

КОНТРАСТНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И МИКРОДВИЖЕНИЯ ГЛАЗ КАК МАРКЕРЫ АДАПТАЦИИ И РЕАДАПТАЦИИ В МОДЕЛЬНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПО ИЗУЧЕНИЮ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ГРАВИТАЦИИ

Шошина И.И.¹, Зеленская И.С.², Бекренева М.П.², Ляпунов С.И.³, Ляпунов И.С.³, Котова Д.А.¹, Томиловская Е.С.²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет
Университетская наб., 7-9, г. Санкт-Петербург, 196034, РФ; e-mail: i.shoshina@spbu.ru

² Институт медико-биологических проблем РАН
Хорошевское ш., 76А, г. Москва, 123007, РФ

³ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
ул. Вавилова 38, г. Москва, 119991 ГСП-1, РФ

Поступила в редакцию 01.08.2022. DOI: 10.29039/rusjbpс.2022.0571

Аннотация. Визуальное восприятие играет решающую роль в обеспечении мозга информацией, необходимой для принятия решений, построения картины мира и адаптации к изменяющимся условиям среды. В условиях «сухой» иммерсии, моделирующей эффекты невесомости на организм человека, исследовали контрастную чувствительность и треморные движения глаз при изменении условий среды. В исследовании приняли участие 10 добровольцев-испытателей (средний возраст $30,8 \pm 4,6$ лет). Контрастную чувствительность зрительной системы регистрировали с помощью метода визоконтрастометрии. Предъявляли элементы Габора с пространственной частотой: 0,4; 0,8; 1,0; 3,0; 6,0 и 10,0 цикл/град. Параметры микродвижений глаз – амплитуду и частоту треморных колебаний глаз регистрировали с помощью оптической системы, обеспечивающей высокочастотную видеосъемку. Измерения проводили за день до погружения в иммерсионную ванну (фон), на 1, 3, 5 и 7 дни «сухой» иммерсии (СИ), а также на следующий день после ее окончания. Установлено изменение контрастной чувствительности в диапазоне низких и высоких пространственных частот, а также амплитуды микродвижений глаз. Полученные данные на сегодняшний день являются новым шагом в поиске методов объективной оценки функционального состояния при изменении условий среды.

Ключевые слова: контрастная чувствительность, микротремор глаз, иммерсия, гравитация, адаптация.

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних десятилетий довольно глубоко исследованы физиологические последствия влияния на организм человека условий космического полета, в частности невесомости, однако предстоит еще большая работа по изучению адаптации мозга к условиям микрогравитации [1-3]. Неоднократно показано, что оперативная деятельность членов экипажа может быть нарушена из-за пространственной дезориентации, иллюзий восприятия, укачивания, нарушений равновесия и сенсомоторного контроля, возникающих при смене условий гравитации [1-8].

Визуальное восприятие играет решающую роль в обеспечении мозга информацией, необходимой для принятия решений, построения картины мира и адаптации к изменяющимся условиям среды. Контрастная чувствительность – фундаментальная характеристика зрительного восприятия, отражающая процессы обработки информации на уровне сенсорного входа. Контрастная чувствительность преимущественно регистрируется в ответ на паттерны из чередующихся светлых и темных полос с размытыми краями (синусоидальные решетки), с распределением света, интенсивность которого изменяется в соответствии с синусоидальной функцией. Контрастная чувствительность – величина обратная пороговому контрасту, отличающаяся для разных пространственных частот. Пространственная частота – величина, обратная количеству светлых и темных полос на единицу длины. Синусоидальные решетки, по поверхности которых интенсивность света меняется медленно (черные и белые полосы широкие), содержат низкие пространственные частоты. В случае, когда интенсивность света меняется быстро, соответственно решетка состоит из большого количества узких черных и белых полос, говорят, о решетке с высокими пространственными частотами.

Согласно теории пространственно-частотной фильтрации информации, зрительная система представлена совокупностью каналов, специфичных к восприятию определенного спектра пространственных частот [9]. Основные из них – крупноклеточные магноцеллюлярные и мелкоклеточные парвоцеллюлярные каналы или системы [10]. На корковом уровне магно- и парвоцеллюлярные каналы дают начало, соответственно, дорзальному и вентральному потокам передачи информации из каудальных во фронтальные отделы коры, взаимодействие которых обеспечивает целостность зрительного восприятия [11,12]. Характеристики нейронов магно- и парвоцеллюлярной систем определяют особенности восприятия информации (пространственно-частотной фильтрации) на входе и высокоуровневых когнитивных процессов [11,13,14].

Тремор глазных движений наряду с дрейфом характеризует межсаккадические периоды фиксации, когда поступает большая часть информации и происходит детальный анализ изображения. В результате тремора ось глаза описывает эллипсоподобные фигуры. Средняя амплитуда треморных колебаний глаз составляет 20"–40", частота 87 Гц. Теория треморно-модуляционного сигнала (ТМС) описывает взаимосвязь между показателями контрастной чувствительности и микродвижений глаз [15-18].

В наземных условиях для моделирования физиологических эффектов невесомости успешно используется метод «сухой» иммерсии (СИ) [19]. Физиологические эффекты невесомости в этом случае моделируются созданием условий безопорности и гиподинамии.

Гипотеза исследования – параметры зрительного восприятия являются объективными показателями функционального состояния при изменении условий гравитации (гравитация-микрогравитация-гравитация).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

К участию в исследовании врачебно-экспертной комиссией были допущены десять добровольцев-испытателей (средний возраст $30,8 \pm 4,6$ года).

Контрастную чувствительность зрительной системы регистрировали с помощью метода визоконтрастометрии в диапазоне низких, средних и высоких пространственных частот [7,8], к восприятию которых в разной степени специфичны нейроны магно- и парвоцеллюлярной систем, формирующих дорзальный и вентральный потоки [12]. Исходили из того, что нейроны магноцеллюлярной системы более специфичны к восприятию низких пространственных частот, парвоцеллюлярной системы - высоких пространственных частот [11]. Так как средние пространственные частоты обрабатываются нейронами обеих систем, контрастную чувствительность в этих пространственных частотах рассматривали, как меру рассогласования их взаимодействия.

В качестве стимулов использовали элементы Габора, которые представляют собой синусоиду, умноженную на функцию Гаусса. Элемент Габора описывается выражением (для вертикальной ориентации элемента):

$$f(x, y, \sigma, v, \varphi) = \sin(2\pi vx + \varphi) \times e^{-\frac{(x_2 + y_2)^2}{2 \times \sigma_2^2}} \times e^{-2 \times \pi \sigma_2} \quad (1)$$

где x, y – координаты на изображении, σ – стандартное отклонение, v – пространственная частота, φ – фаза (в изображениях, синтезируемых программой, $\varphi = -\pi/2$).

Предъявляли элементы Габора с пространственной частотой: 0,4; 0,8; 1,0; 3,0; 6,0 и 10,0 цикл/град на экране монитора Toshiba Satellite A200-1M8, Intel® Core™2 Duo - T7100 1800 МГц/1024 Мб, дисплей 15,4" TFT WXGA активная матрица повышенной яркости (Toshiba TruBrite), разрешение 1024*600 пикселей, частота обновления 60 Гц. Стимулы выводили в случайном порядке слева или справа от центра экрана (рис. 1). Для предъявления стимулов и регистрации контрастной чувствительности использовали компьютерную программу, позволяющую формировать тестовые изображения на мониторе любого типа без предварительной его калибровки. Для передачи яркостного профиля тестовых изображений в программе использованы вариации плотности случайно расположенных на черном фоне белых точек. Измерение порогового контраста реализовано с помощью адаптивной "лестничной" процедуры [7,8,13]. При анализе данных к диапазону низких пространственных частот относили частоты 0,4 и 0,8 цикл/град, средних – 1,0, и 3,0 цикл/град, высоких частот – 6,0 и 10,0 цикл/град.

Задача испытуемого состояла в том, чтобы нажать на правую кнопку мыши, если он видит изображение справа, левую кнопку, - если слева. Выбор просили делать и тогда, когда испытуемый не был уверен, что видит тестовое изображение.

Измерения контрастной чувствительности и показателей микротремора глаз проводили за день до погружения в иммерсионную ванну (фон), на 1, 3, 5 и 7 дни «сухой» иммерсии (СИ), а также на следующий день после ее окончания (R1). Параметры микродвижений глаз – амплитуду (A_t) и частоту (f_t) треморных колебаний глаз регистрировали с помощью оптической системы, позволяющей осуществлять высокочастотную видеосъемку [19]. Разрешающая способность видеосъемки 960 fps. Анализ показателей микротремора глаз

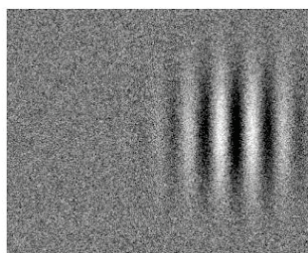


Рисунок 1. Пример изображений элементов Габора, предъявляемых в исследовании по оценке контрастной чувствительности зрительной системы

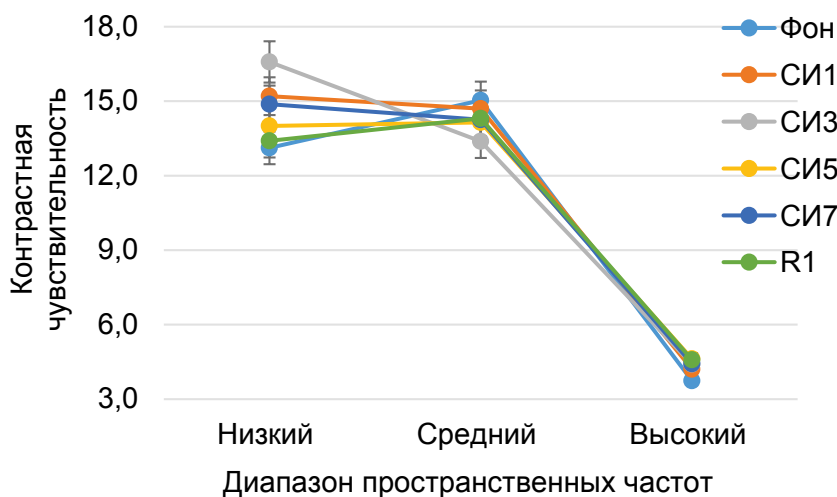


Рисунок 2. Контрастная чувствительность зрительной системы в различных диапазонах пространственных частот в модельном эксперименте с «сухим» погружением

осуществляли по частотности попадания колебаний микродвижений глаз в условно выделенные диапазоны частоты тремора, что позволяло получить более детальное представление о спектральных характеристиках микротремора. За 1 принимали общее количество видеок кадров. Для измерения контрастной чувствительности иммерсионную ванну с установленным на ней на расстоянии 1,5 метров от испытателя монитором, накрывали плотной черной тканью, не пропускающей солнечный свет. Монитор был установлен так, чтобы уровень расположения глаз испытателя примерно соответствовал середине экрана. Наблюдение осуществляли бинокулярно. Острота зрения всех испытуемых соответствовала норме.

Статистический анализ достоверности различий выполняли с использованием непараметрического критерия Манна-Уитни в программе STATISTICA 10.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено значимое изменение контрастной чувствительности в диапазоне низких ($p=0,02$) и высоких ($p=0,01$) пространственных частот на третий день «сухого» погружения по сравнению с фоновыми показателями в условиях гравитации (рис. 2).

На следующие сутки после окончания иммерсии контрастная чувствительность в диапазоне низких пространственных частот соответствовала исходным фоновым значениям ($p=0,9$). Полученные данные рассматриваются как свидетельства рассогласования во взаимодействии между магноцеллюлярной и парвоцеллюлярной системами, что, вероятно, является одним из факторов повышения уровня внутреннего шума зрительной системы.

Для показателей микротремора глаз установлено следующее. На третьи сутки погружения происходило значимое изменение амплитуды тремора в широком диапазоне частот, также как и при переходе из условий микрогравитации к гравитации после окончания погружения (рис. 3). Значимость различий амплитуды для разных диапазонов частот варьировала от $p=0,001$ до $p=0,03$. По показателю частоты микротремора различия наблюдались только для диапазона с частотой тремора до 40 Гц и только между фоновыми значениями и на третий день «сухого» погружения.

Таким образом, наиболее информативными с точки зрения оценки процессов смены функционального состояния при изменении условий гравитации являются параметры амплитуды тремора, по сравнению с частотой тремора.

Функциональная специфика глазодвигательных реакций позволяет использовать их в качестве интегративного показателя состояния ЦНС [21,22]. Полученные данные рассматриваются нами, как свидетельства повышения уровня внутреннего шума зрительной системы при переходе к условиям моделируемой микрогравитации и обратно в результате, в том числе, рассогласования во взаимодействии магно- и парвоцеллюлярной систем, берущих начало от разного типа ганглиозных клеток сетчатки и через соответствующие слои латерального коленчатого тела, передающих информацию к коре головного мозга, где формируют два корковых потока информации из каудальных во фронтальные зоны коры [12]. Нейроны магноцеллюлярной системы формируют дорзальный поток, пролегающий через заднетеменную кору, дополнительное зрительное поле, прилегающее к моторным зонам, и отвечают за восприятие движения, оценку местоположения в пространстве. Нейроны парвоцеллюлярной системы формируют вентральный поток информации из каудальных во фронтальные зоны коры через нижневисочную кору, обеспечивая объектное зрение. Согласованная работа этих систем обеспечивает целостность восприятия и ее нарушение при

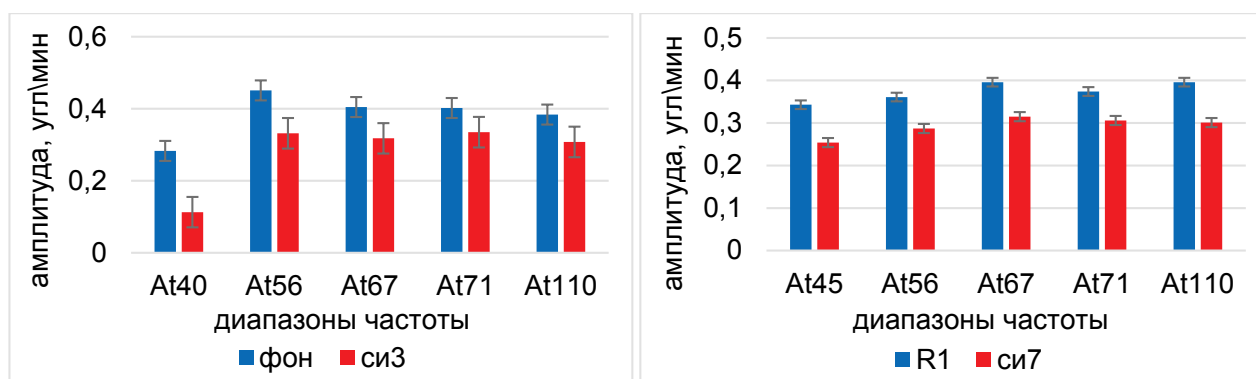


Рисунок 3. Особенности амплитуды треморных движений глаз (At) в модельном эксперименте с «сухим» погружением

расогласовании взаимодействия. Результаты недавних послеполетных исследований [2] свидетельствуют о реорганизации при длительном отсутствии опоры взаимосвязей между сенсомоторной, зрительной, проприоцептивной и вестибулярной системами. Наиболее заметные изменения включают увеличение связи правой задней супрамаргинальной извилины (области заднетеменной коры) с остальной частью мозга; усиление связей между левой и правой островковыми зонами; снижение сцепления мозжечка со зрительной корой и с правой нижней теменной корой; изменение связей островковых долей обоих полушарий, вестибулярных ядер, правой нижней теменной коры и мозжечка с другими областями, вовлеченными в обеспечение моторных, зрительных, вестибулярных и проприоцептивных функций. Вероятно, что условия безопорности и гиподинамии приводят к редукции обратной афферентации и возникновению конфликта на входе от разных сенсорных модальностей [23], что также является фактором повышения уровня внутреннего шума зрительной системы.

Снижение амплитуды микротремора как в низко- так и высокочастотной составляющей спектра микродвижений глаз при изменении интенсивности опорной афферентации в иммерсии свидетельствует о снижении чувствительности зрительной системы. Изменения глазодвигательной активности при моделировании эффектов микрогравитации в «сухой» иммерсии могут быть результатом недостатка входной афферентации и снижения возбуждающих воздействий со стороны управляющих корковых зон на подкорковые ядра, регулирующие глазные движения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Контрастная чувствительность, в первую очередь, в диапазоне низких пространственных частот и амплитуда треморных микродвижений глаз могут служить в качестве объективных показателей функционального состояния центральной нервной системы при изменении условий среды.

Выполнено при поддержке РФФ (проект № 22-18-00074).

Список литературы / References:

- White O., Clement G., Fortrat J.O. et al. Towards human exploration of space: the THESEUS review series on neurophysiology research priorities. *NPJ Microgravity*, 2016, vol. 2, p. 16023, doi: 10.1038/npmjgrav.2016.23.
- Pechenkova E., Nosikova I., Rumshiskaya A. et al. Alterations of Functional Brain Connectivity After Long-Duration Spaceflight as Revealed by fMRI. *Front. Physiol.*, 2019, vol. 10, p. 761, doi: 10.3389/fphys.2019.00761.
- Marshall-Goebel K., Damani R., Bershada E.M. Brain physiological response and adaptation during spaceflight. *Neurosurgery*, 2019, vol. 85, pp. E815-E821.
- Stahn A.C., Riemer M., Wolbers T. et al. Spatial Updating Depends on Gravity. *Front. Neural Circuits*, 2020, vol. 14, p. 20.
- Roberts D.R., Stahn A.C., Seidler R.D., Wuyts F.L. Towards understanding the effects of spaceflight on the brain. *Lancet Neurol*, 2020, vol. 19, p. 808.
- Sosnina I.S., Lyakhovetskii V.A., Zelenskiy K.A. et al. Effects of Five-Day “Dry” Immersion on the Strength of the Ponzo and the Müller-Lyer Illusions. *Neuroscience and Behavioral Physiology*, 2019, vol. 49, no. 7, p. 847.
- Shoshina I., Sosnina I., Zelenskii K., et al. The Contrast Sensitivity of the Visual System in “Dry” Immersion Conditions. *Biophysics*, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 681-685.
- Shoshina I., Zelenskaya I., Karpinskaia V., et al. Sensitivity of Visual System in 5-Day “Dry” Immersion With High-Frequency Electromyostimulation. *Frontiers in Neural Circuits*, 2021, p. 702792.
- Campbell F.W., Robson J.G. Application of Fourier Analyses to the Visibility of Gratings. *J. Physiol*, 1968, vol. 197, p. 551.
- Nassi J.J., Callaway E.M. Parallel Processing Strategies of the Primate Visual System. *Nat. Rev. Neurosci*, 2009, vol. 10, no 5, p. 360.

11. Шошина И.И., Шелепин Ю.Е. *Механизмы глобального и локального анализа зрительной информации при шизофрении*. СПб.: Изд-во ВВМ, 2016, 300 с. [Shoshina I.I., Shelepin Yu.E. *Mechanisms of global and local analysis of visual information in schizophrenia*. St. Petersburg: Publishing House of VVM, 2016, 300 p. (In Russ.)]
12. Milner A.D. How do the two visual streams interact with each other? *Exp. Brain Res*, 2017, vol. 235, p. 1297.
13. Shoshina I.I., Mukhitova Yu.V., Tregubenko I.A., et al. Contrast Sensitivity of the Visual System and Cognitive Functions in Schizophrenia and Depression. *Human Physiology*, 2021, vol. 47, no. 5, pp. 527-538, doi: 10.1134/S0362119721050121.
14. Isaeva E.R., Tregubenko I.A., Mukhitova Yu.V., Shoshina I.I. Functional States of the Magnocellular and Parvocellular Neural Systems and Cognitive Impairments in Schizophrenia at Different Stages of the Disease. *Russian Psychological Journal*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 74-90, doi: 10.21702/rpj.2021.1.6.
15. Lyapunov S.I. Threshold contrast of the visual system as a function of the external conditions for various test stimuli. *J. Opt. Technol.*, 2014, vol. 81, no. 6, p. 349.
16. Lyapunov S.I. Visual acuity and contrast sensitivity of the human visual system. *J. Opt. Technol.*, 2017a, vol. 84, no. 9, p. 613.
17. Lyapunov S.I. Visual-perception depth of field as a function of external conditions. *J. Opt. Technol.*, 2017, vol. 84, no. 1, p. 16.
18. Lyapunov S.I. Response of the visual system to sine waves under external conditions. *J. Opt. Technol.*, 2018, vol. 85, no. 2, p. 100.
19. Tomilovskaya E., Shigueva T., Sayenko D. et al. Dry Immersion as a Ground-Based Model of Microgravity Physiological Effects. *Front. Physiol.*, 2019, vol. 10, p. 284.
20. Lyapunov S.I., Shoshina I.I., Lyapunov I.S. Tremor Eye Movements as an Objective Marker of Driver's Fatigue. *Human Physiology*, 2022, vol. 48, no. 1, pp.71-77, doi: 10.1134/S0362119722010091.
21. Кубарко А.И., Лихачев С.А., Кубарко Н.П. *Зрение*. Минск: БГМУ, 2009, т. 2, 352 с. [Kubarko A.I., Likhachev S.A., Kubarko N.P. *Zrenie*. Minsk: BSMU, 2009, vol. 2, 352 p. (In Russ.)]
22. Schwartz S.H. *Visual Perception a clinical orientation*. NY: McGrawHill. 2010, 488 p.
23. Kornilova L.N., Kozlovskaya I.B. Neurosensory mechanisms of space adaptation syndrome. *Hum. Physiol.*, 2003, vol. 29, pp. 527-538, doi: 10.1023/A:1025899413655.

CONTRAST SENSITIVITY AND EYE MICROTREMOR AS MARKERS OF ADAPTATION AND READAPTATION IN A MODEL EXPERIMENT TO STUDY THE INFLUENCE OF GRAVITY CHANGES

Shoshina I.I.¹, Zelenskaya I.S.², Bekreneva M.P.², Lyapunov S.I.³, Lyapunov I.S.³, Kotova D.A.¹, Tomilovskaya E.S.²

¹ Saint Petersburg State University

Universitetskaya 7-9, St. Petersburg, 196034, Russia; e-mail: i.shoshina@spbu.ru

² Institute for Biomedical Problems, RAS

Khoroshevskoe 76A, Moscow, 123007, Russia

³ A.M. Prokhorov Institute of General Physics, RAS

Vavilova 38, Moscow, 119991 GSP-1, Russia

Received 01.08.2022. DOI: 10.29039/rusjbp.2022.0571

Abstract. Visual perception plays a crucial role in providing the brain with the information it needs to make decisions, build a picture of the world, and adapt to changing environmental conditions. Under conditions of "dry" immersion, which simulates the effects of weightlessness on the human body, contrast sensitivity and tremor eye movements were studied under changing environmental conditions. The study involved 10 volunteers (mean age 30.8±4.6 years). The contrast sensitivity of the visual system was recorded using the method of visiocontrastometry. We presented the Gabor elements with a spatial frequency: 0.4; 0.8; 1.0; 3.0; 6.0 and 10.0 cycle/deg. The parameters of eye micromovements, i.e., the amplitude and frequency of eye tremor oscillations, were recorded using an optical system providing high-frequency video recording. The measurements were carried out the day before immersion in the immersion bath, on days 1, 3, 5, and 7 of "dry" immersion, as well as the next day after its completion. A change in contrast sensitivity in the range of low and high spatial frequencies, as well as in the amplitude of eye micromovements, was established. The data obtained today are a new step in the search for methods for an objective assessment of the functional state under changing environmental conditions.

Key words: contrast sensitivity, eye microtremor, immersion, gravity, adaptation.