

УДК 544.638:616-072

**BIOIMPEDANCE ANALYSIS OF THE HUMAN BODY: HISTORY,  
CLASSIFICATION , BIOPHYSICAL FUNDAMENTALS OF THE  
METHOD**

CHEREVACH Ya.F., BORYSENKO Yu.V.  
Kiev National University of Technologies & Design,  
*boria95@ukr.net*

This work deals with the history, benefits and biophysical basics of the bioimpedance analysis method for studying the composition of human body. It was shown that various tissues of the body have different conductivity values. This is associated with a different content of fluid and electrolytes in the tissues. The method is based on a high correlation between the values of the impedance magnitude and the total water content, fat and lean body mass. Dependence of the human body impedance values on the frequency of the current. The fields of medicine where the bioimpedance analysis is applicable were shown.

**БИОИМПЕДАНСНЫЙ АНАЛИЗ СОСТАВА ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА:  
ИСТОРИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ И БИОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
МЕТОДА**

ЧЕРЕВАЧ Я.Ф., БОРИСЕНКО Ю.В.  
*Киевский национальный университет технологий и дизайна*  
*boria95@ukr.net*

Рассмотрены история, преимущества и биофизические основы биоимпедансного метода анализа состава тела человека. Показано, что различные ткани тела имеют разные значения электропроводности. Это связано с различным содержанием жидкости и электролитов в тканях. Метод основан на высокой корреляции между величиной импеданса и величинами общего содержания воды, безжировой и жировой массы в организме. Приведена зависимость величины импеданса тела человека от частоты зондирующего тока. Указаны области медицины, где применяется биоимпедансный метод анализа.

Современный этап развития науки о составе тела характеризуется увеличением роли новых технологий и методов исследования *in vivo*. Наряду с традиционно используемыми для оценки состава тела методами антропометрии, калиперометрии и подводного взвешивания, получили развитие биофизические методы, самым распространённым из которых является биоимпедансный анализ (БИА) – оперативный, неинвазивный и надёжный метод, используемый в клинических, амбулаторных и домашних условиях [1]. БИА широко применяется в медицине качестве диагностического метода и для мониторинга, позволяющего получить оперативную информацию о состоянии пациента, что важно для правильного выбора и корректировки лечения.

### История

Начало применения биоимпедансного анализа для изучения состава тела человека связывают с работами французского анестезиолога А.Томассета, выполненными в начале 1960-х годов [2]. Метод основан на измерении импеданса всего тела или отдельных сегментов тела ( $Z$ ) с использованием специальных приборов – биоимпедансных анализаторов. Величина импеданса имеет две компоненты – активное ( $R$ ) и реактивное сопротивление ( $X_c$ ), которые связаны следующим соотношением:

$$Z^2 = R^2 + X_c^2$$

Субстратом активного сопротивления  $R$  в биологическом объекте являются жидкости (как вне-, так и внутриклеточные), обладающие ионным механизмом проводимости. Субстратом реактивного сопротивления  $X_c$  (диэлектрический компонент импеданса) являются клеточные мембраны.

По величине активного сопротивления рассчитывается общее содержание воды в организме (ОВО), высокая удельная проводимость которой обусловлена наличием в ней электролитов. Электрическое сопротивление жировой ткани примерно в 20 раз выше, чем основной массы тканей, составляющих безжировую массу тела (БМТ). Так как гидратация безжировой массы составляет в норме около 73% (Heymsfield et al., 2005, [3]), то безжировая масса может быть оценена как

$$\text{БМТ} = \text{ОВО} / 0,73.$$

Hoffer и соавт. (1969, [4]) показали наличие высокой корреляции между величиной импеданса и величинами ОВО, БМТ и жировой массы тела (ЖМТ), и построили регрессионные

зависимости, связывающие эти величины с параметрами импеданса. Houtkooper и соавт. (1996) [5] систематизировали опубликованные к тому времени 55 формул для оценки показателей состава тела биоимпедансным методом: 18 для расчета ОВО, 29 для БМТ, 8 для %ЖМТ. В указанной работе сообщалось, что точность приведенных оценок составляет 0,9-1,8 кг для ОВО и 2,5-3,5% для ЖМТ.

По величине реактивной составляющей импеданса рассчитываются величины основного обмена (ОО) и активной клеточной массы (АКМ) – массы мышц и внутренних органов.

### Классификация

Имеется несколько разновидностей биоимпедансного анализа, которые классифицируют по следующим признакам: по частоте зондирования (одно-, двух-, многочастотные), по участкам измерений (локальные, региональные, интегральные, полисегментные), по тактике измерений (однократные, эпизодические, мониторинговые). Наиболее часто используемая (90% всех измерений в мировой практике) и полноверифицированная разновидность биоимпедансного анализа – одночастотные интегральные эпизодические измерения с расположением электродов на щиколотке и запястье с зондирующим током на частоте 50кГц [1].

### Биофизические основы метода

Биоимпедансный анализ состава тела основывается на различиях электропроводности составляющих его тканей ввиду различного содержания в них жидкости и электролитов (см. таблицу).

*Таблица. Типичные значения удельного электрического сопротивления биологических тканей (1980) [6]*

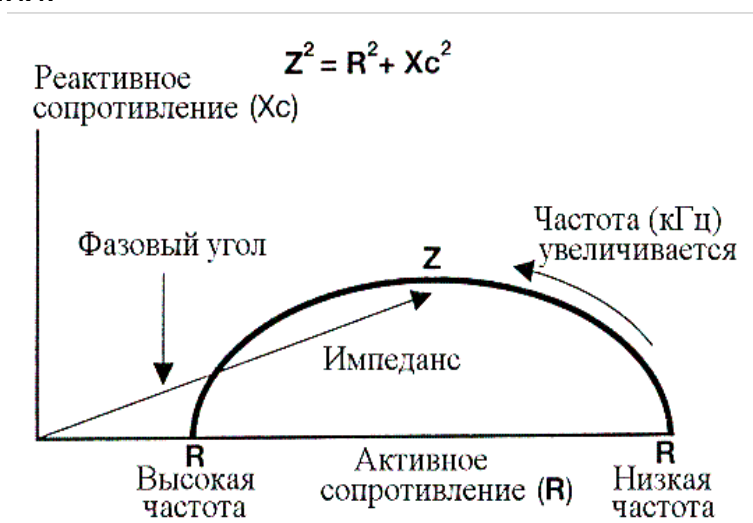
Биологическая ткань	Удельное сопротивление, Ом × м
Кровь	1,5
Спинномозговая жидкость	0,65
Нервно-мышечная ткань	1,6
Легкие без воздуха	2,0
Скелетные мышцы	3,0
Печень	4,0
Кожа	5,5
Легкие при выдохе	7,0

Использование биоимпедансного анализа для оценки состава тела основано на устойчивом соотношении между содержанием воды в организме и безжировой массой тела (1969, [4]). Результаты биоимпедансного анализа зависят от некоторого набора допущений относительно электрических свойств тела, его состава, гидратации, и плотности, а также возраста, пола, расовой принадлежности и физического состояния обследуемого (1988, [7]). Термин «биоэлектрический импеданс» стал общепринятым в зарубежных публикациях второй половины 20 века для характеристики электрических свойств биологических объектов, имеющих клеточную структуру. Импеданс измеряется при пропускании через биологический объект переменного тока в соответствии с законом Ома:

$$Z = U / I,$$

где  $U$  – разность потенциалов, а  $I$  – сила тока.

Первая электрическая модель клетки была предложена Фрике (1924), который описал и объяснил зависимость импеданса от частоты тока (см. рисунок). В области низких частот импеданс практически совпадает с величиной активного сопротивления, а реактивное сопротивление близко к нулю. При увеличении частоты тока реактивное сопротивление возрастает до определенного максимума, соответствующего характеристической частоте  $f_c$ . При дальнейшем увеличении частоты реактивное сопротивление уменьшается, и в пределе импеданс будет снова равен активному сопротивлению. На рисунке видно, что при изменении частоты тока меняется угол между векторами импеданса и активного сопротивления.



**Рис.** Зависимость величины импеданса от частоты зондирующего тока (2005, [3])

Он имеет название фазового угла, и определяется как арктангенс отношения реактивного и активного сопротивлений:

$$\varphi = \arctg (X_c/R).$$

Для практического применения биоимпедансного метода к задачам оценки состава тела существенной является взаимосвязь геометрической формы исследуемого объекта и величины импеданса биологического объекта: величина импеданса пропорциональна длине измеряемого участка тканей и обратно пропорциональна площади его поперечного сечения.

Для однородного изотропного проводника постоянного сечения, поперечные размеры которого много меньше его длины, справедливы следующие соотношения:

$$V = L \times S, \quad R = \rho \times L / S,$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление,  $L$  – длина,  $S$  – площадь поперечного сечения, а  $V$  – объем проводника.

Если выразить  $S$  из второго соотношения и подставить в первое, то:

$$V = \rho L^2/R.$$

В биоимпедансных анализаторах используется зондирующий ток очень низкой, безопасной амплитуды, что обеспечивает возможность не ограничивать количество и длительность измерений.

Реактивное сопротивление и фазовый угол также характеризуют свойства биологических тканей (1988, [7]). Исследования показали взаимосвязь  $X_c$  и фазового угла с параметрами физиологического состояния и режима питания пациентов. Удельное сопротивление в выражении  $\rho L^2/R$  принято постоянным для тела в целом; однако, каждая ткань имеет свое удельное сопротивление, и наблюдаемое удельное сопротивление – это среднее удельное сопротивление всех проводящих тканей.

Опубликованы результаты верификации методов биоимпедансного анализа оценки жировой и безжировой массы тела с результатами подводного взвешивания, для костной массы – рентгеновской денситометрии, для общей, вне- и внутриклеточной жидкости организма – методами разведения индикаторов, а для определения основного обмена – с методом Фика, в том числе для различных возрастных и нозологических групп [1].

Один из вариантов методики одночастотного БИА заключается в следующем: биоадгезивные электроды устанавливаются: на руке – середина первого электрода крепится над сочленением костей предплечья и кисти, а другой располагается на 3-4 см дистальнее;

на ноге – один серединой над сочленением костей голени и стопы, другой дистальнее на 3-5 см. Зажимы электродного кабеля крепятся к свободным от проводящего геля концам электродов, красные – к дистальным, черные – к проксимальным электродам. Дистальные электроды служат для подключения к пациенту цепи пропускания зондирующего тока, проксимальные – для подключения измерительной цепи анализатора. Измерение выполняется в течение 20-40 с и считается завершенным, если в последние 4-5 с значения величин активного и реактивного сопротивлений менялись не более чем на 2 единицы последней значащей цифры [1].

Выходные протоколы методики содержат оценки следующих параметров: основного обмена (ОО), индекса массы тела (ИМТ), жировой массы тела (ЖМТ), безжировой массы тела (БМТ), активной клеточной массы (массы мышц и внутренних органов) (АКМ), процентного содержания активной клеточной массы в безжировой массе (%АКМ), объема воды в организме (ОВО), индекса талия-бедра (ИТБ), а также процентного содержания жира в организме (%ЖМТ).

### **Применение**

Биоимпедансометрия, как быстрый, неинвазивный и безопасный диагностический метод, имеет широкие клинические приложения. Он применяется для оценки ожирения и избыточной массы тела, в медицине критических состояний, для планирования трансфузионной терапии для больных с большими кровопотерями, для оценки гидратации организма у хирургических больных и при отеке мозга, в диагностике и лечении сердечно-сосудистых и желудочно-кишечных заболеваний, при отравлениях с нарушением водного баланса организма, для оценки состояния органов для трансплантации, в урологии, стоматологии, в спортивной медицине.

### **Выводы**

К середине 90-х годов 20 века методы и аппаратура биоимпедансного анализа состава тела по частоте применения в клинической практике превзошли все известные технологии оценки состава тела. Анализ состава тела стал производиться не по антропометрическим индексам, а на основе аппаратных методов, использующих биофизические свойства различных тканей организма. Биоимпедансный анализ состава тела является быстрым, неинвазивным, безопасным и имеет широкие клинические приложения.

## Литература

- [1] Николаев Д.В. Биоимпедансный анализ состава тела человека / Д.В. Николаев, А.В. Смирнов, И.Г. Бобринская, С.Г. Руднев. – М.: Наука, 2009 - 392 с.
- [2] Thomasset A. Bio-electrical properties of tissue impedance measurements // Lyon Med. 1962. V. 207. P. 107–118.
- [3] Heymsfield S.B., Lohman T.G., Wang Z., Going S.B. (eds.) Human body composition (2nd ed.). Champaign, IL: Human Kinetics, 2005. 533 p.
- [4] Hoffer E.C., Meador C.K., Simpson D.C. Correlation of whole-body impedance with total body water volume // J. Appl. Physiol. 1969. V. 26. P. 531–534.
- [5] Houtkooper L.B. Assessment of body composition in youths and relationship to sport // Int. J. Sport Nutr. 1996. V. 6, № 2. P. 146–164.
- [6] Шван Х.П., Фостер К.Р. Воздействие высокочастотных полей на биологические системы: Электрические свойства и биофизи-ческие механизмы // ТИИЭР. 1980. Т. 68, № 1. С. 121–132.
- [7] Baumgartner R.N., Chumlea W.C., Roche A.F. Bioelectric impedance phase angle and body composition // Am. J. Clin. Nutr. 1988. V. 48, № 1. P.16–23.