

DOI: <https://doi.org/10.17816/clinutr72132>

Биоимпедансный анализ состава тела человека: медицинское применение, терминология

Д.В. Николаев¹, С.П. Щелькалина²¹ Научно-технический центр «МЕДАСС», Москва, Российская Федерация² Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Для постановки диагноза и динамического наблюдения пациентов с заболеваниями, сопровождающимися изменениями состава тела, требуются данные целого ряда аппаратных аналитических методов. Неинвазивный, без лучевых и химических нагрузок, быстрый и комфортный для пациента биоимпедансный анализ состава тела комплексно решает проблему одновременного получения количественных оценок всех компонентов состава тела.

В статье обсуждаются особенности терминологии биоимпедансного анализа состава тела и самые частые ошибки в использовании терминов. В русскоязычной медицинской среде можно нередко встретить употребление ряда неточных терминов, относящихся к биоимпедансному анализу состава тела человека. В то же время терминология биоимпедансного анализа состава тела человека в англоязычных публикациях давно устоялась. Приведены русскоязычные и англоязычные термины биоимпедансного анализа состава тела человека с соответствующими сокращениями, а также схема соподчинённости терминов «компоненты состава тела», «параметры состава тела», «параметры биоимпедансного анализа состава тела» и «биоимпедансные параметры».

Обсуждаются наиболее разработанные направления применения биоимпедансного анализа в медицинской практике: оценка питания и динамические наблюдения за изменением состава тела, оценка минеральной массы организма, оценка параметров гидратации организма, оценка кровенаполнения тканей и органов, в том числе в режиме мониторинга, оценка асимметрии парных органов и конечностей, оценка предстартовой готовности, физического развития и уровня тренированности мышечной системы спортсмена.

Ключевые слова: биоимпедансный анализ; состав тела; терминология; медицинское применение.

Как цитировать

Николаев Д.В., Щелькалина С.П. Биоимпедансный анализ состава тела человека: медицинское применение, терминология // Клиническое питание и метаболизм. 2021. Т. 2, № 2. С. 80–91. DOI: <https://doi.org/10.17816/clinutr72132>

DOI: <https://doi.org/10.17816/clinutr72132>

Bioimpedance analysis of human body composition: medical applications, terminology

Dmitry V. Nikolaev¹, Svetlana P. Shchelykalina²

¹ Scientific Research Center "Medas", Moscow, Russian Federation

² Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

To diagnose and dynamically monitor patients with diseases accompanied by changes in body composition, data from a number of hardware analytical methods are required. Non-invasive, without radiation and chemical loads, fast and patientfriendly bioimpedance analysis of body composition comprehensively solves the problem of obtaining quantitative estimates of all components of body composition at the same time.

This article discusses the terminology features of bioimpedance analysis of body composition and the most common mistakes in the use of terms. In the Russian-speaking medical environment, you can often find the use of a number of inaccurate terms related to bioimpedance analysis of the human body composition. At the same time, the terminology of bioimpedance analysis of human body composition in English-language publications has long been established. The article presents the Russian and English terms of bioimpedance analysis of the human body composition with corresponding abbreviations, as well as the hierarchy of the terms "body composition components", "body composition parameters", "parameters of bioimpedance analysis of body composition" and "bioimpedance parameters".

The most developed areas of application of bioimpedance analysis in medical practice are discussed: assessment of nutrition and dynamic observations of changes in body composition, assessment of the body mineral mass, assessment of the body hydration parameters, assessment of blood supply to tissues and organs, including in the monitoring mode, assessment of the asymmetry of paired organs and limbs, assessment of pre-start readiness, physical development and the level of fitness of the athlete's muscular system.

Keywords: electric impedance; body composition; terminology.

To cite this article

Nikolaev DV, Shchelykalina SP. Bioimpedance analysis of human body composition: medical applications, terminology. *Clinical nutrition and metabolism*. 2021;2(2):80–91. DOI: <https://doi.org/10.17816/clinutr72132>

ВВЕДЕНИЕ

Современный врач при постановке диагноза и динамическом наблюдении за течением заболеваний, сопровождающихся изменениями состава тела, имеет возможность пользоваться данными целого ряда аппаратных аналитических методов. Значительный объём диагностической информации приходится на биохимические методы. Лучевые методы позволяют *in vivo* воспроизводить форму, размеры и взаимное расположение основных органов и тканей; антропометрические методы, гидроденситометрия, разведение индикаторов, двухчастотная рентгеновская денситометрия — количественно оценивать отдельные компоненты состава тела. Неинвазивный, без лучевых и химических нагрузок, быстрый и комфортный для пациента биоимпедансный анализ состава тела (БИА) комплексно решает проблему одновременного получения количественных оценок всех компонентов состава тела.

Технология БИА позволяет рассчитывать массу жировой, мышечной и других компонент состава тела на основе значений электрического сопротивления тканей тела и антропометрических параметров. Дополнительно к оценке компонентов состава тела в технологии БИА рассчитываются значения коррелятов скорости обменных процессов организма человека — основного обмена,

удельного основного обмена и фазового угла. Эти параметры относятся уже к функциональным параметрам, но используются наряду с оценками компонент состава тела для решения многих медицинских задач, в частности оценки питания человека.

ТЕРМИНОЛОГИЯ БИОИМПЕДАНСНОГО АНАЛИЗА

В русскоязычной медицинской среде можно нередко встретить употребление ряда неточных терминов, относящихся к биоимпедансному анализу состава тела человека. Это объясняется как некачественным переводом, характерным для ряда руководств к иностранным приборам, так и образованием сленговых выражений пациентами, фрагментарно запомнившими выражения со слов врача.

Терминология биоимпедансного анализа состава тела человека в англоязычных публикациях давно устоялась. Попытки введения терминологического единообразия в отечественной литературе предпринимались [1, 2], но особого успеха не имели ввиду разобщённости авторов и общей немногочисленности публикаций на тот момент. В таблице приведены русскоязычные и англоязычные термины биоимпедансного анализа состава тела человека с соответствующими сокращениями.

Таблица. Русскоязычные и англоязычные термины и их сокращения, используемые в биоимпедансном анализе состава тела человека

Table. Russian and English-language terms and their abbreviations used in bioimpedance analysis of human body composition

Английское написание термина	Русскоязычный аналог	Некорректные синонимы
Bioelectric impedance analysis (BIA)	Биоимпедансный анализ состава тела человека (БИА)	Биоимпедансометрия
Body composition (BC)	Состав тела	Композитный (композиционный) состав тела
Total body water (TBW)	Общая вода организма (ОВО) Общая жидкость организма	
Extracellular fluids (EF) Extracellular water (EW)	Внеклеточная жидкость (ВКЖ) Внеклеточная вода	
Intracellular fluid (ICF) Intracellular water (ICW)	Клеточная (внутриклеточная) жидкость (КЖ) Клеточная (внутриклеточная) вода	
Fat mass (FM)	Жировая масса тела (ЖМТ) Жировая масса (ЖМ)	
Fat-free mass (FFM), lean body mass (LBM)	Безжировая масса тела (БМТ) Тощая масса (ТМ) Безжировая масса	
Active cell mass (ACM)	Активная клеточная масса тела (АКМ)	
Skeletal muscle mass (SMM)	Скелетно-мышечная масса тела (СММ)	Мышечная масса
Basal metabolic rate (BMR)	Основной обмен (ОО)	
Specific basal metabolic rate (SBMR)	Удельный основной обмен (УОО)	

Таблица. Окончание**Table.** Ending

Английское написание термина	Русскоязычный аналог	Некорректные синонимы
Visceral fat mass	Масса висцерального жира (ВЖ) Висцеральный жир	
Mineral mass	Минеральная масса тела (ММ) Минеральная масса	
Bone mineral content (BMC)	Минеральная часть костной массы (МЧКМ) Костный минеральный компонент	
Polisegmental impedance analysis	Полисегментный биоимпедансный анализ (ПБИА)	
Single-frequency bioimpedance analysis (SFBIА)	Одночастотный биоимпедансный анализ (ОБИА)	
Multi-frequency bioimpedance analysis (MFBIA)	Многочастотный биоимпедансный анализ (МБИА)	
Bioelectric impedance spectrometry (BIS)	Биоимпедансная спектрометрия (БИС)	
Resistance (R)	Активное сопротивление (R)	
Reactance (Xc)	Реактивное сопротивление (Xc)	
Impedance (Z)	Импеданс, биоимпеданс (Z)	
Phase angle (PA)	Фазовый угол (ФУ, φ)	

Относительные величины выражаются в процентах, и в этом случае их иногда называют долями (например, доля жировой массы), или индексах, выраженных в отношении к значению роста в квадрате (например, индекс безжировой массы тела: [безжировая масса тела, кг]/[рост, м]²). Обозначение процентных (долевых) значений формируется добавлением знака процента до соответствующей аббревиатуры параметра: %ЖМТ — доля жировой массы тела. Обозначение индексов формируется добавлением буквы «и» перед соответствующей аббревиатурой параметра: иЖМТ — индекс жировой массы тела, иБЖМ — индекс безжировой массы тела, и т.д.

Биоимпедансными технологиями в медицине принято называть импедансную кардиографию (реографию), биоимпедансный анализ состава тела, импедансную томографию и биоимпедансную спектрометрию. Все они приобрели свой современный вид и стали востребованы в медицинской практике во второй половине XX века. Возникли биоимпедансные технологии в результате синтеза биоимпедансометрии (технология измерений электрического сопротивления биологических объектов) и соответствующих направлений медицинской диагностики — кардиографии, методов расчёта состава тела, томографии, спектрометрических методов (рис. 1). Именно поэтому термин «биоимпедансометрия» не равнозначен термину «биоимпедансный анализ состава тела человека»: биоимпедансометрия является лишь техническим приёмом получения части информации наряду с антропометрическими методами (измерение массы и длины тела) и специфическими расчётами состава тела человека. В настоящее время в русскоязычных публикациях, сайтах частных клиник и на непрофессиональных ресурсах сети Интернет термин

«биоимпедансометрия» используется в значении «биоимпедансный анализ состава тела» в половине случаев: по данным Google Scholar, за 2000–2020 гг. опубликовано 1770 статей с ключевыми словами «биоимпедансометрия» и «состав тела», для сравнения, за тот же период опубликовано 2570 статей с ключевыми словами «биоимпедансный анализ» и «состав тела», причём 783 из них содержат также и слова «биоимпедансометрия». Это во многом объясняется существованием с 2010 года по настоящее время в Википедии статьи, посвящённой БИА, содержащей эту и некоторые другие ошибки.

Другой класс ошибок возникает из-за непонимания взаимосвязи различных параметров и терминов биоимпедансного анализа. На рис. 2 показано применение (схема соподчинённости) терминов «компоненты состава тела», «параметры состава тела», «параметры биоимпедансного анализа состава тела» и «биоимпедансные параметры».

Фазовый угол включён как в первичные биоимпедансные параметры, так и в корреляты скорости обменных процессов. В первом случае его чаще обозначают, как принято в электротехнике, греческой буквой «φ», а во втором — сокращением ФУ.

Аналогично можно говорить о соподчинённости *параметров гидратации* тела человека: есть ряд абсолютных параметров — общая вода организма (ОВО), внутриклеточная жидкость (КЖ), внеклеточная жидкость (ВКЖ), и есть их процентные доли в других компонентах состава тела или частях тела, есть их индексы, образованные нормировкой на квадрат роста.

Биоимпедансные параметры принято делить на абсолютные значения (активное электрическое сопротивление R; реактивное электрическое сопротивление Xc;

электрический импеданс Z ; фазовый угол φ), их изменения (ΔR ; ΔX_c ; ΔZ ; $\Delta \varphi$) и относительные значения изменений ($\Delta R/R$; $\Delta X_c/X_c$; $\Delta Z/Z$; $\Delta \varphi/\varphi$).

Терминология биоимпедансного анализа имеет глубокие исторические корни. Большинство учёных, заложивших основу биоимпедансного анализа состава тела, были физиками, биофизиками и инженерами. Первые данные по изучению электрической проводимости тканей

человека и животных были получены достаточно давно, в работах по электротехнике и биофизике. Отдельные научные достижения и этапы предварительных исследований, образовавшие фундамент этих технологий, можно проследить с конца XIX века.

Впервые об исследовании электрической проводимости биологических объектов упоминается в работах В. Томсона (William Thomson) 1880 г. В XX в. этим вопросам

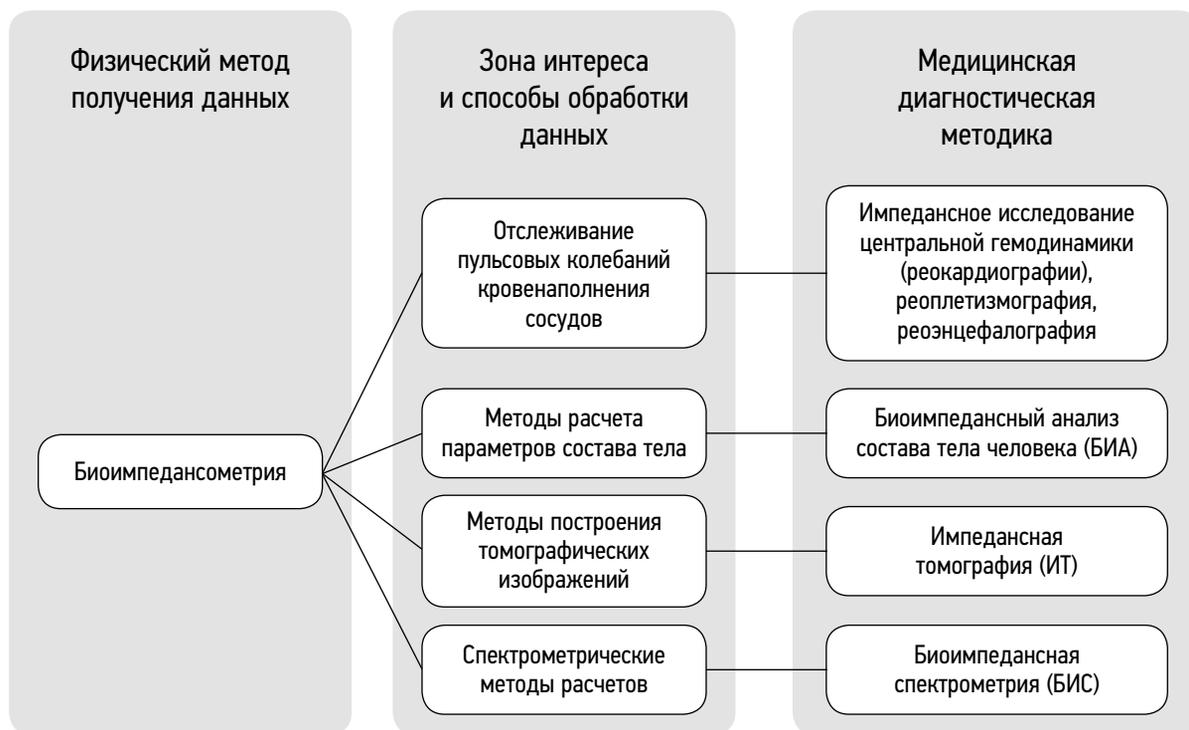


Рис. 1. Схема образования названий основных биоимпедансных технологий.

Fig. 1. Formation scheme of the names of the main bioimpedance technologies.

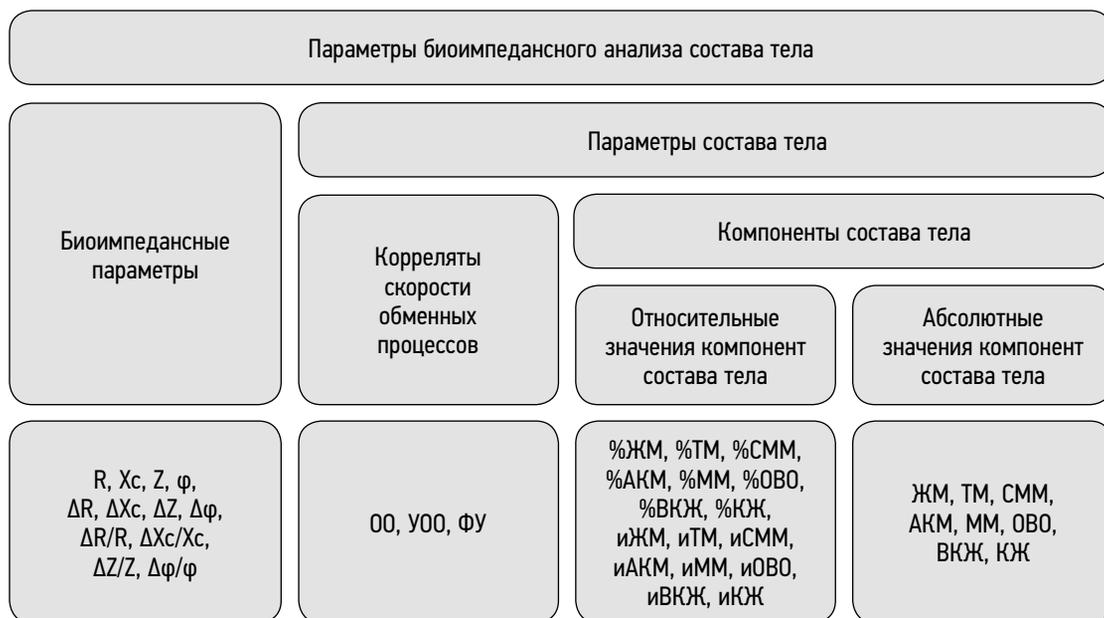


Рис. 2. Схема соподчинённости терминов, используемых в биоимпедансном анализе состава тела.

Fig. 2. Scheme of hierarchy of terms used in bioimpedance analysis of body composition.

было посвящено большое число работ: как методических, описывающих технику измерений электроимпедансных свойств биологических объектов, биофизических — раскрывающих особенности механизмов электропроводности конкретных биологических тканей, так и медицинских, связывающих электроимпедансные свойства тканей с физиологическими и патофизиологическими процессами в организме.

В 1925 г. были опубликованы исследования Г. Фрике (H. Frike) и С. Морзе (S. Morse) о диэлектрических свойствах клеточных суспензий; разработана модель электрической проводимости клетки. В 1935–1938 гг. опубликованы работы А. Барнетта (A. Barnett) и С. Вагно (S. Vagno), посвящённые измерению фазового угла биологических объектов, из которых видно, что авторы владели не только биполярным, но и три- и тетраполярным методом измерения, получали частотные зависимости фазового угла.

В СССР в середине 30-х годов Б.Н. Тарусовым был разработан и выпускался малой серией, а в 1939 г. запатентован прибор СТ-1, при помощи которого определяли коэффициент поляризации живых тканей (коэффициентом поляризации называли отношение электрических сопротивлений на частотах 10 и 1000 кГц). Значения коэффициента поляризации использовались для прогнозирования приживаемости трансплантатов, в частности роговицы глаза.

В начале 1940-х годов были опубликованы работы К. Коула (K.S. Cole) и Р. Коула (R.H. Cole) с описанием частотной зависимости импеданса биологического объекта и уравнения этой зависимости. Большая серия работ по частотным зависимостям биоимпедансных свойств биологических тканей была опубликована в 1950–1970 гг. Х. Шваном (H.P. Schwan). В его исследованиях впервые описано разделение частотной дисперсии биологических тканей на три диапазона — альфа (в низкочастотном диапазоне), бета (в радиочастотном диапазоне) и гамма (в микроволновом диапазоне).

Существенным этапом в разработке технологий биоимпедансных измерений был переход от биполярных (когда к двум электродам присоединяются и задающая ток в объекте, и измеряющая падение напряжения цепь) к тетраполярным (когда обе цепи оканчиваются отдельной парой электродов) методам измерения [3]. Тетраполярный метод измерений позволяет вычленивать и убрать из измеренного сопротивления сопротивление кожи, что в 2–2,5 раза повышает чувствительность измерений и позволяет обойти ряд сигналов, поступающих с контакта электрод–кожа, которые во многих конкретных случаях малоинформативны.

Пионерскими в области БИА стали работы А. Томасета (A. Thomasset), опубликованные в 1962–1963 гг.: в них содержался расчёт объёмов общей и внеклеточной жидкости организма человека на основании измеренных значений импедансов между кистью и диагонально расположенной стопой на частотах 5 и 1000 кГц [3, 4].

Дальнейшие шаги по разработке биоимпедансной технологии исследования состава тела человека и верификации биоимпедансных оценок состава тела привели к созданию серийных биоимпедансных анализаторов состава тела. Первый биоимпедансный анализатор BIA-101 был выпущен в 1979 г. американской фирмой RJL-Systems: это был одночастотный (50 кГц) измеритель активного и реактивного сопротивления с индикацией этих данных на передней панели. Расчёт параметров состава тела производился вручную по формулам и таблицам. Большинство современных биоимпедансных анализаторов состава тела проводят измерение сопротивлений на двух или более частотах и с помощью соответствующего программного обеспечения, встроенного в прибор или запускаемого на персональном компьютере, самостоятельно рассчитывают значения параметров состава тела. Такие приборы, как правило, сопровождают результаты измерений и расчётов указанием диапазонов нормальных значений, что существенно облегчает работу врача.

ЗАДАЧИ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ И СПОСОБЫ ИХ РЕШЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ БИОИМПЕДАНСНОГО АНАЛИЗА

Более чем за 40 лет с начала использования в медицине биоимпедансных анализаторов состава тела сформировались основные области применения этой технологии и наметились перспективные направления её дальнейшего развития. Информация о составе тела и интенсивности обменных процессов находит применение на всех этапах медицинской практики:

- в диагностике и оценке рисков ряда заболеваний;
- оценке резервных возможностей организма, физического развития и уровня тренированности мышечной системы человека;
- профилактике заболеваний (может производиться оценка эффективности профилактических мероприятий);
- лечении (для оценки эффективности лечения заболеваний в целом, а также этапов лечения);
- на этапе реабилитации (оценка эффективности реабилитационных мероприятий);
- в паллиативном лечении (оценка эффективности паллиативного лечения).

Алгоритмы диагностики на основе БИА включают анализ от 15 до 30 расчётных параметров в зависимости от модели используемого анализатора. Рассмотрим несколько вариантов принятия диагностических заключений на основе БИА.

В простейшем случае анализа, например при диагностике ожирения, в оценке достаточности белкового питания и др., алгоритм принятия диагностических решений тривиальный — сравнение текущего значения одного параметра с его пороговым значением по соответствующим

шкалам (в данном случае — процента жировой массы и активной клеточной массы соответственно).

В отдельных случаях, например при оценке риска метаболического синдрома, анализируется совпадение превышений пороговых значений по двум шкалам — индексу талия–бёдра и проценту жировой массы.

На практике анализ состава тела производится путём изучения соотношений между всеми текущими значениями, а также между пороговыми значениями внутри отдельных шкал и между текущими значениями разных параметров состава тела. Во всех случаях принятие диагностических заключений предусматривает сопоставление данных биоимпедансного анализа состава тела с данными анамнеза, других диагностических исследований и известными на текущий момент физиологическими и патофизиологическими ситуациями.

Оценка статуса питания пациента

На сегодняшний день наиболее распространённое и развитое направление использования БИА — оценка статуса питания пациента. Обстоятельства, при которых возникает необходимость оценки питания, и клинические ситуации, при которых возникает такая задача, могут быть самые разнообразные.

Динамические исследования состава тела, входящие в диетологические и фитнес-программы по снижению веса и построению фигуры, составляют, по приблизительным оценкам, около 2/3 всех процедур исследования состава тела. Востребованность этих исследований основана на высокой распространённости избыточного веса и ожирения как у мужской, так и у женской части современных популяций развитых стран. Популяционные данные по распространённости ожирения и избыточного веса, полученные при обследовании практически здоровых граждан РФ в центрах здоровья в 2009–2012 гг., представлены на рис. 3 [5].

При воздействиях, направленных на снижение значений абсолютных (кг) и относительных (%) показателей жировой

массы, интервалы между исследованиями составляют, как правило, 3–5 недель. Эффективность лечения оценивается по скорости снижения жировой массы, сохранности белкового компонента массы тела (активной клеточной массы) и снижению объёма внеклеточной жидкости.

Нередко возникают ситуации, требующие избирательной регуляции белковой массы организма при отклонениях от нормы: например, при онкологических заболеваниях, восстановлении после неадекватной вегетарианской диеты, после длительного обездвиживания при травмах и хирургических вмешательствах, при нарушениях всасывания в тонком кишечнике, после обширных резекций сегментов кишечника, при лечении панкреатитов, последствий отравлений и пр.

Восстановление скелетно-мышечной и белковой массы представляет задачу, трудновыполнимую без контроля промежуточных результатов, поскольку основными в этом случае являются выбор способа лечения и подбор питания, наиболее эффективного для конкретного пациента в текущей клинической ситуации.

Оценка статуса питания пациента имеет значение для прогнозирования течения заболеваний, подбора способов лечения (в том числе хирургических, химиотерапевтических, лучевых) с точки зрения достаточности имеющихся ресурсов организма.

Оценка статуса гидратации организма

Выявление нарушений гидратации — одно из первых описанных в медицинских публикациях применений БИА. В современных методиках БИА принято рассматривать следующие виды оценок гидратации:

- интегральные, т.е. характерные для организма в целом, или локальные, например в голени [6], на участке слизистой оболочки десны [7];
- по интересующему жидкостному сектору (конечности, головы и т.д.) — внеклеточные, внутриклеточные, общие. Для объяснения задержки жидкости в организме известно множество обстоятельств, связанных

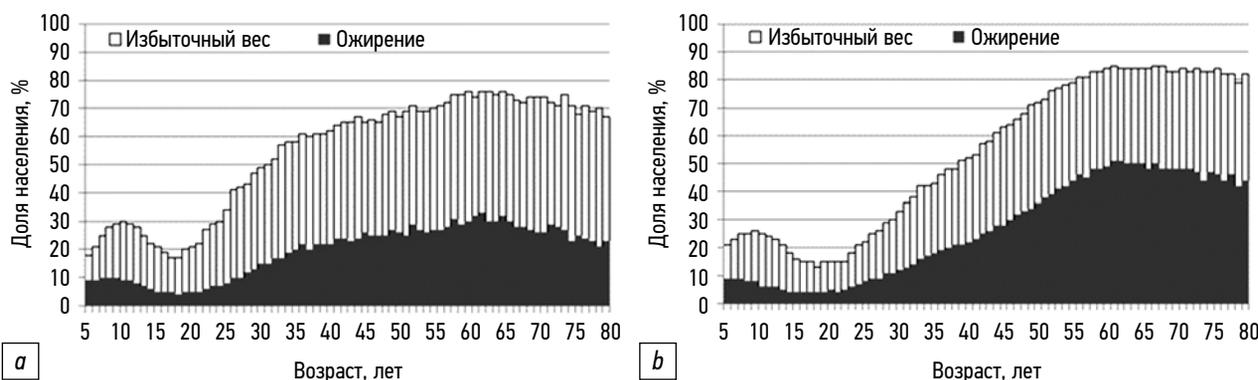


Рис. 3. Графики распространённости избыточного веса и ожирения у мужской (а) и женской (б) части популяции Российской Федерации. Данные 2010–2012 гг. Столбики со сплошной закраской соответствуют оценке процента обследованных граждан с ожирением, незакрашенные — с избыточным весом [5].

Fig. 3. The prevalence of overweight and obesity in the male (a) and female (b) parts of the Russian population. Data for 2010–2012. Bars with solid shading correspond to the estimate of the percentage of surveyed citizens with obesity, open ones — with overweight [5].

с заболеваниями, нестандартными внешними условиями (например, повышенная температура воздуха) или режимом питания (употребление в пищу продуктов, содержащих много поваренной соли). Для локальных отёков чаще всего причинами бывают аллергические реакции, травмы, а также воспалительные заболевания кожи, подкожных желёз и др.

В литературе значительное число работ посвящено нарушениям общей гидратации, и даже локальные измерения часто используют для получения оценок общей гидратации. Яркий пример — методики, предложенные для гемодиализа и кардиореанимации, основанные на измерениях сопротивления голени [6, 8].

Оценка гидратации организма с отдельным вычислением клеточной и внеклеточной жидкости становится неотъемлемой частью технологии гемодиализа. На основе этих оценок вычисляют сухой вес и объём предстоящей ультрафильтрации [9–12]. В расчётах объёма ультрафильтрации иногда используют алгоритмы расчётов, не учитывающие росто-весовые измерения, а основанные на характерном для данного пациента в условиях нормальной гидратации соотношении вне- и внутриклеточной или общей жидкости.

Оценка минеральной массы организма

Количественные оценки минерального компонента костной массы используются при диагностике остеопении и остеопороза, востребованы во многих прикладных медицинских технологиях, например при прогнозировании приживаемости имплантатов в стоматологии. Альтернативой технологии БИА в этом случае могут быть некоторые лучевые методы — рентгеновская денситометрия, компьютерная томография, т.е. существенно менее распространённые, более дорогие и имеющие ограничения из-за лучевой нагрузки.

В БИА возможность оценки минеральной массы появилась сравнительно недавно. В 2002–2003 гг. Z. Wang с соавт. [13–15] опубликовали шестикомпонентную модель состава тела, в которой одним из компонентов были минералы костных тканей. В 2012 г. B.R. Patil с соавт. [16] опубликовали формулу оценки минеральной массы костных тканей по данным БИА, разработанную по результатам биоимпедансных и денситометрических исследований в группе взрослых индийцев, а в 2019 г. L.W. Lee с соавт. [17] провели аналогичную работу в группе 6–12-летних детей. Сегодня многие современные анализаторы состава тела уже содержат формулы оценки минеральной массы. Следует помнить, что минеральная масса, как и остальные параметры состава тела, оценивается не напрямую, а по регрессионным формулам на основе значений сопротивлений роста и веса или уже рассчитанных значений других параметров состава тела. Костная ткань имеет меньшее значение проводимости, чем мышечная ткань, ткань внутренних органов и т.д., и вклад костной ткани в измеряемое

значение импеданса минимален. Таким образом, наиболее корректно количество минеральной массы, большая часть которой приходится на минеральную массу костных тканей, будет определяться у гармонично развитых людей. По-видимому, в дальнейшем потребуются разработка специализированных формул оценки для разных групп пациентов.

Оценка предстартовой готовности, физического развития и уровня тренированности мышечной системы спортсмена

Существенная часть всех эксплуатируемых биоимпедансных анализаторов состава тела используется в спортивной медицине и фитнесе: по некоторым оценкам, до 25%. Анализ состава тела спортсмена интересует тренеров и спортивных врачей как технология, позволяющая прогнозировать успешность его выступления на соревнованиях. Известен ряд работ по оценке состава тела выдающихся спортсменов, призёров Олимпийских игр 1964 г. в Токио, 1968 г. в Мехико [18]. В те годы основным методом расчёта параметров состава тела были антропометрические измерения.

Биоимпедансная технология оценки состава тела создала предпосылки для систематического обследования спортсменов на фоне тренировочного процесса с выявлением комплекса значимых для прогноза успешности выступлений параметров, выявлением интервалов типичных для конкретного спортсмена значений параметров состава тела. Авторы неоднократно писали о способе построения индивидуальных коридоров нормальных значений трёх основополагающих для оценки предстартовой готовности спортсмена параметров — фазового угла, доли скелетно-мышечной массы в тощей массе и доли жировой массы в общей массе [3–5].

Известно, что в фитнесе абсолютное большинство посетителей клубов на первое место по значимости ставят следующие цели: снижение жировой массы, наращивание мышечной массы, повышение скорости обменных процессов. За этими изменениями, подтверждающими эффективность тренировочного процесса, удобно наблюдать с помощью БИА: уже в первичном протоколе можно найти оценки жировой массы, скелетно-мышечной массы, фазового угла. Фазовый угол как коррелят скорости обменных процессов в современной спортивной медицине используется чаще, чем основной обмен [3].

Оценки асимметрии парных органов и конечностей

Использование полисегментных биоимпедансных технологий даёт возможность дополнительно к показателям состава всего тела на момент исследования (или к изменениям показателей состава в динамике) получить информацию о составе нескольких крупных регионов

тела — туловища, конечностей, в некоторых случаях — головы и шеи, абдоминальной и торакальной частей туловища, голеней, предплечий, пальцев [3, 4].

Описание различных применений полисегментных технологий встречается в медицинских публикациях значительно реже, чем интегральных, однако в настоящее время полисегментные технологии становятся всё более востребованными. Известны работы по оценке асимметрии тканей конечностей у профессиональных спортсменов, выполненные при полисегментных исследованиях [19]. Выявлено, что рабочая асимметрия конечностей формируется у теннисистов, копьеметателей и фехтовальщиков. Можно предположить, что существуют и другие виды спорта, вызывающие формирование асимметрии различных участков тела.

В травматологии (не только спортивной) асимметрия показателей гидратации конечностей формируется в результате ушибов, ранений, длительных и интенсивных пережатий, растяжений, переломов, вывихов, химических и термических воздействий, аллергических отёков и собственно хирургических вмешательств. Воспалительные процессы сопровождаются локальными и интегральными изменениями гидратации. Как правило, эти изменения оценивают по асимметрии распределения внеклеточной жидкости регионов. Удобно для этих целей использовать значения процентного выражения асимметрии: $[(Амах - Амин) / Амин] \times 100\%$, где А — текущее значения параметра состава тела исследуемого парного региона. Согласно мнениям спортивных врачей, спортсмена можно возвращать на тренировку в общую группу при значениях асимметрии по внеклеточной жидкости нижних конечностей, не превышающих 2–2,5%. Максимальное значение асимметрии верхних конечностей, которое авторы наблюдали при краш-синдроме, составляло 1100%: сопротивление одной руки составляло 300 Ом, а другой — 25 Ом.

Предпринимались попытки исследовать не только конечности, но и некоторые наружные и внутренние парные органы, например молочные железы и лёгкие. В настоящее время для исследований молочных желёз без лучевой нагрузки используют устройства электроимпедансной томографии: например, отечественный электроимпедансный маммограф МЭМ (Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН и ООО «Импедансные медицинские технологии»). Известны отечественные публикации по использованию электроимпедансного исследования структуры лёгких [20, 21].

Если не претендовать на структурные исследования вышеупомянутых органов, то в лёгких при помощи стандартных устройств БИА можно оценивать изменения гидратации в динамике, асимметрию их гидратации или сравнивать уровни гидратации верхней и нижней части лёгкого [21, 22].

Динамические исследования состава тела

Предметом пристального внимания лечащих врачей в настоящее время являются скорость и направленность изменений значений компонентов состава тела и биоимпедансных параметров как у здоровых лиц в популяции, так и при контроле эффективности лечения.

Средние скорости возрастных изменений для мужской и женской части популяции РФ можно оценить по графикам соответствующих параметров, приведённым в отечественных популяционных исследованиях [3, 5]. Ожидаемо, максимальные значения скоростей изменения параметров БИА можно найти у подростков обоего пола.

С медицинской точки зрения, наибольший интерес представляют немногочисленные данные достоверных оценок изменений состава тела на различных этапах заболеваний и в различные периоды лечебного процесса [3, 4]. Так, средней скоростью снижения жировой массы при использовании диетологических приёмов принято считать 0,5 кг/нед. В экстремальных случаях можно наблюдать и более высокие значения: например, 2,0–2,5 кг/нед. Весьма медленно изменяются также значения активной клеточной, скелетно-мышечной массы и минеральной части костной ткани.

Напротив, изменения жидкостных секторов, особенно снижение объёма внеклеточной жидкости, могут демонстрировать высокие скорости как в ходе заболеваний (холеры, диареи других этиологий), так и в контролируемых лечебных воздействиях (лаваж, применение диуретических средств в кардиологической практике и при отёке лёгких, забор плазмы в гемодиализе). Восполнение объёмов жидкостных секторов тоже происходит относительно быстро. Здесь можно наблюдать скорости порядка единиц литров в час [3].

Ещё более высокие скорости имеют перераспределения венозной крови между участками венозного русла в ходе физических нагрузок и изменений позы (ортостатических, постуральных). При весьма небольших объёмах, составляющих десятки миллилитров, эти изменения могут происходить за секунды [4, 23]. Часто численные оценки таких процессов выполняют на основе данных относительного изменения значений активного сопротивления или модуля импеданса соответствующего региона или группы мышц.

Динамические исследования локального кровенаполнения

В процессе жизнедеятельности человек за сутки многократно изменяет положение своего тела в пространстве (ортостатические воздействия), изменяет положение частей тела (постуральные воздействия), сжимает ткани тела о внешние предметы под действием силы тяжести, инерции и напряжения собственных мышц (прессорное воздействие), пережимает венозное русло без пережатия артериального (окклюзионное воздействие). Все перемещения в пространстве могут рассматриваться

как последовательность динамических и статических физических нагрузок. При всех упомянутых воздействиях, а также при различных воздействиях другой природы кровь частично перемещается из одних участков венозного русла в другие и возвращается в них. Эти процессы сопровождаются изменениями электрического сопротивления участков, задействованных в перераспределении венозной крови, поскольку происходят изменения площади поперечного сечения сосудистого русла. Следовательно, по изменениям сопротивления можно судить об объёмах перераспределений крови.

Измерить изменения электрического сопротивления участков тканей организма можно следующими способами: сразу в нескольких регионах — путём использования стандартных полисегментных схем наложения электродов; в одном регионе — при помощи интегрального режима анализатора. Для этого устанавливают две пары токовых и потенциальных электродов в непосредственной близости от изучаемого участка. Можно, установив между парами токовых и потенциальных электродов одиночные потенциальные электроды, разбить продольно измеряемый объект на несколько составляющих. Примером применения этого приёма может служить исследование изменений кровенаполнения сосудистых бассейнов головы и торакальной части туловища с одной стороны и ног во время вращения испытуемых на центрифуге короткого радиуса [23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отечественных публикациях, опирающихся на результаты биоимпедансных исследований, последние 30 лет наблюдается многообразие синонимично используемых терминов, некоторые из которых являются некорректными. Наиболее вероятными причинами этого явления можно считать разрозненность авторов и исследовательских групп, а также широкое распространение ошибочного употребления терминов в среде пациентов, врачей и их интернет-сообществах, некорректные переводы англоязычных терминов.

Настоятельно рекомендуется не использовать термины «биоимпедансометрия» в значении «биоимпедансный анализ состава тела» и «композитный (композиционный) состав тела» вместо «состав тела».

В настоящее время биоимпедансный анализ состава тела — динамически развивающаяся область

медицинских технологий, и новые применения возникают неожиданно в разных областях медицины. Отслеживание вновь появляющихся, развивающихся и переоткрываемых областей применения биоимпедансного анализа является самостоятельной и достаточно важной научной задачей.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении поисково-аналитической работы и публикации статьи.

Конфликт интересов. Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

Вклад авторов. Д.В. Николаев — разработка концепции статьи, сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи; С.П. Щелькалина — сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи, подготовка иллюстраций. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли равный вклад в разработку концепции и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам и редакционной коллегии журнала «Клиническое питание и метаболизм» за ценные комментарии и методическую помощь, которые позволили значительно улучшить качество научной статьи, а также Романовой Вере Сергеевне, научному сотруднику НТЦ «МЕДАСС» за помощь в поиске источников.

Funding source. This article was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. D.V. Nikolaev — development of the article concept, collection and analysis of literary sources, writing and editing the article; S.P. Shchelykalina — collection and analysis of literary sources, writing and editing the article, preparing illustrations. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Acknowledgments. The authors express their deep gratitude to the reviewers and the editorial board of the journal "Clinical nutrition and metabolism" for valuable comments and methodological assistance, which significantly improved the quality of the scientific article, and to Vera Sergeevna Romanova, a researcher at the Scientific Research Center "Medas" for help in finding sources.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов Г.Г., Мартиросов Э.Г., Николаев Д.В., и др. О терминологии биоимпедансного анализа // Диагностика и лечение нарушений регуляции сердечно-сосудистой системы: материалы 8-й научно-практической конференции, 22 марта 2006 г. Москва, 2006. С. 147–150.
2. Николаев Д.В., Смирнов А.В., Носков В.Б., и др. Биоимпедансный анализ: принципы, терминология, методические вопросы // Хирург. 2007. № 6. С. 18–25.
3. Николаев Д.В., Щелькалина С.П. Лекции по биоимпедансному анализу состава тела человека. Москва, 2016. 152 с.
4. Николаев Д.В., Смирнов А.В., Бобринская И.Г., Руднев С.Г. Биоимпедансный анализ состава тела человека. Москва: Наука, 2009. 392 с.
5. Руднев С.Г., Соболева Н.П., Стерликов С.А., и др. Биоимпедансное исследование состава тела населения России. Москва, 2014. 493 с.

6. Sakamoto K., Kanai H., Sakurai K. Estimation of the fluid distribution change during hemodialysis by the electrical admittance method // Proceedings of the XI international conference on electrical bio-impedance. Oslo, Norway, 2001. P. 377–380.
7. Moskovets O.N., Nikolaev D.V., Smirnov A.V. Evaluation of the periodontal tissue hydration level via bioimpedance spectrometry // 13th International Conference on Electrical Bioimpedance and the 8th Conference on Electrical Impedance Tomography 2007, ICEBI 2007. Graz, 2007. P. 142–145.
8. Shime N., Ashida H., Chihara E., et al. Bioelectrical impedance analysis for assessment of severity of illness in pediatric patients after heart surgery // *Critical Care Medicine*. 2002. Vol. 30, N 3. P. 518–520. doi: 10.1097/00003246-200203000-00004
9. Celik G., Kara I., Yilmaz M., Apiliogullari S. The relationship between bioimpedance analysis, haemodynamic parameters of haemodialysis, biochemical parameters and dry weight // *J Int Med Res*. 2011. Vol. 39, N 6. P. 2421–2428. doi: 10.1177/147323001103900643
10. Kim H., Choi G.H., Shim K.E., et al. Changes in bioimpedance analysis components before and after hemodialysis // *Kidney Res Clin Pract*. 2018. Vol. 37, N 4. P. 393–403. doi: 10.23876/j.krcp.18.0035
11. Park J.H., Jo Y.I., Lee J.H. Clinical usefulness of bioimpedance analysis for assessing volume status in patients receiving maintenance dialysis // *Korean J Intern Med*. 2018. Vol. 33, N 4. P. 660–669. doi: 10.3904/kjim.2018.197
12. Antlanger M., Josten P., Kammer M., et al. Blood volume-monitored regulation of ultrafiltration to decrease the dry weight in fluid-overloaded hemodialysis patients: a randomized controlled trial // *BMC Nephrol*. 2017. Vol. 18, N 1. P. 238. doi: 10.1186/s12882-017-0639-x
13. Wang Z., Pi-Sunyer F.X., Kotler D.P., et al. Multicomponent methods: evaluation of new and traditional soft tissue mineral models by in vivo neutron activation analysis // *Am J Clin Nutr*. 2002. Vol. 76, N 5. P. 968–974. doi: 10.1093/ajcn/76.5.968
14. Wang Z., Shen W., Kotler D.P., et al. Total body protein: a new cellular level mass and distribution prediction model // *Am J Clin Nutr*. 2003. Vol. 78, N 5. P. 979–984. doi: 10.1093/ajcn/78.5.979
15. Wang Z., St-Onge M.P., Lecumberri B., et al. Body cell mass: model development and validation at the cellular level of body composition // *Am J Physiol Endocrinol Metab*. 2004. Vol. 286, N 1. P. E123–128. doi: 10.1152/ajpendo.00227.2003
16. Patil B.R., Patkar D.P., Mandlik S.A., et al. Estimation of bone mineral content from bioelectrical impedance analysis in Indian adults aged 23–81 years: A comparison with dual energy X-ray absorptiometry // *International Journal of Biomedical Engineering and Technology*. 2012. Vol. 8, N 1. P. 99–114.
17. Lee L.W., Liao Y.S., Lu H.K., et al. Performance of bioelectrical impedance analysis in the estimation of bone mineral content in healthy children aged 6–12 years // *J Clin Densitom*. 2020. Vol. 23, N 3. P. 411–417. doi: 10.1016/j.jocd.2019.03.002
18. Николаев Д.В., Руднев С.Г. Состав тела и биоимпедансный анализ в спорте (обзор) // *Спортивная медицина: наука и практика*. 2012. № 3. С. 34–41.
19. Динь Т.М., Ткаченко С.А., Попов С.Н., и др. Проявления функциональной мышечной асимметрии у теннисистов и возможности ее оценки // *Лечебная физкультура и спортивная медицина*. 2012. № 5. С. 33–35.
20. Ерюкова Т.А., Николаев Д.В., Орквасов М.Ю., и др. Анализ гидратации легких биоимпедансным методом // *Материалы Пятого международного научного семинара «Фундаментальные исследования и инновации» и Всероссийского молодежного научного семинара «Наука и инновации-2010»: сборник трудов конференции / под ред. И.И. Попова, В.А. Козлова, В.В. Самарцева и др.* 2010. Т. 18. С. 266.
21. Орквасов М.Ю., Иванов Г.Г., Ян-Борисова Е.Ю., и др. Методика и программа мониторингового контроля гидратации легких // *Диагностика и лечение нарушений регуляции сердечно-сосудистой системы: материалы 13-й научно-практической конференции, 23 марта 2011 г. Москва, 2011. С. 195–201.*
22. Орквасов М.Ю. Биоимпедансная спектроскопия в диагностике тяжести нарушений водного баланса и контроль эффективности терапии у больных острой сердечной недостаточностью: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. Москва, 2013. 20 с.
23. Takhtobina Y.V., Shchelykalina S.P., Smirnov Y.I., et al. Monitoring of body fluid redistribution using segmental bioimpedance during rotation on a short-radius centrifuge // *Physiological Measurement*. 2020. Vol. 41, N 4. P. 044006. doi: 10.1088/1361-6579/ab840b

REFERENCES

1. Ivanov GG, Martirosov EG, Nikolaev DV, et al. On the terminology of bioimpedance analysis. In: *Diagnostics and treatment of disorders of the regulation of the cardiovascular system: materials of the 8th Scientific and Practical Conference, March 22, 2006. Moscow; 2006. P. 147–150. (In Russ).*
2. Nikolaev DV, Smirnov AV, Noskov VB, et al. Bioimpedance analysis: principles, terminology, methodological issues. *Khirurg*. 2007;(6):18–25. (In Russ).
3. Nikolaev DV, Shchelykalina SP. Lectures on bioimpedance analysis of human body composition. Moscow; 2016. 152 p. (In Russ).
4. Nikolaev DV, Smirnov AV, Bobrinskaya IG, Rudnev SG. Bioimpedance analysis of human body composition. Moscow: Nauka; 2009. 392 p. (In Russ).
5. Rudnev SG, Soboleva NP, Sterlikov SA, et al. Bioimpedance study of the body composition of the Russian population. Moscow; 2014. 493 p. (In Russ).
6. Sakamoto K, Kanai H, Sakurai K. Estimation of the fluid distribution change during hemodialysis by the electrical admittance method. In: *Proceedings of the XI international conference on electrical bio-impedance. Oslo, Norway; 2001. P. 377–380.*
7. Moskovets ON, Nikolaev DV, Smirnov AV. Evaluation of the periodontal tissue hydration level via bioimpedance spectrometry. In: *13th International Conference on Electrical Bioimpedance and the 8th Conference on Electrical Impedance Tomography 2007, ICEBI 2007. Graz; 2007. С. 142–145.*
8. Shime N, Ashida H, Chihara E, et al. Bioelectrical impedance analysis for assessment of severity of illness in pediatric patients after heart surgery. *Critical Care Medicine*. 2002;30(3):518–520. doi: 10.1097/00003246-200203000-00004
9. Celik G, Kara I, Yilmaz M, Apiliogullari S. The relationship between bioimpedance analysis, haemodynamic parameters of haemodialysis, biochemical parameters and dry weight. *J Int Med Res*. 2011;39(6):2421–2428. doi: 10.1177/147323001103900643
10. Kim H, Choi GH, Shim KE, et al. Changes in bioimpedance analysis components before and after hemodialysis. *Kidney Res Clin Pract*. 2018;37(4):393–403. doi: 10.23876/j.krcp.18.0035

11. Park JH, Jo YI, Lee JH. Clinical usefulness of bioimpedance analysis for assessing volume status in patients receiving maintenance dialysis. *Korean J Intern Med.* 2018;33(4):660–669. doi: 10.3904/kjim.2018.197
12. Antlanger M, Josten P, Kammer M, et al. Blood volume-monitored regulation of ultrafiltration to decrease the dry weight in fluid-overloaded hemodialysis patients: a randomized controlled trial. *BMC Nephrol.* 2017;18(1):238. doi: 10.1186/s12882-017-0639-x
13. Wang Z, Pi-Sunyer FX, Kotler DP, et al. Multicomponent methods: evaluation of new and traditional soft tissue mineral models by in vivo neutron activation analysis. *Am J Clin Nutr.* 2002;76(5):968–974. doi: 10.1093/ajcn/76.5.968
14. Wang Z, Shen W, Kotler DP, et al. Total body protein: a new cellular level mass and distribution prediction model. *Am J Clin Nutr.* 2003;78(5):979–984. doi: 10.1093/ajcn/78.5.979
15. Wang Z, St-Onge MP, Lecumberri B, et al. Body cell mass: model development and validation at the cellular level of body composition. *Am J Physiol Endocrinol Metab.* 2004;286(1):E123–128. doi: 10.1152/ajpendo.00227.2003
16. Patil BR, Patkar DP, Mandlik SA, et al. Estimation of bone mineral content from bioelectrical impedance analysis in Indian adults aged 23–81 years: A comparison with dual energy X-ray absorptiometry. *Int J Biomed Engineering Technol.* 2012;8(1):99–114.
17. Lee LW, Liao YS, Lu HK, et al. Performance of bioelectrical impedance analysis in the estimation of bone mineral content in healthy children aged 6–12 years. *J Clin Densitom.* 2020;23(3):411–417. doi: 10.1016/j.jocd.2019.03.002
18. Nikolaev DV, Rudnev SG. Body composition and bioimpedance analysis in sports (review). *Sports Medicine: Science and Practice.* 2012;(3):34–41. (In Russ).
19. Din TM, Tkachenko SA, Popov SN, et al. Manifestations of functional muscular asymmetry in tennis players and the possibility of its assessment. *Physical Therapy and Sports Medicine.* 2012;(5):33–35. (In Russ).
20. Yeryukova TA, Nikolaev DV, Orkvasov MYu, et al. Analysis of lung hydration by bioimpedance method. In: Materials of the Fifth International Scientific Seminar “Fundamental research and innovation” and the All-Russian Youth Scientific Seminar “Science and Innovation-2010”: proceedings of the conference. Ed. by I.I. Popov, V.A. Kozlov, V.V. Samartseva et al. 2010;18:266. (In Russ).
21. Orkvasov MYu, Ivanov GG, Yan-Borisova EYu, et al. Methodology and program of monitoring control of lung hydration. In: Diagnostics and treatment of disorders of regulation of the cardiovascular system: materials of the 13th Scientific and practical conference, 2011, March 23. Moscow; 2011. P. 195–201. (In Russ).
22. Orkvasov MYu. Bioimpedance spectroscopy in the diagnosis of the severity of water balance disorders and monitoring the effectiveness of therapy in patients with acute heart failure [dissertation abstract]. Moscow; 2013. 20 p. (In Russ).
23. Takhtobina YV, Shchelykalina SP, Smirnov YI, et al. Monitoring of body fluid redistribution using segmental bioimpedance during rotation on a short-radius centrifuge. *Physiological Measurement.* 2020;41(4):044006. doi: 10.1088/1361-6579/ab840b

ОБ АВТОРАХ

* **Щелькалина Светлана Павловна**, к.м.н.;
адрес: Россия, Москва, 117997, ул. Островитянова, д. 1;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3292-8949>;
eLibrary SPIN: 9804-0820; e-mail: svetlanath@gmail.com

Николаев Дмитрий Викторович;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1461-5896>;
eLibrary SPIN: 5322-6751; e-mail: dvn@medass.ru

AUTHORS' INFO

* **Svetlana P. Shchelykalina**, MD, Cand. Sci. (Med.);
address: 1, Ostrovityanova street, Moscow, 117997, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3292-8949>;
eLibrary SPIN: 9804-0820; e-mail: svetlanath@gmail.com

Dmitry V. Nikolaev;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1461-5896>;
eLibrary SPIN: 5322-6751; e-mail: dvn@medass.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author