ФИЗИОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА, 2022, том 48, № 2, с. 113–136

ОБЗОРЫ

УДК 612.821

ИССЛЕДОВАНИЯ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОСТУРАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ. ВКЛАД РОССИЙСКОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ. ЧАСТЬ I

© 2022 г. О. М. Базанова[1], *, А. В. Ковалева[2]

[1]*ФГБНУ НИИ нейронауки и медицины, Новосибирск, Россия*

[2]*ФГБНУ НИИ нормальной физиологии имени П.К. Анохина, Москва, Россия*

**E-mail: bazanovaom@physiol.ru*

Поступила в редакцию 09.06.2021 г.
После доработки 20.06.2021 г.
Принята к публикации 29.07.2021 г.

Целью данной статьи был систематический обзор опубликованных результатов исследований психофизиологических механизмов регуляции поддержания позы и осанки и выявление тех ключевых факторов, которые влияют на эффективность постурального контроля. Для проведения обзора были соблюдены рекомендации “Предпочтительные элементы отчетности для систематических обзоров и мета-анализов” (*PRISMA*). Результаты были классифицированы с учетом целевых психофизиологических механизмов и факторов, влияющих на постуральный контроль. Представлены теоретические и эмпирические результаты русской научной школы исследования роли опоры на ноги в сенсомоторных механизмах когнитивных и постуральных функций. В связи с ограниченным количеством найденных рандомизированных исследований, было затруднительно осуществить мета-аналитические сравнения, поэтому анализ литературы проведен только качественно. Между тем систематический обзор представляет собой многообещающие сведения о возможных взаимосвязях стабилометрических и психологических показателей постурального контроля, имеющие теоретическое и прикладное значение. Однако необходимы более тщательные исследования, чтобы преодолеть методологические недостатки, с которыми столкнулись авторы данного обзора при качественном анализе.

Ключевые слова: постуральный контроль, сенсорная афферентация, внимание, память, эмоции, настроение, двойные задачи, тонкая моторика пальцев, стабилометрия, ЭЭГ, ЭМГ.

DOI: 10.31857/S0131164622020023

Современный интерес к изучению психофизиологических механизмов постурального контроля начинался с основополагающих трудов русских исследователей Н.А. Бернштейна [1] и В.С. Гурфинкеля [2], определявших постуральный контроль, как один из наиболее общих примеров сенсомоторной интеграции, осуществляемый с помощью механизма обратной связи [3]. Сама идея ключевой роли обратной связи в регуляции физиологических функций и психики родилась также в Российской физиологической школе Н.А. Бернштейна и П.К. Анохина [4, 5]. Нарушение механизма обратной связи между процессами афферентации, переработки информации и исполнительными звеньями сенсомоторной интеграции лежит в основе большинства психических расстройств [6, 7]. О взаимосвязи между расстройствами психики и нарушениями поддержания позы было замечено еще в античные времена [7]. Однако, до сих пор, эмпирических данных, представляющих доказательства наличия взаимосвязи между постуральными и психологическими характеристиками человека в норме недостаточно, не говоря, о малом количестве работ, исследующих психофизиологические механизмы постурального контроля. Между тем, изучение связи между особенностями двигательного контроля и психологических параметров имеет также и прикладное значение для разработки интерфейсов мозг-компьютер и технологии биоуправления, эффективность которых в значительной мере зависит от личностных особенностей, моторных и когнитивных способностей.

Следующий всплеск интереса к изучению постурального контроля возник также в советской физиологической школе в 60-х гг. прошлого столетия в связи с развитием исследований влияния невесомости (отсутствия гравитационных стимулов) на организм человека [8]. Работами, руководимыми И.Б. Козловской, впервые было установлено, что длительное отсутствие обратной

связи от опорных зон стопы имеет драматические последствия на все физиологические процессы [8, 9]. При этом особая роль отводится опорной афферентации (ощущениям опоры под ногами). Ослабление обратной связи от барорецепторов стопы способно вызывать множественные нарушения – начиная с расстройств биосинтеза структурных белков мышечной ткани [10], до патологии всего опорно-двигательного аппарата [11, 12], сердечно-сосудистой, дыхательной [9], эндокринной [13] и других вегетативных систем [14]. Так, при изучении организации сенсомоторной системы постурального контроля возникли новые понятия – "гравитационные механизмы" и "опорная афферентация" [8], были разработаны концепции афферентного контроля движений [8, 12], биомеханические исследования системы внутреннего представления в управлении движениями Ю.С. Левика и др. [15] и теории "перераспределения внимания" (*reweighting*) между различными видами афферентации в постуральном контроле *R. Peterka* [16]. В дальнейшем для преодоления последствий дефицита опорной афферентации показана перспектива использования стимуляции опорных областей подошвы, либо инструментально (с помощью оборудования, разработанного в Институте медико-биологических проблем, г. Москва) [17], либо с помощью тренинга ощущений опоры в передней части стопы с помощью целенаправленных техник Айкидо [18] или танцев [19], что сопровождается улучшением не только постуральных, но и когнитивных и психоэмоциональных функций [18, 19].

Изучение роли опорной афферентации в психофизиологическом здоровье приобрело новую актуальность с развитием современных информационных технологий, предполагающих использование в повседневной жизни все большего количества электронных гаджетов, ведущее к снижению физической активности и к изменению характера когнитивной деятельности [20]. Кроме отрицательных последствий малоподвижного образа жизни, длительное сидячее положение само по себе вызывает нарушение не только физиологических, но и когнитивных [21] и аффективных функций [20–23]. При этом необходимо учесть еще и негативное влияние электромагнитных волн высоких частот, вызываемое электронными приборами и гаджетами [24], которое также ассоциируется с когнитивными и психоэмоциональными нарушениями и даже с возникновением депрессивной симптоматики уже в детском и подростковом возрасте [24]. Таким образом, проблема нарушения постурального контроля вследствие ослабления опорной афферентации сидячего образа жизни приобретает особую актуальность.

Современная актуальность исследования психофизиологических механизмов постурального контроля также обусловлена необходимостью прогноза риска падений и коррекции баланса у пожилых людей, относительная численность которых неуклонно растет последние 20 лет [25].

Наконец, в годы пандемии COVID-19 возникла новая актуальность изучения взаимосвязи между постуральным контролем и когнитивными и аффективными функциями, во-первых, в связи с социальной изоляцией приводящей к малоподвижному сидячему образу жизни и, во-вторых, с ростом частоты депрессии как нейрофизиологического осложнения коронавирусного заболевания [26].

Таким образом, актуальность изучения психофизиологических механизмов постурального контроля продиктована, во-первых, задачей выявления стабилометрических индексов когнитивных и психоэмоциональных функций, а во-вторых, поиском инструментальных подходов к прогнозу, диагностике и реабилитации психических расстройств посредством исследования стабилометрических измерений постурального контроля.

В первой части обзора представлены стабилометрические характеристики постурального контроля, исследования взаимосвязи между постуральными и психологическими характеристиками, где отдельно уделено внимание роли различных входов в механизмах поддержания равновесия. Оценена роль двойных постурально-когнитивных и/или постурально-психомоторных задач в поддержании баланса и возможные нейробиологические механизмы постуральной устойчивости в норме.

Поскольку работы российских ученых внесли весомый вклад в изучение психофизиологических коррелят постурального контроля, настоящий обзор будет способствовать укреплению международного авторитета российской научной школы.

Для обзора исследований, посвященных изучению психофизиологических механизмов постурального контроля поиск литературы проводили по ключевым словам "постуральный контроль", "сенсомоторная интеграция", "сидячий образ жизни", "гравитация", "опорная", "вестибулярная", "проприоцептивная" и "зрительная" "афферентация", в сочетании с такими ключевыми словами, как "когнитивные функции", "память", "внимание", "принятие решения", "воображение", "эмоции", "тонкая моторика", "двойные задачи", "тревожность", "депрессия", "стабилометрия", "Электроэнцефалография", "Электромиография" (табл. 1). Поиск литературы проводили в базах данных *Web of Science*, *PubMed*, *Scopus* и РИНЦ в соответствии с рекомендациями "Предпочтительных элементов отчетности для систематических обзоров и мета-анализов"

Таблица 1. Поисковая стратегия по теме психофизиологические корреляты стабилометрических характеристик постурального контроля в системе *MEDLINE*

Номер позиции	Ключевые слова	Количество найденных источников
1	*Posture AND control AND Stabilometry OR posturography*	2014
2	Сочетание #1 *AND vestibular*	31
3	Сочетание #2 *AND cognitive AND task AND performance*	1
4	Сочетание #2 *AND attention*	3
5	Сочетание #2 *AND memory*	2
6	Сочетание #2 *AND affective*	10
7	Сочетание #1 *AND visual*	102
8	Сочетание #7 *AND cognitive*	35
9	Сочетание #7 *AND attention*	5
10	Сочетание #7 *AND memory*	3
11	Сочетание #7 *AND affective*	2
12	Сочетание #1 *AND gravity*	92
13	Сочетание #12 *AND attention*	1
14	Сочетание #12 *AND memory*	0
15	Сочетание #12 *AND emotion*	0
16	Сочетание #12 *AND cognitive AND task AND performance*	1
17	Сочетание #1 *AND muscles*	256
18	Сочетание #17 *AND cognitive task*	15
19	Сочетание #17 *AND emotion*	5
20	Сочетание #17 *AND memory*	0
21	Сочетание #1 *AND proprioceptive*	0

(*PRISMA*) и с помощью методов, описанных в консорциуме *RELISH* (*RElevant LIterature SearcH*) [27]. В настоящий обзор включили результаты, опубликованные в статьях, имеющих цифровой идентификатор объекта (*DOI*), полностью соответствующих ключевым словам (табл. 1), исключая опубликованные только в виде тезисов.

После удаления повторяющихся ссылок, списки включенных исследований были проверены, а сводки результатов поиска, по ключевым словам, представлены соответственно в табл. 2–4.

Стабилометрические измерения постурального контроля

Весомый вклад русской научной школы был сделан в самом начале исследования постурального контроля для объективизации измерений постуральной устойчивости. Согласно рекомендациям международного консенсуса по измерениям постурального контроля [27], созданного на основе “Методики исследования устойчивости стояния”, разработанной в 1952 г. русскими исследователями [28], эффективность системы под-

Таблица 2. Взаимосвязь стабилометрических и психофизиологических показателей постурального контроля при зрительной афферентации

Источник	*RCT*/*SGT*/*CCS*	Количество испытуемых (количество женщин), (возраст)	Стабилометрические показатели, процедура (оборудование для измерения)	Измерения психофизиологических функций	Заключение
Зрительная афферентация					
Сметанин и др., 2020 [56]	*RCT*	12 (6) здоровых, возраст (–)	Отфильтрованные сагитальные компоненты *MF* и *RMS* колебаний (ЦТ и ЦДС-ЦТ). Испытуемые использовали очки с поляризационными фильтрами, ориентированными параллельно по отношению к соответствующим фильтрам проекторов	Созерцание картины с двумя планами одной и той же сцены, смещенных относительно друг друга: вид из окна на акведук (42 сессии по 3 одноименных, 40 с каждая в рандомизированном порядке)	Установлено, что в используемых условиях: 1) постуральный контроль зависит от параметров “привязки” (получения обратной связи) переднего плана визуализируемой среды к сдвигам тела испытуемого, несмотря на наличие неподвижного фона; 2) первоначальная дестабилизация тела при задержке обратной связи на 0.2 и 0.5 с, стабилизация при задержке 0.8 и 1.0 с
Сметанин и др., 2016 [58]	*SGT*	16 (8) здоровые (64.3 ± 7.6 года)	Амплитудно-частотные характеристики КЦДС в *AP* и *ML* направлениях	Зрительное восприятие (видели только виртуальное трехмерное изображение шара)	В тестовых условиях смещения шара дестабилизировали вертикальную позу. С увеличением размеров шара дестабилизация усиливалась
Кожина и др., 2018 [65]	*SGT*	4 (–) здоровых испытуемых, возраст (–)	Амплитудным и частотным характеристикам переменных ЦТ и ЦД–ЦТ	Выполняли 35 проб зрительного восприятия длительностью 40 с	Процесс стояния в условиях однотипной дестабилизации видимого зрительного окружения к концу проб существенно изменялся, приближаясь по устойчивости к условиям при неподвижном зрительном окружении

Таблица 2. Окончание

Источник	*RCT*/*SGT*/*CCS*	Количество испытуемых (количество женщин), (возраст)	Стабилометрические показатели, процедура (оборудование для измерения)	Измерения психофизиологических функций	Заключение
Redfern et al., 2007 [66]	*RCT*	59 (48) с тревожными расстройствами; 22 (19) здоровых; 21 с паническими расстройствами и агорофобией	*RMS* КЦДС на стабильной платформе и платформе с синусоидальным движением визуального окружения в *AP* направлении	Тревожность; боязнь высоты	Пациенты значительно больше раскачивались в ответ на движущуюся визуальную сцену по сравнению с контрольными субъектами, без различий между группами *NPA* и *PAG*. У пациентов с высокой фобией пространства КЦДС значительно больше, чем у пациентов в контрольной группе и у тревожных пациентов с низкой фобией
Гудков и Демин, 2011 [67]	*RCT*	80 мужчин (возраст 69.0 ± 6.6 лет), 2 группы: зрение в норме и плохое зрение	Скорость КЦДС, средний радиус отклонения КЦДС (*R*ср, мм) в *AP* и *ML* направлениях на “Стабилотест” СТ-01	Жалобы на зрение	Ухудшение зрения сопровождается увеличением скорости КЦДС, *R*ср и КЦДС в *AP* направлении
Lions, 2016 [68]	*RCT*	12(–) испытуемых (от 17.3 до 34.1 лет)	Скорость КЦДС с использованием платформы *Multitest*; движения глаз регистрировали с *Mobile T2* (*e*(*ye*)*BRAIN1*)	Амплитуда саккад; длительность удержания зрительного внимания	Скорость КЦДС в условиях зрительной задачи поиска значительно меньше, чем в динамических условиях свободного просмотра
García-Liñeira, *et al.*, 2021 [120]	*RCT*	316 (158) испытуемых (6–12 лет)	Характеристики ускорения по трем осям *X*, *Y* и *Z*. *RMS* стоя на одной ноге ОГ и ЗГ (*Actigraph LLC*)	Реакция на закрывание глаз	Ускорение колебаний тела больше при ЗГ. Величина увеличения *RMS* снижалась с возрастом медленнее у мальчиков, чем у девочек

Примечание: RCT – рандомизированное контролируемое исследование; *SGT* – исследование в одной группе; *CCS* – исследование случай-контроль; ЦДС – центр давления стоп; КЦДС – колебания центра давления стоп; ЦТ – центр тяжести; *RMS* – среднеквадратическое значение спектра колебаний ЦДС-ЦТ; ЗГ – закрытые глаза; ОГ – открытые глаза.

Таблица 3. Взаимосвязь стабилометрических и психофизиологических показателей постурального контроля при вестибулярной, проприоцептивной и опорной афферентациях

Источник	*RCT*/*SGT*/*CCS*	Количество испытуемых (количество женщин), возраст	Стабилометрические показатели, процедура (оборудование для измерения)	Измерения психофизиологических функций	Заключение
Вестибулярная афферентация					
Grabherr et al., 2007 [72]	*SGT*	8 космонавтов	Микрогравитация	Время решения ментальной задачи, требующей мысленного преобразования собственного тела или частей тела; частота ошибок	В условиях микрогравитации увеличивается время решения задачи
McKay et al., 2013 [75]	*SGT*	31 здоровые	Вестибулярная стимуляция холодной водой последовательно в оба уха	Самооценка будущего риска заболеть	Вестибулярная стимуляция снизила нереалистичный оптимизм
Chen et al., 2018 [101]	*SGT*	23 (–) пациента с болезнью Паркинсона (БП), 23 (–) здоровых	КЦДС (*RMS*); производная КЦДС (*JERK*)	*Mini-Mental State Examination* (*MMSE*); *Montreal Cognitive Assessment* (*MoCA*); *Geriatric Depression Scale* (*GDS*); *Dual cognitive-postural task*	Во время двойной задачи *RMS* и *JERK* увеличивались у БП пациентов больше, чем у здоровых
Indovina et al., 2019 [53]	*RCT*	52 (–) субклиническая агорафобия; 52 (–) контрольная группа	Стойкое постуральное перцепционное головокружение	19 демографических, психологических и психиатрических переменных	При агорофобиии снижена функциональная связность между зрительной и вестибулярной сетями, отмечены более низкие показатели связи в двух мозговых сетях, одна из которых предназначена для обработки входящей визуальной информации о движении в пространстве, оценки угрозы и инициирования/подавления поведенческих реакций (визуально-пространственно-эмоциональная сеть), а другая – для контроля и мониторинга передвижения (вестибулярно-навигационная сеть)

Таблица 3. Продолжение

Источник	*RCT*/*SGT*/*CCS*	Количество испытуемых (количество женщин), возраст	Стабилометрические показатели, процедура (оборудование для измерения)	Измерения психофизиологических функций	Заключение
Ribeyre et al., 2016 [128]	*SGT*	26 (15) вестибулярная шваннома (25–76 лет)	*Sensory Organization Test* (*SOT*) Тест поддержания равновесия	Качество жизни, тревожность, депрессия и реакция совладания со стрессом	Чем больше постуграфические нарушения, тем хуже качество жизни, больше аффекты тревоги и депрессии, более серьезные повседневные последствия и отрицательная реакция совладания со стрессом
Kerr, 1985 [129]	*SGT*	24 (12) здоровых	Тест Ромберга тандем в течение 12 с (*Kistler force platform*) в ЦДС-ЦоТ в переднезаднем и медиально-латеральном направлении	Задача на пространственную память; задача на ассоциативную память	В положении стоя отмечено снижение оценок запоминания пространственной задачи. Запоминание сидя лучше, чем стоя для пространственной, но не для простой памяти
Doumas et al., 2012 [102]	*RCT*	15 (8) с большим депрессивным расстройством (БДР), 24 (11) здоровых (18–35 лет)	Стоя и сидя на стабильной и движущейся платформе в покое и при решении когнитивной задачи	Задача на рабочую память	У БДР снижение точности рабочей памяти по сравнению с контролем. Выполнение двойных задач привело к снижению точности. В контроле точность не различалась между двумя условиями двойной задачи. У БДР значительно отличалась, но устойчивость не снижалась
Dutta et al., 2014 [130]	*SGT*	104 (50) (71 ± 3 лет), 24 (–) до и после СТГ биоуправления; “падающие”; “непадающие”	Шкала баланса Берга (*BBS*). КЦДС (*Wii Balance Board*)	Индийский тест когнитивных способностей (*HMSE*); Гериатрическая шкала депрессии (*GDS*); 14-канальная ЭЭГ	КЦДС у женщин >, чем у мужчин, обратная корреляция с *HMSE*. КЦДС, отношение θ/α мощности ЭЭГ у “более депрессивных” больше, чем у менее депрессивных

Таблица 3. Продолжение

Источник	*RCT*/*SGT*/*CCS*	Количество испытуемых (количество женщин), возраст	Стабилометрические показатели, процедура (оборудование для измерения)	Измерения психофизиологических функций	Заключение
Leandri et al., 2009 [62]	*RCT*	15(8) амнезия (*aMCI*); 15(8) средневыраженная болезнь Альцгеймера (БА); 15(8) контроль	КЦДС *AP*; ЦДС *ML*; площадь СТГ; Тест Ромберга	*Unified Parkinson's Disease*; *Rating Scale* (*UPDRS*); *Geriatric Depression Scale*; *Basic Activities of Daily Living* (*BADL*)	ЦДС *AP* коррелировал с моторной шкалой *UPDRS* у БА пациентов, специфически отличался от *aMCI* здорового контроля
Kapoula et al., 2011 [76]	*RCT*	23 (–) пациентов с глухотой: 12 (–) слева, 8 справа и 3 билатеральная; 18 контроль	Стабилометрия с помощью *Technoconcept*, 40 Гц	Внимание на звук увеличено, на позу снижено	Увеличение медиа латерального перемещения больше у лиц с глухотой, когда отвлекается внимание
Проприоцептивный вход					
Ivanenko et al., 2000 [78]	*SGT*	6(–) здоровых (20–49 лет)	Колебания КЦДС с ЗГ, использовали: жесткий пол; подвижную опору, для поступательного вращательного движения во фронтальном направлении; опору, повернутую на 90 град, для вращательного движения в сагиттальном направлении; подвижную опору, для трансляционно-поворотного движения в любом направлении	Умеренная вибрация (60 Гц, 0.8 мм) к сухожилиям передней большеберцовой мышце (*TA*) (на 3–5 см выше голеностопного сустава) или к ахилловым сухожилиям трехглавой мышцы бедра (*TS*) с помощью двух идентичных вибраторов (300 мм), длиной 9 см при диаметре 4 см; ЭМГ-активность мышц голеностопного сустава; ЭМГ-активность камбаловидной и передней большеберцовой мышц; субъективная оценка трудности	Влияние вибрации мышц голени резко уменьшалось на подвижной опоре, эффект зависел от направления – вибрация мышц изменяла конфигурацию тела только на тех опорах, которые были устойчивы в сагиттальной плоскости. Дифференциальный эффект не объяснялся субъективными трудностями в поддержании равновесия. Реакции присутствовали на фронтальных качелях, несмотря на то, что субъективно было сложнее удерживать равновесие, а опорные колебания в этом случае были больше, чем при стоянии на сагиттальных качелях

Таблица 3. Продолжение

Источник	*RCT/SGT/CCS*	Количество испытуемых (количество женщин), возраст	Стабилометрические показатели, процедура (оборудование для измерения)	Измерения психофизиологических функций	Заключение
Гусаров и др., 2020 [77]	*RCT*	14(–) спортсмены (16–20 лет), 7(–) экспериментальная группа и 7 (7) контрольная	Амплитуда, скорость и площадь КЦДС стабилометрическая в момент фиксации статического упражнения (платформа “МБН”)	Стимуляция двуглавой мышцы бедра и латеральной головки икроножной мышцы на левой ноге. Сила тока – 5 А, частота– 20 Гц, время – 1 мин, чередование воздействия (2 с) и паузы (2 с)	Статическое упражнение “наклон в правую сторону”, с фиксацией его в течение 1 мин, вызывает статистически значимое смещение проекции общего центра массы тела вправо во фронтальной плоскости в краткосрочной перспективе. При электромиостимуляции (ЭМС) на левой мышце в момент удержании позы, происходит статистически значимое смещение проекции ЦДС вправо. Изменения скорости и площади ЦДС статистически недостоверны в краткосрочной перспективе при ЭМС и без нее
Roma et al., 2021 [82]	*RCT*	31 молодых, 30 пожилых (ОГ и ЗГ)	Длина, площадь и скорость КЦДС; *RMS*	Тест пространственной памяти; счет назад; ментальная арифметика; ЭМГ мышц *Tibialis anterior* (*TA*), *Lateral Gastrocnemius* (*GL*), *Peroneus Longus* (*PL*), *Erector Spinae* (*ES*)	Решение когнитивных задач не вызвало напряжения во всех мышцах, кроме *PL* и *ES* и снижение для всех постурографических характеристик вне зависимости от возраста. Исполнение когнитивной задачи вслух вызывает усиление активации *ES*- и *TA*-мышц и ухудшение статического контроля позы

Таблица 3. Продолжение

Источник	*RCT*/*SGT*/*CCS*	Количество испытуемых (количество женщин), возраст	Стабилометрические показатели, процедура (оборудование для измерения)	Измерения психофизиологических функций	Заключение
			Опорная афферентация		
Stawicki, 2021 [19]	*SGT*	23 женщины – танцоры (21.3 ± 1.7 лет); 24 – не танцоры (22.3 ± 1.0 лет)	Скорость перемещения ЦДС; различная позиция ступней	Опыт движения ногами	Значимые различия в устойчивости при ЗГ ($p = 0.04$)
Abou Khalil et al., 2020 [21]	*RCT*	18 (9) здоровых (23.11 ± 1.68 лет)	Положение сидя, стоя, ходьба	Задача запоминания слов, представленных визуально; арифметические задания	Запоминание слов наиболее эффективно при ходьбе. В положении сидя быстрее время реакции по сравнению с положением стоя и ходьбой
Roerdink et al., 2011 [42]	*SGT*	15 (0) (22 ± 1 лет)	ЦДС *AP* и *ML* в течение 32 с сидя и стоя; ЦДС регулярность	Время реакции на стимул; внимание на зрительный стимул	ЦДС более регулярны в положении стоя, чем сидя. Внимание на постуральный контроль больше стоя, чем сидя. Время реакции на стимул стоя меньше, чем сидя
Zehr, 2014 [86]	*SGT*	14 здоровых (8) (30.3 ± 10 лет)	Ходьба на бегущей дорожке; ЭМГ плеча и ноги ипсилатеральной	Стимуляция пяти точек на подошве	Статистически значимое увеличение амплитуд рефлексов, кинематики и давления на подошву стопы, которые зависят от места и фазы. Обратная связь от кожи подошв ног играет важную роль в контроле походки и равновесия стоя

Таблица 3. Окончание

Источник	*RCT*/*SGT*/*CCS*	Количество испытуемых (количество женщин), возраст	Стабилометрические показатели, процедура (оборудование для измерения)	Измерения психофизиологических функций	Заключение
Mochizuki et al., 2008 [107]	*RCT*	8 (4) здоровые (26.1 ± 7.8 лет)	КЦДС в положении сидя, стоя и в начале движения стоя на платформе (*AccuSwayPLUS*)	ЭМГ туловища и шеи; ЭЭГ в C_z	Ожидание нарушения равновесия вызывает такие же изменения активности коры, как реальное нарушение баланса, вне зависимости от положения сидя или стоя
Bourdin et al., 1998 [104]	*SGT*	9 (3) пожилые (71.1 лет); (3) молодых (24.6 лет)	ЦДС на платформе (*AMTI model OR*6-5-1) сидя *vs.* стоя	Время реакции на звуковые стимулы	Сидя и стоя с ЗГ – задача поддержания равновесия становилась труднее для пожилых людей и требовала большего внимания (увеличение времени реакции)
Azevedo, 2005 [126]	*SGT*	48 мужчин (24.2 ± 4.7 лет)	Амплитуда КЦДС	*R*–*R* интервал; оценка выраженности эмоции	Снижение амплитуды КЦДС во время представления изображений увечий по сравнению с изображениями спортивных состязаний и предметов. *RR* модуляция продолжалась после предъявления стимулов. Увеличение *MF* во время блока увечий по сравнению со спортивными в медиально-латеральном направлении

Примечание: обозначения см. табл. 2.

Таблица 4. Взаимосвязь стабилометрических и психофизиологических показателей постурального контроля при выполнении двойных задач и сенсорной модуляции

Источник	*RCT*/ *SGT*/ *CCS*	Количество испытуемых (количество женщин), возраст	Стабилометрические показатели, процедура (оборудование для измерения)	Измерения психофизиологических функций	Заключение
Aftanas et al., 2018 [83]	*RCT*	25 (11) здоровых; 25 (11) большое депрессивное расстройство (БДР)	*E* КЦДС в ЗГ и ОГ, Δ*E* при решении двигательной и идеомоторной задач	Шкала депрессии (*BDI*-II); уровень руминации (*RRS*); тест оппозиционного приведения пальцев; подсчет количества движений; подсчет количества воображаемых движений	Беглость движения пальцев у БДР меньше, чем у здоровых. *E* увеличивалась у здоровых при моторной и идеомоторной задачах, у больных снижалась. Δ*E* положительно коррелировало с уровнем руминации
Модуляция афферентных входов					
Vuillerme, 2003 [84]	*SGT*	9 (4) здоровыех (23.8 ± 2.6 лет)	ЦДС при ЗГ 4 состояния: покой/отсутствие прикосновений, покой/прикосновения, утомляемость/отсутствие прикосновений и усталость/прикосновение	Усталость икроножных мышц вызывалась тем, что участники стояли на носках до изнеможения	Легкое прикосновение пальцами приводило к уменьшению постурального раскачивания в условиях отсутствия утомления и при утомлении. Интересно, что этот стабилизирующий эффект сильнее проявлялся в состоянии утомления
Кожина и др., 2017 [85]	*SGT*	Здоровые добровольцы – 8 мужчин (47.6 ± 5.3 лет); 6 женщин (43.0 ± 5.2 лет)	Покой; в присутствии слабо ощущавшегося (0.1–0.8 *N*) тактильного контакта наружной поверхности предплечья левой расслабленной руки с плоскостью свободного конца упругой стальной пластины (пассивное касание); среднеквадратическое значение спектров колебаний (*RMS*) ЦТ и ЦДС; КЦДС в *PA* и *ML*: *MF* (переменная ЦДС–ЦТ) (Стабилоплатформа-2)	Созерцание двух изображений одной и той же сцены, смещенных относительно друг друга: вид из окна на акведук	*RMS* (ЦДС–ЦТ) и *RMS* (ЦДС) при неподвижном зрительном окружении и при противофазной связи переднего плана с колебаниями тела в покое в отсутствие тактильного контакта, как и при пассивном тактильном контакте спектров колебаний обеих переменных были наименьшими и наибольшими при синфазной связи и стоянии с ЗГ. В условиях пассивного контакта колебания тела уменьшались в обоих направлениях, и *RMS* спектров обеих переменных (ЦТ и ЦДС–ЦТ) снижались при всех зрительных условиях. В условиях тактильного контакта статистически достоверное увеличение *MF* спектров переменной ЦДС–ЦТ было выявлено только для колебаний тела в сагиттальной плоскости
Deschamps, 2016 [73]	*SGT*	5 (3) здоровые (50.41 ± 6.93 лет); 9 (5) БДР (51.88 ± 10.01 лет)	КЦДС скорость с ЗГ и ОГ, программа ходьбы три раза в неделю в течение 2-х мес.	*BDI* – шкала депрессии	Уровень депрессии не изменился

Примечания: E – энергия на поддержание равновесия; остальные обозначения см. табл. 2.

держания равновесия оценивается с помощью измерений колебаний центра давления стоп (КЦДС) относительно центра тяжести (ЦТ) [29]. Эти колебания, прежде всего, отражают движения сегментов тела или суставов, активность мышц, но также и движения, связанные с дыханием [30] и работой сердечно-сосудистой системы [31]. Таким образом, к прежней оценке постуральной устойчивости по результатам клинических тестов прибавились инструментальные измерения амплитуды и частоты колебаний ЦТ и КЦДС в антерио-постуральном (КЦДС_АР) и медиолатеральном направлениях (КЦДС_ML) с помощью стабилографического оборудования [28, 30]. В дальнейшем было установлено, что КЦДС_АР – наиболее чувствительный показатель “боязни падения” и ситуативной тревожности [32].

Спектральный анализ постуральных колебаний позволил установить, как минимум две частотные системы постуральной устойчивости, которые были названы по образному выражению русских исследователей лаборатории Гурфинкеля “консервативная” (меньше 2 Гц) [33] и “оперативная” (больше 4 Гц) [15]. Далее в группе Ю.С. Левика [15] было установлено, что относительно высокочастотные колебания ЦДС не влияют на величину колебаний ЦТ [15, 29]. КЦДС с частотами ниже и выше 1 Гц свидетельствуют о противоположном влиянии на рефлексы и ЭМГ-активность *m. soleus* при стоянии [34]. Оценку влияния экспериментальных условий на процесс поддержания вертикальной позы производили, анализируя изменения медианной частоты (*MF*) и среднеквадратического значения амплитудных спектров (*RMS*) в диапазонах 0–0.5 Гц для переменной ЦТ и 0–3.0 Гц для переменной КЦДС–ЦТ. Так, недавними исследованиями Г.В. Кожиной и др. было показано, что КЦДС с частотами больше 0.5 Гц практически не отражаются на величине колебаний ЦТ и не зависят от антропометрических параметров испытуемых [35].

Доказательства сосуществования двух систем поддержания равновесия были представлены при изучении невесомости в русской школе космической медицины [29], в дифференциальной диагностике вестибулярных нарушений [36], а также с помощью теоретической модели *B.W. Dijkstra et al.* [37]. Установлено, что при кратковременном отсутствии гравитации (невесомости) способность поддержания равновесия сохраняется, несмотря на то, что консервативная (тоническая) система поддержания баланса сразу нарушается, но вступает в силу произвольный контроль поддержания позы [29]. Это указывает на два различных типа контроля позы, действующих в разных временных масштабах, что доказывает весомый вклад когнитивного компонента в постуральный контроль [38]. Позднее статистический анализ выявил три типа динамики КЦДС, коррелирующих с психофизиологическими индексами [29, 38]. Например, о присутствии паркинсонического тремора сигнализирует пик в области 3–5 Гц [39]. Включение центра масс в анализ системы поддержания равновесия, предложенное сначала русскими [27], а затем японскими [40, 41] исследователями, позволяет исследовать зависимость постурального контроля от таких факторов, как возраст [37, 41] и дыхание [41].

Поскольку система постурального контроля не может быть описана, как линейная система, в последние годы к анализу стабилографической информации применяются методы нелинейной динамики, в частности, расчеты корреляционной размерности, ляпуновских показателей энтропии Шеннона–Колмогорова–Климонтовича, регулярности перемещения ЦД [39, 42, 43]. Такой анализ позволяет оценить роль когнитивного компонента постурального контроля [42, 43]. Один из таких интегральных показателей – это затраты энергии на КЦДС, разработанный французскими [44] и русскими [45] исследователями, рассчитывается как сумма приращений кинетической энергии (в джоулях) (*E*), обусловленных изменением скорости смещения центра давления на каждом дискретном участке статокинезиограммы (СТГ) за время теста. Использование этого показателя позволяет количественно оценить функциональную активность, необходимую для поддержания стабильности позы [44, 45]. В настоящее время разработаны компьютерные технологии измерения устойчивости позы с помощью стабилометрического [46] анализа, которые возможно осуществлять даже с помощью смартфонов [47]. При этом установлено, что измерение скоростных стабилометрических показателей КЦДС более предпочтительно, чем акселерометрических [48].

Психофизиологические корреляты постурального контроля

Контроль вертикальной позы является одной из ключевых эволюционно значимых функций человека, предполагающий участие высшей нервной системы [49], функции которой базируются на законах саморегуляции с использованием обратных связей [1, 5]. На протяжении последних 100 лет изучению кинетических и биофизических механизмов поддержания позы человека посвящены множество обзорных статей и эмпирических исследований [50–52]. Однако вопросы, каким образом постуральные стабилометрические характеристики связаны с психофизиологическими коррелятами эффективности когнитивной и психоэмоциональной деятельности исследованы в настоящее время недостаточно. Имеющиеся работы чаще посвящены обсуждению неврологи-

ческих последствий нарушения постуральных характеристик и в меньшей степени представлены данные об участии высшей нервной деятельности в биофизических механизмах поддержания равновесия [53, 54]. Между тем, успех взаимодействия человека с внешней средой связан не только с эффективностью восприятия сигналов от зрительной, вестибулярной, проприоцептивной и барорецепторной систем, что определяет автоматическую стабилизацию тела в покое и при движении [55], но и с точностью внутреннего представления о положении собственного тела в пространстве, когнитивной оценкой структуры, размеров и движений объектов внешнего мира [35]. Если одна или несколько из этих систем нарушены, как часть процесса старения или неврологического заболевания, то система постурального контроля должна корректировать относительные весовые коэффициенты входных данных для поддержания баланса [16, 36].

Данные о взаимосвязи психофизиологических и стабилометрических показателей поддержания равновесия представлены в табл. 2 по разделам в соответствии с модальностью сенсорной афферентации. Отдельно в табл. 2 представлены результаты исследования парадигмы двойных когнитивно- или моторно-постуральных задач.

Роль зрительной афферентации в психофизиологических механизмах постурального контроля. Зрительная система участвует в решении задачи стабилизации позы, участвуя в оценке величины, скорости и направления КЦДС [29, 57] (табл. 2). Это означает, что при нарушении стационарности видимого окружения роль зрительной афферентации увеличивается [29, 57], что, в свою очередь, объясняет факт, что зрительные входы для постурального контроля, имеют бóльшее значение, чем вестибулярные или проприоцептивные [57, 58]. В ряде работ О.В. Казенникова и др. [59] было показано, что система поддержания равновесия может игнорировать сигналы, несущие недостоверную или неоднозначную информацию. При многократном повторении проб с возмущением равновесия показатели устойчивости приближались к показателям при обычном стоянии с открытыми глазами [60]. Поэтому авторы предположили, что повышение качества стояния при последовательном повторении однотипных проб является результатом тренировки более эффективного использования зрительной обратной связи.

Распространенная уже 150 лет оценка зрительной активации в Тесте Ромберга позволила выявить аномалии, связанные с дефицитом постурального контроля неврологического [61] и/или когнитивного [62] генеза. С одной стороны наличие центрального зрения позволяет быстрее преодолевать усталость [63], а с другой *V. Nougier et al.* показали, что для сохранения баланса не важно, центральное или периферическое зрение используется [64]. Компромиссом этого противоречия служат исследования Б.Н. Сметанина и др., показавших, что центральное зрение оказывает большее влияние на контроль движений во фронтальной плоскости, в условиях, когда соматосенсорная информация недостаточна, а периферическое зрение в этих же условиях оказывает большее влияние на контроль колебаний в сагиттальной плоскости [56].

Очевидно, что зрительные влияния, в том числе и неспецифические, реализуются в основном через регуляцию мышечно-суставной жесткости (прежде всего, в суставах нижних конечностей) [65] и опосредуются изменением либо тонического сокращения соответствующих позных мышц, либо роли вестибулярной и (или) проприоцептивной подсистемах позной регуляции, нарушение которых связывают также с депрессивными расстройствами [66]. Однако в этих работах приводятся результаты, которые лишь косвенно подтверждают указанное предположение. В то же время *R. Peterka* [16] показал, что в основе реакции человека в ответ на колебания тела лежит относительно простой механизм обратной связи с линейной комбинацией взвешенных сенсорных весов. При этом количественные оценки сенсорных весов меняются в зависимости от доступности сенсорной информации от зрительных или проприоцептивных систем, и от амплитуды возмущений, создаваемых визуальным окружением или наклонами платформы. В этой связи интересны работы Б.Н. Сметанина и др., показавших, что наличие зрительной афферентации не обязательно для поддержания равновесия и ей отводится лишь модулирующая роль качества устойчивости [58]. Объяснение этому лежит в механизме обратной связи и упреждающем контроле, который определяет возможность человека заранее оценивать характер будущих изменений и своевременно перестраиваться [5, 67], что демонстрирует важный вклад когнитивного компонента в зависимость постурального контроля от зрительной афферентации. К этому же следует добавить доказательства, полученные *C. Lions et al.* и Б.Н. Сметаниным и др.: амплитуда КЦДС в условиях зрительной когнитивной задачи значительно меньше, чем в условиях свободного просмотра картины [68] или не зависит [58] от сложности зрительной обратной связи у молодых здоровых испытуемых. Вместе с тем в других исследованиях было установлено, что наличие зрительной обратной связи о колебаниях тела положительно влияло на поддержание позы в исследованиях как молодых, так и пожилых испытуемых [69]. Чтобы объяснить различия между полученными результатами мы должны интерпретировать процесс интеграции нескольких реальных сенсорных по-

токов, исходящих от проприорецепторов и баррорецепторов (прежде всего, от нижних конечностей и стоп) и вестибулярных органов и, с другой стороны, от рецепторов глаз и глазодвигательных мышц. По мнению Б.Н. Сметанина ключевой трудностью такого исследования является то, что проприоцептивной сигнальный поток и опорная афферентация несут информацию, адекватно соответствующую реальному положению тела в пространстве, а визуальный поток, вследствие значительного вклада когнитивной модуляции, несет искаженную информацию [58].

Роль вестибулярной афферентации в психофизиологических механизмах поддержания равновесия. Наибольшее число обозреваемых исследований демонстрирует участие вестибулярной системы в когнитивных и эмоциональных функциях, которые, казалось бы, далеки от таких, как ориентация в пространстве или контроль позы [70] (табл. 3). На вопрос, каким образом модуляция вестибулярных сигналов изменяет эффективность решения когнитивных задач, таких как мысленные пространственные образы или обработка чисел [71], или аффективные функции, отвечают результаты исследований, связанные с изменением ориентации тела (вращением тела), клинических наблюдений за пациентами с вестибулярными нарушениями [53], а также исследований, проведенных в условиях микрогравитации [72]. Также изучается, каков эффект нисходящих когнитивных и психоэмоциональных процессов на восприятие вестибулярных раздражителей – нарушения постурального контроля [73]. Результаты этих исследований демонстрируют, что изменения вестибулярной афферентации сопровождаются изменением мысленного представления частей тела [74], настроения [75], тактильной и болевой перцепции [70].

Z. Kapoula et al. [76] предположили, что внешняя звуковая стимуляция при “шуме в ушах” влияет на КЦДС за счет активации процессов переключения внимания. Другая возможность – плохая интеграция сенсомоторных сигналов, и/или плохая межполушарная связь.

Таким образом, можно считать доказанной роль когнитивных процессов в регуляции равновесия за счет изменения вестибулярного входа.

Роль проприоцептивной афферентации в психофизиологических характеристиках постурального контроля. В литературе влияние проприоцептивных входов на психологические функции было продемонстрировано различными экспериментальными подходами (табл. 2). Так, при произвольном изменении мышечного тонуса, вызванным статической позой (например, “наклон в правую сторону”) происходит коррекция КЦДС во фронтальной и сагиттальной плоскостях [29, 77]. Ю.П. Иваненко и др. варьировали направление подвижности опоры и применяли вибрацию мышц голени к испытуемым, стоящим на качающейся платформе, подвижной в сагиттальном, фронтальном или обоих направлениях. Постуральные реакции присутствовали только на тех опорах, которые были устойчивы в сагиттальном направлении. Таким образом, можно предположить, что направление постуральной нестабильности влияет на реакцию проприорецепторов голеностопных мышц только в сагиттальном направлении [78]. Однако неясно, является ли это нарушение стабильности специфическим или неспецифическим, направленным на ослабление проприоцептивных влияний со стороны мышц голеностопного сустава.

Гиподинамия, работа с компьютером в неэргономичных условиях, психоэмоциональные перегрузки выходят на ведущее место среди причин в развитии функциональной дезорганизации мышечного тонуса, как это происходит при ослаблении опоры на ноги [79] и, соответственно, ухудшения постурального контроля [17]. Роль опорной афферентации в ослаблении мышечного тонуса доказывается также исследованиями сухой иммерсии и в экспериментах на животных [80].

Несмотря на известный феномен взаимодействия сенсорных и моторных систем при поддержании равновесия и возможность тренинга постуральных мышц [81], процесс запуска мышечных реакций, противостоящих естественной позной нестабильности не до конца выяснен. Более того, не выяснено, почему выполнение когнитивной или психомоторной задачи не снижает, а увеличивает постуральную стабильность в некоторых группах здоровых [82] и больных депрессией пациентов [83].

Роль тактильных ощущений в психофизиологических характеристиках поддержания равновесия. Известно, что визуальный и вестибулярный входы демонстрируют способность играть доминирующую роль в контроле позы, однако роль тактильных сигналов в последнее время также вызывает интерес. В ряде работ [84, 85] был обнаружен механизм контроля позы, в котором показатели КЦДС изменялись без модулирующего воздействия проприоцептивных, зрительных или вестибулярных рецепторов. Поэтому была предложена дополнительная рецепторная система, по-видимому, зависящая от тактильных ощущений и связанная с нарушениями опорно-двигательного аппарата [84, 85]. Установлено, что легкое (т.е. “безопорное”) прикосновение пальца или кожи предплечья снижает постуральное колебание, даже, несмотря на то, что силы контакта были намного ниже тех, которые необходимы для обеспечения механической поддержки [84–86]. Это предполагает, что тактильные сигналы от кожи пальца или предплечья могут быть объединены с

другой сенсорной информацией в ЦНС, обеспечивая дополнительную пространственную ориентацию в стабилизации позы [85].

Роль опорной афферентации в психофизиологических механизмах постурального контроля. Известно, что вертикальное положение тела – это итог эволюции человека в филогенезе [87]. Поддержание вертикального положения предполагает преодоление силы земного притяжения, и, следовательно, позная активность – это бессознательный операционный фон для любых локомоторных и когнитивных актов. Предполагается, что в процессе эволюции прямохождение привело, во-первых, к преобразованию нижних конечностей и вызвало формирование человеческой узкоспециализированной стопы [87], которая утратила хватательную функцию и превратилась в единый мощный рычаг. При этом, основная нагрузка при вертикальной позе легла на большой палец стопы [88], который хоть и потерял свою подвижность, свойственную другим приматам, но вместе с передней частью (подушкой) стопы стал играть ключевую роль в опорной афферентации. Во-вторых, прямохождение позволило освободить верхние конечности и превратить их в орган труда – руки, кисти которых стали способны к точному захвату и сложной трудовой деятельности. В-третьих, следствием участия человека в трудовой деятельности появилась необходимость решать проблемы и планировать задачи, что вызвало развитие коры головного мозга, возросло число нервных клеток, изменилось их расположение, а также увеличилось количество сетевых архитектур [89].

Таким образом, прямохождение стало причиной формирования высокоразвитого головного мозга, способного, наряду с включением в организацию системы поддержания равновесия эволюционно новой опорной афферентации, осуществлять такие когнитивные функции, как абстрактное мышление и планирование [90]. На основании этого можно предположить, что опорная афферентация не только стала участником системы подержания равновесия, но и оказывает влияние на когнитивные функции.

В недавних классических трудах Б.С. Шенкман и И.Б. Козловская [79, 91] обобщили данные, позволяющие оценить актуальность исследования опорной афферентации на модели “сухой” иммерсии. Эти исследования внесли значительный вклад в изучение роли опорной афферентации в физиологии от клеточных реакций постуральной мышцы до психологических характеристик поведения человека. Установлено, что устранение опоры на ноги инактивирует пул медленных двигательных единиц, что приводит к избирательной инактивации и последующей атонии [11], и атрофии мышечных волокон, экспрессирующих медленную изоформу тяжелой цепи миозина (которая составляет большинство мышечных волокон камбаловидной мышцы). Волокна, которые потеряли значительную часть молекул цитоскелета, неспособны к эффективной актомиозиновой моторной мобилизации, что приводит к низкой чувствительности к кальцию [92] и сужению диапазона максимального натяжения [93]. Отсутствие опоры также приводит к снижению эффективности защитных механизмов (синтетаза оксида азота) и снижению активности АМФ-активируемой протеинкиназы, которая является триггером восстановительных процессов [94]. Важно, что стимуляция опорных зон снижает последствия ослабления опорной афферентации тем, что восстанавливает в гиппокампе нейрональные прогениторные клетки и поддерживает активность центрального внеклеточного сигнального пути, который регулирует пролиферацию, дифференцировку, апоптоз, стрессовую реакцию и выживаемость в конечном итоге [95, 96].

Анализ стабилометрических измерений КЦДС показал, что, несмотря на то, что амплитуда КЦДС больше при положении тела стоя, чем сидя, траектории КЦДС более регулярны (более низкая энтропия) в положении сидя, чем в положении стоя [84]. На основании этого можно предположить, что использование показателей регулярности позволяет оценить вклад когнитивной компоненты (внимания) в постуральный контроль [90]. Использование бóльшего внимания к контролю позы в положении стоя, чем сидя, позволило предположить ответ на интересный вопрос, почему качество исполнения музыки музыкантами лучше в положении стоя, чем сидя [97, 98]. По-видимому, это связано с принципом достижения автоматизма Бернштейна при тонкой моторике пальцев, который заключается в высвобождении максимального количества степеней свободы, необходимой для исполнения музыки. Если ресурс внимания используется на поддержание равновесия в положении стоя, то эта часть внимания отвлекается (высвобождается) от контроля за движением пальцев и оно становится более автоматическим. Другим объяснением, почему у музыкантов движения пальцев рук более “свободны” в положении стоя, чем сидя, является теоретическая концепция о реципрокных взаимоотношениях между тоническим напряжением мышц верхней и нижней половины тела [51, 99]: увеличение мышечного тонуса ног сопровождается снижением тонуса мышц рук и, соответственно снижением энергетических затрат на поддержание равновесия в положении стоя [97]. Обе эти гипотезы позволяют предположить, что взаимодействия между тонкими моторными задачами и постурально-моторной ответной реакцией могут эффективно применяться при реаби-

литации двигательных и аффективных расстройств [100] в качестве важного инструмента “отвлечения внимания от патологических доминант” в клинических исследованиях [44]. Таким образом, можно предположить, что изучение роли распределения внимания при постуральном контроле позволит разработать новые подходы к профилактике и реабилитации психогенных расстройств.

Роль двойных (когнитивно- или моторно-постуральных) задач в изучении психофизиологических механизмов поддержания равновесия

Для оценки роли когнитивных факторов, в том числе распределения внимания в системе поддержания равновесия, используется парадигма двойных когнитивно-постуральных задач [83, 101, 102]. Здоровые молодые люди могут легко выполнять задачи поддержания равновесия в сочетании с другими видами деятельности, такими как разговор или чтение. При этом при добавлении когнитивного компонента стратегия постурального контроля может “сжиматься”, т.е. размах КЦДС может снижаться [103], а в других случаях двойного задания эффективность выполнения постуральных задач может “расширяться”, т.е. становиться менее автоматической, чем предполагалось [66]. Примером такого типа задач является скалолазание, когда постуральный контроль преобладает над требованиями точности движений рук [104]. *L. Jakobson* и *M. Goodale*, проведя кинематический анализ высокоточностных движений руками при сохранении равновесия, сделали заключение, что децентрализация между ограничениями скорости (налагаемыми позой) и ограничениями точности (налагаемыми движением пальцев) предполагает существование иерархически организованного центра управления движением [105]. Некоторые авторы использовали когнитивные задачи, чтобы отвлечь внимание от контроля баланса, создавая внешний фокус внимания [83], и/или чтобы исследовать прямую связь между регулярностью КЦДС и количеством внимания, вкладываемым в постуральный контроль [42, 43]. Другие авторы установили, что, наоборот, тренинг устойчивости равновесия может влиять на беглость движения пальцев и эффективность решения когнитивных задач [106].

В целом можно заключить, что тестирование выполнения двойных постурально-когнитивных и/или постурально-моторных задач служит надежной моделью исследования взаимовлияния когнитивных способностей и способности к поддержанию равновесия [83, 102] (табл. 4).

Психофизиологические механизмы и факторы, определяющие взаимосвязь между постуральными и психологическими функциями

Недавно Б. Дижкстра представил обзор литературы, посвященный функциональной нейровизуализации, измеряющей активность нервной системы, связанную с позой, у здоровых субъектов [70]. Известно, что ключевые структурные узлы контроля позы человека – это ствол мозга, мозжечок, базальные ганглии, таламус и несколько областей коры. Мета-анализ оценки вероятности постуральной активации показал, что передний мозжечок постоянно активируется, модулируя активность ядер ствола мозга [37]. Не только сами произвольно вызванные нарушения баланса, но и даже ожидание (антиципация) пертурбации тела, вызывает активацию коры [107]. Эти данные доказывают связь между постуральным контролем и корковой активностью [107]. Оценка электрической активности мозга (ЭЭГ) дает понимание функциональной организации постурального контроля человека. В пионерских работах *R. Cole* показал, что вертикализация сопровождается не только повышением частоты сердечных сокращений и артериального давления, что было известно и ранее, но также увеличением индекса высокочастотной (β) и α-2 мощности электроэнцефалограммы (ЭЭГ) и снижением θ-амплитуды по сравнению с положением сидя [108]. Аналогичные результаты были получены позже рядом исследователей [109–112]. Впервые во время космического полета в условиях невесомости регистрация ЭЭГ была проведена *G. Cheron et al.* [111], показавшим увеличение мощности α-ритма с частотой 10 Гц и небольшой сдвиг частоты α-пика с 9.9 до 10.4 Гц при закрытых глазах (ЗГ). Увеличение частоты и мощности ЭЭГ в диапазоне α-ритма является надежным признаком произвольного торможения [112–114], что также может свидетельствовать о когнитивном компоненте постурального контроля. Впоследствии *D. Lipnicki* предположил, что корковое торможение может быть объяснено перераспределением объема крови в сторону верхней части тела и стимуляцией артериальных барорецепторов в условиях микрогравитации, которые, в свою очередь, могут способствовать торможению коры головного мозга [115]. Однако, *G. Cheron et al.* отмечали значительное увеличение нейрональной активации – так называемого Бергер-эффекта, (супрессии α-мощности при открывании глаз) в условиях невесомости, по сравнению с таковыми характеристиками на Земле. При этом замечено, что мощность частотного “диапазона антиципации” или μ-ритма снижалась до физического открывания глаз, сразу после получения инструкции “открыть глаза” [111]. *G. Cheron et al.* предполагают, что сенсомоторная и теменно-затылочная кора имеют общую сеть, на

которую влияет сила тяжести. Они пришли к выводу, что в условиях микрогравитации увеличенная реактивность α-ритмов связана с тем, что наряду со снижением или даже элиминацией всех сенсорных входов постурального контроля, ответ на единственный неизмененный отсутствием гравитации зрительный вход оказывается увеличенным. Дальнейшие исследования влияния опорной афферентации на нейрональные процессы установили, что изменения активности ЭЭГ в условиях микрогравитации не объясняются гемодинамическими изменениями, а скорее отражают эмоциональные реакции, связанные с ощущением невесомости [116]. Также *V. Brümmer et al.* обнаружили значительное снижение β-мощности в условиях микрогравитации, что авторы связывают с ослаблением возбуждения [116]. Аналогично в работах русских авторов было установлено снижение амплитуды пресаккадических ЭЭГ-потенциалов при отсутствии опорной афферентации [117] и гиподинамии [118]. Авторы полагают, что помимо нейрональных должны быть другие генераторы электрической активности в условиях измененной гравитации [117]. Можно предположить, что феномен снижения амплитуды ЭЭГ в т.н. β-диапазоне может иметь объяснение в технологических особенностях анализа ЭЭГ, не позволяющего оценить вклад в общий потенциал электрических импульсов ЭМГ, генерируемых тоническими мышцами поверхности головы, который увеличивается при эмоциональном напряжении [118], о котором сообщают *V. Brümmer et al.* [116]. К тому же, в работе И.Г. Ненахова и А.В. Швецова указывается на влияние мышечного тонуса на постуральный контроль [118].

На настоящий момент, трудно сделать четкие выводы из результатов сравнения ЭЭГ-показателей, полученных в космических и параболических полетах и/или в условиях микрогравитации: во-первых, из-за недостаточного количества исследований ЭЭГ и ЭМГ, во-вторых, большинство проведенных исследований проводилось без учета возрастного, гендерного и гормонального факторов, в третьих, в силу чисто методических причин анализ ЭЭГ проводился без учета индивидуального ЭЭГ эндофенотипа [113, 114], который определяет стратегию достижения сенсомоторной интеграции.

Возраст. Влияние фактора “возраст” на взаимосвязь между психофизиологическими и стабилометрическими характеристиками постурального контроля убедительно продемонстрировано во многих исследованиях [25, 66, 67, 119]. Установлено, что вариабельность КЦДС снижается по мере взросления у детей до 10–12 лет [120] и увеличивается по мере старения после 40 лет [119]. Многочисленными исследованиями установлено, что у пожилых людей показатели постурального контроля снижены и, соответственно, риск падений значительно возрастает [25, 30, 66, 67, 119]. Причинами ухудшения постурального контроля у пожилых людей может быть возрастное ослабление практически всех сенсорных и исполнительных систем организма. При этом предполагается, что риск падений у женщин выше, чем у мужчин [121], в связи с ослаблением функции яичников. Однако, исследованиями *T. Naessen et al.* убедительно продемонстрировано, что эстроген-заместительная терапия не приводит к улучшению постурального контроля у пожилых женщин, если она не сопровождается тренингом физической активности [122]. При сравнении психофизиологических характеристик женщин постменопаузального возраста мы установили, что долговременная физическая активность (фитнес, танцы или Айкидо тренинг не менее восьми лет) сопровождается снижением психологических симптомов постменопаузы, но лучшие стабилометрические показатели постурального контроля (наиболее низкие затраты энергии на поддержание равновесия и наименьшая ЭЭГ- и ЭМГ-реактивность при решении двойных когнитивно-постуральной и моторно-постуральной задач) отмечаются только в группе женщин, тренирующих ощущение опоры на переднюю часть стопы [18, 19]. Полученные результаты позволяют заключить, что наиболее эффективным способом преодоления риска падений у пожилых людей является физическая активность, связанная с целенаправленным тренингом постурального контроля.

Гендерный фактор. Несмотря на несколько исследований влияния пола на способность удерживать позу, до сих пор однозначных результатов не получено [122, 123]. Противоречивость полученных результатов объясняется отсутствием учета такого очевидного факта, что женщины на разных фазах гормонального цикла демонстрируют значимо отличные психофизиологические характеристики [124], в частности постуральную устойчивость [125]. Дело в том, что у женщин под периодическим действием 17-β-эстрадиола увеличивается пластичность связок стопы [24] и колена [125] и, соответственно изменяется постуральная активация. Эстроген расслабляет коллагеновые поперечные мостики в связках и изменяет активность актомиозиновой АТФ-азы в скелетных мышцах. К тому же эстрогены оказывают центральное влияние на нервно-мышечные взаимодействия, участвующие в двигательном контроле связок и суставов, таких как колено [125]. Однако на настоящий момент не достигнуто консенсуса о влиянии гормонального фона на постуральный контроль [123], что требует дополнительного изучения.

Психоэмоциональное состояние. В связи с тем, что одни и те же области и сети мозга участвуют в регуляции аффективных функций, эмоций и настроения и в системе поддержания баланса, все

большее внимание привлекается к изучению взаимоотношений этих систем [7, 23, 25, 73, 83]. В частности, *Azevedo T.M. et al.* зарегистрировали значительно меньшее раскачивание тела, а также увеличение медианы частоты спектра (*MPF*) КЦДС (индексирующих жесткость мышц), когда здоровые волонтеры стояли на стабилометрической платформе во время просмотра неприятных (увечья), по сравнению с приятными (спортивные действия) или нейтральных (объекты) изображениями [126]. Как ожидалось, пульс также замедлялся при восприятии неприятных снимков. Этот паттерн напоминает "замораживание" и "брадикардию страха", наблюдаемые у многих биологических видов как реакции защиты при столкновении с угрожающими стимулами, опосредованной психофизиологическими механизмами, которые способствуют выживанию [126]. С другой стороны, установлено, что наличие или отсутствие опорной афферентации влияет на валентность эмоционального ответа [127]. В частности, студенты в положении сидя с опорой на ноги воспринимали изображения более позитивно, чем в положении сидя без опоры на ноги [127], а пожилые женщины, тренировавшие опорную стимуляцию, демонстрируют меньшую выраженность тревожности и депрессии, чем женщины того же возраста, занимающиеся просто фитнесом [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ современной литературы, посвященной исследованию взаимосвязи между постуральными и психологическими характеристиками способности поддерживать равновесие, показал, что начиная с работ Бернштейна сенсомоторная интеграция и обратная связь, лежащая в основе взаимосвязи постуральных и психологических функций, является ключевым психофизиологическим механизмом постурального контроля. Это положение имеет фундаментально-теоретическое значение в понимании эволюционно значимой функции постурального контроля и подтверждается в каждом обозреваемом исследовании. Особый интерес к изучению взаимосвязи между постуральными и психологическими характеристиками человека связан с открытием роли гравитации и опорной афферентации в формировании и развитии психофизиологических функций, сделанным в Русской научной школе космической медицины. С началом этих исследований связано осознание значения опоры на ноги и стабилометрических измерений в психофизиологической диагностике, профилактике и коррекции не только моторных, но и психологических функций. В настоящее время получено достаточное количество косвенных доказательств того, что аффективные и когнитивные функции ассоциируют со стабилометрическими показателями поддержания равновесия. В литературе в качестве психофизиологических показателей постурального контроля выделяют внимание, пространственную память, настроение, эмоциональный тонус, скорость принятия решения, тонкую моторику пальцев. Это значит, что обучение, тренинг и коррекция этих психологических функций может осуществляться с помощью тренинга постурального контроля. При этом наиболее информативными предиктивными стабилометрическими коррелятами этих психологических функций служат интегральные скоростные показатели КЦДС в высокочастотных диапазонах. В настоящее время нельзя сделать однозначных выводов о психофизиологических механизмах постурального контроля из-за относительно небольшого размера исследуемых популяций и методологической неоднородности (например, различных инструментальных методов оценки равновесия и походки и различных методических подходов к анализу когнитивных и аффективных функций). По этим причинам невозможно было дать значимую количественную оценку психологических и аффективных коррелят постурального контроля путем проведения мета-анализа.

Однако, несмотря на то, что нейрофизиологические механизмы, лежащие в основе описываемых взаимосвязей, возрастные и гендерные различия пока представлены на основании лишь косвенных доказательств. Можно полагать, что прогресс современных высокоточных измерительных и информационных технологий в ближайшем будущем позволит получить новые знания в этой области в связи с ее фундаментальной значимостью для развития теории эволюционно древнейшей функции поддержания вертикальной позы и актуальностью в прикладном аспекте использования нефармакологического неинвазивного стабилометрического подхода в тренинге и/или коррекции когнитивных и аффективных функций.

Финансирование работы. Работа выполнена за счет средств федерального бюджета на проведение фундаментальных научных исследований (тема № АААА-А21-121011990039-2) при частичной поддержке РФФИ (проекты № 19-013-00317а и 20-113-50129\20).

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бернштейн Н.А.* Физиология движений и активность. М.: Наука, 1990. С. 309.
2. *Гурфинкель В.С., Фейгенберг И.М.* Становление и развитие школы Н.А. Бернштейна / Физиологи-

ческие научные школы в СССР: Очерки // Под ред. Бехтеревой Н.П. Л.: Наука, 1988. С. 247.
3. *Бернштейн Н.А.* Очерки по физиологии движений и физиологии активности. М.: Медицина, 1966. С. 39.
4. *Бернштейн Н.А.* Новые линии развития в физиологии и их соотношение с кибернетикой / Философские вопросы физиологии высшей нервной деятельности и психологии. М.: АН СССР, 1963. С. 299.
5. *Анохин П.К.* Системные механизмы высшей нервной деятельности: избр. тр. АН СССР, Отд-ние физиологии. М.: Наука, 1979. 454 с.
6. *Гурфинкель В.С., Коц Я.М., Шик М.Л.* Регуляция позы человека. М.: Наука, 1965. 256 с.
7. *Murri M.B., Triolo F., Coni A. et al.* Instrumental assessment of balance and gait in depression: A systematic review // Psychiatry Res. 2020. V. 284. P. 112687.
8. *Bodine S.C., Orlov O.I., Grigoriev A.I. et al.* In Memoriam: Inessa B. Kozlovskaya, MD, PhD, 2 June 1927–19 February 2020 // J. Appl. Physiol. (1985). 2020. V. 128. № 4. P. 1090.
9. *Tomilovskaya E., Shigueva T., Sayenko D. et al.* Dry Immersion as a Ground-Based Model of Microgravity Physiological Effects // Front. Physiol. 2019. V. 10. P. 284.
10. *Вильчинская Н.А., Шенкман Б.С.* Сателлитные клетки скелетных мышц в условиях гравитационной разгрузки // Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 2021. Т. 107. № 6-7. С. 717.
11. *Amirova L.E., Plehuna A., Rukavishnikov I.V. et al.* Sharp Changes in Muscle Tone in Humans Under Simulated Microgravity // Front. Physiol. 2021. V. 12. P. 661922.
12. *Григорьев А.И., Козловская И.Б., Шенкман Б.С.* Роль опорной афферентации в организации тонической мышечной системы // Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 2004. Т. 90. № 5. С. 508.
13. *Khowailed I.A., Petrofsky J., Lohman E. et al.* 17β-Estradiol Induced Effects on Anterior Cruciate Ligament Laxness and Neuromuscular Activation Patterns in Female Runners // J. Womens Health (Larchmt). 2015. V. 24. № 8. P. 670.
14. *Konradi A.O., Rotar O.P., Korostovtseva L.S. et al.* Prevalence of Metabolic Syndrome Components in a Population of Bank Employees from St. Petersburg, Russia // Metab. Syndr. Relat. Disord. 2011. V. 9. № 5. P. 337.
15. *Терехов А.В., Левик Ю.С., Солопова И.А.* Механизмы коррекции референтного положения в системе регуляции вертикальной позы // Физиология человека. 2007. Т. 33. № 3. С. 40.
Terekhov A.V., Levik Yu.S., Solopova I.A. Mechanisms of reference posture correction in the system of upright posture control // Human Physiology. 2007. V. 33. № 3. P. 289.
16. *Peterka R.* Sensorimotor integration in human postural control // J. Neurophysiol. 2002. V. 88. № 3. P. 1097.
17. *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.
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 // Human Physiology. 2017. V. 43. № 5. P. 591.
18. *Базанова О.М., Холодина Н.В., Подойников А.Ш., Николенко Е.Д.* Стабилометрические, электромиографические и электроэнцефалографические показатели женщин в постменопаузе зависят от тренинга ощущения опоры на ноги // Физиология человека. 2015. Т. 41. № 4. С. 53.
Bazanova O.M., Kholodina N.V., Podoinikov A.Sh., Nikolenko E.D. Stabilometric, Electromyographic, and Electroencephalographic Parameters in Postmenopausal Women Depend on Training Support Afferentation // Human Physiology. 2015. V. 41. № 4. P. 386.
19. *Stawicki P., Wareńczak A., Lisiński P.* Does Regular Dancing Improve Static Balance? // Int. J. Environ Res. Public Health. 2021. V. 18. № 10. P. 5056.
20. *Leiva A.M., Martínez M.A., Cristi-Montero C. et al.* Sedentary lifestyle is associated with metabolic and cardiovascular risk factors independent of physical activity // Rev. Med. Chil. 2017. V. 145. № 4. P. 458.
21. *Abou Khalil G., Doré-Mazars K., Senot P. et al.* Is it better to sit down, stand up or walk when performing memory and arithmetic activities? // Exp. Brain Res. 2020. V. 238. № 11. P. 2487.
22. *Arocha Rodulfo J.I.* Sedentary lifestyle a disease from xxi century // Clin. Investig. Arterioscler. 2019. V. 31. № 5. P. 233.
23. *Lee E., Kim Y.* Effect of university students' sedentary behavior on stress, anxiety, and depression // Perspect. Psychiatr. Care. 2019. V. 55. № 2. P. 164.
24. *Bickham D.S., Hswen Y., Rich M.* Media use and depression: exposure, household rules, and symptoms among young adolescents in the USA // Int. J. Public Health. 2015. V. 60. № 2. P. 147.
25. *Murri M.B* Instrumental assessment of balance and gait in depression: A systematic review // Psychiatry Res. 2020. V. 284. P. 112687.
26. *Zheng C., Huang W.Y., Sheridan S. et al.* COVID-19 Pandemic Brings a Sedentary Lifestyle in Young Adults: A Cross-Sectional and Longitudinal Study // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2020. V. 17. № 17. P. 6035.
27. *Brown P., Tan A.C., El-Esawi M.A. et al.* Large expert-curated database for benchmarking document similarity detection in biomedical literature search // Database. 2019. V. 2019. P. baz085.
28. *Бабский Е.Б., Гурфинкель В.С., Ромель Э.Л., Якобсон И.С.* Методика исследования устойчивости стояния. М.: Центральный научно-исследовательский институт протезостроения и протезостояния, 1952. С. 3.
29. *Сметанин Б.Н., Кожина Г.В., Попов А.К., Левик Ю.С.* Спектральный анализ колебаний тела человека при стоянии на твердой и податливой опорах в разных зрительных условиях // Физиология человека. 2016. Т. 42. № 6. С. 49.
Smetanin B.N., Kozhina G.V., Popov A.K., Levik Y.S. [Spectral Analysis of Sway of Human Body When Standing on Firm and Compliant Surfaces under Different Visual Conditions] // Fiziol. Cheloveka. 2016. V. 42. № 6. P. 49.
30. *Rodrigues G.D., Gurgel J.L., Dos Santos Galdino I. et al.* Respiratory pump contributions in cerebrovascular and postural control responses during orthostatic

stress in older women // Respir. Physiol. Neurobiol. 2020. V. 275. P. 103384.

31. *Xu D., Tremblay M.F., Verma A.K. et al.* Cardio-postural interactions and muscle-pump baroreflex are severely impacted by 60-day bedrest immobilization // Sci. Rep. 2020. V. 10. № 1. P. 12042.
32. *Richmond S.B., Fling B.W., Lee H., Peterson D.S.* The assessment of center of mass and center of pressure during quiet stance: Current applications and future directions // J. Biomech. 2021. V. 123. P. 110485.
33. *Гельфанд И.М., Гурфинкель В.С., Коц Я.М и др.* Исследование позной активност // Биофизика. 1964. Т. 9. № 8. С. 475.
34. *Fitzpatrick R.C., Corman R.B., Burke D., Gandevia S.C.* Postural proprioceptive reflexes in standing human subjects: bandwidth of response and transmission characteristics // J. Physiol. 1992. V. 458. P. 69.
35. *Кожина Г.В., Левик Ю.С., Попов А.К., Сметанин Б.Н.* Поддержание вертикальной позы при многократном повторении проб в условиях дестабилизации виртуального зрительного окружения // Физиология человека. 2019. Т. 45. № 5. С. 66.
Kozhina G.V., Levik Y.S., Popov A.K., Smetanin B.N. Vertical posture maintenance with multiple repetitions under the conditions of destabilizing virtual visual environment // Human Physiology. 2019. V. 45. № 5. P. 515.
36. *Gouveia É.R., Gouveia B.R., Ihle A., Kliegel M. et al.* Balance and mobility relationships in older adults: A representative population-based cross-sectional study in Madeira, Portugal // Arch. Gerontol. Geriatr. 2019. V. 80. P. 65.
37. *Dijkstra B.W., Bekkers E.M.J., Gilat M. et al.* Functional neuroimaging of human postural control: A systematic review with meta-analysis // Neurosci. Biobehav. Rev. 2020. V. 115. P. 351.
38. *Mammarella N.* Towards the Affective Cognition Approach to Human Performance in Space // Aerosp. Med. Hum. Perform. 2020. V. 91. № 6. P. 532.
39. *Винарская Е.Н., Фирсов Г.И.* Экспериментальные исследования автоматизмов управления позной статикой методом компьютерной стабилометрии // Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. 2017. Т. 12. № 2. С. 453.
40. *Nomura T., Oshikawa S., Suzuki Y. et al.* Modeling human postural sway using an intermittent control and hemodynamic perturbations // Math. Biosci. 2013. V. 245. № 1. P. 86.
41. *Oba N., Sasagawa S., Yamamoto A., Nakazawa K.* Difference in Postural Control during Quiet Standing between Young Children and Adults: Assessment with Center of Mass Acceleration // PLoS One. 2015. V. 10. № 10. P. e0140235.
42. *Roerdink M., Hlavackova P., Vuillerme N.* Center-of-pressure regularity as a marker for attentional investment in postural control: a comparison between sitting and standing postures // Hum. Mov. Sci. 2011. V. 30. № 2. P. 203.
43. *Donker S.F., Roerdink M., Greven A.J., Beek P.J.* Regularity of center-of-pressure trajectories depends on the amount of attention invested in postural control // Exp. Brain Res. 2007. V. 181. № 1. P. 1.
44. *Franco C., Fleury A., Diot B., Vuillerme N.* Applying Entropy to Human Center of Foot Pressure Data to Assess Attention Investment in Balance Control // Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. 2018. P. 5586.
45. *Gorohovsky S.S., Kubryak O.V.* Metrological assurance of stabilometric study // Biomedical Engineering. 2014. V. 48. № 4. P. 196.
46. *Чигалейчик Л.А., Полещук В.В., Илларионшкин С.Н.* Применение компьютерной стабилометрии для оценки и дифференциальной диагностики постуральных нарушений при болезни Паркинсона // Вестник Российской военно-медицинской академии. 2019. № S3. С. 167.
47. *Fleury A., Mourcou Q., Franco C. et al.* Assessment of attention demand for balance control using a Smartphone: implementation and evaluation // Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. 2018. P. 5598.
48. *Jeka J., Kiemel T., Creath R. et al.* Controlling human upright posture: velocity information is more accurate than position or acceleration // J. Neurophysiol. 2004. V. 92. № 4. P. 2368.
49. *Guillaud E., Seyres P., Barrière G. et al.* Locomotion and dynamic posture: neuro-evolutionary basis of bipedal gait // Neurophysiol. Clin. 2020. V. 50. № 6. P. 467.
50. *Latash M.L., Talis V.L.* Bernstein's Philosophy of Time: An Unknown Manuscript by Nikolai Bernstein (1949) // Motor Control. 2021. V. 25. № 2. P. 315.
51. *Боброва Е.В., Левик Ю.С., Богачева И.Н.* Колебания верхнего и нижнего звеньев тела в сагиттальной плоскости при поддержании вертикальной позы: пространственно-временные взаимоотношения // Биофизика. 2009. Т. 54. № 5. С. 935.
52. *Грибанов А.В., Шерстенникова А.К.* Физиологические механизмы регуляции постурального баланса человека // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Мед.-биол. науки. 2013. № 4. С. 20.
53. *Indovina I., Conti A., Lacquaniti F. et al.* Lower Functional Connectivity in Vestibular-Limbic Networks in Individuals with subclinical Agoraphobia // Front. Neurol. 2019. V. 10. P. 874.
54. *Balaban C.D.* Neural substrates linking balance control and anxiety // Physiol. Behav. 2002. V. 77. № 4-5. P. 469.
55. *Гурфинкель В.С., Липшиц М.И., Мори С., Попов К.Е.* Стабилизация положения тела как основная цель позной регуляции // Физиология человека. 1981. Т. 7. № 3. С. 400.
Gurfinkel' V.S., Lipshits M.I., Mori S., Popov K.E. Stabilization of body position as the main task of postural regulation // Human Physiology. 1981. V. 7. № 3. P. 155.
56. *Сметанин Б.Н., Левик Ю.С., Кожина Г.В., Попов А.К.* Влияние размера объекта, обеспечивающего зрительную обратную связь, на поддержание вертикальной позы человека // Физиология человека. 2020. Т. 46. № 6. С. 108.
Smetanin B.N., Levik Y.S., Kozhina G.V., Popov A.K. The influence of the size of the object, providing the visual feedback on the maintenance of the vertical posture in humans // Human Physiology. 2020. V. 46. № 6. P. 677.
57. *Lakhani B., Mansfield A.* Visual feedback of the centre of gravity to optimize standing balance // Gait Posture. 2015. V. 41. № 2. P. 499.

58. *Сметанин Б.Н., Попов К.Е., Кожина Г.В., Левик Ю.С.* Спектральный анализ колебаний тела человека при стоянии на твердой и податливой опорах в разных зрительных условиях // Физиология человека. 2016. Т. 42. № 6. С. 49.
Smetanin B.N., Kozhina G.V., Popov A.K., Levik Y.S. Spectral analysis of sway of human body when standing on firm and compliant surfaces under different visual conditions // Human Physiology. 2016. V. 42. № 6. P. 626.

59. *Казенников О.В., Киреева Т.Б., Шлыков В.Ю.* Влияние нагрузки на ноги и подвижности опоры под ногой на упреждающие позные настройки // Физиология человека. 2015. Т. 41. № 1. С. 57.
Kazennikov O.V., Kireeva T.B., Shlykov V.Yu. Influence of the leg load and support mobility under leg on the anticipatory postural adjustments // Human Physiology. 2015. V. 41. № 1. P. 47.

60. *Солопова И.А., Казенников О.В., Денискина Н.В. и др.* Сравнение ответов мышц ног на транскраниальную магнитную стимуляцию при стоянии на устойчивой и неустойчивой опоре // Физиология человека. 2002. Т. 28. № 6. С. 80.
Solopova I.A., Kazennikov O.V., Deniskina N.V. et al. Comparison of Leg Muscle Responses to Transcranial Magnetic Stimulation upon Standing on Stable and Unstable Supports // Human Physiology. 2002. V. 28. № 6. P. 702.

61. *Termoz N., Halliday S.E., Winter D.A. et al.* The control of upright stance in young, elderly and persons with Parkinson's disease // Gait Posture. 2008. V. 27. № 3. P. 463.

62. *Leandri M., Cammisuli S., Cammarata S. et al.* Balance features in Alzheimer's disease and amnestic mild cognitive impairment // J. Alzheimers Dis. 2009. V. 16. № 1. P. 113.

63. *Vuillerme N., Nougier V., Prieur J.M.* Can vision compensate for a lower limbs muscular fatigue for controlling posture in humans? // Neurosci. Lett. 2001. V. 308. № 2. P. 103.

64. *Nougier V., Bard C., Fleury M., Teasdale N.* Contribution of central and peripheral vision to the regulation of stance: developmental aspects // J. Exp. Child Psychol. 1998. V. 68. № 3. P. 202.

65. *Кожина Г.В., Левик Ю.С., Попов А.К., Сметанин Б.Н.* Зрительно-моторная адаптация у здоровых людей при стоянии в условиях дестабилизации виртуального зрительного окружения // Физиология человека. 2018. Т. 44. № 5. С. 30.
Kozhina G.V., Levik Y.S., Popov A.K., Smetanin B.N. Visuomotor adaptation in healthy humans in standing position under the conditions of destabilization of virtual visual environment // Human Physiology. 2018. V. 44. № 5. P. 517.

66. *Redfern M.S., Furman J.M., Jacob R.G.* Visually induced postural sway in anxiety disorders // J. Anxiety Disord. 2007. V. 21. № 5. P. 704.

67. *Гудков А.Б., Дёмин А.В.* Особенности постурального баланса у мужчин пожилого и старческого возраста в зависимости от состояния зрения // Фундаментальные исследования. 2011. № 2. С. 51.

68. *Lions C., Bucci M.P., Bonnet C.* Postural Control Can Be Well Maintained by Healthy, Young Adults in Difficult Visual Task, Even in Sway-Referenced Dynamic Conditions // PLoS One. 2016. V. 11. № 10. P. e0164400.

69. *Kilby M.C., Slobounov S.M., Newell K.M.* Augmented feedback of COM and COP modulates the regulation of quiet human standing relative to the stability boundary // Gait Posture. 2016. V. 47. P. 18.

70. *Mast F.W., Preuss N., Hartmann M., Grabherr L.* Spatial cognition, body representation and affective processes: the role of vestibular information beyond ocular reflexes and control of posture // Front. Integr. Neurosci. 2014. V. 8. P. 44.

71. *Falconer C.J., Mast F.W.* Balancing the mind: vestibular induced facilitation of egocentric mental transformations // Exp. Psychol. 2012. V. 59. № 6. P. 332.

72. *Grabherr L., Karmali F., Bach S. et al.* Mental own-body and body-part transformations in microgravity // J. Vestib. Res. 2007. V. 17. № 5-6. P. 279.

73. *Deschamps T., Sauvaget A., Pichot A. et al.* Posture-cognitive dual-tasking: A relevant marker of depression-related psychomotor retardation. An illustration of the positive impact of repetitive transcranial magnetic stimulation in patients with major depressive disorder // J. Psychiatr. Res. 2016. V. 83. P. 86.

74. *Ahadi M., Naser Z., Abolghasemi J.* Vestibular-Balance Rehabilitation in Patients with Whiplash-Associated Disorders // Int. Tinnitus J. 2019. V. 23. № 1. P. 42.

75. *McKay R., Tamagn C., Palla A. et al.* Vestibular stimulation attenuates unrealistic optimism // Cortex. 2013. V. 49. № 8. P. 2272.

76. *Kapoula Z., Yang Q., Lê T.T. et al.* Medio-lateral postural instability in subjects with tinnitus // Front. Neurol. 2011. V. 2. P. 35.

77. *Гусаров А.В., Ростовцев В.Л., Сафонов Л.В., Шурыгин С.Н.* Влияние электромиостимуляции на показатели постурального баланса при выполнении статического упражнения на растяжку (стретчинг) // Журн. неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2020. Т. 120. № 2. С. 76.

78. *Ivanenko Y.P., Solopova I.A., Levik Y.S.* The direction of postural instability affects postural reactions to ankle muscle vibration in humans // Neurosci. Lett. 2000. V. 292. № 2. P. 103.

79. *Shenkman B.S., Kozlovskaya I.B.* Cellular Responses of Human Postural Muscle to Dry Immersion // Front. Physiol. 2019. V. 10. P. 187.

80. *Шарло К.А., Львова И.Д., Тыганов С.А., Шенкман Б.С.* Механизмы поддержания экспрессии медленного миозина в волокнах постуральной мышцы при стимуляции опорных афферентов на фоне гравитационной разгрузки // Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 2019. Т. 105. № 12. С. 1561.

81. *Drozdova-Statkevičienė M., Česnaitienė V.J., Levin O. et al.* The beneficial effects of acute strength training on sway activity and sway regularity in healthy older men: Evidence from a posturography study // Neurosci. Lett. 2021. V. 749. P. 135718.

82. *Roma E., Gobbo S., Bullo V. et al.* Influence of age on postural control during dual task: a centre of pressure motion and electromyographic analysis // Aging Clin. Exp. Res. 2021.
https://doi.org/10.1007/s40520-021-01888-x

83. *Aftanas L.I., Bazanova O.M., Novozhilova N.V.* Posture-motor and posture-ideomotor dual-tasking: A putative marker of psychomotor retardation and de-

pressive rumination in patients with major depressive disorder // Front. Hum. Neurosci. 2018. V. 12. P. 108.

84. *Vuillerme N., Nougier V.* Effect of light finger touch on postural sway after lower-limb muscular fatigue // Arch. Phys. Med. Rehabil. 2003. V. 84. № 10. P. 1560.

85. *Кожина Г.В., Левик Ю.С., Попов А.К., Сметанин Б.Н.* Влияние пассивного тактильного контакта руки на поддержание вертикальной позы человека // Физиология человека. 2017. Т. 43. № 4. С. 70.
Kozhina G.V., Levik Y.S., Popov A.K., Smetanin B.N. Influence of passive tactile contact of arms on the maintenance of upright posture in humans // Human Physiology. 2017. V. 43. № 4. P. 416.

86. *Zehr E.P., Nakajima T., Barss T. et al.* Cutaneous stimulation of discrete regions of the sole during locomotion produces "sensory steering" of the foot // BMC Sports Sci. Med. Rehabil. 2014. V. 6. P. 33.

87. *Vereecke E.E., Aerts P.* The mechanics of the gibbon foot and its potential for elastic energy storage during bipedalism // J. Exp. Biol. 2008. V. 211(Pt 23) P. 3661.

88. *Okuda R., Yasuda T., Jotoku T., Shima H.* Supination stress of the great toe for assessing intraoperative correction of hallux valgus // J. Orthop. Sci. 2012. V. 17. № 2. P. 129.

89. *Mantini D., Corbetta M., Romani G.L. et al.* Evolutionarily novel functional networks in the human brain? // J. Neurosci. 2013. V. 33. № 8. P. 3259.

90. *Зубов А.А.* Магистрализация и демагистрализация в ходе эволюционного процесса // Вопросы антропологии. 1985. Вып. 75. С. 14.

91. *Шенкман Б.С., Шарло К.А.* Как мышечная активность контролирует экспрессию медленного миозина // Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 2021. Т. 107. № 6-7. С. 669.

92. *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.

93. *Шенкман Б.С., Подлубная З.А., Вихлянцев И.М. и др.* Сократительные характеристики волокон и белки саркомерного цитоскелета m. Soleus человека в условиях гравитационной разгрузки. Роль опорного стимула // Биофизика. 2004. Т. 49. № 5. С. 881.
Shenkman B.S., Podlubnaya Z.A., Vikhlyantsev 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. 2004. V. 49. № 5. P. 807.

94. *Vilchinskaya N.A., Krivoi I.I., Shenkman B.S.* AMP-Activated Protein Kinase as a Key Trigger for the Disuse-Induced Skeletal Muscle Remodeling // Int. J. Mol. Sci. 2018. V. 19. № 11. P. 3558.

95. *Tyganov S.A., Mochalova E., Belova S. et al.* Plantar mechanical stimulation attenuates protein synthesis decline in disused skeletal muscle via modulation of nitric oxide level // Sci. Rep. 2021. V. 11. № 1. P. 9806.

96. *Berezovskaya A.S., Tyganov S.A., Nikolaeva S.D. et al.* Plantar Stimulations during 3-Day Hindlimb Unloading Prevent Loss of Neural Progenitors and Maintain ERK1/2 Activity in the Rat Hippocampus // Life (Basel). 2021. V. 11. № 5. P. 449.

97. *Kondratenko A., Petrenko T.I., Bazanova O.M.* Posture influences on the musical performance fluency // Int. J. Psychophysiol. 2018. V. 131. P. S47.

98. *Ackermann B.J., O'Dwyer N., Halaki M.* The difference between standing and sitting in 3 different seat inclinations on abdominal muscle activity and chest and abdominal expansion in woodwind and brass musicians // Front. Psychol. 2014. V. 5. P. 913.

99. *Бернштейн Н.А.* Проблема взаимоотношений координации и локализации // Архив биол. наук. 1935. Т. 38. № 1. С. 18.

100. *Hove M.J., Balasubramaniam R., Keller P.E.* The time course of phase correction: a kinematic investigation of motor adjustment to timing perturbations during sensorimotor synchronization // J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform. 2014. V. 40. № 6. P. 2243.

101. *Chen T., Fan Y., Zhuang X. et al.* Postural sway in patients with early Parkinson's disease performing cognitive tasks while standing // Neurol. Res. 2018. V. 40. № 6. P. 491.

102. *Doumas M., Smolders C., Brunfaut E. et al.* Dual task performance of working memory and postural control in major depressive disorder // Neuropsychology. 2012. V. 26. № 1. P. 110.

103. *Dault M.C., Frank J.S. Allard F.* Influence of a visuospatial, verbal and central executive working memory task on postural control // Gait Posture. 2001. V. 14. № 2. P. 110.

104. *Bourdin C., Teasdale N., Nougier V.* High postural constraints affect the organization of reaching and grasping movements // Exp. Brain Res. 1998. V. 122. № 3. P. 253.

105. *Jakobson L.S., Goodale M.A.* Factors affecting higher-order movement planning: a kinematic analysis of human prehension // Exp. Brain Res. 1991. V. 86. № 1. P. 199.

106. *Bazanova O.M., Kholodina N.V., Nikolenko E.D., Payet J.* Training of support afferentation in postmenopausal women // Int. J. Psychophysiol. 2017. V. 122. P. 65.

107. *Mochizuki G., Sibley K.M., Esposito J.G. et al.* Cortical responses associated with the preparation and reaction to full-body perturbations to upright stability // Clin. Neurophysiol. 2008. V. 119. № 7. P. 1626.

108. *Cole R.J.* Postural baroreflex stimuli may affect EEG arousal and sleep in humans // J. Appl. Physiol. (1985). 1989. V. 67. № 6. P. 2369.

109. *Caldwell J.A., Prazinko B., Caldwell J.L.* Body posture affects electroencephalographic activity and psychomotor vigilance task performance in sleep-deprived subjects // Clin. Neurophysiol. 2003. V. 114. № 1. P. 23.

110. *Slobounov S., Hallett M., Stanhope S., Shibasaki H.* Role of cerebral cortex in human postural control: an EEG study // Clin. Neurophysiol. 2005. V. 116. № 2. P. 315.

111. *Cheron G., Cebolla A.M., Petieau M. et al.* Adaptive changes of rhythmic EEG oscillations in space implications for brain-machine interface applications // Int. Rev. Neurobiol. 2009. V. 86. P. 171.

112. *Hülsdünker T., Mierau A., Struder H.K.* Higher balance task demands are associated with an increase in individual alpha peak frequency // Front. Hum. Neurosci. 2016. V. 9. P. 695.

113. *Klimesch W.* The frequency architecture of brain and brain body oscillations: an analysis // Eur. J. Neurosci. 2018. V. 48. № 7. P. 2431.

114. *Mierau A., Pester B., Hülsdünker T. et al.* Cortical Correlates of Human Balance Control // Brain Topogr. 2017. V. 30. № 4. P. 434.
115. *Lipnicki D.* Baroreceptor activity potentially facilitates cortical inhibition in zero gravity // NeuroImage. 2009. V. 46. № 1. P. 10.
116. *Brümmer V., Schneider S., Vogt T. et al.* Coherence between brain cortical function and neurocognitive performance during changed gravity conditions // J. Vis. Exp. 2011. V. 5. P. 2670.
117. *Киренская А.В., Новотоцкий-Власов В.Ю., Лазарев И.Е. и др.* Влияние безопорности на характеристики пресаккадических ЭЭГ-потенциалов у испытуемых различного профиля асимметрии // Авиакосм. и эколог. мед. 2008. Т. 42. № 5. С. 14.
118. *Ненахов И.Г., Шевцов А.В.* Снижение негативного влияния мышечно-тонических асимметрий на постуральный контроль тела у лиц, перенесших острое нарушение мозгового кровообращения // Ученые записки университета им. П.Ф. Лесгафта. 2017. № 9(151). С. 202.
119. *Устинова К.Е., Иоффе М.Е., Черникова Л.А.* Возрастные особенности произвольного управления позой // Физиология человека. 2003. Т. 29. № 6. С. 74.
Ustinova K.I., Ioffe M.E., Chernikova L.A. Age-Related Features of the Voluntary Control of the Upright Posture // Human Physiology. 2003. V. 29. № 6. P. 724.
120. *García-Liñeira J., Leirós-Rodríguez R., Chinchilla-Minguet J.L., García-Soidán J.L.* Influence of Visual Information and Sex on Postural Control in Children Aged 6–12 Years Assessed with Accelerometric Technology // Diagnostics (Basel). 2021. V. 11. № 4. P. 637.
121. *Lee H., Petrofsky J.* Differences Between Men and Women in Balance and Tremor in Relation to Plantar Fascia Laxity During the Menstrual Cycle // J. Athl. Train. 2018. V. 53. № 3. P. 255.
122. *Naessen T., Lindmark B., Larsen H.C. et al.* Tibolone low dose (1.25 mg/d) therapy and postural balance in elderly women // Maturitas. 2009. V. 62. № 1. P. 72.
123. *Ołpińska-Lischka M., Kujawa K., Maciaszek J.* Differences in the Effect of Sleep Deprivation on the Postural Stability among Men and Women // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2021. V. 18. № 7. P. 3796.
124. *Bazanova O.M., Nikolenko E.D., Barry R.J.* Reactivity of alpha rhythms to eyes opening (the Berger effect) during menstrual cycle phases // Int. J. Psychophysiol. 2017. V. 122. P. 56.
125. *Yim J., Petrofsky J., Lee H.* Correlation between Mechanical Properties of the Ankle Muscles and Postural Sway during the Menstrual Cycle // Tohoku J. Exp. Med. 2018. V. 244. № 3. P. 201.
126. *Azevedo T.M., Volchan E., Imbiriba L.A. et al.* A freezing-like posture to pictures of mutilation // Psychophysiology. 2005. V. 42. № 3. P. 255.
127. *Peper E., Booiman A., Lin I.M., Harvey R.* Increase strength and mood with posture // Biofeedback. 2016. V. 44. № 2. P. 66.
128. *Ribeyre L., Spitz E., Frère J., Gauchard G., Parietti-Winkler C.* Correlations between postural control and psychological factors in vestibular schwannoma patients // J. Vestib. Res. 2016. V. 26. № 4. P. 387.
129. *Kerr B., Condon S.M., McDonald L.A.* Cognitive spatial processing and the regulation of posture // J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform. 1985. V. 11. № 5. P. 617.
130. *Dutta N., Koepp G.A., Stovitz S.D. et al.* Using sit-stand workstations to decrease sedentary time in office workers: a randomized crossover trial // Int. J. Environ. Res. Public. Health. 2014. V. 11. № 7. P. 6653.

Psychophysiological Indicators of Postural Control. Contribution of the Russian Scientific School. Part I

O. M. Bazanova[a], *, A. V. Kovaleva[b]

[a]*Scientific Research Institute of Physiology & Basic Medicine, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*
[b]*Anokhin Research Institute of Normal Physiology, Moscow, Russia*
**E-mail: bazanovaom@physiol.ru*

The aim of this article was to systematically review the published results of studies of psychophysiological mechanisms of posture maintenance and to identify those key factors that affect the effectiveness of postural control. For the review, the recommendations of "Preferred reporting elements for systematic reviews and meta-analyzes" (PRISMA) were followed. The results were classified taking into account the target psychophysiological mechanisms and factors affecting postural control. The article presents the theoretical and empirical results of the Russian scientific school of research on the role of leg support in the sensorimotor mechanisms of cognitive and postural functions. Due to the limited number of randomized studies found, it was not possible to make meta-analytic comparisons, so the literature analysis was carried out only qualitatively. Meanwhile, our systematic review provides promising information on possible relationships between stabilometric and psychological indicators of postural control, which have theoretical significance and application in correction and training of posture control However, more thorough research is needed to overcome the methodological shortcomings that we encountered in our qualitative analysis.

Keywords: postural control, sensory afferentation, attention, memory, emotions, mood, dual tasks, fine motor skills of fingers, stabilometry, EEG, EMG.