

DOI: <https://doi.org/10.17816/KMJ641804> EDN: FAOQQP

Оценка биомеханических параметров ходьбы мужчин в условиях элементного дисбаланса

К.И. Агеенко, Е.А. Луговая, К.А. Старенченко

Научно-исследовательский центр «Арктика» Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Магадан, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Анализ биомеханических параметров ходьбы и уровней макро- и микроэлементов обследуемых, опирающийся на современные технологии их измерения, позволяет оценить биоэлементные основы функционирования опорно-двигательного аппарата.

Цель. Установить взаимосвязь временных, фазовых, пространственных и кинематических параметров ходьбы практически здоровых мужчин зрелого возраста, проживающих в г. Магадане, и содержания у них эссенциальных химических элементов.

Материал и методы. Измерение и оценку 18 параметров ходьбы у 42 практически здоровых мужчин зрелого возраста провели с помощью системы диагностики двигательной патологии и восстановительного лечения. Методами атомно-эмиссионной и масс-спектрометрии с индуктивно связанной аргоновой плазмой в волосах обследованных определили концентрации 25 химических элементов. Статистическую обработку выполнили с помощью программы SPSS 23. Применяли тест Шапиро–Уилка и ранговую корреляцию Спирмена ($p < 0,05$).

Результаты. Установлено, что временные параметры ходьбы соответствуют нормативным значениям у 73,81–100% обследованных, характеристики фаз ходьбы — у 76,19–92,86%, пространственные параметры — у 76,19–100% пациентов. Элементный профиль добровольцев характеризуется недостатком Ca (83,9%), Co (16,1%), Fe (16,1%), I (16,1%), Mg (22,6%), Se (19,4%) и избытком K (22,6%), Na (12,9%) при отклонении концентраций данных элементов от референсных значений не более чем в 2 раза. Умеренно выраженные положительные ($0,356 < r < 0,475$; $p < 0,048$) и отрицательные ($-0,472 < r < -0,382$; $p < 0,034$) корреляционные связи были установлены между биомеханическими параметрами ходьбы и концентрациями Ca, Co, Cr, Fe, K, Mg, Na, P, Se, Zn.

Заключение. Биомеханические параметры ходьбы обследованных условно здоровых магаданцев соответствуют интервалам нормы. Значительный дисбаланс биоэлементов (более чем в 3 раза) приводит к инструментально фиксируемым отклонениям в параметрах ходьбы.

Ключевые слова: биомеханические параметры ходьбы; опорно-двигательная система; эссенциальные химические элементы.

Как цитировать:

Агеенко К.И., Луговая Е.А., Старенченко К.А. Оценка биомеханических параметров ходьбы мужчин в условиях элементного дисбаланса // Казанский медицинский журнал. 2025. DOI: 10.17816/KMJ641804 EDN: FAOQQP

DOI: <https://doi.org/10.17816/KMJ641804> EDN: FAOQQP

Evaluation of Walking Biomechanics in Men with Elemental Imbalance

Kirill I. Ageenko, Elena A. Lugovaya, Kirill A. Starenchenko

“Arctic” Research Center, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Magadan, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The analysis of walking biomechanics and macro- and micronutrient levels in participants based on contemporary measurement technologies allows for the assessment of the bioelemental bases of musculoskeletal functions.

AIM: To establish the relationship between the temporal, phase, spatial, and kinematic parameters of walking in apparently healthy middle-aged men living in Magadan and the level of essential elements in their system.

MATERIAL AND METHODS: Eighteen walking parameters of 42 apparently healthy middle-aged men were measured and assessed using a system for diagnosing musculoskeletal disorders and rehabilitation. The levels of 25 elements were determined in the hair of the participants using atomic emission and mass spectrometry with argon inductively coupled plasma. SPSS 23 software was used for statistical analysis. The Shapiro–Wilk test and Spearman rank correlation ($p < 0.05$) were used.

RESULTS: The temporal parameters of walking corresponded to the reference values in 73.81% to 100% of participants, the walking phase parameters in 76.19% to 92.86% of participants, and the spatial parameters in 76.19% to 100% of participants. The elemental profiles of the volunteers showed a deficiency of Ca (83.9%), Co (16.1%), Fe (16.1%), I (16.1%), Mg (22.6%), and Se (19.4%) and an excessive level of K (22.6%) and Na (12.9%). The concentration of these elements deviated from the reference values by a maximum of two times. Moderate positive ($0.356 < r < 0.475$; $p < 0.048$) and negative ($-0.472 < r < -0.382$; $p < 0.034$) correlations were detected between the walking biomechanics and Ca, Co, Cr, Fe, K, Mg, Na, P, Se, and Zn concentrations.

CONCLUSION: The walking biomechanics of the examined apparently healthy Magadan residents corresponded to the reference ranges. A significant elemental imbalance (more than three times) leads to instrumental deviations of walking parameters.

Keywords: walking biomechanics; musculoskeletal system; essential chemical elements.

To cite this article:

Ageenko KI, Lugovaya EA, Starenchenko KA. Evaluation of walking biomechanics in men with elemental imbalance. *Kazan Medical Journal*. 2025. DOI: 10.17816/KMJ641804 EDN: FAOQQP

АКТУАЛЬНОСТЬ

Оценку биомеханических характеристик опорно-двигательного аппарата (ОДА) и, в частности, параметров ходьбы проводят чаще всего для лиц с патологией ОДА либо для лиц пожилого возраста [1–6]. Параметры ходьбы здорового человека изучают гораздо реже, и в основном полученные экспериментальные данные используют для разработки половозрастных или региональных нормативов [7–10].

В физиологии человеческого организма интересен комплексный подход, позволяющий сравнить различные показатели и попытаться обнаружить взаимосвязи между ними.

Структурными и функциональными химическими элементами, играющими большую роль в работе ОДА, являются такие эссенциальные макро- и микроэлементы, как Ca, Mg, P, K, Na, Cu, Zn и др. [11–13]. Ранее установлено, что территория Магаданской области — элемент-дефицитная биогеохимическая провинция с выраженным недостатком многих жизненно важных химических элементов [14, 15].

Цель исследования — установить взаимосвязь временных, фазовых, пространственных и кинематических параметров ходьбы практически здоровых мужчин зрелого возраста, проживающих в г. Магадане, и содержания у них эссенциальных химических элементов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

При помощи системы диагностики двигательной патологии и восстановительного лечения методом биологической обратной связи «Стэдис» (ООО «Нейрософт», Россия) в период с февраля по август 2024 г. были обследованы 42 добровольца мужского пола, проживающих в г. Магадане. Средний возраст обследованных составил $39,33 \pm 1,26$ года в интервале от 22 до 57 лет. Произведена регистрация 18 параметров качества ходьбы, включая: временные (цикл шага, шаг — в секундах; частота шага — в шагах в минуту; ритмичность ходьбы), фазовые [период опоры (%), одиночная опора (%), двойная опора (%), первая двойная опора (%), вторая двойная опора (%), начало второй двойной опоры (%), период переноса (%)], пространственные [длина цикла шага (см), скорость ходьбы (км/ч), высота подъёма стопы (см), циркумдукция (см)] и кинематические [амплитуда сгибания/разгибания (градусы), амплитуда приведения/отведения (градусы), амплитуда ротации (градусы)]. Все параметры, кроме ритмичности ходьбы, длины цикла шага и скорости ходьбы, определяли для левой и правой ноги. Исследование качества ходьбы проведено на базе лаборатории биоэлеметологии и функциональной морфологии Научно-исследовательского центра «Арктика» ДВО РАН (г. Магадан).

У этих же добровольцев с помощью спектрального анализа (атомно-эмиссионная спектрометрия с индук-

тивно связанной плазмой и масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой) определяли содержание 25 химических элементов в волосах (K, Na, Ca, Mg, P, Fe, Zn, Cu, Se, I, Mn, Co, Cr, Mo, V, Si, B, Ni, Li, Al, As, Hg, Pb, Cd, Be), отражающее долговременный элементный статус организма. Спектральный анализ волос проводили в соответствии с утверждёнными рекомендациями (МУК 4.1.1482-03, МУК 4.1.1483-03) на приборах Optima 2000 DV (Perkin Elmer Corp., США) и NexION 300D (Perkin Elmer Corp., США) в ООО «Центр биотической медицины» (Россия).

Критерии включения в исследование — мужчины 1-го и 2-го зрелого возраста.

Критерии исключения — острые или хронические, в стадии обострения заболевания различной этиологии.

Статистическую обработку полученных данных выполняли с использованием программы IBM SPSS Statistics 23.0. Нормальность распределения полученных количественных данных определяли с использованием теста Шапиро–Уилка. Для анализа корреляционных взаимосвязей между параметрами применяли ранговую корреляцию Спирмена.

Оценку полученных значений биомеханических параметров произвели согласно нормативам, использованным в программном обеспечении системы диагностики «Стэдис», с учётом пола, возраста, массы и роста обследованных, и привели в итоговых протоколах. Оценку концентраций 25 макро- и микроэлементов выполнили относительно референсных значений базы данных АНО «Центр биотической медицины» (Москва, [16]), а также референсным значениям (25–75-центильный интервал) по г. Магадану [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Временные параметры ходьбы соответствуют нормативным значениям у 73,81–100% обследованных, характеристики фаз ходьбы — у 76,19–92,86% обследованных, пространственные параметры — 76,19–100% пациентов (табл. 1–3). Отклонение биомеханических параметров от нормы в сторону уменьшения отмечено у 21,43% обследованных (для временных параметров), 2,38–21,43% (для фазовых параметров) и 7,14–21,43% пациентов (для пространственных параметров). Отклонение биомеханических параметров от нормы в сторону увеличения зафиксировано для 14,29–29,19% (для временных параметров), 2,38–23,81% обследованных (для фазовых параметров) и 2,38–19,29% (для пространственных параметров). Отметим, что максимальная частота встречаемости обследованных с пониженным значением параметра ходьбы (21,43%) зафиксирована для частоты шагов обеих ног, одиночной опоры левой ноги, периода переноса для обеих ног и скорости ходьбы; максимальная частота встречаемости обследованных с повышенным значением параметра ходьбы (29,19%) отмечена для цикла шага левой ноги.

Кинематические параметры ходьбы (амплитуда сгибания/разгибания, амплитуда приведения/отведения

Таблица 1. Временные параметры ходьбы мужчин г. Магадана зрелого возраста (n=42)**Table 1.** Temporal walking parameters of middle-aged men living in Magadan (n = 42)

Параметры ходьбы	M±m	Частота встречаемости обследованных с нормативными и отличными от них параметрами, %		
		Норма	Ниже нормы	Выше нормы
ЦШ-лев., с	1,14±0,01	85,71	—	14,29
ЦШ-прав., с	1,15±0,01	85,71	—	14,29
Ш-лев., с	0,57±0,01	73,81	—	29,19
Ш-прав., с	0,58±0,01	76,19	—	23,81
ЧШ-лев., Ш/мин	52,65±0,61	78,57	21,43	—
ЧШ-прав., Ш/мин	52,65±0,61	78,57	21,43	—
PX	0,970±0,003	100	—	—

Примечание. Лев. — параметр для левой ноги; прав. — параметр для правой ноги; ЦШ — цикл шага; Ш — шаг; ЧШ — частота шага; PX — ритмичность ходьбы.

Таблица 2. Параметры фаз ходьбы мужчин г. Магадана зрелого возраста (n=42)**Table 2.** Walking phase parameters of middle-aged men living in Magadan (n = 42)

Параметры ходьбы	M±m	Частота встречаемости обследованных с нормативными и отличными от них параметрами, %		
		Норма	Ниже нормы	Выше нормы
ПО-лев., %	63,58±0,23	83,33	—	16,67
ПО-прав., %	63,85±0,24	80,95	—	19,05
ОО-лев., %	36,00±0,24	78,57	21,43	—
ОО-прав., %	36,39±0,25	80,95	19,05	—
ДО-лев., %	25,57±0,41	78,57	—	21,43
ДО-прав., %	27,45±0,42	76,19	—	23,81
ПДО-лев., %	14,07±0,21	78,57	—	21,43
ПДО-прав., %	13,64±0,23	83,33	—	16,67
ВДО-лев., %	13,51±0,23	83,33	2,38	14,29
ВДО-прав., %	13,81±0,23	78,57	2,38	19,05
НВДО-лев., %	49,99±0,14	92,86	2,38	4,76
НВДО-прав., %	50,03±0,10	92,86	4,76	2,38
ПП-лев., %	36,44±0,23	78,57	21,43	—
ПП-прав., %	36,15±0,24	78,57	21,43	—

Примечание. ПО — период опоры; ОО — одиночная опора; ДО — двойная опора; ПДО — первая двойная опора; ВДО — вторая двойная опора; НВДО — начало второй двойной опоры; ПП — период переноса.

и амплитуда ротации нижних конечностей) оценить с позиции нормативов нельзя, поскольку они отсутствуют в программном обеспечении «Стэдис» в настоящее время.

Характеристика дисбаланса эссенциальных макро- и микроэлементов представлена в табл. 4.

Приведённые в табл. 4 данные свидетельствуют о том, что при анализе показателей необходимо пользоваться и региональными, и общероссийскими референсными значениями, что позволит более внимательно подходить к назначению коррекции элементного дисбаланса.

Корреляционный анализ между рассматриваемыми в исследовании параметрами качества ходьбы и концентрациями химических элементов в волосах добровольцев позволил выявить ряд достоверных корреляционных

связей (табл. 5). Все корреляции имеют умеренную силу. Коэффициент Спирмена для положительных корреляций соответствует интервалу от 0,356 до 0,472 ($p < 0,048$), отрицательных — от $-0,472$ до $-0,382$ ($p < 0,034$).

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные показали, что у большинства обследованных характеристики ходьбы соответствуют нормативным значениям и свидетельствуют об отсутствии значимых патологий ОДА у добровольцев, подобранных нами по критерию «практически здоровые». Отмечен небольшой вектор в сторону обнаружения повышенных значений временных параметров, соответствующих более медленной ходьбе. Так, параметр «цикл шага» оказался

Таблица 3. Пространственные и кинематические параметры ходьбы мужчин г. Магадана зрелого возраста (n=42)**Table 3.** Spatial and kinematic walking parameters of middle-aged men living in Magadan (n = 42)

Параметры ходьбы	M±m	Частота встречаемости обследованных с нормативными и отличными от них параметрами, %		
		Норма	Ниже нормы	Выше нормы
ДЦШ, см	147,67±2,41	85,72	7,14	7,14
СХ, км/ч	4,67±0,09	76,19	21,43	2,38
ВПС-лев., см	13,67±0,25	85,71	—	14,29
ВПС-прав., см	12,45±0,23	85,71	—	19,29
Ц-лев., см	3,48±0,20	97,62	—	2,38
Ц-прав., см	3,31±0,17	100	—	—
АС/Р-лев., °	4,48±0,34	**	**	**
АС/Р-прав., °	4,36±0,34	**	**	**
АП/О-лев., °	6,00±0,34	**	**	**
АП/О-прав., °	5,88±0,37	**	**	**
АР-лев., °	10,19±0,67	**	**	**
АР-прав., °	9,64±0,70	**	**	**

Примечание. ДЦШ — длина цикла шага; СХ — скорость ходьбы; ВПС — высота подъема стопы; Ц — циркумдукция; АС/Р — амплитуда сгибания/разгибания; АП/О — амплитуда приведения/отведения; АР — амплитуда ротации; ** — сравнение показателей с нормативами невозможно из-за отсутствия нормативов.

Таблица 4. Структура элементного дисбаланса у обследованных мужчин г. Магадана, прошедших оценку качества ходьбы, по сравнению с референсными значениями (n=42)**Table 4.** Structure of elemental imbalance in the examined men living in Magadan after the walking quality assessment compared with reference values (n = 42)

Элемент	Референсы	Норма, %	Дефицит, %*			Избыток, %**		
			в 1–2 раза	> чем в 2 раза	Всего	в 1–2 раза	> чем в 2 раза	Всего
Ca	Москва ¹	16,13	67,74	16,13	83,87	Нет	Нет	Нет
	Магадан ²	16,30	61,20	9,60	70,80	12,90	Нет	12,90
Co	Москва	80,65	3,22	12,90	16,12	3,23	Нет	3,23
	Магадан	61,20	16,30	22,50	38,80	Нет	Нет	Нет
Cr	Москва	93,54	3,23	Нет	3,23	Нет	3,23	3,23
	Магадан	51,60	38,70	6,40	45,10	Нет	3,30	3,30
Cu	Москва	93,55	6,45	Нет	6,45	Нет	Нет	Нет
	Магадан	67,70	19,30	Нет	19,30	13,0	Нет	13,0
Fe	Москва	83,87	16,13	Нет	16,13	Нет	Нет	Нет
	Магадан	25,80	64,50	9,70	74,20	Нет	Нет	Нет
I	Москва	77,42	12,90	3,23	16,13	3,225	3,225	6,45
	Магадан	29,00	19,30	48,3	67,60	3,40	Нет	3,40
K	Москва	70,97	3,225	3,225	6,45	9,67	12,91	22,58
	Магадан	51,60	22,50	6,40	28,90	16,30	3,20	19,50
Mg	Москва	77,42	19,36	3,22	22,58	Нет	Нет	Нет
	Магадан	48,30	29,00	3,40	32,40	19,30	Нет	19,30
Mn	Москва	90,32	Нет	Нет	Нет	9,68	Нет	9,68
	Магадан	16,10	41,90	25,90	67,80	16,10	Нет	16,10
Na	Москва	87,10	Нет	Нет	Нет	3,22	9,68	12,90
	Магадан	41,90	25,80	25,80	51,60	6,50	Нет	6,50
P	Москва	93,55	6,45	Нет	6,45	Нет	Нет	Нет
	Магадан	48,30	38,80	Нет	38,80	12,90	Нет	12,90
Se	Москва	70,96	19,36	Нет	19,36	3,23	6,45	9,68
	Магадан	64,50	19,30	Нет	19,30	6,50	9,70	16,20

Продолжение таблицы 4.

Si	Москва	96,77	3,23	Нет	3,23	Нет	Нет	Нет
	Магадан	35,40	25,80	3,40	29,20	35,40	Нет	35,40
V	Москва	90,32	3,23	Нет	3,23	6,45	Нет	6,45
	Магадан	73,30	Нет	3,40	3,40	23,30	Нет	23,30
Zn	Москва	90,32	6,45	Нет	6,45	3,23	Нет	3,23
	Магадан	70,90	16,20	Нет	16,20	12,90	Нет	12,90

Примечание. * Относительно нижней границы нормы референса, ** относительно верхней границы нормы референса, 1 — А.В. Скальный и соавт. [16], 2 — Е.А. Луговая, Е.М. Степанова [15].

Таблица 5. Значимые корреляции биомеханических параметров ходьбы и уровней эссенциальных химических элементов мужчин г. Магадана зрелого возраста

Table 5. Meaningful correlations between the walking biomechanics and essential chemical element levels among middle-aged men living in Magadan

Элемент	Параметр	r	p
Ca	Период опоры (левая)	-0,391	0,030
	Период переноса (левая)	0,396	0,027
Co	Период опоры (левая)	-0,472	0,007
	Период переноса (левая)	0,472	0,007
	Амплитуда ротации (правая)	0,370	0,041
Cr	Амплитуда сгибания/разгибания (левая)	0,447	0,012
Fe	Период опоры (левая)	-0,382	0,034
	Период переноса (левая)	0,387	0,031
K	Период опоры (правая)	-0,404	0,024
	Период переноса (правая)	0,404	0,024
	Частота шагов (левая)	0,380	0,035
	Частота шагов (правая)	0,380	0,035
Mg	Период опоры (левая)	-0,420	0,019
	Период переноса (левая)	0,422	0,018
	Длина цикла шага	0,451	0,011
	Скорость ходьбы	0,358	0,048
Na	Период опоры (правая)	-0,392	0,029
	Период переноса (правая)	0,392	0,029
	Цикл шага (левая)	-0,406	0,024
	Цикл шага (правая)	-0,406	0,024
	Частота шагов (левая)	0,356	0,049
	Частота шагов (правая)	0,356	0,049
P	Амплитуда ротации (левая)	-0,389	0,031
Se	Период опоры (левая)	-0,423	0,018
	Период переноса (левая)	0,431	0,016
Zn	Амплитуда ротации (правая)	0,378	0,036
	Частота шагов (левая)	-0,402	0,025
	Частота шагов (правая)	-0,402	0,025

Примечание. Для расчёта корреляций использован коэффициент корреляции Спирмена.

выше нормы у 14,29% обследованных мужчин, параметр «шаг» — у 23,81–29,19%. Обследованных со значениями данных характеристик ниже нормы выявлено не было.

Сопоставление полученных данных о биоэлементном статусе с референсными значениями А.В. Скального и соавт. [16] позволило сделать вывод о выраженном недостатке Ca (83,9%), Co (16,1%), Fe (16,1%), I (16,1%), Mg (22,6%), Se (19,4%) и избытке K (22,6%), Na (12,9%) (см. табл. 4). Рассмотрение полученных данных на основании региональных нормативов Е.А. Луговой, Е.М. Степановой [15] подтвердило дефицит Ca (70,8%), Co (38,8%), Fe (74,2%), I (67,6%), Mg (32,4%), Se (19,3%). В то же время для биоэлементов K и Na был дифференцирован их дефицит (28,9 и 51,6% соответственно), который оказался более выраженным, чем избыток (19,5 и 6,5% соответственно). Кроме того, привлекают внимание высокие показатели дефицита Mn (67,8%) и P (38,8%), а также дефицита и избытка Si (29,2 и 35,4% соответственно). Однако заметим, что более высокие значения дефицитных и избыточных концентраций, согласно региональным магаданским нормативам [15], имеют место за счёт дефицита и избытка в рамках 1–2-кратного превышения границ референсных интервалов. Так, например, чрезвычайно важный для биохимии ОДА элемент Ca, образующий главный минерал костной ткани гидроксиапатит кальция ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), у большей (67,74%) части магаданских добровольцев, согласно референсным значениям А.В. Скального и соавт. [16], имеет менее чем двукратный дефицит (см. табл. 4). Таким образом, адекватное функционирование ОДА у практически здоровых мужчин может осуществляться и на фоне слабо выраженного биоэлементного дефицита.

В ходе исследования выявлены умеренно значимые корреляционные связи — между уровнем Mg и такими интегральными показателями ходьбы, как скорость ходьбы ($r=0,358$; $p=0,043$) и длина цикла шага ($r=0,451$; $p=0,011$) (см. табл. 5). Известно, что Mg играет важную роль в состоянии здоровья ОДА — в работе мышц он обеспечивает процесс их расслабления, в костной ткани непосредственно участвует в процессе её роста и минерализации, способствует синтезу коллагена и, кроме того, активизирует витамин D, регулирующий метаболизм

кальция и фосфата [18, 19]. Следовательно, содержание Mg в организме может рассматриваться как один из важных биоэлементных маркеров качества ходьбы.

Нами установлено, что каждая группа биомеханических параметров имеет свои корреляционные связи с отдельными макро- и микроэлементами (см. табл. 5). Всего обнаружено 28 достоверных связей, наибольшее из которых образует Na (6), далее в порядке убывания Mg (4), K (4), Co (3), Zn (3), Ca (2), Se (2), Fe (2), P (1), Cr (1). С временными параметрами ходьбы коррелируют концентрации K, Na и Zn, с фазовыми параметрами — Ca, Co, Fe, K, Mg, Na, Se и Zn, с пространственными параметрами — Mg, с кинематическими параметрами (характеризующие угловые перемещения в суставах) — Co, Cr, P и Zn. Только отрицательные корреляции с концентрациями биоэлементов выявлены для временного параметра «цикл шага» (в связи с уровнем Na) и фазового параметра «период опоры» (в связи с уровнями Ca, Co, Fe, K, Mg, Se). Временной параметр «частота шага» и кинематический параметр «амплитуда ротации» имеют как отрицательные, так и положительные корреляции с уровнями макро- и микроэлементов.

При проведении качественного анализа протоколов оценки ходьбы у четырёх обследованных мы отметили увеличение времени на выполнение цикла шага и на шаг с замедлением частоты шага, скорости ходьбы и уменьшением длины цикла шага на фоне трёх-четырёхкратного дефицита Co. Кобальт как эссенциальный элемент значим для развития и функциональной реализации ОДА, поскольку входит в активный центр витамина B12, который вместе со своими биомаркерами тесно связан с минеральной плотностью костей, составом тела, мышечной силой и физической активностью у людей среднего и пожилого возраста [20, 21], обменом веществ и кровотоком в костной ткани, метилированием ДНК и/или физическими функциями и риском падений [22]. Для организма особенно важно достаточное присутствие данного микроэлемента, поэтому продукты с Co особенно необходимы.

Таким образом, комплексы макро- и микроэлементов должны правильно подбираться на основе предшествующего биоэлементного анализа, подразумевающего среди прочего оценку дисбаланса эссенциальных химических элементов в организме обследуемого, что поможет усилению профилактических мер по предотвращению нарушений работы тканевых и клеточных структур ОДА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом у всех добровольцев временные, фазовые и пространственные параметры ходьбы находятся в пределах нормы. При этом биоэлементный статус обследованных характеризуется наличием большого количества дефицитных частот слабой степени выраженности (не более чем в 2 раза): Ca (70,8%), Co (38,8%), Fe (74,2%), I (67,6%), Mg (32,4%), Se (19,3%).

Значительный дисбаланс биоэлементов (более чем в 3 раза; например, для Co) приводит к инструментально фиксируемыми отклонениям в параметрах ходьбы.

Установлено 28 достоверных корреляционных связей между биомеханическими параметрами ходьбы и концентрациями биоэлементов в организме обследованных «практически здоровых» мужчин из г. Магадана. С временными параметрами ходьбы коррелируют концентрации K, Na и Zn, с фазовыми параметрами — Ca, Co, Fe, K, Mg, Na, Se и Zn, с пространственными параметрами — Mg, с кинематическими параметрами — Co, Cr, P и Zn.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. А.К.И. — разработка концепции, формальный анализ, проведение исследования, научное руководство, написание черновика рукописи, редактирование; Л.Е.А. — разработка концепции, формальный анализ, написание черновика рукописи, редактирование; С.К.А. — проведение исследования, написание черновика рукописи. Все авторы одобрили рукопись, а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом Научно-исследовательского центра «Арктика» Дальневосточного отделения Российской академии наук (№ 001/024 от 23.01.2024). Все участники исследования добровольно подписали форму информированного согласия до включения в исследование.

Согласие на публикацию. Авторы не брали письменное информированное добровольное согласие обследованных на публикацию персональных данных, в связи с отсутствием такой необходимости.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Все данные, полученные в настоящем исследовании, доступны в статье.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали три внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: A.K.I.: conceptualization, formal analysis, investigation, supervision, writing—original draft, writing—review & editing; L.E.A.: conceptualization, formal analysis, writing—original draft, writing—review & editing; S.K.A.: investigation, writing—original draft. All authors approved the version of the manuscript to be published and agree to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: The study was approved by the local Ethics Committee of Arctic Research Center of the Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences (No. 001/024 dated January 23, 2024). All participants provided written informed consent prior to enrollment in the study.

Consent for publication: Written informed consent was not obtained from the participants for the publication of personal data as it is not applicable.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this work.

Data availability statement: All data generated during this study are available in this article.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved three external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Skvortsov DV. *Diagnosis of motor pathology by instrumental methods: gait analysis, stabilometry*. Moscow: Scientific-med. MBN company; 2007. (In Russ.) ISBN: 978-5-94982-045-2 EDN: QLQAIN
2. Piche E, Gerus P, Chorin F, et al. The effect of different dual tasks conditions on gait kinematics and spatio-temporal walking parameters in older adults. *Gait Posture*. 2022;95:63–69. doi: 10.1016/j.gaitpost.2022.04.006 EDN: NCQBTS
3. Herssens N, Verbecque E, Hallems A, et al. Do spatiotemporal parameters and gait variability differ across the lifespan of healthy adults? A systematic review. *Gait Posture*. 2018;64:181–190. doi: 10.1016/j.gaitpost.2018.06.012
4. Migel K, Wikstrom E. Gait biomechanics following taping and bracing in patients with chronic ankle instability: a critically appraised topic. *J Sport Rehabil*. 2020;29(3):373–376. doi: 10.1123/jsr.2019-0030 EDN: PERFPZ
5. Koroleva SV. The technology of objective assessment of motor disorders in the dynamics of rehabilitation in patients with traumatic and orthopedic profile. *Fizicheskaya i reabilitacionnaya medicina*. 2022;4(1):47–52. doi: 10.26211/2658-4522-2022-4-1-47-52 EDN: ZCFJQS
6. Kirpichev IV, Koroleva SV, Usmane MA. Study of the temporal characteristics of gaiting in patients with coxarthrosis. *Fizicheskaya i reabilitacionnaya medicina*. 2023;5(2):65–71. doi: 10.26211/2658-4522-2023-5-2-65-71 EDN: TSWVVZ
7. Fukuchi CA, Fukuchi RK, Duarte M. Effects of walking speed on gait biomechanics in healthy participants: a systematic review and meta-analysis. *Syst Rev*. 2019;8(1):153. doi: 10.1186/s13643-019-1063-z EDN: UHLUIS
8. Lau LK, Wee SL, Pang WJB, et al. Reference values of gait speed and gait spatiotemporal parameters for a south east asian population: the yishun study. *Clin Interv Aging*. 2020;15:1753–1765. doi: 10.2147/CIA.S270407
9. Lordall J, Oates AR, Lanovaz JL. Spatiotemporal walking performance in different settings: effects of walking speed and sex. *Front Sports Act Living*. 2024;6:1277–1587. doi: 10.3389/fspor.2024.1277587 EDN: TPKSOV
10. Rössler R, Wagner J, Knaier R, et al. Spatiotemporal gait characteristics across the adult lifespan: reference values from a healthy population — analysis of the COMplete cohort study. *Gait Posture*. 2024;109:101–108. doi: 10.1016/j.gaitpost.2024.01.005 EDN: GNIWXK
11. Ciosek Z, Kot K, Kosik-Bogacka D, et al. The effects of calcium, magnesium, phosphorus, fluoride, and lead on bone tissue. *Biomolecules*. 2021;11(4):506. doi: 10.3390/biom11040506 EDN: JGLSCN
12. Danilchenko S, Rogulsky Y, Kulik A, et al. A simple method to determine the fractions of labile and mineral-bound microelements in bone tissue by atomic absorption spectrometry. *Biol Trace Elem Res*. 2021;199(3):935–943. doi: 10.1007/s12011-020-02234-4 EDN: MHGLFU
13. Shrimanker I, Bhattarai S. Electrolytes. In: *StatPearls* [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan. 2023 Jul 24.
14. Gorbachev AL, Efimova AV, Lugovaya EA, Bulban AP. Features of element's status of inhabitants of different natural-geographic territories of the Magadan region. *Human ecology*. 2003;6:12–16. EDN: HRTKUV
15. Lugovaya EA, Stepanova EM. *Regional indicators of the content of macro- and microelements in the body of residents of Magadan. Scientific and practical recommendations*. Magadan: Ekspress-poligrafiya; 2019. (In Russ.)
16. Skalny AV, Grabeklis AR, Korobejnikova TV, et al. Reference values of the content of chemical elements in human biological substrates. Moscow, 2023. 58 p. (In Russ.)
17. Lugovaya EA, Stepanova EM. Analysis of elemental status of residents of Magadan town with different body mass index. Part 2. Element interconnections. *Problems of biological, medical and pharmaceutical chemistry*. 2014;11:66–71. EDN: TEQRVH
18. Rondanelli M, Faliva MA, Tartara A, et al. An update on magnesium and bone health. *Biometals*. 2021;34(4):715–736. doi: 10.1007/s10534-021-00305-0 EDN: SCATRA
19. Pinto MM, Dubouchaud H, Jouve C, et al. A chronic low-dose magnesium L-lactate administration has a beneficial effect on the myocardium and the skeletal muscles. *J Physiol Biochem*. 2022;78(2):501–516. doi: 10.1007/s13105-021-00827-8 EDN: KQJPFS
20. Zhao J, Lu Q, Zhang X. Associations of serum vitamin B12 and its biomarkers with musculoskeletal health in middle-aged and older adults. *Front Endocrinol*. 2024;15:1387035. doi: 10.3389/fendo.2024.1387035 EDN: KPZWJU
21. Pyrgioti EE, Karakousis ND. B12 levels and frailty syndrome. *J Frailty Sarcopenia Falls*. 2022;7(1):32–37. doi: 10.22540/JFSF-07-032 EDN: BQOBZQ
22. Swart KM, van Schoor NM, Lips P. Vitamin B12, folic acid, and bone. *Curr Osteoporos Rep*. 2013;11(3):213–218. doi: 10.1007/s11914-013-0155-2 EDN: CAAIWC

ОБ АВТОРАХ

* **Агеенко Кирилл Игоревич**, канд. биол. наук, заведующий, лаб. биоэлементологии и функциональной морфологии; адрес: Россия, 685000, Магадан, пр. К. Маркса, д. 24; ORCID: 0000-0001-8297-931X; eLibrary SPIN: 1647-5767; e-mail: kir.ageenko@yandex.ru

Луговая Елена Александровна, канд. биол. наук, доцент, директор; ORCID: 0000-0002-6583-4175; eLibrary SPIN: 5825-7122; e-mail: elena_plant@mail.ru

Старенченко Кирилл Анатольевич, младший научный сотрудник, лаб. биоэлементологии и функциональной морфологии; ORCID: 0009-0000-8459-8473; e-mail: kirillstarenchenko@mail.ru

AUTHORS' INFO

* **Kirill I. Ageenko**, Cand. Sci. (Biology), Researcher, Head, Lab. of Bioelementology and Functional Morphology; address: 24 Karl Marx st, Magadan, Russia, 685000; ORCID: 0000-0001-8297-931X; eLibrary SPIN: 1647-5767; e-mail: kir.ageenko@yandex.ru

Elena A. Lugovaya, Cand. Sci. (Biology), Assistant Professor, Director; ORCID: 0000-0002-6583-4175; eLibrary SPIN: 5825-7122; e-mail: elena_plant@mail.ru

Kirill A. Starenchenko, Junior Research Associate, Lab. of Bioelementology and Functional Morphology; ORCID: 0009-0000-8459-8473; e-mail: kirillstarenchenko@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author