

## СТАТЬЯ

УДК 577.31

**БИОИМПЕДАНСНЫЙ АНАЛИЗ РЕАКЦИИ ОРГАНИЗМА  
НА УМЕРЕННОЕ ГИПОКСИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ****Шушков С.В.***Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,  
Минск, e-mail: shushkov\_s\_v@mail.ru*

Дыхание при пониженной концентрации кислорода сопровождается активной адаптацией организма к гипоксии. Разнообразие протекающих при этом физиологических процессов требует получения возможно большего количества информации. Для контроля состояния предлагается использовать биоимпедансный анализ, позволяющий измерить с высокой точностью угол сдвига фазы между зондирующими сигналами тока и напряжения. Результат позволяет оценить состояние клеточных мембран, в частности концентрацию ионов. Целью исследования было изучение процесса адаптации к гипоксии во времени. В разработанной установке биоимпедансные измерения проводились по трехточечной схеме, когда на стопу правой ноги накладываются пара электродов, включенных в цепь генератора и в измерительный контур, и на запястье правой руки устанавливается электрод, подключенный одновременно к обоим контурам. Наблюдения в течение двух лет для относительно здорового человека показали сезонные колебания значений фазового угла. Можно полагать, что данный эффект определяется уровнем физической активности человека и питания. В ходе исследований гипоксического воздействия применялась палатка с воздухом при пониженной концентрации кислорода. После проведения гипоксических процедур обнаружено появление колебаний в организме для величины фазового угла, наблюдаемое на протяжении нескольких дней. После часовой процедуры при сниженной до 18% концентрации кислорода амплитуда колебаний могла превышать исходный уровень в полтора раза. После сна в палатке в течение 6 ч происходили колебания фазового угла с двукратным нарастанием по амплитуде. Обнаруженный эффект возникновения колебаний в организме как термодинамически неравновесной системе демонстрирует, что адаптация к гипоксии сопровождается формированием новых биоструктур, поддерживая процесс самоорганизации в лечебно-оздоровительном направлении.

**Ключевые слова:** умеренное потребление кислорода, адаптация к гипоксии, гипоксическая палатка, биоимпедансный анализ, колебания величины фазового угла

**BIOIMPEDANCE ANALYSIS OF THE BODY'S REACTION  
FOR MODERATE HYPOXIC EFFECTS****Shushkov S.V.***Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus,  
Minsk, e-mail: shushkov\_s\_v@mail.ru*

Breathing at a low concentration of oxygen is accompanied by an active adaptation of the body to hypoxia. The variety of physiological processes involved requires obtaining as much information as possible. To monitor the condition, it is proposed to use bioimpedance analysis, which makes it possible to measure with high accuracy the phase shift angle between current and voltage probing signals. The result makes it possible to assess the state of cell membranes, in particular, the concentration of ions. The aim of the study was to study the process of adaptation to hypoxia over time. In the developed installation, bioimpedance measurements were carried out according to a 3-point scheme, when a pair of electrodes connected to the generator circuit and measuring circuit are applied to the foot of the right foot, and an electrode connected to both circuits is installed on the wrist of the right hand. Observations over two years for a relatively healthy person showed seasonal fluctuations in the values of the phase angle. It can be assumed that this effect is determined by a person's level of physical activity and nutrition. In the course of studies of hypoxic effects, a tent with air at a reduced concentration of oxygen was used. After carrying out hypoxic procedures, the appearance of fluctuations in the body for the magnitude of the phase angle was observed for several days. After an hour-long procedure, with the oxygen concentration reduced to 18%, the oscillation amplitude could exceed the initial level by one and a half times. After sleeping in the tent for 6 hours, the phase angle fluctuated with a twofold increase in amplitude. The discovered effect of fluctuations in the body as a thermodynamically non-equilibrium system demonstrates that adaptation to hypoxia is accompanied by the formation of new biostructures, supporting the process of self-organization in the therapeutic and health-improving direction.

**Keywords:** moderate oxygen consumption, adaptation to hypoxia, hypoxic tent, bioimpedance analysis, fluctuations in the magnitude of the phase angle

**Введение**

Среди методов, сопровождающих лечение по медицинскому протоколу и в целом способствующих оздоровлению, положительно зарекомендовало себя дыхание воздухом с пониженной концентрацией кислорода ввиду активной физиологической

адаптации организма к гипоксии [1]. Умеренное гипоксическое воздействие обладает значительным восстановительным потенциалом для организма человека, способствующим здоровью и продолжительности жизни [2]. В лечебной и санаторной практике активно применяются в различных вари-

антах установки для дыхательной терапии «Био-Нова», Reoxu и др. Гипоксическое воздействие осуществляется, как правило, путем дыхания в маске. Широко применяемая процедура «интервальная нормобарическая гипокситерапия» проводится, например, циклами по 5 мин, чередуя пониженное до 9% содержание кислорода и обычный воздух (21% O<sub>2</sub>) [3]. Для улучшения спортивных результатов применяют физические упражнения и сон в дыхательной атмосфере «горный воздух», создаваемой в «гипоксической» палатке путем снижения концентрации кислорода [4]. Для целей общего оздоровления также применяются различные дыхательные тренажеры типа «Самоздрав», «ГУИ», а также безаппаратные методики К.П. Бутейко, А.Н. Стрельниковой и пр. [5].

Среди прочих методов оценки состояния организма информативным в биофизическом аспекте является биоимпедансный анализ (БИА) [6, 7]. В этом случае на тело человека накладываются несколько электродов, например, по паре на руку и на ногу, подается зондирующий сигнал синусоидальной формы повышенной частоты (как правило, 50 кГц) напряжением несколько вольт, и измеряются характеристики проводимости биологических тканей, активное сопротивление R и угол сдвига фазы  $\varphi$  одного сигнала относительно другого. Из соотношения  $\operatorname{tg} \varphi = 1/(\omega CR)$ , где  $\omega$  – частота сигнала, можно оценить электрическую емкость биологического объекта C, которая отражает эволюцию заряда на клеточных мембранах. Так, уменьшение  $\varphi$  соответствует росту электрической емкости C, увеличению числа заряженных частиц и большей эквивалентной площади, занимаемой ими. В обратном процессе стекание зарядов приводит, как правило, к увеличению проводимости крови и лимфы и может контролироваться по снижению величины сопротивления R.

В настоящее время для проведения БИА применяются аппараты «Медасс», «Велнесс» (РФ), различные зарубежные [8]. В случае медицинских исследований, имеющих особенности, применяют приборы специализированной разработки, например с установкой электродов в локализованной зоне и при генерации зондирующего сигнала на нескольких частотах [9]. Нужно отметить, что единовременное биоимпедансное измерение чувствительно к режиму предшествующего сна, приема пищи, физической нагрузки и других факторов, поэтому процедуру измерения стараются проводить в одинаковых условиях, например утром натощак.

Практика применения «Медасс» показывает, что фазовый сдвиг 4,40 соответствует ослабленному организму, в том числе

при устойчивой гиподинамией, 5,50 характерно для нормального состояния организма, 7,80 отвечает физически развитому здоровому человеку. Низкие значения фазового угла наблюдаются у больных онкологическими заболеваниями, при гепатитах, СПИДе и многих прочих долговременных проблемах и ассоциированы с осложнениями в «период дожития» [10, с. 12]. Из статистики анализов «Велнесс» следует, что большее значение фазового угла свидетельствует о хорошем состоянии мембран клеток и высокой активности мышц. С возрастом, при недостатке питательных веществ или хронических болезнях, величина этого параметра снижается. Коридор нормы соответствует 5,50–8,0. Значительное снижение бывает при обширном распаде тканей, например при циррозе печени или туберкулезе. У больных людей, особенно с хроническими заболеваниями, чем ниже значения, тем хуже прогноз лечения [11, с. 26].

Разнообразие физиологических процессов, протекающих в организме в условиях умеренного потребления кислорода, требует для правильного выбора лечебных процедур получения возможно большего количества информации. в том числе биофизического характера.

**Цель исследования** – для установления взаимосвязи между условиями гипоксического воздействия и откликом на них организма изучить чувствительным физическим методом биоимпедансного анализа кратковременные и долговременные биофизические эффекты адаптации к гипоксии.

#### Материалы и методы исследования

В разработанной установке специализированный модуль БИА-измерений имел три электрода (вместо традиционных четырех), что связано с особенностями генератора, совмещенного с цифровым осциллографом HANTEK 2D72. Соответственно, измерения проводились по трехточечной схеме, когда на стопу правой ноги накладываются пара электродов, включенных в цепь генератора и в измерительный контур, а на запястье правой руки – электрод, одновременно подключенный к обоим контурам. Тем самым применяемый в данном случае БИА (с контактами по системе «рука – нога») обеспечивает протекание тока по значительной части тела, и отражает состояние организма в целом. Амплитуда напряжения зондирующего сигнала составляла 2 В при частоте 50 кГц. В измерениях регистрировался один цикл осциллограмм тока и напряжения за период ~20 мкс, по 1200 отсчетов данных. Числовые значения программно пересчитывались по закономерностям Фурье-

анализа в величины фазового угла  $\phi$  и импеданса  $Z$ . Проводящие контактные элементы электродов представляли собой пластинки из нержавеющей стали размером 25x15 мм, подобно описанным в [12, с. 151]. Перед наложением на кожу электроды смачивались физиологическим раствором для обеспечения лучшего контакта. Как было установлено сравнительными опытами, при данной схемотехнике трехточечных измерений значения фазового угла получаются примерно в половину меньше, чем при четырехточечной схеме на аппарате «Велнесс».

Результат гипоксического воздействия оценивался также пульсоксиметром Oximetron M130B по сатурации  $SpO_2$  (степени насыщенности гемоглобина крови кислородом).

### Результаты исследования и их обсуждение

БИА измерения, проводившиеся с 2022 по 2024 г., для относительно здорового человека показали сезонные колебания значений фазового угла  $\phi$  (рис. 1). Как можно видеть, в летние месяцы величина  $\phi$  в целом выше, в то время как зимой ниже.

Наблюдаемые отдельные выбросы величины  $\phi$  могут быть связаны как с реальным состоянием организма, например по при-

чине предшествующей измерению интенсивной физической нагрузки, так и с некоторой статистической погрешностью ввиду несколько отличающегося положения электродов, при недостаточно плотном контакте их с кожей и т.п. Тем самым можно полагать, что зависимость в целом определяется уровнем физической активности человека, питания и прочими сезонными факторами. Действительно, летом поступление энергетически важных компонентов обеспечивает повышенную проводимость и активный перенос жидкостей и зарядов, что соответствует открытости клеточных мембран, росту фазового угла  $\phi$  и снижению величины импеданс-сопротивления.

Долговременные БИА измерения в течение нескольких месяцев применения дыхательных упражнений для относительно здорового человека показывают, как правило, прирост величины фазового угла [13]. Физиологически этот факт можно интерпретировать как увеличение функциональной проницаемости клеточных мембран, что соответствует повышению проводимости и интенсивности процессов массопереноса в жидкостях организма, сопровождающему, например, рост мышечной массы у спортсменов.

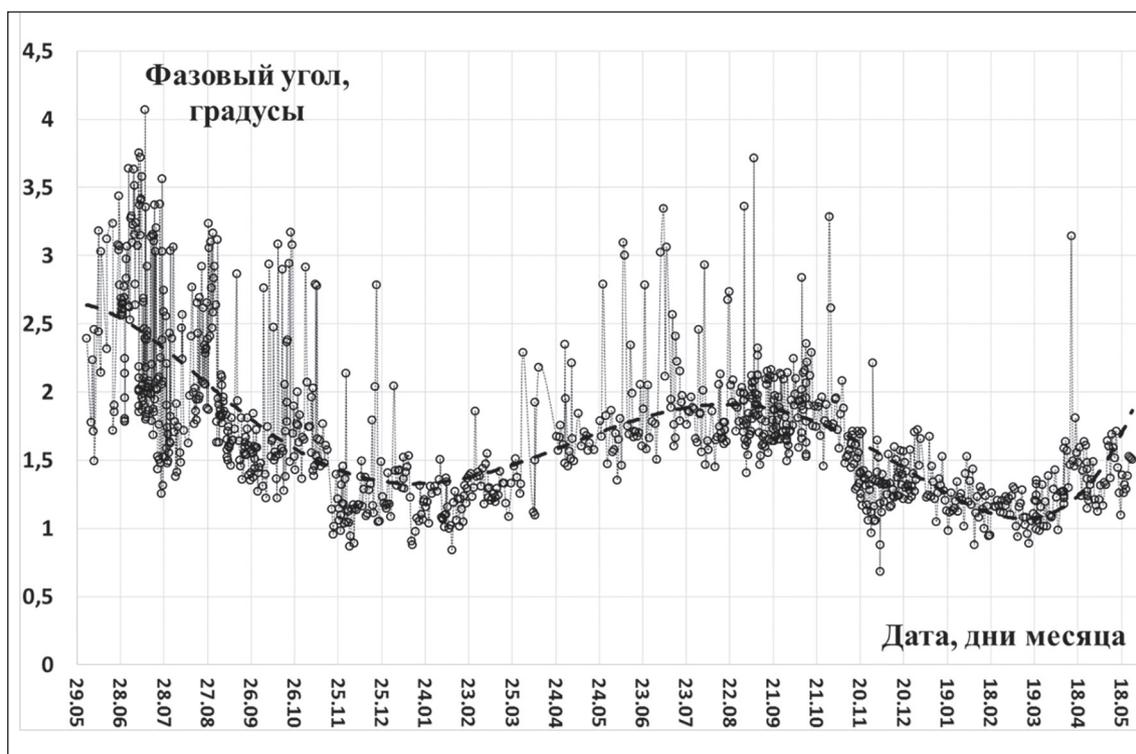


Рис. 1. Величина сдвига фазового угла между сигналами тока и напряжения при биоимпедансных измерениях в зависимости от времени года. Продолжительность наблюдений 2 года  
 Источник: составлено автором по результатам данного исследования

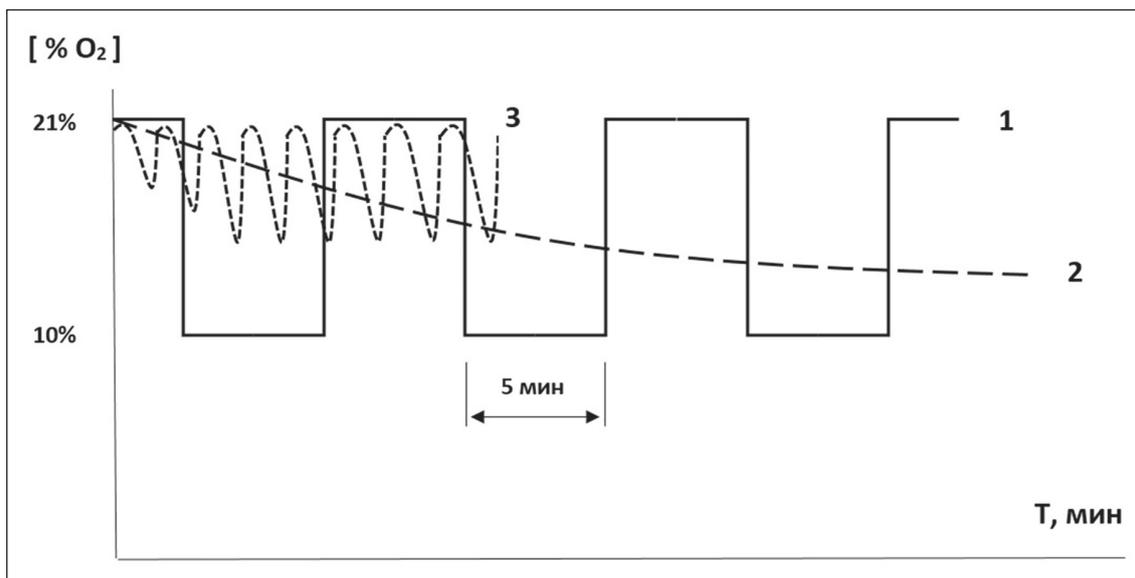


Рис. 2. Сравнение по степени гипоксии и по времени процедур нормобарической интервальной гипокситерапии (1), дыхания в гипоксической палатке (2), и при упражнении «произвольная зевота» (3)

Источник: составлено автором на основе [3, 14]

Способы кратковременного гипоксического воздействия отличаются по глубине физиологического расслабления организма. В методе интервальной нормобарической гипокситерапии при подаче в маску воздуха с пониженной концентрацией кислорода происходит резкая смена режимов дыхания [3], что, безусловно, провоцирует некоторый стресс в организме (рис. 2, кривая 1).

Применение гипоксической палатки «горный воздух» задает постепенное изменение концентрации O<sub>2</sub> во вдыхаемом воздухе (рис. 2, кривая 2). Плавный переход обеспечивает комфортное состояние и расслабление организма, что является важным элементом для повышения эффективности лечебно-оздоровительной процедуры.

Можно отметить также безаппаратный метод «произвольной зевоты», при котором на выдохе производится задержка дыхания, но лишь пока сохраняется комфортное без перенапряжения состояние [14]. Это условие, а также вдох, выполняемый как имитация зевоты, способствуют глубокому «гипоксическому расслаблению» организма, активизируя внутриклеточное (тканевое) дыхание, что заметно по постепенно увеличивающейся комфортной задержке дыхания (рис. 2, кривая 3).

В ходе гипоксических исследований использовалась портативная палатка размером 1x0,5x0,5 м. В объеме палатки находи-

лись голова и плечи человека в лежачем положении. Воздух с заданной концентрацией кислорода подавался с расходом 10 л/мин от гипоксикатора YS-800H. Концентрация O<sub>2</sub> контролировалась по прилагаемым к аппарату таблицам и кислородным анализатором CY-12C. По заключению МЗ Республики Беларусь, гипоксическая палатка имеет статус «дыхательный тренажер», и исследования проводились с «практически здоровыми» людьми, общим числом несколько десятков человек. В ходе процедур испытываемые, как правило, пробовали применить дыхательное упражнение «произвольная зевота».

Типичные результаты гипоксического воздействия в ходе процедуры в палатке в течение 1 ч представлены на рис. 3. В данном случае концентрация кислорода снижалась от атмосферного значения 21% до ~12%, что соответствовало эквивалентной высоте до 4500 м.

Как видно, частота сердечных сокращений в ходе процедуры изменялась незначительно. Насыщенность SpO<sub>2</sub> гемоглобина крови кислородом то уменьшалась, то подрастала в пределах некоторого коридора значений, с периодом до нескольких минут, при общей тенденции к снижению. В итоге в конце часового пребывания в гипоксической атмосфере верхний уровень SpO<sub>2</sub> составлял ~80%, а нижний предел доходил до ~70% и менее.

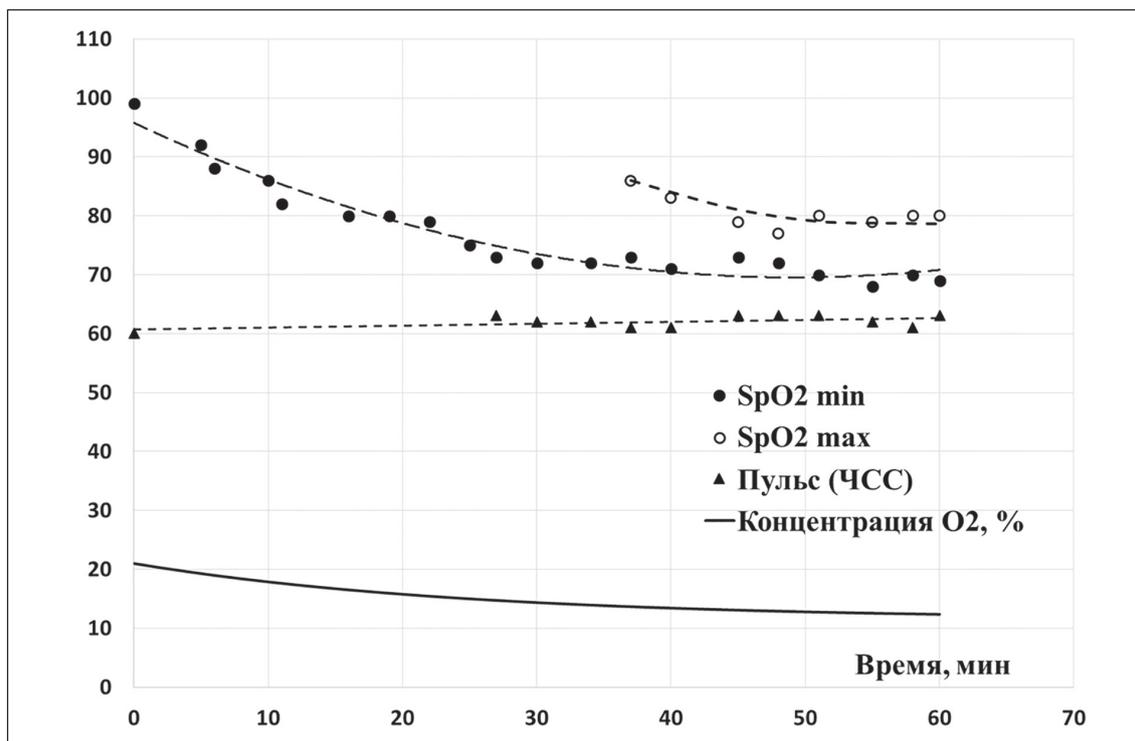


Рис. 3. Изменение насыщенности гемоглобина крови кислородом (сатурация  $SpO_2$ , максимальная и минимальная) и пульс (частота сердечных сокращений) во время прохождения процедуры в гипоксической палатке в течение 1 ч, при уменьшающейся до 12% концентрации кислорода (эквивалентная высота до 4500 м)  
 Источник: составлено автором по результатам данного исследования

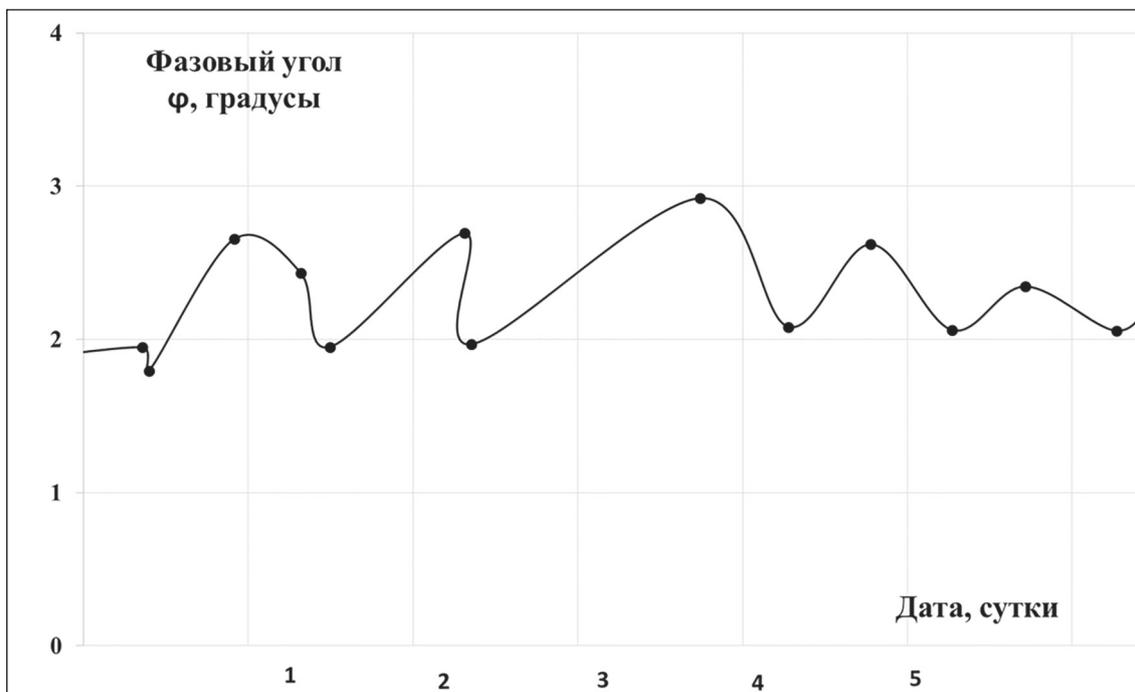


Рис. 4. Изменения фазового угла  $\phi$  сдвига между сигналами тока и напряжения при биоимпедансном анализе после прохождения процедуры в гипоксической палатке в течение часа при концентрации кислорода 17–18% (эквивалентная высота до 1500 м)  
 Источник: составлено автором по результатам данного исследования

БИА перед процедурой и сразу после окончания, как правило, показывал уменьшение фазового угла на величину  $0,1-0,5^\circ$ , что можно интерпретировать как показатель степени расслабления организма человека в ходе процедуры. Соответственно кратковременное снижение  $\varphi$  (зарядка клеточных мембран) представляется фактором, способствующим оздоровлению. Также уменьшение фазового угла для людей с осложнениями (воспаление суставов, поясничные боли, и др.) происходит не только из-за сниженной физической активности, но и ввиду включения физиологических процессов, противодействующих развитию патологий.

После процедуры проводились периодические БИА измерения для изучения воздействия умеренной гипоксии. Как правило, на протяжении нескольких дней регистрировалось возникновение колебаний величины фазового угла  $\varphi$ . Например, после гипоксического воздействия в течение 1 ч при сниженной до 17% концентрации кислорода амплитуда колебаний могла превышать исходный уровень в полтора раза (рис. 4).

После более интенсивного гипоксического воздействия в виде сна в палатке

в течение 6 ч в организме возникли и продолжались в течение нескольких суток колебания фазового угла  $\varphi$  с почти двукратным превышением от исходного состояния (рис. 5).

Известно, что возникновение колебаний физиологических параметров и развитие автоволновых процессов в биологической системе, как правило, сопровождается структурными изменениями [15, 16]. Для человеческого организма после применения умеренного гипоксического воздействия этот факт демонстрирует, что адаптация к гипоксии вызывает соответствующую перестройку физиологических процессов и биоструктур. В аспекте оздоровления биофизическая самоорганизация обеспечивает увеличение иммунного отклика и запаса устойчивости клеток от перерождения [2].

Нужно отметить, что эффект углубленного расслабления, заметный помимо БИА, например, по появлению слезотечения, выделению насморка, наступлению рефлекторной зевоты и прочим проявлениям, имеет относительно субъективный характер и достигается не сразу и не у всех испытуемых, проходящих процедуру.

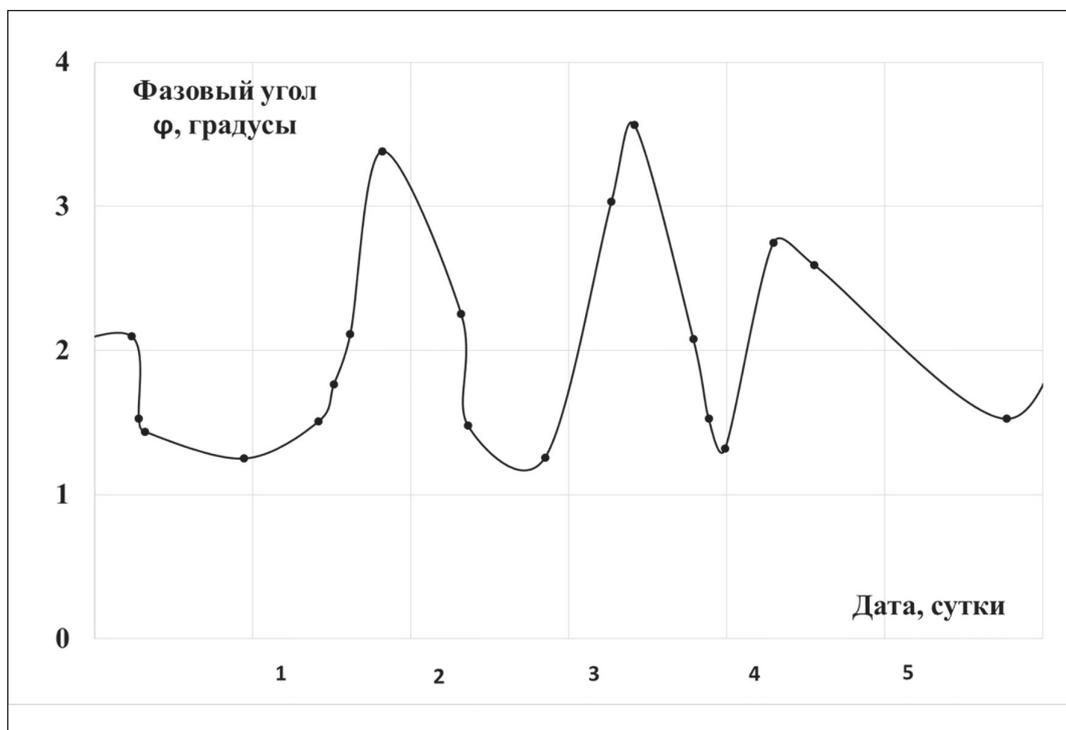


Рис. 5. Изменение фазового угла  $\varphi$  сдвига между сигналами тока и напряжения при биоимпедансном анализе за период наблюдений нескольких дней после сна в течение 6 ч в гипоксической палатке при концентрации кислорода 17–18% (эквивалентная высота до 1500 м)  
Источник: составлено автором по результатам данного исследования

Использование физиологических процессов адаптации к гипоксии представляется актуальным, в частности, для лечения патологий воспалительного характера. Например, как отмечалось с физической точки зрения, формирование хронически воспаленной зоны с повышенным энерговыделением обуславливает онкогенез, поскольку ввиду сдвига химического равновесия вместо нормальных реакций химической индукции становится возможным подхват и развитие более энергозатратных процессов (преимущественный гликолиз вместо фосфорилирования и др.) [17]. Перевод организма в состояние гипоксического расслабления снижает уровень энергетической активности и способствует устранению зоны воспаления.

### Заключение

Величина сдвига фазового угла между сигналами тока и напряжения при биоимпедансном анализе может служить показателем отклика организма на умеренное гипоксическое воздействие при дыхании воздухом с пониженной концентрации кислорода.

Продолжительная статистика величины фазового угла обнаруживает сезонные колебания активности физиологических процессов в организме, определяемые уровнем физической активности человека и характером питания.

Обнаруженный эффект возникновения колебаний величины фазового угла в течение нескольких суток после процедур умеренного гипоксического воздействия (часовое пребывание или сон до десятка часов в палатке «горный воздух») показывает, что адаптация к гипоксии сопровождается активизацией физиологических процессов и формированием новых биоструктур.

Снижение величины фазового угла, сопровождающее увеличение концентрации ионов на клеточных мембранах и снижение проводимости, и при долговременном наблюдении воспринимаемое как свидетельство неблагоприятных изменений в организме, при одновременных измерениях может иметь различную природу. Сезонное снижение в зимний период может определяться ограничением пребывания на свежем воздухе, изменением рациона питания. Для относительно здорового человека состояние с низким значением сдвига фазы может быть временным, вызываемым, например, малоподвижным образом жизни. Некоторое уменьшение величины фазового угла при измерениях перед гипоксической процедурой и непосредственно после окончания можно использовать как пока-

затель относительно полноценного расслабления организма. В целом снижение величины фазового угла представляется откликом в виде физиологических процессов самоорганизации организма человека как неравновесной системы, направленных на устранение отклонений от нормально функционирования.

Использование процедур умеренного дыхания с биоимпедансным контролем может оказаться полезным для сопровождения медицинских мероприятий, в частности при лечении хронических процессов воспалительного характера.

### Список литературы

1. Гридин Л.А. Современные представления о физиологических и лечебно-профилактических эффектах действия гипоксии и гиперкапнии // Медицина. 2016. № 3. С. 45–68. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-predstavleniya-o-fiziologicheskikh-i-lechebno-profilakticheskikh-effektah-deystviya-gipoksii-i-giperkapnii> (дата обращения: 01.06.2025).
2. Шушков С.В. Восстановительный потенциал организма при контролируемом умеренном дыхании // Научное обозрение. Биологические науки. 2022. № 1. С. 62–67. DOI: 10.17513/srbs.1262. URL: <https://science-biology.ru/ru/article/view?id=1262> (дата обращения: 01.06.2025).
3. Нормобарическая гипокситерапия. Методические рекомендации. МЗ РФ. Под ред. Стрелкова Р.Б. 3-е изд. М., ПАИМС, 2001. 16 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://hypoxicom.cp18415.tmweb.ru/wp-content/uploads/2019/03/metod1.pdf> (дата обращения: 01.06.2025).
4. Глушков С.П., Осипов В.М., Пищалов Е.В. Воздействие ночной нормобарической гипоксии и интервальной гипоксической тренировки на организм атлетов // Сибирский педагогический журнал. 2015. № 3. С. 153–158. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozdeystvie-nochnoy-normobaricheskoy-gipoksii-i-intervalnoy-gipoksicheskoy-trenirovki-na-organizm-atletov/viewer> (дата обращения: 01.06.2025).
5. Марущенко В.Л., Гаврилова А.С., Самарская Т.А., Скворцова А.А. Дышим с пользой для здоровья. М.: Эксмо, 2008. 320 с. [Электронный ресурс]. URL: [https://rusneb.ru/catalog/004034\\_000032\\_PEGUB-RU\\_Пермская+ГОУБ\\_0000038989/](https://rusneb.ru/catalog/004034_000032_PEGUB-RU_Пермская+ГОУБ_0000038989/) (дата обращения: 01.06.2025). ISBN: 978-5-699-30291-8
6. Kyle U.G., Bosaeus I., De Lorenzo A.D., Deurenberg P., Elia M., Manuel Gómez J., Liliental B., Heitmann, Kent-Smith L., Melchior J.-C., Pirlich M., Scharfetter H., Schols A.M.W.J., Pichard C. Bioelectrical impedance analysis: part I: review of principles and methods // Clinical Nutrition. 2004. Vol. 23, Is. 5. P. 1226–1243. DOI: 10.1016/j.clnu.2004.06.004.
7. Kyle U.G., Bosaeus I., De Lorenzo A.D., Deurenberg P., Elia M., Manuel Gómez J., Liliental B., Heitmann, Kent-Smith L., Melchior J.-C., Pirlich M., Scharfetter H., Schols A.M.W.J., Pichard C. Bioelectrical impedance analysis-part II: utilization in clinical practice // Clinical Nutrition. 2004. Vol. 23, Is. 6. P. 1430–1453. DOI: 10.1016/j.clnu.2004.09.012.
8. Showkat I., Khanday F.A., Beigh M.R. A review of bio-impedance devices // Med Biol Eng Comput. 2023. T. 61. P. 927–950. DOI: 10.1007/s11517-022-02763-1.
9. Ямпиллов С.С., Хараев Г.И., Павлов А.Г. Изучение злокачественной опухоли кожи аппаратом биоимпедансной диагностики // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер. Естественные и технические науки. 2019. № 1. С. 40–44. URL: <http://www.nauteh-journal.ru/index.php/3/2019/№1/52d3a70f-425d-42ee-b4b9-63123048b50b> (дата обращения: 01.06.2025).

10. Николаев Д.В., Руднев С.Г. Биоимпедансный анализ: основы метода, протокол обследования и интерпретация результатов. 17 с. [Электронный ресурс]. URL: [https://medass.su/wp-content/uploads/2017/03/intro\\_lesson.pdf](https://medass.su/wp-content/uploads/2017/03/intro_lesson.pdf) (дата обращения: 01.06.2025).
11. АРМ «Медсканер БИОРС». 36 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.biors.ru/static/up/files/medscanner-reports.pdf> (дата обращения: 01.06.2025).
12. Николаев Д.В., Смирнов А.В., Бобринская И.Г., Руднев С.Г. Биоимпедансный анализ состава тела человека. М.: Наука, 2009. 392 с. (в пер.). [Электронный ресурс]. URL: <https://medass.su/wp-content/uploads/2017/03/book2009.pdf>. (дата обращения: 01.06.2025). ISBN 978-5-02-036696-1.
13. Шушков С.В. Биоимпедансная диагностика при умеренном гипоксическом воздействии // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 2 (116). Ч. 2. С. 34–37. URL: <https://research-journal.org/archive/2-116-2022-february/bioimpedansnaya-diagnostika-pri-umerennom-gipoksicheskom-vozdeystviu> (дата обращения: 01.06.2025). DOI: 10.23670/IRJ.2022.116.2.037.
14. Шушков С.В. Произвольная зевота как гипоксическая процедура // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. 2020. Вып. 77. С. 69–76. URL: <https://cfpd.elpub.ru/jour/article/view/822>. (дата обращения: 01.06.2025). DOI: 10.36604/1998-5029-2020-77-69-76.
15. Твердислов В.А., Яковенко Л.В. Активные среды, автоволны и самоорганизация. От физико-химических систем к биологическим и социальным системам // Российский химический журнал. 2000. Т. 44. № 3. С. 21–32. URL: <https://www.chem.msu.ru/rus/jvho/2000-3/21.pdf> (дата обращения: 01.06.2025).
16. Trzaska Z. Oscillations in Biological Processes. In: *Mathematical Modelling and Computing in Physics, Chemistry and Biology. Studies in Systems, Decision and Control* // Springer, Cham. 2023. Vol. 495. P. 161–190. DOI: 10.1007/978-3-031-39985-5\_5.
17. Шушков С.В. Газоразрядная аналогия для онкогенеза // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики // Серия Естественные и Технические Науки. 2019. № 1. С. 27–35. URL: <https://www.nauteh-journal.ru/files/77068cea-a205-4822-aff4-afdbca40b97b> (дата обращения: 01.06.2025).