

УДК 612.216+612.821.3

Ю.Е. Вагин,
д.м.н., профессор кафедры нормальной физиологии
Первого МГМУ им. И.М. Сеченова

Yu.E. Vagin,
MD, prof. of the chair of normal physiology
of the I.M. Sechenov First MSU

НЕРАВНОМЕРНОСТЬ РИТМА ДЫХАНИЯ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

THE UNEVENNESS OF RESPIRATORY RHYTHM AS AN INDICATOR OF EMOTIONAL STRESS

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ:

Юрий Евгеньевич Вагин, профессор кафедры нормальной физиологии
Адрес: 117588, г. Москва, ул. Тарусская, д. 22, корп. 1
Телефон: 8 (916) 839–24–53
E-mail: YuVaguine@yandex.ru
Статья поступила в редакцию: 04.02.2015
Статья принята в печать: 19.03.2015

CONTACT INFORMATION:

Yuriy Evgenievich Vagin, prof. of the chair of normal physiology
Address: 22–1 Tarusskaya str., Moscow, 117588
Tel.: 8 (916) 839–24–53
E-mail: YuVaguine@yandex.ru
The article received: 04.02.2015
The article approved for publication: 19.03.2015

Аннотация. Внешнее дыхание состоит из относительно самостоятельных циклов. В ходе каждого цикла дыхания дыхательный центр принимает решение о способах удовлетворения дыхательной потребности организма. Влияние предыдущих дыхательных циклов на последующие приводит к образованию континуума циклов дыхания.

Был разработан метод анализа неравномерности ритма дыхания, который учитывал относительную самостоятельность каждого дыхательного цикла и влияние предыдущих дыхательных циклов на последующие. Было установлено, что неравномерность ритма дыхания отражает степень эмоционального напряжения и не связана с физическим напряжением организма. Неравномерность ритма дыхания увеличивалась при пищевом поведении, мнестической деятельности, болевых реакциях, остром эмоциональном стрессе, утомлении при реальной производственной деятельности. Неравномерность ритма дыхания изменялась односторонне с артериальным давлением ($r=0,66$) и кожно-гальванической реакцией ($r=0,81$). Неравномерность ритма дыхания изменялась от 0 до 20% при различных функциональных состояниях организма. Увеличение неравномерности ритма дыхания более 30% происходило кратковременно и было предвестником скорой гибели организма.

Неравномерность ритма дыхания позволила предвидеть выживаемость животных при остром экспериментальном эмоциональном стрессе. Оценка степени обезболивания с помощью неравномерности ритма дыхания способствовала разработке микроволновой рефлексотерапии. Исследование неравномерности ритма дыхания в условиях реальной трудовой деятельности способствовало профилактике заболеваемости рабочих. Мотивация голода у людей была исследована при обонятельных раздражениях с помощью неравномерности ритма дыхания. Неравномерность ритма дыхания характеризовала величину эмоциональных реакций животных при самораздражении мозга.

Annotation. External respiration consists of relatively independent cycles. During each breath cycle the respiratory center makes a decision about how to meet the respiratory necessity of the body. The influence of previous respiratory cycles for the next leads to the formation of the breath cycles continuum.

The method was developed for analysis of unevenness of respiratory rhythm, which takes into account the relative independence of each breathing cycle and the impact of previous respiratory cycles later. It was found that the unevenness of respiratory rhythm reflects the degree of emotional stress and is not associated with the physical strain of the organism. The uneven rhythm of breathing increased when dietary behavior, mental activity, pain reactions, acute emotional stress, fatigue in real productive activity. Uneven breathing rhythm changed unilaterally with blood pressure ($r=0.66$) and galvanic skin response ($r=0.81$). Uneven breathing rhythm changed from 0 to 20 % in different functional states of the body. The increasing irregularity of the rhythm of breathing more than 30 % was short-lived, and was a harbinger of the imminent death of the body.

The unevenness of respiratory rhythm was possible to predict the survival of animals in acute experimental emotional stress. Assessment of the degree of analgesia using the uneven rhythm of breathing helped to develop the microwave reflex therapy. Study of the uneven breathing rhythm in actual work activity contributed to the prevention of the workers morbidity. The hunger motivation in humans was investigated in olfactory stimuli with the unevenness of breathing rhythm. The unevenness of respiratory rhythm has characterized the magnitude of the animals' emotional reactions over itself stimulation of the brain.

Ключевые слова. Неравномерность ритма дыхания, частота дыхания, дыхательный цикл, эмоциональное напряжение, системное квантование поведения.

Keywords. Unevenness of respiratory rhythm, respiratory rate, respiratory cycle, emotional stress, system quantization of behavior.

Известно, что изменение функционального состояния организма человека и животных связано с перестройками функций различных органов и функциональных систем организма. Изменение нейрогуморальной регуляции функциональных процессов сопровождается вовлечением сердечно-сосудистой, дыхательной и других систем организма. Показано, что характер внешнего дыхания меняется не только при изменении кислородной потребности организма, но и при различных поведенческих реакциях, связанных с психофизиологическими процессами. Пневмография относится к одному из самых чувствительных методов исследования эмоционального состояния организма человека и животных. Собственный опыт экспериментальной работы показал, что динамика пневмограммы изменяется при незначительных воздействиях на животных значительно раньше других параметров организма. Высокая лабильность характера дыхания была также нами обнаружена у людей при различных формах их целенаправленного поведения. Исследование ряда физиологических параметров в условиях производственной деятельности рабочих обнаружило значительную изменчивость их характера дыхания, в то время как другие соматовегетативные параметры организма изменялись не всегда и недостаточно наглядно. Изменения ритма дыхания сопровождали каждое следующее действие рабочих, в то время как изменения других функционально важных параметров организма были следствием значительного и длительного напряжения трудовой деятельности рабочих.

Пневмография входит в набор традиционных методов исследования функций организма при изучении как поведенческих реакций, так и изменений функционального состояния организма человека и животных. Однако использование параметров пневмограммы ограничено отсутствием количественных приемов анализа ритма дыхания адекватных задачам изучения дыхания как компонента психофизиологических процессов. Основным изучаемым параметром внешнего дыхания до сих пор остается частота дыхания. Наибольшие затруднения в исследовании ритма дыхания возникают при анализе пневмограммы при кратковременных действиях обследуемого, когда визуально прослеживаются изменения ритма дыхания без изменения частоты дыхания. В связи с этим данные пневмографии обычно используют как дополнительный материал исследования, и описывают пневмографические изменения качественно, как «кратковременную задержку дыхания, углубление вдоха, возникновение аритмичного дыхания».

Адекватные количественные приемы оценки изменения ритма дыхания до сих пор не разработаны, и физиология пользуется лишь качественным описанием изменений дыхательных волн. С целью

обогащения набора физиологических приемов для исследования функциональных состояний организма нами был разработан новый математический прием измерения неравномерности ритма дыхания. Была определена чувствительность этого метода и его информационное значение для оценки эмоционального состояния человека и животных. Теоретическим базисом метода была концепция К.В. Судакова о системном квантовании повторяющихся физиологических процессов. Накопленный опыт измерения неравномерности ритма дыхания обобщен в этой работе.

РИТМ ДЫХАНИЯ КАК КОМПОНЕНТ ВЫСШЕЙ НЕРВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Известно, что пневмография была и остается одним из самых распространенных физиологических методов исследования функционального состояния человека и животных [1–7]. Уже первые исследования, проведенные физиологами в XIX-м и нач. XX-го вв., обнаружили, что характер дыхания зависит не только от кислородной потребности организма, но также является интегральным показателем состояния психических и эмоциональных процессов человека. Задолго до появления в психофизиологии методов электроэнцефалографии, кожно-гальванической реакции и вариабельности сердечного ритма высшую нервную деятельность человека исследовали по изменениям ритма дыхания. В диссертации В.В. Средневского 1906 г., текст которой хранится в библиотеке Первого МГМУ им. И.М. Сеченова, была показана высокая информативность пневмографии при реакциях испуга у человека [1].

Простота регистрации пневмограммы и высокая чувствительность характера дыхания к различным изменениям в организме явились теми положительными факторами, которые дали возможность использовать пневмографию как один из способов оценки функционального состояния организма. Пневмография была использована при исследовании различных форм целенаправленного поведения животных [8–11] и человека [1, 2, 12–17]. До появления современных методов исследования функций головного мозга пневмография была одним из самых распространенных методов изучения высшей нервной деятельности [8, 9]. В настоящее время пневмография продолжает использоваться в комплексе с другими методами для исследования функционального состояния организма при целенаправленной деятельности человека и животных [6, 7]. При оценке состояния человека с помощью полиграфии по методу «детектора лжи» изменение дыхательных волн является ведущим показателем состояния человека при правдивом или лживом ответе на вопрос дознавателя [18–20].

Однако видимые изменения дыхательных волн до сих пор оценивали качественно [12–14, 18–20]. При вычислении частоты дыхания (ЧД) специфика изменений пневмограммы в большинстве случаев утрачивалась, что свидетельствовало о низкой информативности ЧД для оценки изменений степени равномерности ритма дыхания [13, 15, 21]. Отсутствие информативного количественного показателя степени аритмичности дыхания постепенно снизило интерес исследователей к пневмографии и переключило их внимание на электроэнцефалографию, электрокардиографию, исследование вариабельности сердечного ритма, уровня артериального давления и анализ кожно-гальванической реакции. Этому особенно способствовало развитие в 90-х гг. XX в. компьютерной техники обработки физиологических параметров.

МЕХАНИЗМЫ РЕГУЛЯЦИИ РИТМА ДЫХАНИЯ

С позиции знаний о природе ритмических процессов [22] внешнее дыхание рассматривается как единый волнообразный процесс полностью связанных между собой дыхательных циклов. Известно, что ритмичность дыхания определяется основными тремя механизмами [2, 6, 7]. Прежде всего, ритмичность вдохов и выдохов поддерживается автоматизмом дыхательного центра продолговатого мозга, возбудимость нейронов которого увеличивается при гиперкапнии. Во-вторых, ритмичность дыхания зависит от пневмотаксического центра ствола мозга. Он получает информацию от центра дыхания, обрабатывает ее и способствует поддержанию регулярности смены возбуждения в нейронах вдоха и выдоха дыхательного центра. Пневмотаксический центр переключает работу центра дыхания с вдоха на выдох. Показано, что при экспериментальном выключении пневмотаксического центра внешнее дыхание сохраняется, но вдохи удлиняются, сопровождаясь короткими выдохами. Дыхание становится менее ритмичным. В-третьих, высокая частота импульсов от растянутых механорецепторов легких при вдохе способствует переключению вдоха на выдох, а уменьшение этой частоты на выдохе способствует смене выдоха на вдох. Этот дополнительный механизм регуляции ритмичности дыхания имеет особенное значение при форсированном дыхании, когда возникает большая разница в частоте возбуждений механорецепторов на вдохе и выдохе.

При анализе ритмичности дыхания методами классической статистики [23–25] не учитываются физиологические механизмы ритма дыхания. Каждый дыхательный цикл рассматривается как полностью независимый случайный процесс. Последовательность возникновения дыхательных циклов не учитывается. Влияние предыдущих дыхательных

процессов на последующие дыхательные циклы исключается.

С позиции концепции К.В. Судакова [26–29] о системном квантовании процессов жизнедеятельности внешнее дыхание рассматривается как континуум прерывных циклов дыхания. Циклы дыхания не являются полностью детерминированными параметрами единого волнообразного функционального процесса, как это следует из представлений о биоритмах. Каждый дыхательный цикл не оторван от предыдущих и последующих циклов и не представляет собой случайное событие в организме, как это подразумевает статистический анализ. Отличительной особенностью концепции системного квантования для понимания организации ритма внешнего дыхания является рассмотрение каждого дыхательного цикла как самостоятельного события во внешнем дыхании. Каждый цикл дыхания является этапом внешнего дыхания от возникновения потребности в определенном газовом составе крови до ее удовлетворения адекватными параметрами вдоха и выдоха. Дыхательная потребность в соответствии со скоростью окислительных реакций тканей изменяющегося функционального состояния организма включает три составляющие. Это кислородная потребность органов и тканей, действующая на дыхательный центр, гиперкапнический стимул, вызванный $p\text{CO}_2$ крови и легочная вентиляционная потребность организма. Удовлетворение дыхательной потребности происходит в организме прерывным способом с помощью дыхательных циклов.

Ключевым моментом в подходе к анализу ритма дыхания с позиции концепции системного квантования физиологических функций считается наличие в нейрофизиологических процессах дыхательного центра стадии принятия решения о параметрах вдоха и выдоха в ходе каждого цикла дыхания. Каждый дыхательный цикл только частично зависит от предыдущего дыхательного цикла и в некоторой степени влияет на последующий дыхательный цикл [30]. Влияние предыдущих дыхательных циклов на последующие приводит к образованию континуума циклов дыхания. Этот континуум внешнего дыхания субъективно воспринимается исследователями как непрерывный ритм дыхания.

Каждый цикл дыхания всегда включает несколько важных функциональных процессов (рис. 1). Автоматизм дыхательного центра определяет длительность и глубину как вдоха, так и выдоха. В условиях функционального покоя автоматизм является главной причиной неизменности параметров каждого дыхательного цикла. Однако известно, что ритмичность дыхания нарушается при изменении функционального состояния организма. Физическая и умственная деятельность организма, своеобразие двигательных реакций организма при целенаправленном поведении перестраивают пат-

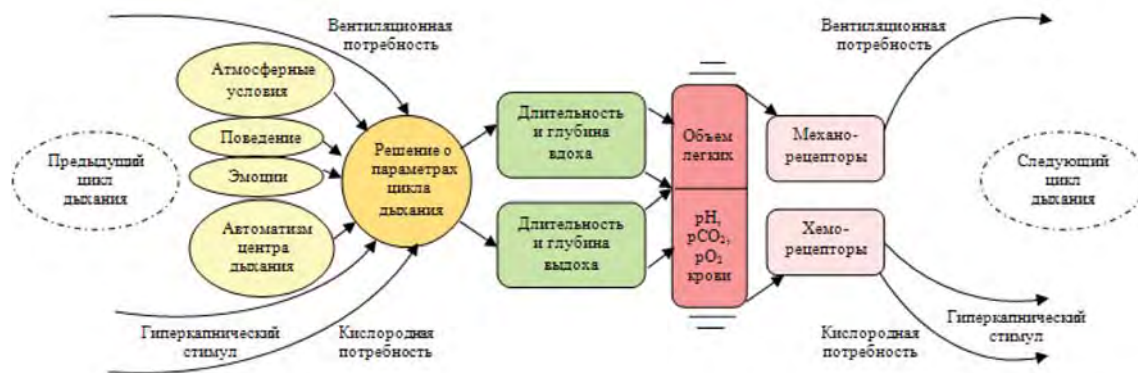


Рис. 1. Функциональные процессы дыхательного цикла в ситемеквантовом континууме внешнего дыхания

терны дыхательного цикла [5]. Голосовые реакции животных, человеческая речь и сознательная регуляция дыхательных циклов существенно изменяют параметры дыхательного цикла, выражающиеся в изменении длительности и глубины вдоха или выдоха, а иногда временной задержке дыхания [6, 7]. Эмоциональное напряжение нарушает правильный ритм дыхания [8, 9, 11, 18–20]. Недостаточность или избыточность наполнения легких воздухом в ходе предыдущего дыхательного цикла определяет вентиляционную потребность организма. Одновременно с вентиляционной потребностью на дыхательный центр влияет гиперкапнический стимул при увеличении парциального давления CO_2 в крови и кислородная потребность, возникающая при гипоксемии в ходе предыдущего дыхательного цикла. Внутренние компоненты афферентного синтеза возбуждений в дыхательном центре дополняются внешними компонентами, определяемыми изменяющимися атмосферными условиями. Обработка полученной информации в дыхательном центре завершается принятием решения о длительности и глубине вдоха и выдоха. Параметры дыхательного цикла определяют степень растяжения альвеол легких и pH , pCO_2 и pO_2 крови. Возбуждение механорецепторов легких при растяжении альвеол в ходе вдоха и торможение их при уменьшении альвеол во время выдоха формирует вентиляционную потребность организма. Возбуждение сосудистых и центральных хеморецепторов обеспечивает возникновение гиперкапнического стимула и кислородной потребности организма. Эти потребности формируют обратную афферентацию от результата дыхательного цикла. Однако они будут частично влиять не на произошедший, а на следующий дыхательный цикл.

Выделение из непрерывного процесса ритма дыхания дыхательных циклов, отличающихся от других дыхательных циклов и имеющих относительно самостоятельное значение для дыхательной потребности организма, отражает диалектические свойства одновременной прерывности и непрерывности повторяющихся функциональных процессов

организма [27]. При равномерном ритме дыхания в большей степени проявляются его непрерывные свойства, зависящие от автоматизма дыхательного центра. При увеличении неравномерности ритма дыхания усиливается проявление прерывных свойств внешнего дыхания. Длительность каждого дыхательного цикла зависит частично от длительности предыдущего цикла, влияет на длительность последующего цикла и не имеет связи с более отдаленными дыхательными циклами. При этом каждый вдох и выдох являются составными частями определенного цикла дыхания и не имеют признаков самостоятельных функционально значимых этапов внешнего дыхания [30].

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА РИТМА ДЫХАНИЯ

Оценку изменений пневмографии проводят визуально, полагаясь на экспериментальный опыт исследователя. При количественном анализе пневмографических изменений пользуются методами классической статистики или теории колебательных процессов. Основываясь на непрерывности внешнего дыхания, ритмичности вдохов и выдохов и автоматизме дыхательного центра пневмограмма анализируется как непрерывный волнообразный функциональный процесс организма [2, 5–7].

Однако измерение параметров ритма дыхания, таких как частота дыхания и средняя длительность дыхательных волн, возможна только при регулярном дыхании в определенном функциональном состоянии организма. При изменении функционального состояния организма, сопровождающегося нарушением регулярного ритма дыхания, параметры ритмичности дыхания становятся малоинформативными. Ритм дыхания утрачивает регулярность, и длительность каждого последующего дыхательного цикла отличается от длительности предшествующего цикла.

Известно, что классическая статистика разработана для количественного анализа случайных про-

цессов и анализирует независимые друг от друга значения переменной величины. Статистические способы анализа параметров дыхательных циклов не учитывают физиологических механизмов ритма дыхания. Такой анализ подразумевает возникновение дыхательных циклов как несвязанные между собой события [23–25]. Однако длительность каждого дыхательного цикла не является случайным процессом, как и многие другие функции организма [31]. Поэтому применение для анализа пневмограммы методов классической статистики возможно, но оно не отражает физиологию процессов внешнего дыхания. Статистические параметры длительности дыхательного цикла, такие как частота, дисперсия, коэффициент вариации и др., не учитывают последовательности дыхательных циклов.

С целью увеличения информативности ритма дыхания нами был разработан математический прием последовательного сравнения длительностей смежных дыхательных циклов. В основе анализа дыхательного ритма лежат теоретические представления о системоквантах функциональных процессов организма как единицах системной организации физиологических функций [26–29]. Функциональные системокванты процессов жизнедеятельности являются элементами саморегуляторной деятельности гомеостатических и поведенческих функциональных систем организма. Результаты системоквантов жизнедеятельности представляют собой этапы в достижении конечных результатов поддержания гомеостаза организма.

Предлагаемый метод системоквантового анализа ритма дыхания отличается от методов классической статистики и количественного анализа ритмических процессов. Каждый дыхательный цикл рассматривается не как случайное событие, что подразумевает статистический анализ, и не как часть единого волнового процесса в соответствии с представлениями о биоритмах. Дыхательные циклы рассматриваются как этапы, системокванты континуума дыхательных циклов. Эти циклы имеют самостоятельные свойства и одновременно связаны с предыдущими и последующими циклами. Метод учитывает последовательность возникновения дыхательных циклов. Одним из важнейших параметров дыхательного цикла является его длительность. Поэтому на исследуемом участке пневмограммы последовательно сравниваются длительности смежных дыхательных циклов. Сопоставляются длительности первого и второго, второго и третьего, третьего и четвертого дыхательного циклов и т. д.

ИЗМЕРЕНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РИТМА ДЫХАНИЯ

При сравнении длительностей смежных дыхательных циклов необходимо избежать зависимости

разницы между длительностями смежных дыхательных циклов от абсолютной величины длительностей этих циклов. Поэтому разницу длительностей смежных дыхательных циклов нормируют к их сумме. Деление на сумму длительностей двух дыхательных циклов увеличивает точность вычисляемой величины вдвое. Затем вычисляют среднюю арифметическую величину нормированных величин разностей между смежными интервалами на исследуемом отрезке времени. Вычисленный параметр назван «неравномерностью ритма дыхания» (НД). НД вычисляют по формуле

$$\text{НД} = \frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^{n-1} \frac{|T_i - T_{i+1}|}{T_i + T_{i+1}} \times 100 \%, \quad (1)$$

где T_i — длительность i -го дыхательного цикла, i — его порядковый номер, n — число исследуемых циклов.

Метод был предложен в 1981 г. [32]. Математический смысл вычисленной величины заключается в том, что она показывает среднюю относительную разницу между длительностями соседних дыхательных циклов. Физиологический смысл измеряемой величины НД заключается в том, что она показывает «напряженность» работы дыхательного центра по изменению длительностей дыхательных циклов на изучаемом отрезке времени. В связи с тем, что изменение длительности дыхательного цикла определяется внешними причинами по отношению к автоматизму дыхательного центра, величина НД характеризует величину этих внешних воздействий на дыхательный центр. Термин «неравномерность ритма дыхания» более правильно отражает суть измеряемой величины по сравнению с термином «нерегулярность ритма дыхания». «Неравномерность» характеризует изменчивость каждого цикла ритмического процесса, а «нерегулярность» возникает при отсутствии некоторых циклов ритмического процесса.

Величина НД измеряется в процентах. Теоретически НД может изменяться от 0 % при равномерном ритме дыхания до 100% при значительном изменении длительностей дыхательных циклов. В ходе практического исследования НД было установлено, что при различных функциональных состояниях у человека, кроликов и крыс НД колеблется от 0 до 30%. При этом величина НД зависит от силы воздействия на организм. Значения НД от 30 до 70% возникают только эпизодически при угрожающих жизни состояниях.

В качестве примера приводим исследование НД у больного человека с пояснично-крестцовым болевым синдромом. В соответствии с инструкцией больной в положении стоя наклонял туловище вперед до максимального угла наклона и удерживал позу в течение 30 с. При этом была зарегистрирована следующая последовательность длительностей девяти дыхательных циклов: 9, 4, 13, 8, 9, 10, 2, 12 мм (рис. 2).

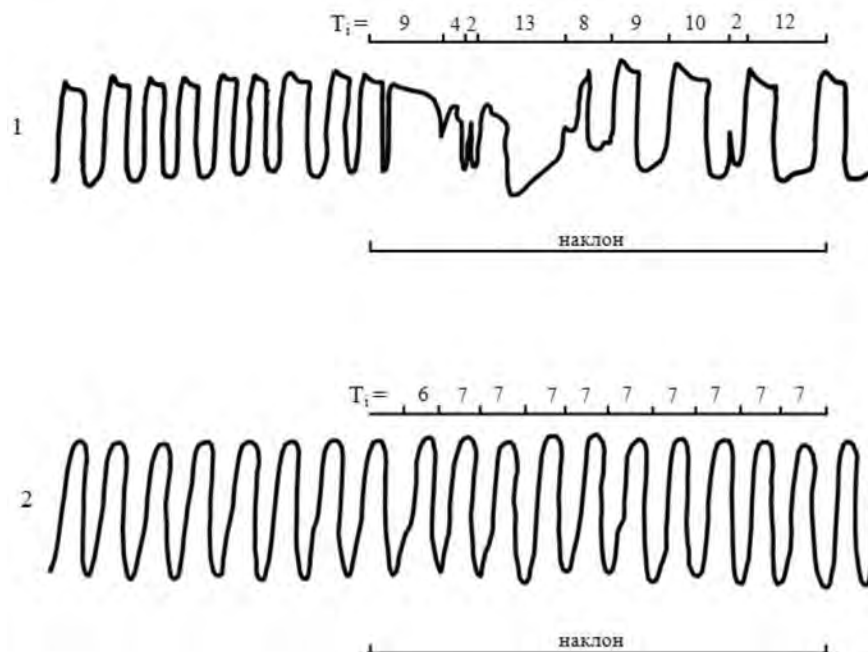


Рис. 2. Пневмограмма при наклоне туловища больного с пояснично-крестцовым болевым синдромом (1 — до лечения; 2 — после медикаментозной терапии; T_i — длительность дыхательных волн в мм)

После лечения при наклоне туловища дыхание оставалось равномерным. Длительность циклов была 6, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 7 мм и НД = 0,9%. Выздоровление больного с пояснично-крестцовым болевым синдромом сопровождалось уменьшением НД с 37,9 % до 0,9 % [33].

$$\text{НД} = \frac{1}{9-1} \times \left(\frac{|9-4|}{9+4} + \frac{|4-2|}{4+2} + \frac{|2-13|}{2+13} + \frac{|13-8|}{13+8} + \frac{|8-9|}{8+9} + \frac{|9-10|}{9+10} + \frac{|10-2|}{10+2} + \frac{|2-12|}{2+12} \right) \times 100 \% = 39,7 \%$$

ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РИТМА ДЫХАНИЯ

Точность измерения НД будет зависеть от ошибки измерения длительности дыхательных циклов (h), средней длительности дыхательных циклов (T) и от количества обсчитываемых дыхательных циклов (n). Ошибка НД тем меньше, чем больше средняя длительность дыхательных циклов и количество исследуемых дыхательных циклов. Ошибка НД h имеет обратную зависимость от удвоенной средней длительности дыхательных циклов T , поскольку вычисление НД ведется по длительности двух смежных дыхательных циклов. Ошибка НД h , как и любая другая ошибка среднего значения [23–25], обратно пропорциональна квадратному корню из количества обсчитываемых величин. В данном случае ошибка НД h обратно пропорциональна квадратному корню из количества разностей между длительностями смежных дыхательных циклов, по которым вычисляют величину НД.

Ошибку НД h рассчитывают по формуле:

$$h = \frac{1}{2\sqrt{n-1}} \times 100 \% \quad (2)$$

при точности измерения длительности дыхательных циклов $\pm 0,5$ (мм, с), где T — средняя длительность дыхательных циклов и n — число исследуемых дыхательных циклов.

Впервые вычисление ошибки неравномерности ритма было выполнено в 1985 г. [34]. Поскольку ошибка НД h не относится к величинам классической статистики, ее значения не следует сопоставлять с величинами статистической значимости (p).

Если средняя длительность дыхательных циклов теоретически будет стремиться к бесконечности ($T \rightarrow \infty$), что может наблюдаться при остановке дыхания, то $H=0$ в соответствии с формулой 1. При этом ошибка НД стремится к нулю ($h \rightarrow 0$) в соответствии с формулой 2.

Если средняя длительность дыхательных циклов приближается к нулю, то ошибка НД стремится к бесконечности ($h \rightarrow \infty$). Средняя длительность дыхательных циклов становится меньше точности измерения длительности дыхательных циклов и НД измерить невозможно. В этом случае для измерения НД необходимо увеличивать скорость регистрации пневмограммы с целью получения более длительных дыхательных циклов.

Минимальная средняя длительность дыхательных циклов, при которой возможно практическое измерение НД, равно 1 (мм, с). При этом ошибка НД h будет равна максимальной величине 50% в реальных условиях измерения НД.

Зависимость ошибки НД h от средней длительности дыхательных циклов T представлена семейством наклонных прямых, характеризующих изменение h от T при различном количестве дыхательных циклов n от 2 до 101 (рис. 3).

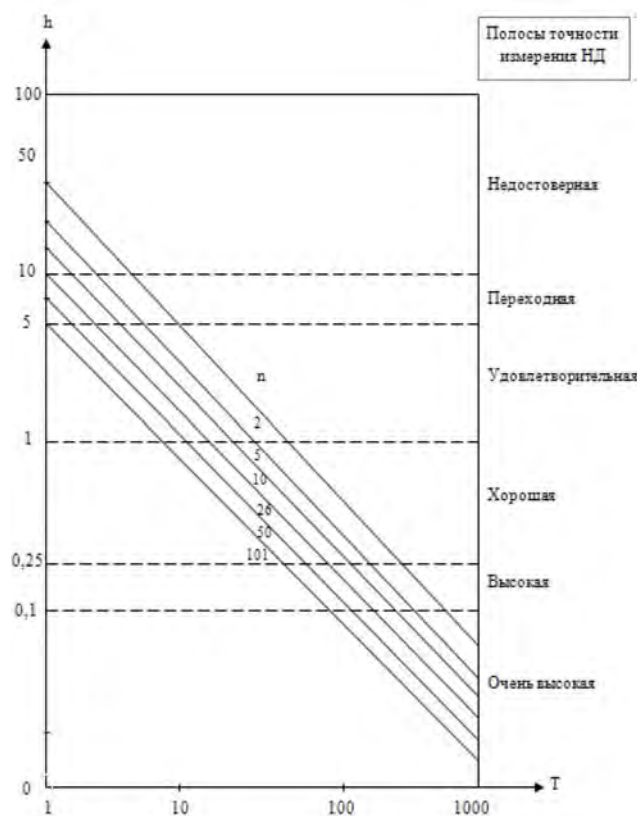


Рис. 3. Зависимость ошибки измерения НД (h , %) от средней длительности дыхательных циклов (T , мм, с) и от количества дыхательных циклов (n)

Зная среднюю длительность дыхательных циклов T и количество исследуемых дыхательных циклов n по графику зависимости h от T , можно определить ошибку НД h . Ошибка НД h указывает на точность измерения величины НД. Ошибка НД h уменьшается при увеличении средней длительности дыхательных циклов T и количества исследуемых дыхательных циклов n .

Для удобства качественной оценки точности измерения НД все значения h на графике разделены горизонтальными пунктирными прямыми на полосы точности измерения НД. Это разделение сделано по аналогии с выделением полос достоверности значений t -критерия Стьюдента [35]. При $0 \leq h \leq 0,1\%$ точность измерения НД очень высокая, при $0,1\% < h \leq 0,25\%$ — высокая, при $0,25\% < h \leq 1\%$ — хорошая, при $1\% < h \leq 5\%$ — удовлетворительная, при $5\% < h \leq 10\%$ — переходная с тенденцией к недостоверной и при $10\% < h \leq 100\%$ — недостоверная.

Недостаточная точность измерения НД может быть при анализе менее 100 дыхательных циклов при средней длительности дыхательных циклов менее 10 (мм, с). Точность измерения НД становится удовлетворительной при расчете НД всего лишь по двум дыхательным циклам при средней длительности циклов 10 (мм, с) и более. Если же средняя длительность дыхательных циклов равна 1 (мм, с), то для удовлетворительной точности измерения НД необходимо вычислять НД по 100 и более циклов.

Высокая точность измерения НД дает возможность оценить величину неритмичности дыхания за короткие промежутки времени. Так, например, при исследовании влияния неосознанных запахов на человека НД измеряли по четырем дыхательным циклам [36]. Для сравнения укажем, что расчет широко применяемого «индекса напряжения» регуляций сердечного ритма проводится по 100 сердечным циклам [37, 38], что обусловлено требованиями законов классической статистики.

Перед проведением исследования целесообразно определить минимальную скорость регистрации пневмограммы, при которой точность измерения НД не будет ниже удовлетворительной. Скорость регистрации пневмограммы (V в мм/с) имеет прямую зависимость от ЧД и обратную зависимость от ошибки НД и количества исследуемых дыхательных циклов, и должна быть больше следующего выражения: $V \geq \frac{f}{2h\sqrt{n}-1} \times 100\%$, где f — ЧД в цикл/с, h — ошибка НД в %, n — количество исследуемых дыхательных циклов.

Например, ЧД обследуемого человека равно 12 цикл/мин, т. е. 0,2 цикл/с. Предположим, что НД вычисляют по пяти дыхательным циклам. Точность измерения НД должна быть не ниже удовлетворительной и ошибка НД должна быть не менее 5% ($h=5\%$). В этом случае скорость регистрации пневмограммы должна быть $V \geq \frac{0,2 \times 100}{2 \times 5 \times \sqrt{5} - 1} = 1 \frac{\text{мм}}{\text{сек}}$. Это значит, что при скорости регистрации пневмограммы 1 мм/с и больше ошибка НД будет меньше 5%.

ИНФОРМАЦИОННОЕ ЗНАЧЕНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РИТМА ДЫХАНИЯ

В проведенных нами исследованиях было установлено, что изменения ЧД и НД связаны с разными физиологическими процессами при функциональных перестройках организма.

Было показано, что НД отражает степень эмоционального напряжения организма. При этом величина НД не зависела от эмоционального знака реакции. НД увеличивалась при приеме пищи, при насильственном кормлении горчицей соусом и при раздражении пульпы зуба у кроликов [32]. НД была тем больше, чем сильнее было раздражение пульпы зуба [39].

При пищевом поведении кроликов ЧД не изменялась [32]. В отличие от мнения о том, что боль сопровождается увеличением ЧД [11, 40, 41], экспериментально было установлено, что при раздражении пульпы зуба ЧД изменялась индивидуально у разных животных [32, 39].

Увеличение НД при боли позволило использовать этот параметр как показатель выраженности ноцицептивных реакций у животных [39, 42] и человека. Провоцирование патогенетической боли у больных пояснично-крестцовым болевым синдромом сопровождалось увеличением НД. Степень выраженности болевого синдрома у больного прямо влияло на величину НД [33].

Величина НД существенно увеличивалась при экспериментальном эмоциональном стрессе у крыс, который вызывали у них стохастическим раздражением вентромедиального ядра гипоталамуса, который считается прессорным центром, и электрокожным раздражением. Увеличение НД свыше 30% было связано с временными остановками дыхания, и сопровождалось последующей гибелью животных. Была обнаружена высокая степень корреляции ($r=0,66$) между уровнем артериального давления и величиной НД в момент раздражения вентромедиального гипоталамуса [43].

Были исследованы изменения НД и ЧД при мнестической деятельности и физической нагрузке людей [44]. Величина ЧД зависела ($r=0,67$) от количества приседаний за определенное время, что полностью соответствовало известным фактам зависимости ЧД от величины физического напряжения организма [14, 21, 45, 46]. Величина НД не была связана с количеством приседаний ($r=0,13$). ЧД не зависела ($r=0,13$), а НД зависела ($r=0,49$) от силы эмоционального напряжения, направленного на запоминание слов.

Сходная зависимость ЧД и НД от физического и эмоционального напряжения была обнаружена у работников завода, занимающихся сборкой электронных изделий [41]. Изменения ЧД были связаны ($r=0,34$) с изменениями времени производственной операции к концу рабочей смены. Изменения НД такой связи не имели ($r=0,13$). Однако изменения НД были связаны ($r=0,44$) с неравномерностью ритма работы, которую определяли по средней относительной разнице между длительностями соседних повторяющихся производственных операций. Изменения ЧД не имели связи с неравномерностью ритма работы ($r=0,01$).

При исследовании вегетативных реакций человека на запахи была обнаружена высокая степень корреляции (r = от 0,56 до 0,81) между НД и одним из самых распространенных показателей эмоционального напряжения организма — величиной кожно-гальванической реакции [36].

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РИТМА ДЫХАНИЯ

Результаты исследования НД при различных функциональных состояниях организма подкрепляют общие положения концепции системного квантования процессов жизнедеятельности [26–29]. Кроме общего теоретического значения измерение НД имеет практическую значимость.

Величина НД явилась одним из объективных прогностических критериев выживаемости животных при остром экспериментальном эмоциональном стрессе [43]. Увеличение НД при раздражении эмоциогенных центров вентромедиального ядра гипоталамуса на величину более 30% свидетельствовало о скорой гибели животного в случае продолжения эмоционального стресса.

Зависимость величины НД от выраженности ноцицептивной реакции у животных [41, 42] и больных пояснично-крестцовым болевым синдромом [33], а также уменьшение НД при обезболивании способствовало созданию нового физиотерапевтического метода лечения больных — микроволновой рефлексотерапии [42, 47].

Измерение величины НД совместно с другими показателями у рабочих в условиях реальной трудовой деятельности на заводе позволило судить о «физиологической цене» выполнения планового задания, что способствовало профотбору и профилактике заболеваемости рабочих [48, 49].

НД явилась одним из объективных критериев оценки мотивации голода у людей при исследовании физиологических механизмов действия на организм пищевых и непищевых запахов [36].

Использование методики расчета НД дало возможность оценить эмоциональные реакции у животных при изучении механизмов самораздражения мозга [50].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Организация ритма дыхания рассмотрена с позиции концепции системного квантования функциональных процессов организма [26–29], что имеет теоретическое значение для развития теории функциональных систем [8, 9, 26, 29]. Каждый дыхательный цикл рассматривается не как часть единого волнового процесса в соответствии с представлениями о биоритмах и не как случайное событие, что подразумевает статистический анализ. Дыхательные циклы обладают прерывно-непрерывными свойствами, и рассматриваются как системокванты ритма дыхания. Предыдущие циклы определяют параметры последующих циклов, что обуславливает континуум циклов дыхания.

Метод количественного определения НД учитывает системоквантовую природу ритма дыхания.

Разработан прием вычисления ошибки НД в зависимости от средней длительности дыхательных циклов и количества исследуемых циклов.

Подтверждено, что ЧД связана с кислородным запросом органов и тканей организма и отражает величину физического напряжения человека или животных. НД отражает величину эмоционального напряжения организма без учета биологического знака эмоции. Величина НД увеличивается при эмоциональном напряжении при умственной работе, боли, остром эмоциональном стрессе. Измерение НД становится инструментом изучения эмоционального напряжения организма при различных функциональных процессах и поведенческих реакциях индивидуума.

Список литературы

1. Средневский В.В. Испуг и его влияние на некоторые физические и психологические аспекты. Дисс. М. 1906. 328 с.
[Srednevsky V.V. Funk and its influence on some of the physical and psychological aspects. Diss. M. 1906. 328 p.]
2. Маршак М.Е. Регуляция дыхания у человека. М. Медгиз. 1961. 267 с.
[Marshak M.E. Regulation of respiration in human. M. Medgiz. 1961. 267 p.]
3. Анохин П.К. Эмоции // БМЭ. М. «Медицина». 1964. Т. 35. С. 339.
[Anokhin P.K. Emotions // GME. M. «Meditsina». 1964. V. 35. P. 339.]
4. Шингаров Г.Х. Эмоции и чувства как форма отражения действительности. М. «Наука». 1971. 223 с.
[Shingarov G.Kh. Emotions and feelings as a form of reflection of reality. M. «Nauka». 1971. 223 p.]
5. Сафонов В.А., Ефимов В.Н., Чумаченко А.А. Нейрофизиология дыхания. М. «Медицина». 1980. 223 с.
[Safonov V.A., Efimov V.N., Chumachenko A.A. Neurophysiology of breathing. M. «Meditsina». 1980. 223 p.]
6. Сафонов В.А., Тарасова Н.Н. Нервная регуляция дыхания // Физиология человека. 2006; 32(4): 64–76.
[Safonov V.A., Tarasova N.N. Nervous regulation of breathing // Fiziologiya cheloveka. 2006; 32(4): 64–76.]
7. Бреслав И.С., Ноздрачев А.Д. Регуляция дыхания: висцеральная и поведенческая составляющие // Успехи физиологических наук. 2007; 38(2): 26–45.
[Breslav I.S., Nozdrachev A.D. Regulation of respiration: visceral and behavioral components // Uspekhi fiziologicheskikh nauk. 2007; 38(2): 26–45.]
8. Анохин П.К. Биология и нейрофизиология условного рефлекса. М. «Медицина». 1968. С. 349–380.
[Anokhin P.K. Biology and neurophysiology of the conditioned reflex. M. «Meditsina». 1968. P. 349–380.]
9. Анохин П.К. Системные механизмы высшей нервной деятельности. М. «Наука». 1979. С. 63, 80–99, 279–289, 354–366, 372.
[Anokhin P.K. System mechanisms of higher nervous activity. M. «Nauka». 1979. P. 63, 80–99, 279–289, 354–366, 372.]
10. Карсен Г.Г., Брейтшер И.Л. Функциональная система дыхания и движения рысистых лошадей // Системный анализ механизмов поведения. М. «Наука». 1979. С. 160–168.
[Karsen G.G., Breitsher I.L. A functional system of breathing and movement of trotting horses // System analysis of mechanisms of behavior. M. «Nauka». 1979. P. 160–168.]
11. Вальдман А.В., Игнатов Ю.Д. Центральные механизмы боли. Л. «Наука». 1976. 192 с.
[Valdman A.V., Ignatov Yu.D. The central mechanisms of pain. L. «Nauka». 1976. 192 p.]
12. Линдсли Д.Б. Эмоции // Экспериментальная психология / Под ред. С.М. Стивенса. М. «ИЛ». 1960. 629 с.
[Lindsly D.B. Emotions // Experimental psychology / Ed. By S.M. Stevens. M. «IL». 1960. 629 p.]
13. Оленьянская Р.П. Регуляция дыхания при работе // Руководство по физиологии труда / Под ред. М.И. Виноградова. М. «Медицина». 1969. С. 171–174.
[Olnyanskaya R.P. Regulation of breathing at work // Manual for labor physiology / Ed. by M.I. Vinogradov. M. «Meditsina». 1969. P. 171–174.]
14. Смирнов К.М. Внешнее дыхание при мышечной деятельности // Физиология мышечной деятельности, труда и спорта. Л. «Наука». 1969. С. 227–241.
[Smirnov K.M. External respiration during muscular activity // Physiology of muscular activity, labor and sport. L. «Nauka». 1969. P. 227–241.]
15. Горшков С.И., Золина З.М., Мойкин Ю.В. Методики исследования в физиологии труда. М. «Медицина». 1974. С. 245–248.
[Gorshkov S.I., Zolina Z.M., Mojkin Yu.V. Methods of research in the physiology of labor. M. «Meditsina». 1974. P. 245–248.]
16. Костандов Э.А. Восприятие и эмоции. М. «Медицина». 1977. 248 с.
[Kostandov E.A. Perception and emotions. M. «Meditsina». 1977. 248 p.]
17. Sebej F. Relationship between respiration characteristics and their changes during psychological load personality traits // Archive news super. 1980. V. 22, N 2. P. 122–123.
18. Хессет Д. Введение в психофизиологию. М. «Мир». 1981. С. 248.
[Hesset D. Introduction to psychophysiology. M. «Mir». 1981. P. 248.]
19. Grubin D., Madsen L. Lie detection and the polygraph: A historical review // J. of forensic psychiatry and psychology. 2005. V. 16. Issue 2. P. 357–369.
20. Haack S. Evidence matters: science, proof, and truth in the law. Cambridge Univ. press. 2014. 416 p.
21. Ramanathan N.L. Reliability of estimation of metabolic levels from respiratory frequency // J. appl. physiology. 1964. V. 19. P. 497–502.
22. Крыжановский Г.Н. Биоритмы и закон структурно-функциональной временной дискретности биологиче-

- ских процессов // Биологические ритмы в механике компенсаторных нарушениях функции. М. 1973. С. 20–23.
[Kryzhanovsky G.N. Biorhythms and the law of structural and functional time is discrete biological processes // Biological rhythms in mechanics of compensatory dysfunction. М. 1973. Р. 20–23.]
23. Климовицкий В.Г., Колодежный А.В., Вертыло Н.А. Применение математической статистики в медико-биологических исследованиях. Донецк. «Донецчина». 2004. 216 с.
[Klimovitsky V.G., Kolodezhny A.V., Vertylo N.A. An application of mathematical statistics in biomedical researches. Donetsk. «Donechchina». 2004. 216 p.]
24. Трухачева Н.В. Математическая статистика в медико-биологических исследованиях с применением пакета statistica. М. «ГЭОТАР-Медиа». 2012. 379 с.
[Trukhacheva N.V. Mathematical statistics in biomedical researches using packet statistica. М. «GEOTAR-Media». 2012. 379 p.]
25. Shahbaba B. Biostatistics with R: An introduction to statistics through biological data. N. Y. Springer. 2012. 352 p.
26. Судаков К.В. Функциональные системы. М. РАМН. 2011. 320 с.
[Sudakov K.V. Functional systems. М. RAMS. 2011. 320 p.]
27. Судаков К.В., Вагин Ю.Е., Андрианов В.В., Зилов В.Г., Киселев И.И. Кванты жизнедеятельности / Под ред. К.В. Судакова. М. Моск. мед. академия. 1993. 260 с.
[Sudakov K.V., Vagin Yu.E., Andrianov V.V., Zilov V.G., Kiselev I.I. Quanta of life activity / Ed. by K.V. Sudakov. М. Mosk. med. academy. 1993. 260 p.]
28. Судаков К.В., Агаянц Г.Ц., Вагин Ю.Е., Толпыго С.М., Умрюхин Е.А. Системокванты физиологических процессов / Под ред. К.В. Судакова. М. Международ. гуманитарн. фонд арменоведения. 1997. 152 с.
[Sudakov K.V., Agayants G.Ts., Vagin Yu.E., Tolpygo S.M., Umryukhin E.A. System-quanta of physiological processes / Ed. by K.V. Sudakov. М. Intern. Hum. Fund of arm. Study. 1997. 152 p.]
29. Вагин Ю.Е. Физиология — теоретическая основа медицины // Сеченовский вестник. 2013; 4(14): 18–24.
[Vagin Yu.E. Physiology as the theoretical basis of medicine // Sechenovsky vestnik. 2013; 4(14): 18–24.]
30. Вагин Ю.Е. Взаимосвязь длительности смежных дыхательных циклов // Физиология человека. 1995; 21(2): 168–170.
[Vagin Yu.E. The correlation between length of adjacent breaths // Fiziologiya cheloveka. 1995; 21(2): 168–170.]
31. Чернышев М.К. Резонансно-поисковые вычислительные методы анализа скрытых колебательных процессов в живых системах // Теоретические и прикладные аспекты анализа временной организации биосистем. М. «Наука». 1976. С. 11–34.
[Chernyshev M.K. Resonant search computational methods for analyzing the hidden oscillatory processes in living systems // Theoretical and applied aspects of the analysis of temporal organization of biological systems. М. «Наука». 1976. Р. 11–34.]
32. Вагин Ю.Е. Ритм дыхания как один из показателей напряженности мотивационно — эмоциональных реакций кроликов // Высшая нервная деятельность. 1982; 32(5): 875–878.
[Vagin Yu.E. Respiratory rate as an indicator of intensity of motivation — emotional reactions of rabbits // Vysshaya nervnaya deyatel'nost'. 1982; 32(5): 875–878.]
33. Вагин Ю.Е., Вагина Л.В., Бацуро С.Г. Оценка эффективности лечения пояснично-крестцового болевого синдрома по степени неравномерности ритма дыхания при наклоне туловища // Невропатология и психиатрия. 1986. Т. 86. В. 8. С. 1155–1158.
[Vagin Yu.E., Vagina L.V., Batsyuro S.G. Evaluation of the effectiveness of treatment of lumbosacral pain for the degree of unevenness in the rate of breathing torso // Nevropatologiya i psikhiatriya. 1986; 86(8): 1155–1158.]
34. Вагин Ю.Е., Шурыгина А.П., Бацуро С.Г. Анализ значения неравномерности ритма импульсной активности при действии медиаторов на нейроны виноградной улитки // Высшая нервная деятельность. 1985; 35(2): 322–329.
[Vagin Yu.E., Shurygina A.P., Batsyura S.G. Analysis of the value of uneven rhythm of pulse activity under the action of mediators on snail neurons // Vysshaya nervnaya deyatel'nost'. 1985; 35(2): 322–329.]
35. Монцевичюте-Эрингене Е.В. Упрощенные математико-статистические методы в медицинской исследовательской работе // Патологическая физиология и экспериментальная терапия. 1964; 8(4): 71–78.
[Montsevichyute-Eringene E.V. Simplified mathematical and statistical methods in medical research // Patologicheskaya fiziologiya i eksperimental'naya terapiya. 1964; 8(4): 71–78.]
36. Вагин Ю.Е., Заузолкова И.И. Оpozнание запаха человеком в зависимости от предшествующего опыта // Физиология человека. 1993; 19(3): 167–170.
[Vagin Yu.E., Zauzolkova I.I. The identification of human odor depending on previous experience // Fiziologiya cheloveka. 1993; 19(3): 167–170.]
37. Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Чирейкин Л.В. и др. Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем: методические рекомендации // Вестник аритмологии. 2001; 24: 65–87.
[Baevsky R.M., Ivanov G.G., Chireikin L.V. et al. Analysis of heart rate variability using different electrocardiographic systems: Guidelines // Vestnik aritmologii. 2001; 24: 65–87.]
38. Баевский Р.М. Анализ вариабельности сердечного ритма: история и философия, теория и практика // Клиническая информатика и телемедицина. 2004. С. 54–64.
[Baevsky R.M. Analysis of heart rate variability: the history and philosophy, theory and practice // Clinical Informatics and telemedicine. 2004. Р. 54–64.]
39. Вагин Ю.Е. Исследование ритма дыхания при раздражении пульпы зуба у кроликов // Стоматология. 1986; 4: 9–11.

- [Vagin Yu.E. Research of breathing rhythm at the dental pulp irritation in rabbits // *Stomatologiya*. 1986; 4: 9–11.]
40. Кассиль Г.Н. Наука о боли. М. «Наука». 1975. 400 с.
[Kassil G.N. Science about pain. M. «*Nauka*». 1975. 400 p.]
 41. Кукушкин М.Л., Хитров Н.К. Общая патология боли. М. «Медицина», 2004. 144 с.
[Kukushkin M.L., Khitrov N.K. General pathology of pain. M. «*Meditsina*». 2004. 144 p.]
 42. Вагин Ю.Е., Вагина Л.В., Бацуро С.Г. Изучение соматовегетативных функций у кроликов при действии электромагнитного поля сверхвысокой частоты на точки акупунктуры // *Научные доклады высшей школы. Биологические науки*. 1985; 10: 50–55.
[Vagin Yu.E., Vagina L.V., Batsyuro S.G. A study of somatic-vegetative functions in rabbits under the influence of ultra-high frequency of electromagnetic fields on acupuncture points // *Nauchnye doklady vysshey shkoly. Biologicheskie nauki*. 1985; 10: 50–55.]
 43. Вагин Ю.Е., Коплик Е.В., Ведяев Д.Ф. Исследования ритма дыхания у крыс в условиях острого эмоционального стресса // *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины*. 1984; 5: 524–526.
[Vagin Yu.E., Koplik E.V., Vedyayev D.F. Studies of respiratory rate in rats with acute emotional stress // *Byulleten eksperimentalnoy biologii i meditsiny*. 1984; 5: 524–526.]
 44. Вагин Ю.Е. Информационное значение частоты и неравномерности ритма дыхания при физическом и эмоциональном напряжении человека // *Высшая нервная деятельность*. 1987; 37(5): 975–978.
[Vagin Yu.E. Data of frequency and uneven rhythm of breathing during physical and emotional stress of man // *Vysshaya nervnaya deyatel'nost*. 1987; 37(5): 975–978.]
 45. Шерпер Ж. Физиология труда (эргономика). М. «Медицина». 1973. С. 190–191.
[Sherrer Zh. Physiology of work (ergonomics). M. «*Meditsina*». 1973. P. 190–191.]
 46. Руководство по физиологии труда / Под ред. З.М. Золиной, Н.Ф. Измеровой. М. «Медицина». 1983. 524 с.
[Guide to the physiology of labor / Ed. by Z.M. Zolina, N.F. Izmerova. M. «*Meditsina*». 1983. 524 p.]
 47. Шестиперов В.А. Новые направления использования сверхвысоких частот в области биологии и медицины // *Электронная промышленность*. 1982; 8(114): 56–63.
[Shestiperov V.A. New ways of using microwaves in the field of biology and medicine // *Elektronnaya promyshlennost*. 1982; 8(114): 56–63.]
 48. Вагин Ю.Е. Информационное значение частоты и аритмичности дыхания у работниц, занятых сборкой мелких деталей // *Гигиена труда и профессиональных заболеваний*. 1985; 10: 51–52.
[Vagin Yu.E. Data of arrhythmia frequency of breathing in female workers engaged in assembling of small parts // *Gigiena truda i professionalnykh zabolevaniy*. 1985; 10: 51–52.]
 49. Вагин Ю.Е., Теребенкова И.А. Оценка динамики работоспособности работниц в течении смены по степени неравномерности ритма дыхания и длительности производственной операции // *Актуальные вопросы физиологии труда. Горький*. 1982. Ч. 1. С. 24–25.
[Vagin Yu.E., Terebenkova I.A. An assessment of the dynamics of health workers during the shift in the degree of unevenness of the rhythm of the breath and length of the production operation // *Topical issues of the physiology of labor. Gorky*. 1982. P. 1. P. 24–25.]
 50. Бадиков В.И. Механизмы динамического взаимодействия положительных и отрицательных эмоций в поведенческих актах. Дисс. д.м.н. М. 1986. 305 с.
[Badikov V.I. Mechanisms of dynamic interaction of positive and negative emotions in behavioral acts. MD Diss. M. 1986. 305 p.]