

УДК 616.28-008.5-073.175-053:616.281
<https://doi.org/10.18692/1810-4800-2023-4-8-12>

Влияние возраста на относительный вклад сенсорных систем в контроль вертикальной стойки здорового человека

Е. Н. Кравцова^{1,2}, А. Ю. Мейгал², Е. Д. Кульгова², В. В. Дворянчиков¹

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи, Санкт-Петербург, 190013, Россия

² Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, 185000, Россия

Оценено влияние фактора возраста на вклад вестибулярной, зрительной и проприоцептивной сенсорных систем на функцию пространственной ориентации при помощи метода стабилотрии (ST-150, Мера, Москва, Россия) во время вертикальной стойки здорового человека ($N = 69$, от 20 до 83 лет, из них 42 женщины и 27 мужчин). Обследованы 3 возрастные группы испытуемых: I (молодые, 20–25 лет, $n = 37$), II (среднего возраста, 44–64 года, $n = 17$ человек) и III (пожилые и старые, 65–83 года, $n = 15$). Испытуемые выполняли тест Ромберга (стойка с закрытыми глазами), «стопную пробу» (стояние на твердой и мягкой поверхностях) и комбинированную пробу (тест Ромберга + стопная реакция). Это позволило сравнить стабилотрические параметры (длина и скорость траектории и площадь перемещения центра общего давления – ОЦД) в четырех условиях: 1) стоя с открытыми глазами на твердой поверхности (ОТ), 2) с закрытыми глазами на твердой поверхности (ЗТ), 3) стоя с открытыми глазами на толстом слое поролона (ОМ), 4) с закрытыми глазами на толстом слое поролона (ЗМ). Для расчета вклада сенсорных систем в функцию поддержания равновесия в вертикальной стойке использована формула. Выявлено увеличение длины траектории ОЦД при увеличении возраста. Вместе с тем отмечено лишь незначимое изменение относительного вклада сенсорных систем в параметры стабильности у лиц среднего и старшего возраста по сравнению с молодым возрастом.

Ключевые слова: стабилотрия, пространственная ориентация тела, вестибулярная система, проприоцептивная система, зрительная система.

Для цитирования: Кравцова Е. Н., Мейгал А. Ю., Кульгова Е. Д., Дворянчиков В. В. Влияние возраста на относительный вклад сенсорных систем в контроль вертикальной стойки здорового человека. *Российская оториноларингология*. 2023;22(4):8–12. <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2023-4-8-12>

Influence of age on relative contribution of sensory systems to control of vertical stance in healthy subjects

Е. Н. Kravtsova^{1,2}, А. Yu. Meigal², Е. D. Kul'gova², V. V. Dvoryanchikov¹

¹ Saint Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech, Saint Petersburg, 190013, Russia

² Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, 185000, Russia

The influence of the age factor on the contribution of the vestibular, visual, and proprioceptive sensory systems to the function of spatial orientation was assessed using the stabilometry method (ST-150, Mera, Moscow, Russia) during the vertical stance of a healthy person ($N = 69$, from 20 to 83 years old, of which 42 women and 27 men). Three age groups of subjects were examined: I (young, 20–25 years old, $n = 37$), II (middle-aged, 44–64 years old, $n = 17$ people), and III (elderly and old, 65–83 years old, $n = 15$). The subjects performed the Romberg test (stand with closed eyes) and postural stability (standing on a hard and soft surface) and a combined test (Romberg test + postural stability). This made it possible to compare the stabilometric parameters (the length and speed of the trajectory and the area of movement of the common center of pressure (COP)) under four conditions: 1) standing with eyes open on a stable surface (SS – EO), 2) eyes closed on a

stable surface (SS – EC), 3) standing with eyes open on a thick layer of unstable surface (foam) (US – EO), and 4) eyes closed on a thick layer of unstable surface (foam) (US – EC). To calculate the contribution of sensory systems to the function of maintaining balance in a vertical stance, a formula was used. An increase in the length of the COP trajectory with increasing age was revealed. At the same time, only an insignificant change in the relative contribution of sensory systems to the parameters of the stabilogram was noted in middle-aged and older people compared to young people.

Keywords: stabilometry, spatial orientation, vestibular system, proprioceptive system, visual system.

For citation: Kravtsova E. N., Meigal A. Yu., Kul'gova E. D., Dvoryanchikov V. V. Influence of age on relative contribution of sensory systems to control of vertical stance in healthy subjects. *Russian Otorhinolaryngology*. 2023;22(4):8-12. <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2023-4-8-12>

Введение

В поддержании вертикальной стойки человека, помимо центральных структур мозга, участвуют три сенсорные системы: 1) зрительная, 2) проприоцептивная, 3) вестибулярная. Эти сенсорные системы используют свои специфические системы координат [2]. Так, зрительная система участвует в ориентации в пространстве при помощи так называемой аллометрической системы координат, то есть опирается на информацию, приходящую извне организма. Аллометрическая система позволяет оценивать так называемую зрительную вертикаль организма. Проприоцептивная система встроена в т. н. «эгоцентрическую» систему координат, которая позволяет оценить пространство «изнутри» при помощи ощущения конечностей и частей тела в пространстве. Вестибулярная система опирается на «гравитационную» систему координат и, соответственно, «гравитационную вертикаль».

По современным данным, роль сенсорных систем в функциях, связанных с поддержанием вертикального положения и равновесия, не равнозначна у лиц разного возраста. Например, проприоцептивная система имеет наибольший вклад во всех возрастах, однако в молодом возрасте имеет даже большее значение по сравнению с пожилым возрастом. В пожилом возрасте, напротив, зрение начинает играть большую роль. Пожилые люди в некотором смысле становятся «зависимыми» от зрения и зрительной картины пространства [3–5]. Молодые люди, как правило, в состоянии с закрытыми глазами вполне хорошо ориентируются в пространстве. Вестибулярная система с возрастом изменяется мало, поэтому можно считать, что основные модификации вклада сенсорных систем в пространственную ориентацию связаны с именно зрительной и проприоцептивными системами.

Имеется несколько методик определения вклада сенсорных систем в движение, однако все эти методы наукоемкие и требуют наличия точной аппаратуры и исполнения в условиях научной лаборатории [3–7]. Ранее нами была предложена формула для расчета вклада названных сенсорных систем при помощи двух стандартных

проб, которые проводятся при помощи компьютерной стабилометрии [1]. Эти две пробы позволяют оценить функцию вертикальной стойки при выключении отдельно зрительной и проприоцептивной систем. Данная формула была апробирована для лиц молодого возраста. Для дальнейшей верификации данной формулы требуется исследовать вклад сенсорных систем у здоровых лиц разного возраста. В этой связи целью данной работы является изучение вклада сенсорных систем – зрительной, проприоцептивной и вестибулярной – в функцию вертикальной стойки у здоровых лиц разного возраста при помощи стандартных стабилометрических проб.

Методика

Обследовано 69 неврологически, отоларингологически и ортопедически здоровых лиц. Обследовано 3 возрастные группы испытуемых: I (молодые, 20–25 лет, $n = 37$), II (среднего возраста, 44–64 года, $n = 17$ человек) и III (пожилые и старые, 65–83 года, $n = 15$). Состояние слуховой и зрительной функций у данных испытуемых соответствовало возрастной норме. Также у испытуемых не было выявлено нарушений мышечно-суставной чувствительности.

Для оценки системы равновесия использовали метод компьютерной стабилографии (ST-150, Мера, Москва, Россия) в четырех состояниях. В первом состоянии испытуемый стоял в европейской стойке (пятки вместе, носки врозь) с открытыми глазами, на поверхности динамической плиты стабилометра, то есть на твердой поверхности («глаза открыты», «твердая поверхность» – ОТ). Во втором состоянии – с закрытыми глазами, на твердой поверхности («глаза закрыты», «твердая поверхность» – ЗТ), в третьем – с открытыми глазами на слое поролона (толщина 10 см) («глаза открыты», «мягкая поверхность», – ОМ), в четвертом – с закрытыми глазами, на слое поролона («глаза закрыты», «мягкая поверхность» – ЗМ). Эти состояния соответствуют встроенной программе стабилометра «Тест Ромберга» (с закрыванием глаз) и программе «стопная реакция» (на смену твердой поверхности на мягкую). Состояния ОТ и ЗТ получены при помощи «Теста Ромберга», со-

стояние ОМ – при сравнении с состояниями ОТ и ОМ в «стойной реакции». Состояние ЗМ – в виде отдельного измерения.

В качестве параметра, характеризующего функцию равновесия, принята длина траектории ОЦД (L , мм) во всех четырех состояниях, поскольку это единственный непосредственно измеряемый, а не расчетный параметр. Во время проведения тестов в комнате соблюдалась тишина, были запрещены разговоры и отключены мобильные телефоны, так как звук вызывает у испытуемого поведенческие двигательные реакции. Сама платформа находилась на полу цокольного этажа на бетонной подушке, поэтому вибрации (резонанс) здания были сведены к минимуму. Горизонтальный уровень силовой платформы проверяли строительным ватерпасом.

Для расчета весового вклада исследуемых сенсорных систем (вестибулярной, зрительной, проприоцептивной) использована разработанная нами ранее формула [1]. В состоянии ЗМ (глаза закрыты, стоя на мягкой поверхности – поролоне), которое можно считать наиболее сложным для исполнения [8], нами принято, что зрительная и проприоцептивная (с оговорками, так как отключена, по сути, только опорная афферентация) сенсорные системы «отключены», что позволяет ориентировочно считать вклад вестибулярной системы равным 100% ($W_{\text{вест}} = 1,0$). В состоянии ОТ вклад вносят все три сенсорные системы ($W_{\text{вест}} + W_{\text{зрит}} + W_{\text{проп}} = 1,0$), в состоянии ОМ – только зрительная и вестибулярная ($W_{\text{вест}} + W_{\text{зрит}} = 1,0$), а в состоянии ЗТ – только вестибулярная и проприоцептивная ($W_{\text{вест}} + W_{\text{проп}} = 1,0$). Таким образом, последователь-

ным исключением из общей формулы ($W_{\text{вест}} + W_{\text{зрит}} + W_{\text{проп}} = 1,0$) компонентов можно вычислить вклад каждого компонента. Алгоритм вычисления представлен в работе [1].

Результаты

Длина траектории ОЦД была наибольшей в группе III (лица самого старшего возраста) в каждом из четырех сенсорных условий (рис.), что вполне закономерно. Между группами I и III и между группами II и III выявлены достоверно значимые различия по такому параметру, как длина статокинезмограммы ($p < 0,005$). Вместе с тем весовой вклад трех исследованных сенсорных систем в общую функцию равновесия оказался менее зависимым от возраста, поскольку различие вклада сенсорных систем между исследованными возрастными группами не достигло статистической значимости ($p > 0,05$). В целом во всех группах наибольший вклад вносила проприоцептивная сенсорная система ($W = 0,44 \div 0,52$), тогда как зрительная и вестибулярная системы внесли примерно одинаковый вклад – приблизительно по 0,25 (табл.). Можно лишь отметить увеличение вклада проприоцептивной сенсорной системы у нескольких лиц самого старшего возраста (более 80 лет). Таким образом, с увеличением возраста человека и уменьшением устойчивости весовой вклад сенсорных систем в целом остается практически неизменным.

Обсуждение

Согласно рабочей гипотезе данного исследования с возрастом может увеличиться относительный вклад зрительной сенсорной системы

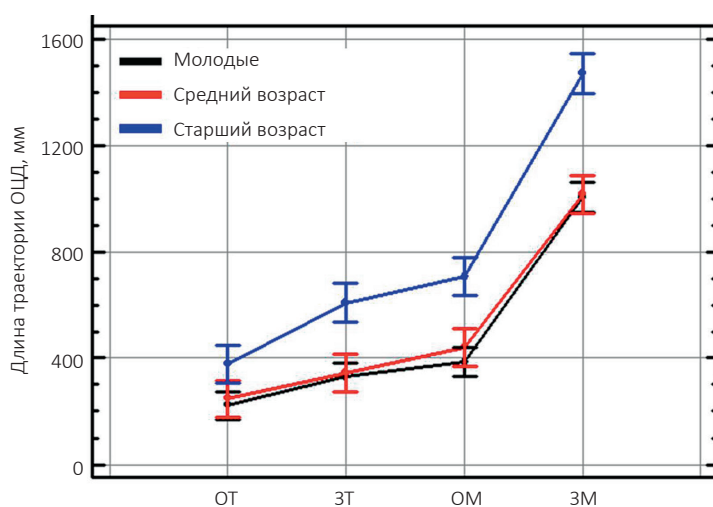


Рис. Зависимость длины статокинезмограммы L (мм) от возраста пациента в различных сенсорных условиях: ОТ – состояние «глаза открыты, стоя на твердой поверхности»; ЗТ – состояние «глаза закрыты, стоя на твердой поверхности»; ОМ – состояние «глаза открыты, стоя на мягкой поверхности»; ЗМ – состояние «глаза закрыты, стоя на мягкой поверхности»

Fig. Dependence of the length of the statokinesigram L (mm) on the age of the patient in various sensory conditions: ОТ – state „eyes are open standing on a hard surface“; ЗТ – state „eyes are closed standing on a hard surface“; ОМ – state „eyes open standing on a soft surface“; ЗМ – state „eyes closed standing on a soft surface“

Таблица 1

Весовой вклад сенсорных систем в процесс поддержания равновесия в вертикальной стойке у испытуемых разного возраста

Table 1

The weight contribution of sensory systems to the process of maintaining balance in a vertical stance in subjects of different ages

Группа	Возраст	$W_{\text{зрит}}$	$W_{\text{проп}}$	$W_{\text{вест}}$
1	20–25	0,31 (0,12)	0,44 (0,17)	0,25 (0,10)
2	44–64	0,22 (0,13)	0,52 (0,16)	0,261 (0,09)
3	65–83	0,27 (0,15)	0,47 (0,16)	0,27 (0,07)

Примечание: $W_{\text{вест}}$ – вклад вестибулярной системы; $W_{\text{зрит}}$ – вклад зрительной системы; $W_{\text{проп}}$ – вклад проприоцептивной системы, данные представлены как среднее и стандартное отклонение ($p > 0,05$). Между группами 1–3 и 2–3 нет достоверно значимых различий

в функцию поддержания равновесия в вертикальной стойке при увеличении возраста от молодого до пожилого и старческого. Однако вклад трех основных сенсорных систем (вестибулярной, проприоцептивной и зрительной) в функцию поддержания равновесия в вертикальной стойке оказался стабильным, то есть не различался в трех исследованных возрастных группах (молодые испытуемые, испытуемые среднего и старческого возраста). То, что различия между группами все-таки существуют, подтверждается тем фактом, что траектория ОЦД, то есть количество корректирующих движений тела при вертикальном стоянии, все-таки растет с возрастом. Вместе с тем все эти изменения пропорционально распределены между сенсорными системами и пропорция между ними не изменяется. Можно сказать, что ожидаемая «перекалибровка» сенсорных систем с увеличением возраста не произошла. Этот результат требует осмысления, поскольку длина траектории ОЦД все-таки подчинялась возрастной закономерности и была увеличена именно в группе старческого возраста. Нам представляются важными три следующих аспекта данных результатов.

Во-первых, у нескольких испытуемых самого старшего возраста вклад проприоцептивной системы все-таки увеличивался. Возможно, если выделить отдельную группу лиц в возрасте старше 80 лет, эти изменения достигли бы статистической значимости. Вероятно, в возрасте старше 80 лет (older old, согласно международной номенклатуре) действительно наблюдаются изменения функции равновесия, тогда как у лиц 60–80 лет (просто old) эти изменения, даже если они есть, компенсированы.

Во-вторых, данное исследование проводилось в достаточно простых кинематических условиях. Испытуемому было необходимо просто поддерживать вертикальную стойку, что в целом несложно. В этой связи применение не статического, а динамического задания, например связанного

с ходьбой или со сложным движением, могло бы выявить большие различия между группами [9]. Действительно, наибольшие различия между, например, группами здоровых и неврологически больных лиц выявляются именно при провокационных пробах. Действительно, наиболее точные котировки пропорции вклада сенсорных систем в движение производятся при помощи динамических проб [3–6].

В-третьих, при нахождении человека в вертикальной стойке, практически без движения в спокойном состоянии остается и голова. Основным адекватным раздражителем вестибулярного рецептора остается гравитация, вследствие чего афферентация от вестибулярных лабиринтов задействована минимально. Основной поток афферентации при спокойном стоянии поступает от проприорецепторов подошвы стоп. Во время ходьбы, при выполнении сложных движений на вестибулярный рецептор воздействуют дополнительные адекватные раздражители, и вклад вестибулярной системы в поддержание равновесия увеличивается.

В-четвертых, имеются данные, например Wiesmeier et al. [10], что вклад проприоцептивной системы, а не зрительной системы во время поддержания позы в условиях угловых ускорений становится выше, чем у молодых испытуемых. Вместе с тем в таких условиях на вестибулярный рецептор воздействуют и другие сенсорные стимулы – угловое ускорение и прямолинейное ускорение.

Заключение

Результаты исследования указывают на то, что, несмотря на возрастные изменения нейромusкельной системы, такая важная функция, как поддержание вертикального положения в целом остается неизменной в смысле соотношения вклада сенсорных систем. Это, в свою очередь, указывает на то, что паттерн организации вертикальной стойки довольно жестко запрограмми-

рован в нервной системе. Примеры таких жестких паттернов встречаются и при ходьбе, когда несколько наиболее повторяющихся паттернов остаются неизменными, потому узнаваемыми на-

чиная от периода новорожденности до взрослого состояния [11].

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Meigal A., Kravtsova E., Gerasimova-Meigal L., Prokhorov K., Peskova L. Contribution of Various Sensory Inputs to Vertical Stance and Locomotion in Humans: Robust Assessment with Stabilography and Motion Videocapture. Proceedings of the 28th Conference of Open Innovations Association FRUCT. FRUCT Oy. Russia, 2021. P. 1-7. <https://fruct.org/publications/fruct28/files/Mei.pdf>
2. Foisy Z., Kapoula. Plantar cutaneous afferents influence the perception of subjective visual vertical in quiet stance. *Scientific Reports*. 2018;8:14939. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33268-3>
3. Feller K. J., Peterka R. J., Horak F. B. Sensory re-weighting for postural control in Parkinson's disease. *Frontiers in Human Neurosciences*. 2019;13:126. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00126>
4. Peterka R. J. Sensorimotor integration in human postural control. *Journal of Neurophysiology*. 2002; 88:1097-1118. <https://doi.org/10.1152/jn.2002.88.3.1097>
5. Peterka R. J., Black F. O. Age-related changes in human posture control: sensory organization tests. *J Vestib Res*. 1990-1991;1(1):73-85. PMID: 1670139.
6. Riva D., Mamo C., Fanì M., Saccavino P., Rocca F., Momenté M., Fratta M. J. Single stance stability and proprioceptive control in older adults living at home: gender and age differences. *Aging Researches*. 2013; 3:561695. <https://doi.org/10.1155/2013/561695>
7. Sexton B. M., Liu Y., Block H. J. Increase in weighting of vision vs. proprioception associated with force field adaptation. *Scientific Reports*. 2019; 9:10167. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46625-7>
8. Hong S. K., Park J. H., Kwon S. Y., Kim J. S., Koo J. W. Clinical efficacy of the Romberg test using a foam pad to identify balance problems: a comparative study with the sensory organization test. *Eur Arch Otorhinolaryngol*. 2015; Oct;272(10):2741-2747. <https://doi.org/10.1007/s00405-014-3273-2>. Epub 2014 Sep 9. PMID: 25200890.
9. Cordo P. J., Gurfinkel V. S. Motor coordination can be fully understood only by studying complex movements. *Prog Brain Res*. 2004;143:29-38. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(03\)43003-3](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(03)43003-3)
10. Wiesmeier I. K., Dalin D., Maurer C. Elderly Use Proprioception Rather than Visual and Vestibular Cues for Postural Motor Control. *Front Aging Neurosci*. 2015;Jun 23;7:97. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2015.00097>
11. Dewolf A. H., Sylos-Labini F., Cappellini G., Lacquaniti F., Ivanenko Y. Emergence of Different Gaits in Infancy: Relationship Between Developing Neural Circuitries and Changing Biomechanics. *Front Bioeng Biotechnol*. 2020;May; 19:8:473. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00473>

Информация об авторах

✉ **Кравцова Елена Николаевна** – кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры госпитальной хирургии, ЛОР-болезней, офтальмологии, урологии, онкологии, стоматологии, Петрозаводский государственный университет (185000, Россия, Петрозаводск, ул. Ленина, д. 33); e-mail: e.kravtsova@bk.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-002-2067-5764>

Мейгал Александр Юрьевич – доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой нормальной и патологической физиологии человека и животных, Петрозаводский государственный университет (185000, Россия, Петрозаводск, ул. Ленина, д. 33); e-mail: meigal@petrsu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2088-5101>

Кульгова Елизавета Денисовна – студент, Петрозаводский государственный университет (185000, Россия, Петрозаводск, ул. Ленина, д. 33); e-mail: kulgovaliza@gmail.com

Дворянчиков Владимир Владимирович – доктор медицинских наук, профессор, заслуженный врач России, директор, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи (190013, Санкт-Петербург, Бронницкая ул., д. 9); e-mail: 3162256@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0925-7596>

Information about authors

✉ **Elena N. Kravtsova** – MD Candidate, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Hospital Surgery, ENT Diseases, Ophthalmology, Urology, Oncology, Dentistry, Petrozavodsk State University (33, Lenin str., Petrozavodsk, Russia, 185000); e-mail: e.kravtsova@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-002-2067-5764>

Aleksandr Yu. Meigal – MD, Professor, Head of the Department of Normal and Pathological Physiology of Humans and Animals, Petrozavodsk State University (33, Lenin str., Petrozavodsk, Russia, 185000); e-mail: meigal@petrsu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2088-5101>

Elizaveta D. Kul'gova – Student, Petrozavodsk State University (33, Lenin str., Petrozavodsk, Russia, 185000); e-mail: kulgovaliza@gmail.com

Vladimir V. Dvoryanchikov – MD, Professor, director, Saint Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech (9, Bronnitskaya str., Saint Petersburg, Russia, 190013); e-mail: 3162256@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0925-7596>

Статья поступила 25.05.2023

Принята в печать 27.06.2023