

УДК 004.946:519.876.5

БИОМЕХАТРОНИКА – КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**В.В. Александров, С.С. Лемак, К.В. Тихонова, А.И. Ковалев,
М.Х. Магомедов, П.Ю. Сухочев, В.А. Чертополохов**

Докт. физ.-мат. наук, проф. В.В. Александров; докт. физ.-мат. наук С.С. Лемак;
канд. физ.-мат. наук К.В. Тихонова; канд. психол. наук А.И. Ковалев;
докт. физ.-мат. наук М.Х. Магомедов; П.Ю. Сухочев;
канд. физ.-мат. наук В.А. Чертополохов (МГУ имени М.В. Ломоносова)

В статье представлены некоторые направления работы коллектива ученых межфакультетского центра «Математическое и программное обеспечение технологий виртуальной и смешанной реальности», кафедры прикладной механики и управления, лаборатории математического обеспечения имитационных динамических систем механико-математического факультета МГУ по биомехатронике. Обсуждаются методы имитации орбитальных полетов, разработка математических моделей для коррекции визуального управления в космосе и влияние виртуальной реальности на вестибулярные нарушения. Подчеркивается важность междисциплинарного подхода в понимании и коррекции бионавигационных процессов в экстремальных условиях.

Ключевые слова: орбитальная станция, невесомость, космос, тренажер, вестибулярный аппарат

**Biomechatronics – Space Research. V.V. Aleksandrov,
S.S. Lemak, K.V. Tikhonova, A.I. Kovalyov, M.Kh. Magomedov,
P.Yu. Sukhochev, V.A. Chertopolokhov**

The paper gives some focus areas of a scientific team of the inter-faculty Center “Mathematical and Software Support for Virtual and Mixed Reality Technologies”, Sub-department for Applied Mechanics and Control, Laboratory for Mathematical Support of Simulation Dynamic Systems at the Mechanics-Mathematics Department for Biomechatronics of the MSU. Orbital flight simulation methods, development of mathematical models to correct visual control in space and the effects of virtual reality on vestibular disturbances are discussed. The importance of the interdisciplinary approach to the understanding and correction of bio-navigational processes under extreme conditions is emphasized.

Keywords: orbital station, weightlessness, space, simulator, vestibular apparatus

В статье представлены некоторые направления работ коллектива ученых межфакультетского центра «Математическое и программное обеспечение технологий виртуальной и смешанной реальности» МГУ по биомехатронике. Работы берут свое начало с 1977 года, благодаря визиту в МГУ летчика-космонавта Г.Т. Берегового (начальника Центра подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина) и усилиям трех известных ученых А.Ю. Ишлинского, Г.А. Тюлина и В.А. Садовниченко. Ключевым направлением исследований

стало математическое моделирование инерциальных механорецепторов – важнейших элементов системы бионавигации. Основное внимание в статье уделяется математическому обеспечению динамической имитации управляемого движения на стендах-центрифугах и гальванической стимуляции вестибулярного аппарата в условиях невесомости. Также группой факультета психологии МГУ представлено направление исследований вестибулярных нарушений, индуцированных воздействием объемной зрительной стимуляции в системах виртуальной реальности, и выделена роль глазодвигательной активности человека в обеспечении работы функциональной системы определения положения и ориентации тела человека в пространстве.

Строение вестибулярного аппарата

Вестибулярный аппарат человека является ключевым компонентом системы бионавигации (рис. 1). Этот аппарат, расположенный во внутреннем ухе и включающий в себя сложную сеть рецепторов, играет важную роль в восприятии положения тела и равновесии.

Анализ вестибулярного аппарата на разных уровнях, включая макро (по модели Штейнхаузена [1]), микро (по модели Ходжкина – Хаксли [2]) и нано (с использованием моделей синаптической трансмиссии и адаптации тока трансдукции [3]), позволяет глубже понять биомеханические и электрофизиологические процессы, происходящие в нем. Несмотря на объединение макро- и микроуровневых моделей в динамическую модель, комплексное описание всех уровней вестибулярного аппарата остается задачей будущих исследований.

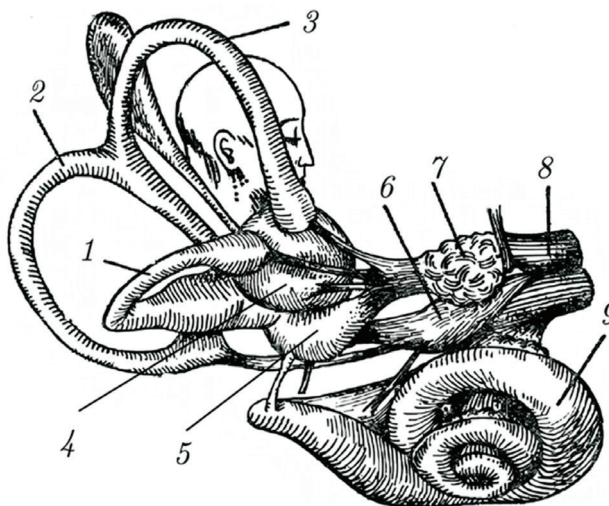


Рис. 1. Вестибулярный аппарат:

1, 2, 3 – горизонтальный, задний и передний полукружный канал;
4, 5 – отолитов аппарат; 6, 7 – нервные ганглии; 8 – вестибулярный нерв; 9 – улитка

Информация о движении головы тесно связана с вестибулоокулярным рефлексом [4], который играет ключевую роль в поддержании стабильности зрения при движениях головы (рис. 2). Когда голова двигается, вестибулярный аппарат по короткой трехнейронной цепочке координирует движения глаз так, чтобы они стабилизировались относительно окружающего пространства. Это позволяет сохранять фокус взгляда на объекте, несмотря на движения, обеспечивая стабильность изображения на сетчатке.

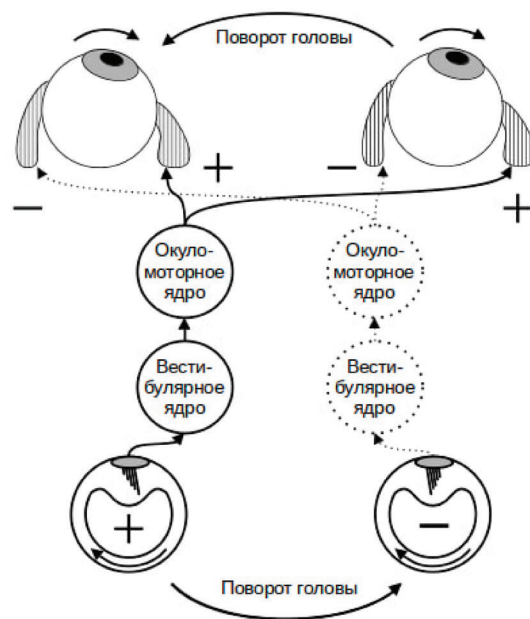


Рис. 2. Схема работы вестибулоокулярного рефлекса

Значение вестибулярного аппарата и вестибулоокулярного рефлекса, которые обеспечивают устойчивость зрения и точную ориентацию в пространстве, становится особенно очевидным в экстремальных условиях, когда эти системы сталкиваются с необычными нагрузками, нетипичными для повседневной человеческой деятельности. Космический полет и связанное с ним состояние невесомости являются яркими примерами таких условий.

Динамическая имитация орбитального полета

В 1977 году коллектив механико-математического факультета МГУ получил доступ к центрифуге ЦФ-18, расположенной в ЦПК имени Ю.А. Гагарина. Этот аппарат, имеющий консоль в 18 метров, играл ключевую роль в исследованиях пилотируемых космических полетов. Организацией и проведением исследований с использованием центрифуги занималась группа специалистов МГУ под руководством академика В.А. Садовниченко и доцента В.В. Александрова.

В рамках этих исследований особое внимание уделялось разработке математического обеспечения для анализа данных, собранных во время экспериментов. Активное участие в процессе принимали аспиранты и студенты МГУ, работая как в лабораториях, так и на кафедре прикладной механики механико-математического факультета МГУ. Одним из первых значимых достижений было создание алгоритмов для имитации перегрузок, возникающих при взлете и спуске космических аппаратов, таких как пилотируемый космический корабль «Союз» [5]. Учитывая ограниченные возможности человека в условиях сильных перегрузок, эта разработка оказалась критически важной для безопасности и эффективности космических миссий.

Особенностью космических полетов является состояние невесомости, оказывающее значительное влияние на систему кровообращения и вестибулярный аппарат человека. Эти системы, эволюционировавшие под воздействием земной гравитации, в условиях космоса испытывают значительные изменения. Возвращение космонавтов на Землю часто сопровождается «болезнью движения», проявляющейся в различной степени, от легких симптомов до рвоты. Исследования на Международной космической станции выявили у космонавтов симптомы утомления, сенсомоторные и статокинетические нарушения, а также нервно-мышечные расстройства [6].

Интересно, что степень реадaptационных проявлений зависит не столько от продолжительности пребывания на орбите, сколько от индивидуальных особенностей организма. В исследованиях отмечаются специфические сенсорные и вегетативные нарушения, возникающие в начале космического полета, известные как «космическая болезнь движения» (КБД) или «космический адаптационный синдром» (КАС) [7].

В статье [8] описываются ключевые факторы, влияющие на развитие КАС на начальном этапе полета. Основным фактором является вестибуло-сенсорный конфликт, связанный рассогласованием информации от вестибулярной системы и других рецепторов, чувствительных к гравитации.

Методы имитации невесомости на Земле включают полеты в самолетах-лабораториях, выполняющих маневры по параболе Кеплера, обеспечивающие кратковременное состояние невесомости. Однако требуемые физиологические реакции прерываются между маневрами.

В качестве альтернативы был предложен динамический тренажер с управляемым кардановым подвесом, который потенциально способен устранить упомянутые недостатки. Вместе с исследователями ЦПК имени Ю.А. Гагарина сотрудниками МГУ были созданы алгоритмы имитации вестибуло-сенсорного конфликта орбитального полета на ЦФ-18.

На рис. 3 представлена схема стенда-центрифуги. Управление установкой осуществляется в соответствии с алгоритмом динамической имитации сенсорного конфликта невесомости [5]. Угловая скорость вращения консоли задается выражением:

$$\omega = \omega_0 + \omega_1 \times \sin 2\pi vt.$$

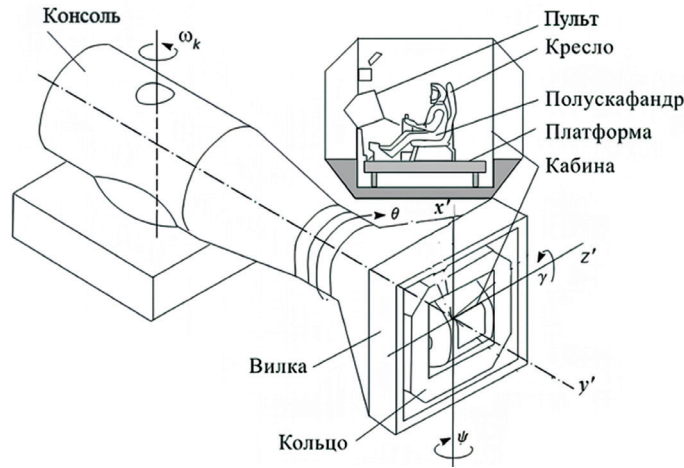


Рис. 3. Динамический стенд «Центрифуга ЦФ-18» с трехступенным кардановым подвесом в ЦПК имени Ю.А. Гагарина

где ω_0 и ω_1 подбираются таким образом, чтобы значение $\omega^2 l / g_0$ находилось в диапазоне от 0,2 до 0,3. Частота вращения ν задается в диапазоне 0,1–0,3 Гц, а g_0 и l представляют собой модуль ускорения свободного падения и длину плеча центрифуги соответственно. В то же время, вилка остается закрепленной под углом $\theta = 90^\circ$, в то время как кольцо и кабина изменяют свои положения в соответствии с:

$$\psi = \frac{\pi}{2} + \arctan S_0, \quad \gamma = \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{S_1}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}},$$

$$S_0 = \frac{\omega^2 l}{g_0}, \quad S_1 = \frac{\dot{\omega} l}{g_0}, \quad S_2 = \sin \psi - S_0 \cos \psi.$$

В условиях экспериментов направление гравитоинерциального вектора оставалось неизменным в системе координат, связанной с космонавтом, что не исключало воздействие на отолитовые органы, но исключало изменение его направления. При этом полукружные каналы продолжали ощущать угловое движение, это позволяло вызывать вестибуло-сенсорный конфликт на Земле.

Разработанные алгоритмы помогли в изучении воздействия космических полетов на вестибулярную систему космонавтов. Работа коллектива была отмечена государственной премией, которая стала важным достижением для всей команды и свидетельствовала о значимости данных исследований [9]. В этот период также проводились эксперименты с участием космонавтов, включая группу из 14 опытных и новых участников. Эти эксперименты позволили изучить различные физиологические реакции космонавтов в условиях наличия сенсорного конфликта [10].

Это были первые примеры имитации «по входу» вестибулярных гравиторецепторов пилота. Полученные результаты стимулировали исследования по созданию математических моделей вестибулярной и глазодвигательной системы как части бионавигационной системы человека. Таким образом, получил развитие новый раздел механики управляемых систем – «Биомехатронные системы». Он нашел отражение в монографии «Математические задачи динамической имитации аэрокосмических полетов», выпущенной издательством МГУ в 1995 году. В ней были подведены итоги первых исследований в этой области. Работа представляет собой значимый вклад в теорию и практику динамической имитации полетов, включая детальное рассмотрение динамики и имитационного моделирования в аэрокосмической сфере [5].

Возможность гальванической коррекции установки взора

В 1997 году в ходе экспериментов на борту станции «Мир» учеными Института медико-биологических проблем Российской академии наук (ИМБП РАН) И.Б. Козловской и Л.Н. Корниловой было обнаружено, что в орбитальном полете возникает вестибуло-сенсорный конфликт и вызывает нарушение вестибулоокулярного рефлекса. Это явление характеризовалось значительным увеличением задержки при попытке установить взор на объект, что создавало проблемы с визуальным управлением в условиях космоса. Подобные трудности стали предметом дальнейших исследований с целью коррекции задержки реакции установки взора [11].

Измененное состояние гравитации во время космического полета и после возвращения на Землю приводит к нарушениям в восприятии и моторике, особенно в первые дни адаптации к новой среде. Отсутствие гравитации приводит к тому, что вестибулярные отолитовые органы перестают стимулироваться так, как это происходит на Земле. Понимание того, как мозг реагирует и адаптируется к измененному сенсорному вводу, имеет важное значение для осознания возможностей и ограничений человеческой производительности. Эксперименты в космосе показали, что пребывание в состоянии невесомости вызывает структурные и функциональные изменения на нескольких этапах обработки вестибулярных сигналов – от волосковых клеток сенсорных органов до клеток Пуркинье коры мозжечка [8].

В сотрудничестве с мексиканскими учеными сотрудниками МГУ была создана модифицированная модель Ходжкина – Хаксли работы вестибулярной клетки, что способствовало разработке комплексной модели гравитационноинерциального механорецептора. В рамках экспериментов на волосковых и биполярных клетках млекопитающих, проведенных группой доктора Э. Сото в лаборатории нейрофизиологии Заслуженного автономного университета штата Пуэбла (BUAP, Мексика), были получены функциональные параметры модели [12]. Это позволило утвердить возможность гальванической коррекции активности афферентного первичного нейрона вестибулярного

аппарата [13]. Идея коррекции информационного процесса на выходе вестибулярного аппарата была направлена на помощь в установлении взора в экстремальных условиях орбитального полета. Такая коррекция потенциально позволяла бы улучшить стабилизацию взгляда при гальванической вестибулярной стимуляции.

В ходе исследования было обнаружено, что вестибулярная клетка может функционировать как бистабильная система. Бистабильность здесь означает наличие двух устойчивых состояний: устойчивого фокуса, который соответствует состоянию покоя клетки, и устойчивого предельного цикла, который соответствует активированному рабочему состоянию клетки. Такое свойство системы позволяет теоретически использовать гальваническое воздействие для перевода клетки из одного состояния в другое. В контексте описанной бистабильности вестибулярной клетки применим закон «все или ничего» [2]. Этот закон, связанный с нейронной активностью, утверждает, что нейрон либо полностью активируется, либо остается неактивным. В случае вестибулярной клетки это означает, что она может переходить из состояния покоя (устойчивого фокуса) в активированное рабочее состояние (устойчивый предельный цикл) и обратно, но не может находиться в промежуточном состоянии активности.

Приведем модель афферентного первичного нейрона (АПН) с модификациями Сото – Александрова [14]:

$$\begin{aligned}
 C_m \frac{dV}{dt} &= I_{\text{Syn}} - I_{\text{Na}} - I_{\text{K}} - I_{\text{L}}, \\
 \tau_n(V) \frac{dn}{dt} &= (n_{\infty}(V) - n)Q. \\
 I_{\text{Na}} &= g_{\text{Na}} m_{\infty}^3(V) I_{\text{K}}(V - V_{\text{Na}}), \\
 I_{\text{K}} &= g_{\text{K}} m_{\infty}^4(V) h_{\text{K}}(V - V_{\text{K}}), \\
 I_{\text{L}} &= g_{\text{L}}(V - V_{\text{L}}), \\
 m_{\infty}(V) &= \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{-(V + 33.8)}{5.2}\right)}, \\
 h_{\text{Na}}(V) &= \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{V + 60.5}{9.9}\right)}, \\
 n_{\infty}(V) &= \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{-(V + 35)}{5}\right)}, \\
 \tau_n(V) &= \frac{68}{\exp\left(\frac{V + 25}{-15}\right) + \exp\left(\frac{V + 30}{20}\right)}, \\
 h_{\text{K}}(V) &= \frac{(0.96408 - 0.7329)}{1 + \exp\left(\frac{V + 33.87968}{10.24986}\right)} + 0.7329.
 \end{aligned}$$

Здесь I_{syn} – постсинаптический ток; I_L – ток утечки; V – мембранный потенциал афферентного нейрона; C_m – емкость мембраны нервной клетки; n – вероятность присутствия частицы активации калиевого тока; h_K – вероятность отсутствия частиц инактивации калиевого тока – параметр, описывающий процесс инактивации калиевого тока; h_{Na} – вероятность отсутствия частиц инактивации натриевого тока – параметр, описывающий процесс инактивации натриевого тока; τ_n – постоянная времени процесса активации калиевого и натриевого тока соответственно; n_∞ , m_∞ – стационарные значения процессов активации натриевого и калиевого тока соответственно; $h_{\text{Na}\infty}$ – стационарное значение процессов инактивации натриевого тока; Q – коэффициент температурной зависимости, необходимость его введения связана с разностью физиологической температуры и комнатной (20–25 °C), при которой проводились эксперименты по определению параметров модели.

Единицей измерения всех входящих в систему уравнения токов выбирается $\mu A/cm^2$.

Численные значения параметров, входящих в уравнения модифицированной модели Ходжкина – Хаксли, также были определены на основе опытов на изолированных волосковых клетках полукружного канала и саккулюса аксолотля и крысы, проведенных в лаборатории нейрофизиологии доктора Э. Сото в Заслуженном автономном университете Пуэбла в Мексике.

Параметры системы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры модели вестибулярного нейрона

Параметр	Численное значение	Доверительный интервал	Размерность
C_m	1	–	$\mu F/cm^2$
V_{Na}	52	–	mV
V_K	–84	–	mV
V_L	–63	–	mV
g_{Na}	2,3	2–8	mS/cm^2
g_K	2,4	1–2,6	mS/cm^2
g_L	0,03	0,02–0,16	mS/cm^2
Q_m	8,4	6,4–10,6	–

Изучение данной системы подразумевает построение области достижимости и анализ возможности обратного перехода системы из области притяжения точечного аттрактора (рис. 5) в область притяжения периодического аттрактора (рис. 4), что предоставляет математическую основу для понимания механизмов гальванической коррекции и ее применения в практических задачах визуального управления [13].

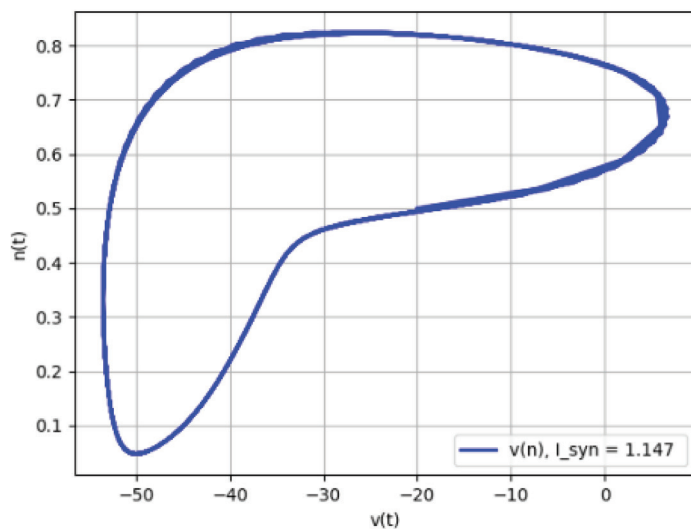


Рис. 4. Пример построения устойчивого предельного цикла при численном моделировании динамики АПН

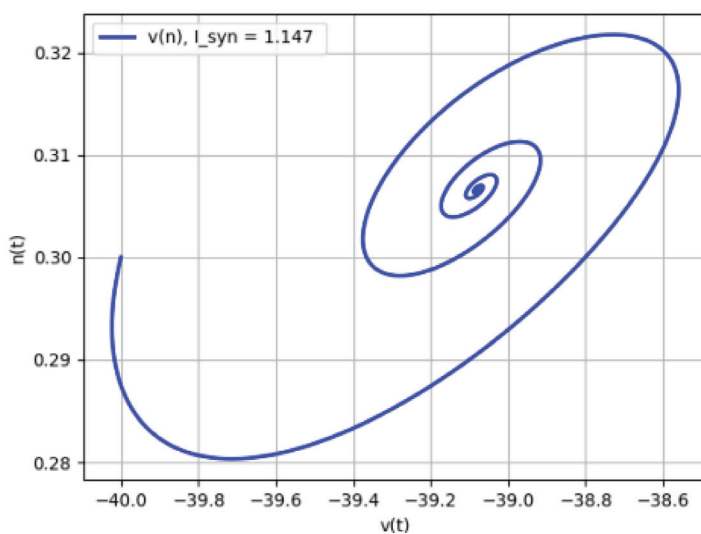


Рис. 5. Пример построения устойчивого фокуса при численном моделировании динамики АПН

Было показано, что под влиянием внешнего возмущения, которое в данном контексте может быть интерпретировано как гальваническое воздействие, система может совершать переход между этими двумя устойчивыми состояниями (см. рис. 6). Это открытие предполагает возможность контролируемой имитации «по выходу» (см. рис. 7) вестибулярного нейрона, что может быть использовано для коррекции визуального управления у космонавтов.

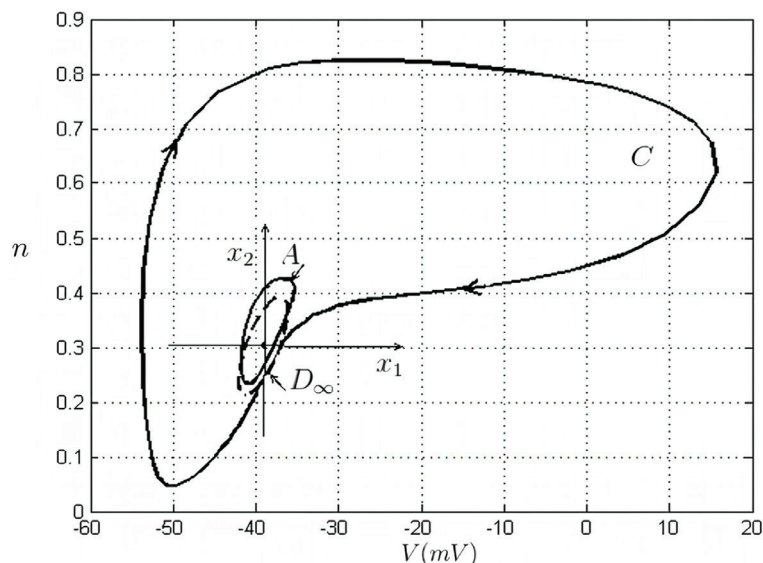


Рис. 6. Переход в бистабильной системе

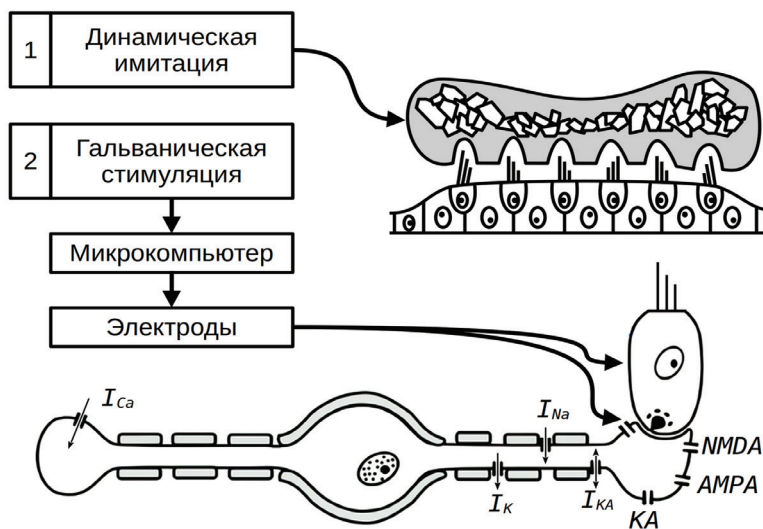


Рис. 7. Сравнение «классической» динамической имитации на стендах-тренажерах («по входу») и гальванической имитации («по выходу»)

Гальваническая коррекция может обеспечить значительное преимущество в точности и скорости восприятия визуальной информации, что критически важно в условиях, требующих мгновенной реакции. Таким образом, данные исследования могут быть применены для разработки новых методов тренировки космонавтов, повышения их адаптации к визуальным условиям управления в невесомости и улучшения общей безопасности полетов.

Однако для реализации этой технологии необходимы дальнейшие исследования, включая экспериментальное подтверждение теоретических моделей и разработку практических методик гальванической стимуляции, которые должны быть безопасными, эффективными и удобными в применении. В настоящее время продолжаются космические исследования, которые легли в основу научного задела межфакультетского центра «Математическое и программное обеспечение технологий виртуальной и смешанной реальности» МГУ. В 2021 году завершена орбитальная часть космического эксперимента «Вектор-МБИ-1» [15]. В 2023 году начата подготовка нового эксперимента «ГВС-1» по реализации гальванической вестибулярной стимуляции на орбите. Научной группой Института биомехатроники (г. Махачкала) был изготовлен прототип прибора гальванической стимуляции (рис. 8, 9), проводятся комплексные испытания изделия.

Предполагается применить гальваническую стимуляцию для формирования стабильного сигнала (идентичного сигналу, формируемому отолитовым органом при воздействии силы тяжести на Земле) на информационном выходе отолитового органа с целью обеспечить согласованность информации, передающейся от вестибулярного аппарата в центральную нервную систему.

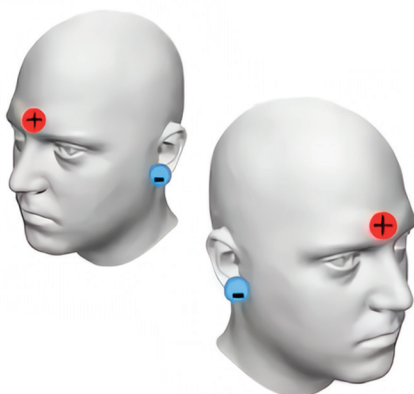


Рис. 8. Расположение электродов для гальванической стимуляции



Рис. 9. Внешний вид изделия для гальванической стимуляции

Для выполнения исследований установки взора необходимы средства измерения параметров направления оптической оси глаз испытуемого в пространстве, для чего применены средства определения углов поворота глаз относительно головы, совмещенные с инерциальными датчиками для определения параметров поворота головы в корпусе видеоокулографа. В качестве дополнения, позволяющего скорректировать показания видеоокулографа при перекрытии или потере видеоизображения, предложено оснастить видеоокулограф датчиками магнитного окулографа.

Для фиксации взора на точках с известным углом отклонения от центра создан экран с пятью предъявляемыми в программном режиме стимулами – светодиодами. Программа обеспечивает требуемую повторяемость необходимого числа предъявлений стимулов, но порядок предъявлений генерируется случайным образом, не позволяя испытуемому спрогнозировать следующее предъявление. Угловое отклонение периферических стимулов находится за областью четкого зрения, но внутри области периферического зрения, что позволяет испытуемому обнаружить включение светодиода, но требует поворота головы для фиксации на нем.

Ожидаемый результат эксперимента – снижение задержки взора и повышение комфорта, и как следствие – повышение качества и безопасности операторской деятельности в космосе, особенно при ручном управлении стыковкой, управлении различными устройствами, предназначенными для монтажа конструкций и спасения космонавта в случае возникновения нештатной ситуации, то есть в тех ситуациях, когда присутствует активный или пассивный поворот головы и важна скорость и точность восприятия визуальной информации и точность действий.

Высокоуровневые механизмы бионавигации

В последние годы виртуальная реальность постепенно внедряется в процесс подготовки к полетам в космос [16], применяется для исследования долгосрочных пилотируемых миссий и операторской деятельности в космосе [17]. Этот инструмент не только позволяет имитировать сложные условия космических миссий, но и обеспечивает безопасную среду для отработки экстренных процедур и повышения психологической устойчивости космонавтов к изоляции и ограниченному пространству. Однако внедрение виртуальной реальности требует тщательного подхода и учета всех аспектов влияния виртуальной среды на человека, включая возможные сенсорные конфликты и воздействие на вестибулярную систему.

Изучение так называемых высокоуровневых механизмов бионавигации, включающих в себя их отражение на психическом уровне, представляет собой отдельную задачу. Для ее решения требуется ввести в рассмотрение понятие сложной функциональной системы определения положения и ориентации тела человека в пространстве – многокомпонентной системы, состоящей из сенсорного, моторного и собственного когнитивного звена [18].

Функционирование такой системы, а также роль сенсорного и моторного компонента в ее работе, длительное время рассматривалось исключительно в экспериментах с различными тренажерными и имитационными системами, моделирующими реальное физическое перемещение тела человека. Однако с развитием систем визуализации и особенно устройств виртуальной реальности, существенно расширились возможности моделирования комбинации различных сенсорных и несенсорных факторов, влияющих на работу механизмов бионавигации человека.

Так системы виртуальной реальности позволили создавать условия предъявления объемной зрительной стимуляции, занимающей значительную часть зрительного поля и совершающей движение в различных направлениях. Тем самым классическая модель сенсорного конфликта [19], предполагающая появление вестибулярных нарушений вследствие рассогласования между поступающей зрительной и вестибулярной информацией из-за внесения существенных изменений в последнюю (например, как в случае с использованием гальваностимуляции или при «морской болезни»), была существенно дополнена индуцированным зрительно-вестибулярным конфликтом при варьировании интенсивности именно зрительного стимула.

Вращение виртуальной среды вокруг испытуемого, а также ее линейные перемещения приводили к появлению у человека комплекса дискомфортных симптомов, аналогичных симптомам кинетоза, а также возникновению новой психологической феноменологии – появлению иллюзии движения собственного тела, изменению эффекта присутствия в виртуальном пространстве. Для оценки выраженности этих состояний, а также в целях изучения механизмов их возникновения и протекания, сотрудниками межфакультетского центра «Математическое и программное обеспечение технологий виртуальной и смешанной реальности» МГУ были разработаны оригинальные психодиагностические приемы, а также экспериментальные парадигмы и способы обработки различных психофизиологических показателей.

Одной из первых решенных методических задач стало создание библиотеки сред виртуальной реальности, представляющих собой различные движущиеся пространства. Примером такой среды является виртуальный оптокинетический барабан – цилиндр, внутренние стенки которого окрашены в чередующиеся черные и белые полосы, совершающий вращения вокруг неподвижного испытуемого (рис. 10). В ходе экспериментов были установлены оптимальные скорости такого вращения для исследования порогов возникновения нарушений в работе системы определения положения и ориентации тела в пространстве [20].

Для оценки выраженности дискомфортных симптомов была адаптирована и многократно апробирована на русскоязычной выборке ставшая классической в области применения авиасимуляторов методика «Симуляторные расстройства» [21], которая была переведена на русский язык и показала свою эффективность в измерении степени головокружения, дезориентации

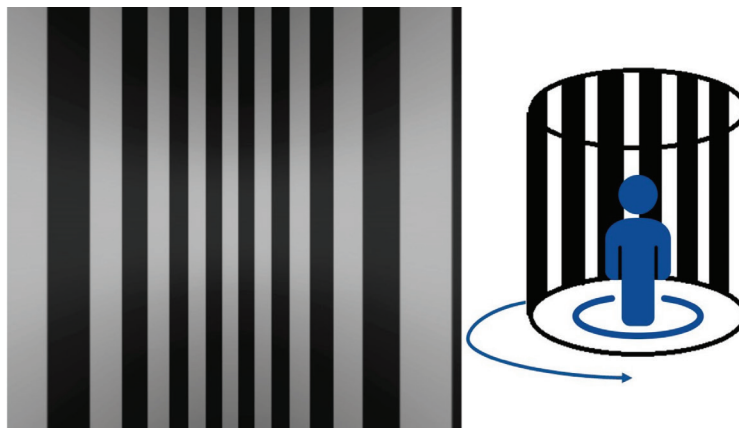


Рис. 10. Виртуальный оптокинетический барабан в системах виртуальной реальности

и потери координации при наблюдении объемного движения в условиях виртуальной реальности [22].

Использование вращающихся и движущихся линейно сред виртуальной реальности позволило в совокупности с интеграцией с системами регистрации движений глаз перейти к рассмотрению роли глазодвигательной активности в обеспечении вестибулярного функционирования. В частности, анализу был подвергнут особый тип движений глаз – оптокинетический нистагм, представляющий собой двухфазное движение, состоящее из фазы прослеживания взглядом движущегося стимула и скачкообразного перевода взора в первоначальную точку.

Роль оптокинетического нистагма в обеспечении работы вестибулярной функции человека и животных давно рассматривается в современной нейронауке и биомеханике [23], однако его изучению в системах виртуальной реальности было уделено ранее недостаточно внимания. С использованием разработанных приемов микроструктурного анализа пространственно-временных траекторий движений глаз человека при наблюдении движущейся объемной стимуляции в виртуальной среде удалось показать, что при замедлении прослеживающей фазы оптокинетического нистагма происходит нарастания дискомфортных симптомов, а также становится более выраженным иллюзорное переживание перемещения собственного неподвижного тела в пространстве [24].

Эти результаты, наряду с учетом факторов активности пользователя в виртуальной среде, обогащенности его двигательного опыта в прошлом [25], позволили уточнить модель сенсорного конфликта путем введения в нее звена управления движениями глаз. Данный результат применим при разработке современных методов подготовки космонавтов с использованием компактных систем виртуальной реальности.

Выводы

Научные исследования в области бионавигации, проведенные коллективом МГУ имени М.В. Ломоносова, демонстрируют значительный прогресс в понимании и моделировании работы вестибулярного аппарата человека. Важной частью работы стало изучение влияния невесомости на вестибулярный аппарат, что имеет значительные практические последствия для долгосрочных космических миссий. Применение стенда-центрифуги для динамической имитации орбитального полета позволило создавать моделируемые условия, близкие к реальному космическому полету, и обеспечивать ценными данными дальнейшие исследования, продолженные в 2023 году в ЦПК имени Ю.А. Гагарина.

Разработка математических моделей инерциальных механорецепторов позволила лучше понять механизмы бионавигации и способствовала разработке методов коррекции визуального управления с использованием автоматического гальванического вестибулярного стимулятора (АГВС). Таким образом, можно говорить о внедрении первой биомехатронной системы (вестибулоокулярной системы совместно с АГВС) для космических исследований и возможности ее применения для визуального управления в космосе.

Интеграция представленных подходов с современными системами виртуальной реальности позволит создавать реалистичные условия одновременно для визуального и вестибулярного информационных входов человека. Изучение высокоуровневых механизмов бионавигации человека в перспективе позволит не только улучшить подготовку космонавтов, но и минимизировать риски, связанные с возможными сенсорными нарушениями и дезориентацией в космосе.

Работа выполнена при поддержке Программы развития МГУ, проект научно-образовательной школы «Математические методы анализа сложных систем» № 23А-Ш05-05.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Steinhausen, W. Über die Beobachtung der Cupula in den Bogengangampullen des Labyrinths des lebenden Hechts // Pflügers Archiv für die Gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere. – 1933. – Vol. 232, No 1. – P. 500–512.
- [2] Модификация модели Ходжкина – Хаксли и математическая интерпретация основного закона нейрофизиологии «Все или ничего» / В.В. Александров, О.В. Александрова, И.А. Козик [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. – 2021. – № 3. – С. 67–70.
- [3] Hudspeth, A.J. A Model for Electrical Resonance and Frequency Tuning in Saccular Hair Cells of the Bullfrog / A.J. Hudspeth, R.S. Lewis // J. Physiol. – 1988. – Vol. 400. – P. 275–297.
- [4] Сентаготаи, Я. Роль отдельных лабиринтных рецепторов при ориентации глаз и головы в пространстве. – Ленинград: Наука. Ленингр. отд-ние, 1967. – 140 с.
- [5] Математические задачи динамической имитации аэрокосмических полетов / В.В. Александров, А.Ю. Ишлинский, В.А. Садовничий [и др.]. – Изд-во Московского Университета: Москва, 1995. – 160 с.

- [6] Функциональные свойства нервно-мышечного аппарата космонавтов и их изменения после семисуточного космического полета на МКС / Ю. Коряк, Ю. Гидзенко, М. Шаттлфорт [и др.] // Успехи современного естествознания. – 2007. – № 12(3). – С. 149–150.
- [7] Корнилова, Л.Н. Вестибулярная функция и межсенсорное взаимодействие в условиях измененной гравитации: специальность 14.00.32: диссертация на соискание ученой степени доктора медицинских наук / Корнилова Людмила Николаевна; Ин-т медико-биологических проблем. – Москва, 1998. – 104 с.
- [8] Challenges to the Vestibular System in Space: How the Brain Responds and Adapts to Microgravity / J. Carriot, I. Mackrous, K.E. Cullen [et al.] // Front Neural Circuits. – 2021, Nov 3. – Vol. 15.
- [9] Смирнов, Н.Н. Механика в московском университете / Н.Н. Смирнов, И.А. Тюлина. – Москва: Айрис-Пресс, 2005. – 352 с.
- [10] Моделирование сенсорного конфликта невесомости / Л.И. Воронин, Ю.Н. Глазков, Р.Д. Каспранский [и др.] // Международная научно-практическая конференция «Профессиональная деятельность космонавтов и пути повышения ее эффективности»: Тезисы докладов. 6–7 октября 1993 г., Звездный городок.
- [11] Корнилова, Л.Н. Нарушение вестибулярных функций и зрительного слежения в космическом полете и современные подходы к их коррекции (актовая речь). – Москва: ГНЦ РФ – ИМБП РАН. – 2009. – 82 с.
- [12] Mathematical Modeling of Output Signal for the Correction of the Vestibular System Inertial Biosensors / V.V. Aleksandrov, M.R. Romero, T.B. Alexandrova [et al.] // Proceeding of the 1st IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems. – New York, United States: IEEE Sensors Council, 2014.
- [13] О гальванической коррекции вестибулярной активности пилота при визуальном управлении полетом / В.А. Садовничий, В.В. Александров, О.В. Александрова [и др.] // Вестник Московского университета. – Серия 1: Математика. Механика. – 2019. – № 1. – С. 34–41.
- [14] Математическое моделирование информационного процесса в биосенсоре углового ускорения / В.А. Садовничий, В.В. Александров, Т.Б. Александрова [и др.] // Фундаментальная и прикладная математика. – 2018. – Вып. 22, № 2. – С. 17–32.
- [15] О задаче проверки носимого регистратора ускорений в условиях орбитального полета / П.А. Бахметьев, А.П. Кручинина, В.В. Латонов [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2021. – № 4(41). – С. 75–88.
- [16] Garcia, A.D. Training Astronauts using Hardware-in-the-Loop Simulations and Virtual Reality / A.D. Garcia, J. Schlueter, E. Paddock // AIAA 2020-0167. AIAA Scitech 2020 Forum. 2020.
- [17] Экспериментальные исследования возможности применения систем виртуальной реальности при моделировании на центрифуге управляемого движения лунохода / П.П. Долгов, В.Н. Киршанов, Е.Ю. Иродов [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2020. – № 3(36). – С. 91–108.
- [18] Меньшикова, Г.Я. Роль нистагменных движений глаз в формировании иллюзии движения собственного тела / Г.Я. Меньшикова, А.И. Ковалев // Вестник Московского университета. – Серия 14. Психология. – 2018. – № 4. – С. 135–148.
- [19] Reason J.T. Motion Sickness Adaptation: a Neural Mismatch Model // Journal of the Royal Society of Medicine. – 1978. – Vol. 71. – No 11. – С. 819–829.

- [20] Testing the Vestibular Function Development in Junior Figure Skaters Using the Eye Tracking Technique / G. Menshikova, A. Kovalev, O. Klimova, A. Chernorizov [et al.] // *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. – 2014. – Vol. 146. – P. 252–258.
- [21] Simulator Sickness Questionnaire: an Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness / R.S. Kennedy, N.E. Lane, K.S. Berbaum, M.G. Lilienthal // *The International Journal of Aviation Psychology*. – 1993. – Vol. 3, No 3. – P. 203–220.
- [22] The Effects of Optokinetic Nystagmus on Vection and Simulator Sickness / A. Kovalev, O. Klimova, M. Klimova, A. Drozhdev // *Procedia Computer Science*. – 2020. – No 176. – P. 2832–2839.
- [23] Ebenholtz, S.M. The Possible Role of Nystagmus in Motion Sickness: a Hypothesis / S.M. Ebenholtz, M.M. Cohen, B.J. Linder // *Aviation, Space, and Environmental Medicine*. – 1994. – Vol. 65. – No 11. – P. 1032–1035.
- [24] The Application of Virtual Reality Technology to Testing Resistance to Motion Sickness / G.Y. Menshikova, A.I. Kovalev, O.A. Klimova, V.V. Barabanshikova // *Psychology in Russia. State of the Art*. – 2017. – No 10(3). – P. 151–164.
- [25] Kovalev, A. Figure Skaters Eye Movements as Indices of Vection: VR Study / A. Kovalev, G. Menshikova, O. Klimova // *Perception*. – 2014. – 43(1). – P. 105–106.

REFERENCES

- [1] Steinhausen, W. Über die Beobachtung der Cupula in den Bogengangampullen des Labyrinths des lebenden Hechts // *Pflügers Archiv für die Gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere*. – 1933. – Vol. 232, No 1. – P. 500–512.
- [2] Modification of the Hodgkin – Huxley Model and Mathematical Interpretation of the Basic Law of Neurophysiology “All or Nothing” / V.V. Alexandrov, O.V. Alexandrova, I.A. Kozik [et al.] // *Bulletin of Moscow University*. – Series 1: Mathematics. Mechanics. – 2021. – No 3. – P. 67–70.
- [3] Hudspeth, A.J. A Model for Electrical Resonance and Frequency Tuning in Saccular Hair Cells of the Bullfrog / A.J. Hudspeth, R.S. Lewis // *J. Physiol.* – 1988. – Vol. 400. – P. 275–297.
- [4] Szentágothai J. The Role of Individual Labyrinthine Receptors in the Orientation of Eyes and Head in Space. – Leningrad: Nauka. Leningr. Ed., 1967. – 140 p.
- [5] Mathematical Problems of Dynamic Simulation of Aerospace Flights / V.V. Alexandrov, A.Y. Ishlinsky, V.A. Sadovnichy [et al.]. – Moscow University Press, Moscow, 1995. – 160 p.
- [6] Functional Properties of the Neuromuscular Apparatus of Cosmonauts and Their Changes After a Seven-Day Space Flight to the ISS / Yu. Koryak, Yu. Gidzenko, M. Shatlufort [et al.] // *Advances in Modern Natural Science*. – 2007. – No 12(3). – P. 149–150.
- [7] Kornilova, L.N. Vestibular Function and Intersensory Interaction in Altered Gravity Conditions: Specialty 14.00.32: Dissertation for the Degree of Doctor of Medical Sciences / L.N. Kornilova; SRC RF – IMBP RAS. – Moscow, 1998. – 104 p.
- [8] Challenges to the Vestibular System in Space: How the Brain Responds and Adapts to Microgravity / J. Carrier, I. Mackrous, K.E. Cullen [et al.] // *Front Neural Circuits*. – 2021, Nov 3. – Vol. 15.
- [9] Smirnov, N.N. Mechanics at Moscow University / N.N. Smirnov, I.A. Tyulina. – Iris-Press: Moscow, 2005. – P. 352.
- [10] Modeling of the Sensory Conflict of Weightlessness / L.I. Voronin, Yu.N. Glazkov, R.D. Kaspransky [et al.] // *International Scientific and Practical Conference*

- “Professional Activity of Cosmonauts and Ways to Increase Its Efficiency”: Abstracts of Reports. – October 6–7, 1993, Star City, Russia.
- [11] Kornilova, L.N. Violation of Vestibular Functions and Visual Tracking in Space Flight and Modern Approaches to Their Correction (Act Speech). – Moscow: State Scientific Center of the Russian Federation Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences. – 2009. – 82 p.
- [12] Mathematical Modeling of Output Signal for the Correction of the Vestibular System Inertial Biosensors / V.V. Aleksandrov, M.R. Romero, T.B. Alexandrova [et al.] // Proceeding of the 1st IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems. – New York, United States: IEEE Sensors Council, 2014.
- [13] On the Galvanic Correction of Vestibular Activity of a Pilot During Visual Flight Control / V.A. Sadovnichy, V.V. Alexandrov, O.V. Alexandrova [et al.] // Bulletin of Moscow University. Series 1: Mathematics. Mechanics. – 2019. – No 1. – P. 34–41.
- [14] Mathematical Modeling of the Information Process in the Angular Acceleration Biosensor / V.A. Sadovnichiy, V.V. Alexandrov, T.B. Alexandrova [et al.] // Fundamental and Applied Mathematics. – 2018. – Issue 22, No 2. – P. 17–32.
- [15] On the Task of Verifying a Portable Accelerometer Recorder in Orbital Flight Conditions / P.A. Bakhmetev, A.P. Kruchinina, V.V. Latonov [et al.] // Manned Spaceflight. – 2021. – No 4(41). – P. 75–88.
- [16] Garcia, A.D. Training Astronauts Using Hardware-in-the-Loop Simulations and Virtual Reality / A.D. Garcia, J. Schlueter, E. Paddock // AIAA 2020-0167. AIAA Scitech 2020 Forum. 2020.
- [17] Experimental Studies on the Application of Virtual Reality Systems in Simulating Controlled Motion of a Lunar Rover on a Centrifuge / P.P. Dolgov, V.N. Kirshanov, E.Y. Irodov [et al.] // Manned Spaceflight. – 2020. – No 3(36). – P. 91–108.
- [18] Menshikova, G.Ya. The Role of Nystagmic Eye Movements in the Formation of the Illusion of Self-Motion / G.Ya. Menshikova, A.I. Kovalev // Bulletin of Moscow University. Series 14. Psychology. – 2018. – No 4. – P. 135–148.
- [19] Reason J.T. Motion Sickness Adaptation: a Neural Mismatch Model // Journal of the Royal Society of Medicine. – 1978. – Vol. 71. – No 11. – C. 819–829.
- [20] Testing the Vestibular Function Development in Junior Figure Skaters Using the Eye Tracking Technique / G. Menshikova, A. Kovalev, O. Klimova, A. Chernorizov [et al.] // Procedia-Social and Behavioral Sciences. – 2014. – Vol. 146. – P. 252–258.
- [21] Simulator Sickness Questionnaire: an Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness / R.S. Kennedy, N.E. Lane, K.S. Berbaum, M.G. Lilienthal // The International Journal of Aviation Psychology. – 1993. – Vol. 3, No 3. – P. 203–220.
- [22] The Effects of Optokinetic Nystagmus on Vection and Simulator Sickness / A. Kovalev, O. Klimova, M. Klimova, A. Drozhdev // Procedia Computer Science. – 2020. – No 176. – P. 2832–2839.
- [23] Ebenholtz, S.M. The Possible Role of Nystagmus in Motion Sickness: a Hypothesis / S.M. Ebenholtz, M.M. Cohen, B.J. Linder // Aviation, Space, and Environmental Medicine. – 1994. – Vol. 65. – No 11. – P. 1032–1035.
- [24] The Application of Virtual Reality Technology to Testing Resistance to Motion Sickness / G.Y. Menshikova, A.I. Kovalev, O.A. Klimova, V.V. Barabanshikova // Psychology in Russia. State of the Art. – 2017. – No 10(3). – P. 151–164.
- [25] Kovalev, A. Figure Skaters Eye Movements as Indices of Vection: VR Study / A. Kovalev, G. Menshikova, O. Klimova // Perception. – 2014. – 43(1). – P. 105–106.