitzenhofer S., Hanganu-Opatz I., Dutschmann M., Egger V. Blood pressure pulsations modulate central neuronal activity via mechanosensitive ion channels. *Science (New York, N.Y.)*. 2024. V. 383. P. eadk8511. URL: <https://doi.org/10.1126/science.adk8511>
- Seth A. K., Tsakiris M., Being a beast machine: the somatic basis of selfhood. *Trends Cognit. Sci.* 2018. V. 22. P. 969–981. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.08.008>
- Tallon-Baudry C., Campana F., Park H-D., Babo-Rebelo M. The neural monitoring of visceral inputs, rather than attention, accounts for first-person perspective in conscious vision. *Cortex.* V. 102. P. 139–149. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2017.05.019>
- Tong S., Bezerianos A., Paul J., Zhu Y., Thakor N. Removal of ECG interference from the EEG recordings in small animals using independent component analysis. *J. Neurosci. Methods.* 2001. V. 108. P. 11–17. URL: [https://doi.org/10.1016/s0165-0270\(01\)00366-1](https://doi.org/10.1016/s0165-0270(01)00366-1). PMID: 11459613
- Verberne A. J., Owens M. Cortical modulation of the cardiovascular system. *Progress in Neurobiol.* 1998. V. 54. P. 149–168. URL: [https://doi.org/10.1016/s0301-0082\(97\)00056-7](https://doi.org/10.1016/s0301-0082(97)00056-7)
- Whalley K. Olfactory neurons can feel the (heart) beat. *Nat. Rev. Neurosci.* 2024. V. 25, P. 210. URL: <https://doi.org/10.1038/s41583-024-00801-5>
- Winston J., Rees G. Following your heart. *Nat. Neurosci.* 2014. V. 17. P. 482–483. URL: <https://doi.org/10.1038/nn.3677>
- Yasui Y., Breder C. D., Saper C. B., Cechetto D. F. Autonomic responses and efferent pathways from the insular cortex in the rat. *J. Comp. Neurol.* 1991. V. 303. P. 355–374. URL: <https://doi.org/10.1002/cne.903030303>
- Yu X. L., Zhang C., Zhang J. B. Causal interactions between the cerebral cortex and the autonomic nervous system. *Sci. China Life Sci.* 2014. V. 57. P. 532–538. URL: <https://doi.org/10.1007/s11427-014-4627-0>

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО ЭФФЕКТИВНАЯ АДАПТИВНАЯ ЦВЕТОВАЯ КОРРЕКЦИЯ

© 2024 г. М. В. Харкевич<sup>1, 2,\*</sup>, О. А. Басова<sup>1</sup>, И. А. Коноваленко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН,  
127051, Москва, пер. Большой Каретный, 19 стр. 1, Россия

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт,  
141707, Долгопрудный, Институтский пер, д. 9, Россия

<sup>3</sup> Федеральный исследовательский центр “Информатика и управление” РАН,  
119333, Москва, ул. Вавилова, д. 44, к. 2, Россия

\*kharkevich@iitp.ru

Поступила в редакцию 25.06.2024 г.

После доработки 25.08.2024 г.

Принята к публикации 30.08.2024 г.

Для получения цифровой фотографии, максимально точно воспроизводящей оригинальную сцену, необходимо решить задачу цветовой коррекции, т.е. найти отображение, переводящее координаты цветового пространства камеры (RGB) в координаты цветового пространства человека (CIE XYZ). В данной статье мы рассматриваем цветовую коррекцию с помощью таблиц поиска (англ. lookup table), заранее построенных для различных условий освещения. Такой подход позволяет достичь высоких скорости и точности при применении цветовой коррекции на устройстве, однако требует больших объемов оперативной памяти, которыми располагают не все устройства, например, мобильные телефоны. Нами предлагается метод автоматического прореживания множества таблиц поиска с минимальными потерями в точности цветовой коррекции. Метод основан на кластеризации отображений, задающих цветовую коррекцию. Для сравнения отображений нами предлагается критерий их схожести, основанный на максимальном различии порождаемых цветов в целевом пространстве стандартного наблюдателя CIE XYZ. Для предложенного критерия в статье приводится эффективный метод вычисления вместе с теоремой, обосновывающей корректность метода.

**Ключевые слова:** адаптивная цветовая коррекция, критерий схожести отображений, таблица поиска, тематическое программирование, кластеризация

DOI: 10.31857/S0235009224040077 EDN: ACVQWZ

### ВВЕДЕНИЕ

#### Цветовая коррекция

Основной задачей цветовой коррекции является получение репродукции, максимально точно воспроизводящей оригинал (Шашлов, 2016, с. 47). Проблема заключается в том, что цвета, регистрируемые сетчаткой глаза человека и сенсором камеры, отличаются (рис. 1). Если функции спектральной чувствительности сенсора камеры линейно выразимы в базисе цветового пространства человека, причем матрица отображения невырождена — Лютера — Айвза (Ives, 1915; Luther, 1927). В таком случае отображение, переводящее координаты цветового пространства камеры (RGB) в цветовое пространство стандартного наблюдателя (CIE XYZ), существует, оно линейно, и цветовую

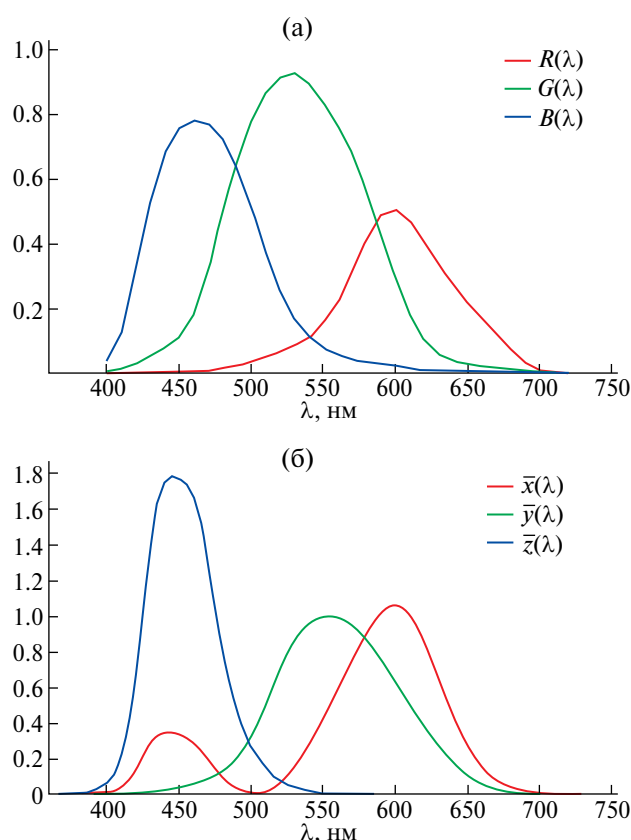
коррекцию можно сделать идеально точно. Однако функции спектральной чувствительности большинства камер сильно отличаются от функций чувствительности глаза человека (рис. 2), и вышеупомнутый критерий не выполняется даже приблизительно. Таким образом, не существует отображения, которое бы переводило координаты цветового пространства камеры (RGB) в координаты цветового пространства человека (CIE XYZ).

Поиск отображения, максимально точно воспроизводящего исходный цветовой образ, осложняется несколькими проблемами. Учитывая коммерческие обстоятельства, для сенсоров не введено единого стандарта на спектральную чувствительность (Solomatov, Akkaynak, 2023), а технологии цветоделения в камерах разнообразны и непрерывно совершенствуются. Поэтому сенсоры каждой отдельной камеры имеют уникальные функции спектральной чувствительности (рис. 3).



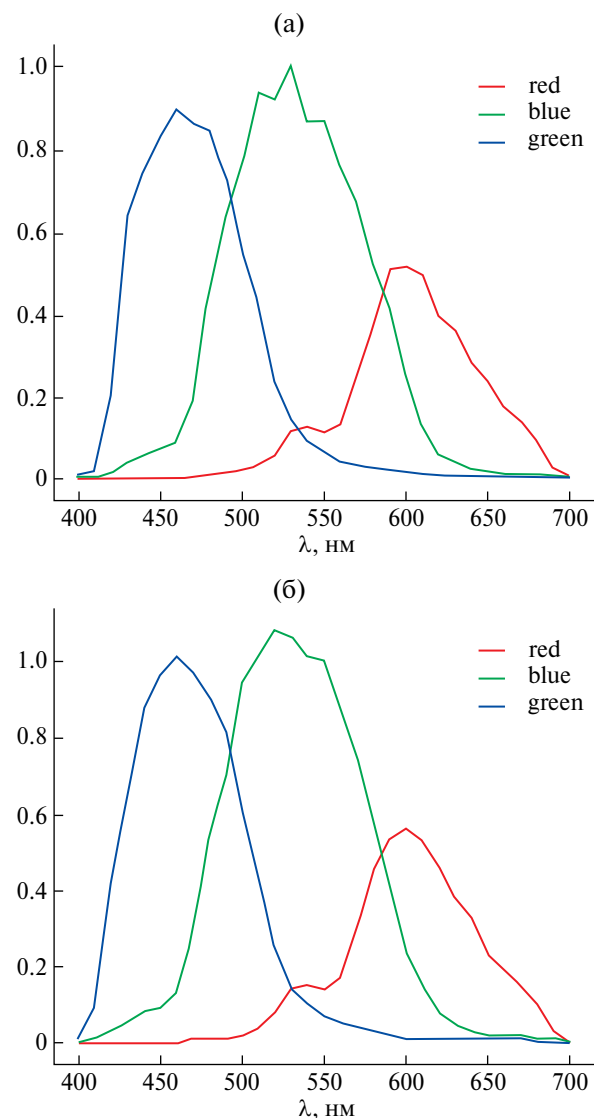


**Рис. 1.** Пример разного восприятия цвета глазом человека (а) и камерой (б). Излучение пульта находится в инфракрасном диапазоне, невидимом для человеческого глаза. Однако с помощью камеры этот сигнал можно зафиксировать.



**Рис. 2.** Функции спектральной чувствительности фотоаппарата Canon EOS600D (а) и человека (б).

Для лучшего понимания проблемы поиска отображения введем понятие модели формирования цвета, не учитывающей последующие преобразования зарегистрированного сигнала.



**Рис. 3.** Функции спектральной чувствительности двух экземпляров камеры модели Canon 40D.

Цветовой сенсор линейно отображает спектральные освещенности фоточувствительной поверхности сенсора в конечномерное пространство цветовых координат (Николаев и др., 2021, с. 15). Такое отображение можно представить следующим образом:

$$\mathbf{c} = \int_0^\infty F(\lambda) \mathbf{X}(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где  $\mathbf{c}$  — вектор координат регистрируемого цвета;  $\lambda$  — длина волны;  $F(\lambda)$  — спектральная освещенность сенсора,  $\mathbf{X}(\lambda)$  — вектор функций спектральной чувствительности сенсора к разным длинам волн.

Построение цветовой коррекции также осложняется метамерия. Метамерией двух излучений

различных спектральных составов  $F_1(\lambda) \sim F_2(\lambda)$  называют ситуацией, когда они оказываются визуально неразличимы, т.е. выполнено следующее условие:

$$\int_0^\infty (F_1(\lambda) - F_2(\lambda)) X(\lambda) d\lambda = 0. \quad (2)$$

Каждому из сенсоров присуща метамерия, причем множества неразличимых спектров уникальны для каждого сенсора (в том числе глаза человека). Поэтому принципиально невозможно построить биективное отображение между пространством сенсора и пространством стандартного наблюдателя.

Кроме того, даже для одного и того же сенсора множества неразличимых окрасок будут различаться в зависимости от источника освещения, под которым они наблюдаются. Это приводит к тому, что цветовая коррекция должна зависеть от доминирующего источника освещения в сцене.

Таким образом, задача цветовой коррекции оказывается нетривиальной, несмотря на простоту ее формулировки.

### Адаптивная цветовая коррекция

Классическая цветовая коррекция предполагает применение только одного отображения независимо от условий съемки. Такой подход может быть неточным при изменении условий освещения.

Адаптивная цветовая коррекция основана на построении уникальных отображений для разных условий освещения. Такой подход учитывает то, что для каждого источника освещения множества неразличимых окрасок уникальны, поэтому за счет применения разных отображений получается повысить точность цветовой коррекции. Такую цветовую коррекцию можно осуществлять различным образом: линейно (Gasparini, Schettini, 2003; Mantiuk et al., 2009; Sari et al., 2015) и нелинейно (Moroney, 2000; Finlayson et al., 2015; Soshin et al., 2023). Например, Юита Сари предлагает использовать линейную регрессию для решения задачи цветовой коррекции (Sari et al., 2015), а Грэм Финлейсон — производить отображения из цветового пространства камеры в цветовое пространство человека нелинейно, используя расширение размерности исходного пространства с помощью корней из полиномов различных степеней (англ. Root Polynomial Color Correction) (Finlayson et al., 2015). По сравнению с классической адаптивная цветовая коррекция является более точным подходом, но она сложнее вычислительно, что затрудняет ее использование, например, в мобильных телефонах.

### Цветовая коррекция с помощью таблиц поиска

Проблему сложных вычислений при использовании адаптивной цветовой коррекции можно решить с помощью таблиц поиска (англ. lookup table) (Fernando, 2005). Таблица поиска — это структура данных, в которой хранятся результаты предподсчета некоторой функции, в нашем случае — отображения координат из цветового пространства камеры в цветовое пространство человека. Она представляет собой массив, используемый для замены вычислений некоторой сложной функции на операцию простого поиска с дальнейшей интерполяцией. Таблицы поиска имеют широкое применение в цветовой коррекции (Kim et al., 2003; Han, 2004; Morovic, Luo, 2001). Такие таблицы с контролируемой точностью могут описать любое гладкое преобразование, при этом они очень быстры в применении, даже к большим изображениям и видеопотоку. Однако они требуют большого количества памяти, так как для каждого отдельного отображения строится уникальная таблица поиска (например, для одной таблицы среднего размера  $40 \times 40 \times 40$  потребуется приблизительно 250 КБ) (Fernando, 2005). В условиях съемки происходит оценка спектра излучения (она может производиться автоматически или настраиваться вручную), а также поиск ближайшего к нему источника, для которого хранится таблица. Далее полученным RGB цветам ставятся в соответствие координаты CIE XYZ с помощью выбранной таблицы поиска. Такой подход является быстрым, не уступает по точности адаптивной цветовой коррекции, но в большинстве случаев мы не располагаем большими объемами свободной оперативной памяти на устройстве, поэтому он также имеет существенные ограничения в применении.

### Цель работы

Таким образом, все рассмотренные решения имеют существенные недостатки. В данной работе мы предлагаем модификацию цветовой коррекции с помощью таблиц поиска, которая нацелена на решение проблемы требуемых больших объемов памяти при той же скорости работы алгоритма, а также не имеющую значительных потерь в точности отображения.

### Структура статьи

Далее статья устроена следующим образом. Второй раздел описывает рассматриваемый метод цветовой коррекции, также приводятся преимущества выбранного метода. В третьем разделе предлагается эффективный метод применения таблиц поиска, основанный на кластеризации

отображений. Данный метод решает проблему необходимых объемов памяти при той же скорости работы алгоритма. Далее, в четвертом разделе, вводится критерий схожести отображений, на основе которого предлагается осуществлять кластеризацию. В пятом приводится эффективный метод вычисления вместе с теоремой, обосновывающей корректность метода.

### РАССМАТРИВАЕМЫЙ МЕТОД ЦВЕТОВОЙ КОРРЕКЦИИ

В данной работе мы будем рассматривать отображения, которые осуществляются с помощью расширения размерности исходного пространства. В литературе предлагаются разные алгоритмы расширения размерности, например, с использованием корней из полиномов различных степеней (англ. Root Polynomial Color Correction, далее – RPCC) (Finlayson et al., 2015) или с помощью дробно-рациональных признаков вида частного от многочленов (англ. Scalable Rational Color Correction, далее SRCC) (Soshin et al., 2023). Такие подходы являются более точными, чем линейная цветовая коррекция.

Координаты расширенного пространства для RPCC 2-й степени выглядят следующим образом:

$$p(c_c) = (R, G, B, \sqrt{RG}, \sqrt{GB}, \sqrt{RB})^T, \quad (3)$$

где  $c_c = (R, G, B)$  – вектор цветовых координат в пространстве RGB;  $p$  – вектор-функция, задающая многомерные цветовые координаты камеры 2-й степени.

Для модели SRCC координаты пространства 2-й степени записываются следующим образом:

$$p(c_c) = \left( \frac{RG}{R+G+B}, \frac{RB}{R+G+B}, \frac{GB}{R+G+B} \right). \quad (4)$$

В качестве примера мы привели формулы для моделей второй степени, однако на практике для достижения лучшей точности могут применяться модели RPCC и SRCC более высоких степеней. Для них вычисляется еще больше координат, которые строятся аналогичным образом, но с использованием корней более высокого порядка и большего количества умножений, что повышает их вычислительную сложность. Это делает задачу построения быстрых в применении таблиц поиска еще более актуальной.

При использовании координат расширенного цветового пространства камеры (3, 4) оценка цветовых координат в пространстве CIE XYZ будет производиться следующим образом:

$$\hat{c}_h = Mp(c_c), \quad (5)$$

где  $M$  – матрица линейного отображения из расширенного пространства RGB в пространство CIE XYZ;  $\hat{c}_h$  – оценка координат пространства CIE XYZ.

Преимуществом ввода как RPCC, так и SRCC координат является большее количество признаков. Также для обеих моделей имеет место однородность 1-й степени, или шкалируемость:

$$p(kc) = kp(c). \quad (6)$$

Однородность 1-й степени (6) полезна для решения задачи цветовой коррекции, так как при ее выполнении линейное увеличение яркости при неизменной цветности в цветовом пространстве RGB влечет за собой линейное изменение яркости в цветовом пространстве CIE XYZ. При этом цветность также не изменяется. Цветностью называется цвет без учета яркости.

### ЭФФЕКТИВНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ТАБЛИЦ ПОИСКА

В зависимости от известных условий съемки используются различные отображения из пространства RGB в CIE XYZ. Для разных условий съемки матрицы отображений могут порождать схожие цветовые пространства, в таком случае можно заменить мало отличающиеся друг от друга отображения одним, а далее произвести предподсчет таблиц поиска только для отображенных.

Поставим задачу нахождения  $k$  наиболее непохожих матриц отображения из  $n$  данных, что автоматически означает исключение наиболее похожих. Эту задачу будем решать полным перебором. Для поиска нужно рассмотреть  $C_n^k$  наборов матриц по  $k$  элементов. Для определения наиболее непохожего набора в каждом из них найдем минимальное значение некоторого критерия схожести для пар отображений, входящих в него. Далее сравним эти минимальные значения и выберем из них максимальное:

$$i_1^*, i_2^*, \dots, i_k^* = \operatorname{argmax}_{i_1, i_2, \dots, i_k} \min_{i < j (i, j \in \{i_1, i_2, \dots, i_k\})} \Delta_{ij}, i_j \in \{1, \dots, n\}, \quad (7)$$

где количество всевозможных наборов  $i_1, i_2, \dots, i_k$  равно  $C_n^k$ ,  $i_1^*, i_2^*, \dots, i_k^*$  – отобранный набор.

Тот набор, которому соответствует это значение, содержит в себе наиболее различные отображения. Далее для  $k$  выбранных отображений производится предподсчет таблиц поиска. В условиях съемки происходит оценка спектра излучения, после чего происходит его классификация к ближайшей таблице из предподсчитанных. Наконец, полученным цветам из RGB ставятся

в соответствие цвета из CIE XYZ с помощью выбранной таблицы поиска.

Для кластеризации отображений необходим критерий их схожести. Следует отметить, что сравнивать матрицы поэлементно бессмысленно, так как, на первый взгляд, похожие матрицы могут порождать совершенно разные пространства, и наоборот. Сама же замена нескольких близких отображений одним дает возможность экономии памяти без существенных потерь точности цветовой коррекции.

В следующем разделе мы предлагаем пример критерия схожести отображений, с помощью которого удобно производить их кластеризацию.

### КРИТЕРИЙ СХОЖЕСТИ ОТОБРАЖЕНИЙ

Введем критерий схожести двух отображений:

$$\Delta_{ij} = \max_{c_i \in C} \|M_i p(c_i) - M_j p(c_i)\|_2 = \max_{c_i \in C} \|(M_i - M_j)p(c_i)\|_2, \quad (8)$$

где  $M_i, M_j$  – матрицы, задающие отображения из цветового пространства RGB в пространство CIE XYZ;  $C$  – единичный RGB-куб (рис. 4).

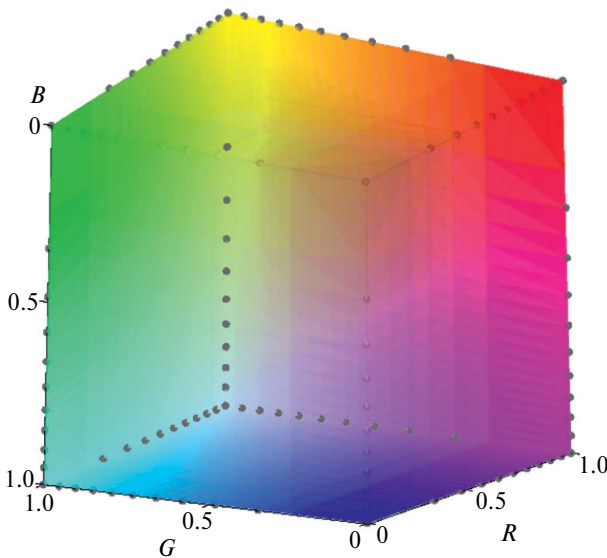


Рис. 4. Единичный RGB-куб.

Критерий (8) представляет собой максимальное евклидово расстояние между цветами, порожаемыми двумя отображениями, т.е. цветовую невязку между этими отображениями в худшем случае.

### ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ КРИТЕРИЯ

Аналитическое вычисление критерия (8) затруднительно, а численное предполагает 3D-оптимизацию. Следующая теорема, вдохновленная схожим примером в (Коноваленко, 2021), позволяет свести эту задачу к 2D-оптимизации с помощью замены  $M_i - M_j = A$ , что значительно ускоряет работу алгоритма оптимизации.

**Теорема.** Максимум функции  $\max_{c \in C} \|Ap(c)\|_2$  на единичном кубе  $C$ , где  $A$  – некоторая матрица, а  $p(c)$  обладает свойством шкалируемости (6), достигается на трех гранях этого куба  $F$ , содержащих точку  $(1, 1, 1)$ :

$$\max_{c \in C} \|Ap(c)\|_2 = \max_{c \in F} \|Ap(c)\|_2. \quad (9)$$

**Доказательство.** Проведем доказательство от противного. Пусть максимум функции  $\|Ap(c)\|_2$  на  $C$  не достигается на  $F$ :

$$\max_{c \in C} \|Ap(c)\|_2 \neq \max_{c \in F} \|Ap(c)\|_2. \quad (10)$$

Так как  $C \supset F$ , то:

$$\max_{c \in C} \|Ap(c)\|_2 \geq \max_{c \in F} \|Ap(c)\|_2. \quad (11)$$

Из (10) и (11) следует, что:

$$\max_{c \in C} \|Ap(c)\|_2 > \max_{c \in F} \|Ap(c)\|_2. \quad (12)$$

Тогда максимум достигается в некоторой точке  $c^* \in C \setminus F$ , т.е.

$$\|Ap(c^*)\|_2 = \max_{c \in C} \|Ap(c)\|_2 > \max_{c \in F} \|Ap(c)\|_2. \quad (13)$$

Пусть сначала  $c^* = 0$ . Тогда, в силу (13), свойства однородности 1-й степени  $p(c)$  (6) и неотрицательности модуля, можно записать следующее:

$$0 = \|Ap(c^*)\|_2 > \max_{c \in F} \|Ap(c)\|_2 \geq 0. \quad (14)$$

Получено противоречие, а именно  $0 > 0$ , следовательно, в этом случае верно доказываемое равенство  $\max_{c \in C} \|Ap(c)\|_2 = \max_{c \in F} \|Ap(c)\|_2$ .

Пусть далее  $c^* \neq 0$ . Так как множество  $F$  представляет собой 3 грани единичного куба  $C$ , содержащих точку  $(1, 1, 1)$ , то принадлежащий этому кубу за вычетом  $F$  ненулевой вектор  $c^*$  можно удлинить так, чтобы он достиг  $F$ . То есть существует такое  $k > 1$ , что  $\tilde{c} = kc^* \in F$ .

Так как  $\tilde{c} \in F$ , то:

$$\|Ap(\tilde{c})\|_2 \leq \max_{c \in F} \|Ap(c)\|_2. \quad (15)$$

Учитывая вышесказанное, а также зная, что  $p(c)$  обладает свойством однородности 1-й степени (6), запишем:

$$\begin{aligned} \max_{c \in C} \|Ap(c)\|_2 &\leq k \max_{c \in C} \|Ap(c)\|_2 = k \|Ap(c^*)\|_2 = \\ &= \|Ap(c^*)\|_2 = \|Ap(\tilde{c})\|_2 \leq \max_{c \in F} \|Ap(c)\|_2. \end{aligned} \quad (16)$$

Т.е.:

$$\max_{c \in C \setminus F} \|Ap(c)\|_2 \leq \max_{c \in F} \|Ap(c)\|_2. \quad (17)$$

Получено противоречие с (12). Таким образом, верно доказываемое равенство:

$$\max_{c \in C} \|Ap(c)\|_2 = \max_{c \in F} \|Ap(c)\|_2. \quad (18)$$

Теорема доказана.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предлагается подход к эффективному использованию таблиц поиска на основе кластеризации отображений. Отбирая лишь наиболее непохожие отображения, мы сокращаем количество требуемой памяти с некритичными потерями в точности. Кластеризацию мы предлагаем осуществлять на основе введенного нами критерия схожести отображений. Для оптимизации вычисления критерия мы предлагаем перейти от 3D-оптимизации к 2D-оптимизации и доказываем, что это не приведет к потере точности. Таким образом, нами предложен метод вычислительно эффективной адаптивной цветовой коррекции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Коноваленко И. А. *Критерии и алгоритмы вычисления точности проективной нормализации изображений*. Дисс. канд. физ.-мат. наук. М., 2021. 136 с.
- Николаев Д.П., Николаев П.П., Гладилин С.А., Божкова В.П. *Основы цветовой теории в техническом зрении. I. Введение в цветовую теорию*. М.: Мир науки, 2021. 40 с.
- Николаев П.П., Николаев Д.П., Гладилин С.А., Басова О.А., Ярыкина М.С. *Сборник задач по обработке изображений и техническому зрению*. М.: 2023. 78 с.
- Шашлов А.Б. *Основы светотехники*. М.: Логос, 2016. 256 с.
- Fernando R., Matt P. *GPU Gems 2: Programming Techniques for High-Performance Graphics and General-Purpose Computation*. Addison-Wesley Professional, 2005. 814 p.
- Finlayson G.D., Michal M., Anya H. Root-polynomial colour correction. *Color and Imaging Conference*. Society of Imaging Science and Technology, 2011. V. 19. P. 115–119.
- Gasparini F., Schettini R. Color correction for digital photographs. *12th International Conference on Image Analysis and Processing, 2003. Proceedings*. IEEE, 2003. P. 646–651. DOI: 10.1109/ICIAP.2003.1234123
- Han D. Real-time color gamut mapping method for digital TV display quality enhancement. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. IEEE, 2004. V. 50. P. 691–698. DOI: 10.1109/TCE.2004.1309450
- Ives H.E. The transformation of color-mixture equations from one system to another. *Journal of the Franklin Institute*. 1915. V. 180. P. 673–701.
- Kim Y.T., Cho Y.H., Lee C.H., Ka Y.H. Color look-up table design for gamut mapping and color space conversion. *International Conference on Digital Production Printing and Industrial Applications*. 2003. P. 28–29.
- Luther R. Aus dem gebiet der farbreizmetrik, *Zeitschrift fur Technishe Physik*. 1927. V. 12. P. 540–558.
- Mantiuk R., Mantiuk R., Tomaszewska A., Heidrich W. Color correction for tone mapping. *Computer graphics forum*. Oxford. Blackwell Publishing Ltd, 2009. V. 50. P. 193–202.
- Moroney N. Local color correction using non-linear masking. *Color and Imaging conference*. California. Society of Imaging Science and Technology, 2000. V. 8. P. 108–111.
- Morovic J., Luo M.R. The fundamentals of gamut mapping: A survey. *Journal of Imaging Science and Technology*. Derby. The Society for Imaging Science and Technology, 2001. V. 45. P. 283–290.
- Sari Y.A., Ginardi R.V. H., Suciati N. Color correction using improved linear regression algorithm. *2015 International Conference on Information & Communication Technology and Systems (ICTS)*. IEEE, 2015. P. 73–78. DOI: 10.1109/ICTS.2015.7379874.
- Solomatov G., Akkaynak D. Spectral Sensitivity Estimation Without a Camera. *2023 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*. IEEE, 2023. P. 1–12. DOI: 10.1109/ICCP56744.2023.10233713
- Soshin K.V., Nikolaev D.P., Ershov E.I., Tchobanov M.K. *A scalable rational color correction for an image*. Patent RF. № WO2023121500A1. 2023.

## COMPUTATIONALLY EFFICIENT ADAPTIVE COLOR CORRECTION

**M. V. Kharkevich<sup>1, 2, \*</sup>, O. A. Basova<sup>1</sup> and I. A. Konovalenko<sup>3</sup>**<sup>1</sup> Institute for Information Transmission Problem RAS, 127051, Moscow, Bolshoy Karetny lane, 19, Russia<sup>2</sup> Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University) 141700, Dolgoprudny, Institutskiy lane, 9, Russia<sup>3</sup> Federal Research Center "Informatics and Management" RAS, Vavilova st. 44, b. 2, 119333, Moscow, Russia

\*E-mail: kharkevich@iitp.ru

To obtain a photo that reproduces the original scene as accurately as possible, it is necessary to solve the problem of color correction, that is, to find a mapping that translates the coordinates of the camera color space (RGB) into the coordinates of the human color space (CIE XYZ). In this article, we consider color correction using lookup tables, pre-built for various lighting conditions. This approach allows you to achieve high speed and accuracy when applying color correction on the device, but requires large amounts of RAM, which, for example, mobile phones do not have. We propose a method for automatic thinning of a set of search tables without loss of accuracy of color correction. The method is based on clustering of the mappings that specify the color correction. To compare the mappings, we propose a criterion for their similarity based on the maximum difference of the generated colors in the target space of a standard CIE XYZ observer. For the proposed criterion, the article provides an effective calculation method and, together with a theorem justifying the correctness of the method.

**Keywords:** adaptive color correction, similarity criterion of mapping, lookup table, mathematical programming, clustering

## REFERENCES

- Konovalenko I.A. *Kriterii i algoritmy vychisleniya tochnosti proektivnoy normalizatsii izobrazhenij* [Criteria and algorithms for calculating the accuracy of projective normalization of images]. PhD thesis. Moscow, 2021. 136 p. (in Russian).
- Nikolaev D.P., Nikolaev P.P., Gladilin S.A., Bozhkova V.P. *Osnovy cvetovoy teorii v tekhnicheskome zrenii. I. Vvedenie v cvetovuyu teoriyu* [Fundamentals of color theory in technical vision. I. Introduction to Color Theory]. Moscow, Mir nauki, 2021. 40 p. (in Russian).
- Nikolaev P.P., Nikolaev D.P., Gladilin S.A., Basova O.A., Yarykina M.S. *Sbornik zadach po obrabotke izobrazhenij i tekhnicheskome zreniyu* [Collection of tasks on image processing and technical vision]. Moscow, 2023. 78 p. (in Russian).
- Shashlov A.B. *Osnovy svetotekhniki* [Fundamentals of lighting engineering]. Moscow: Logos, 2016. (in Russian).
- Fernando R., Matt P. *GPU Gems 2: Programming Techniques for High-Performance Graphics and General-Purpose Computation*. Addison-Wesley Professional, 2005. 814 p.
- Finlayson G.D., Michal M., Anya H. Root-polynomial colour correction. *Color and Imaging Conference*. Society of Imaging Science and Technology, 2011. V. 19. P. 115–119.
- Gasparini F., Schettini R. Color correction for digital photographs. *12th International Conference on Image Analysis and Processing, 2003. Proceedings*. IEEE, 2003. P. 646–651. DOI: 10.1109/ICIAP.2003.1234123
- Han D. Real-time color gamut mapping method for digital TV display quality enhancement. *IEEE Transactions on consumer Electronics*. IEEE, 2004. V. 50. P. 691–698. DOI: 10.1109/TCE.2004.1309450
- Ives H.E. The transformation of color-mixture equations from one system to another. *Journal of the Franklin Institute*. 1915. V. 180. № 6. 673–701.
- Kim Y.T., Cho Y.H., Lee C.H., Ka Y.H. Color look-up table design for gamut mapping and color space conversion. *International Conference on Digital Production Printing and Industrial Applications*. 2003. P. 28–29.
- Luther R. Aus dem gebiet der farbreizmetrik, *Zeitschrift fur Technishe Physik*. 1927. V. 12. P. 540–558.
- Mantiuk R., Mantiuk R., Tomaszewska A., Heidrich W. Color correction for tone mapping. *Computer graphics forum*. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2009. V. 50. P. 193–202.
- Moroney N. Local color correction using non-linear masking. *Color and Imaging conference*. California. Society of Imaging Science and Technology, 2000. V. 8. P. 108–111.
- Morovic J., Luo M.R. The fundamentals of gamut mapping: A survey. *Journal of Imaging Science and Technology*. Derby. The Society for Imaging Science and Technology, 2001. V. 45. P. 283–290.
- Sari Y.A., Ginardi R.V. H., Suciati N. Color correction using improved linear regression algorithm. *2015 International Conference on Information & Communication Technology and Systems (ICTS)*. IEEE, 2015. P. 73–78. DOI: 10.1109/ICTS.2015.7379874
- Solomatov G., Akkaynak D. Spectral Sensitivity Estimation Without a Camera. *2023 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*. IEEE, 2023. P. 1–12. DOI: 10.1109/ICCP56744.2023.10233713.
- Soshin K.V., Nikolaev D.P., Ershov E.I., Tchobanov M.K. *A scalable rational color correction for an image*. Patent RF. № WO2023121500A1. 2023.



*Russian Academy of Sciences*

# SENSORY SYSTEMS

The journal was founded in January, 1987

ISSN 0235-0092

The journal is published quarterly and guided by the Branch  
of Physiology and Fundamental Medicine, Russian Academy of Sciences

The journal is indexed by The Russian Science Citation Index at the platform of Web of Science

The journal is publishing original papers, reviews, short reports and covers researches ranging over the fields of physiology, morphology, biophysics, psychophysics of sensory systems, sensory biology, biosensors, and also sensor technology, basis of coding, analysis of information about the environment and its transformation into perceived images — visual, auditory, olfactory, etc. as well as the algorithms of automatic analysis of sensory information, its representation, interpretation and usage for driving various devices

## Editor-in-Chief

**Corr.memb. of RAS M.L. Firsov**

### Editorial board:

I.G. Andreeva, D.Sci., S.V. Alexeenko, D.Sci., Artushkin S.A., D.Sci, prof.,  
N.G. Bibikov, D.Sci., Boboshko M.Yu., D.Sci., prof, Golovanova L.E., D.Sci.,  
M.A. Gracheva, PhD, K. Donner, D.Sci. (Finland), M.I. Zhukovskaya, PhD,  
S.S. Kolesnikov, corr. memb. of RAS, D.Sci., B.V. Krylov, D.Sci., prof., D.N. Lapshin, D.Sci.,  
Malykh M.D., PhD, D.Sci., P.P. Nikolaev, D.Sci., D.P. Nikolaev, D.Sci., E.A. Ogorodnikova, PhD,  
M.A. Ostrovsky, academician, Popov S.B., PhD, D.Sci., G.I. Rozhkova, D.Sci., prof.,  
V.G. Skrebitsky, D.Sci., corr. memb. of RAS, A.Ya. Supin, D.Sci., prof., Tvardkiladze G.A., D.Sci.,  
P.V. Frolov, PhD, N.S. Chernetsov, corr.memb. of RAS,  
T.V. Chernigovskaya, D.Sci., prof., P.A. Chochia, PhD, D. Sci.,  
A.I. Chulichkov, D.Sci., prof., Y.E. Shelepin, MD, prof.

### *Administrative manager:*

M.A. Gracheva

### *Address:*

119071 Russia, Moscow, Leninsky ave., 14

Phone: 8-906-759-85-98

*E-mail:* editor.sensys@gmail.com

*E-mail:* editor@sensorysystems.ru

*E-mail:* http://sensorysystems.ru

### **Moscow**

### **Information about the journal is in the site of e-library**

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ №ФС77-66699 от 28 июля 2016 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

---

Подписано к печати

г. Дата выхода в свет

г. Формат 60 × 88<sup>1</sup>/<sub>8</sub> Усл. печ. л.

Уч.-изд. л.

Тираж экз. Зак. Цена свободная

---

Учредитель: Российская академия наук

---

Издатель: Российская академия наук, 119991 Москва, Ленинский просп., 14

Исполнитель по контракту № 4У-ЕП-039-24 ФГБУ «Издательство «Наука»

121099, Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1

Отпечатано в ФГБУ «Издательство «Наука»

121099, Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1

Журналы РАН, выходящие в свет на русском языке

- Автоматика и телемеханика  
Агрохимия  
Азия и Африка сегодня  
Акустический журнал  
Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы  
Астрономический журнал  
Биологические мембраны  
Биология внутренних вод  
Биология моря  
Биоорганическая химия  
Биофизика  
Биохимия  
Ботанический журнал  
Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук  
Вестник древней истории  
Вестник Российской академии наук  
Вестник российской сельскохозяйственной науки  
Водные ресурсы  
Вопросы истории естествознания и техники  
Вопросы ихтиологии  
Вопросы языкознания  
Вулканология и сейсмология  
Высокомолекулярные соединения. Серия А  
Высокомолекулярные соединения. Серия Б  
Высокомолекулярные соединения. Серия С  
Генетика  
Геология рудных месторождений  
Геомагнетизм и аэрономия  
Геоморфология и палеогеография  
Геотектоника  
Геохимия  
Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология  
Государство и право  
Дефектоскопия  
Дифференциальные уравнения  
Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления  
Доклады Российской академии наук. Науки о жизни  
Доклады Российской академии наук. Науки о Земле  
Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки  
Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах  
Журнал аналитической химии  
Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова  
Журнал вычислительной математики и математической физики  
Журнал неорганической химии  
Журнал общей биологии  
Журнал общей химии  
Журнал органической химии  
Журнал прикладной химии  
Журнал физической химии  
Журнал эволюционной биохимии и физиологии  
Журнал экспериментальной и теоретической физики  
Записки Российского минералогического общества  
Зоологический журнал  
Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа  
Известия Российской академии наук. Механика твердого тела  
Известия Российской академии наук. Серия биологическая  
Известия Российской академии наук. Серия географическая  
Известия Российской академии наук. Серия литературы и языка  
Известия Российской академии наук. Серия физическая  
Известия Российской академии наук. Теория и системы управления  
Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана  
Известия Российской академии наук. Энергетика  
Известия Русского географического общества  
Исследование Земли из космоса  
Кинетика и катализ  
Коллоидный журнал  
Координационная химия  
Космические исследования  
Кристаллография  
Латинская Америка
- Лёд и Снег  
Лесоведение  
Литология и полезные ископаемые  
Мембраны и мембранные технологии  
Металлы  
Микология и фитопатология  
Микробиология  
Микроэлектроника  
Молекулярная биология  
Нейрохимия  
Неорганические материалы  
Нефтехимия  
Новая и новейшая история  
Общественные науки и современность  
Общество и экономика  
Океанология  
Онтогенез  
Палеонтологический журнал  
Паразитология  
Петрология  
Письма в Астрономический журнал  
Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики  
Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования  
Почвоведение  
Приборы и техника эксперимента  
Прикладная биохимия и микробиология  
Прикладная математика и механика  
Проблемы Дальнего Востока  
Проблемы машиностроения и надежности машин  
Проблемы передачи информации  
Программирование  
Психологический журнал  
Радиационная биология. Радиоэкология  
Радиотехника и электроника  
Радиохимия  
Расплавы  
Растительные ресурсы  
Российская археология  
Российская история  
Российская сельскохозяйственная наука  
Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова  
Русская литература  
Русская речь  
Сенсорные системы  
Славяноведение  
Современная Европа  
Социологические исследования  
Стратиграфия. Геологическая корреляция  
США & Канада: экономика, политика, культура  
Теоретические основы химической технологии  
Теплофизика высоких температур  
Успехи современной биологии  
Успехи физиологических наук  
Физика Земли  
Физика и химия стекла  
Физика металлов и металловедение  
Физика плазмы  
Физикохимия поверхности и защита материалов  
Физиология растений  
Физиология человека  
Химическая физика  
Химия высоких энергий  
Химия твердого топлива  
Цитология  
Человек  
Экология  
Экономика и математические методы  
Электрохимия  
Энтомологическое обозрение  
Этнографическое обозрение  
Ядерная физика