

## MODEL OF DIAGNOSTICS OF THE PULMONARY SYSTEM BASED ON FMCW RADAR

Balakin D.A., Krivova O.V., Erochkina S.S.

Moscow, Russia, National Research University "Moscow Power Engineering Institute"  
[erochkinas@bk.ru](mailto:erochkinas@bk.ru) [KrivovaOV@mpei.ru](mailto:KrivovaOV@mpei.ru) [dabalakin@yandex.ru](mailto:dabalakin@yandex.ru)

The paper presents a generalized model for diagnosing the pulmonary system based on FMCW radar. The model consists of two parts. The first is a simulation of the operation of the pulmonary system, based on two principles: physical and mechanical modeling. The second part is an FMCW radar model that simulates both the emitted and reflected signal from the human chest. The pulmonary system model and FMCW radar are combined together to form a single model for assessing the state of the human respiratory system

Key words: pulmonary system model, FMCW radar, HIL testing.

## Библиографический список

1. Darcy Bullock, Brian Johnson, Richard B. Wells, Michael Kyte, Zhen Li, Hardware-in-the-loop simulation, Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – V. 12 – 2004 – p. 73-89.
2. Биорадиолокация/ под ред. А.С. Бугаева, С.И. Иващова, И.Я. Иморева. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 396 с.
3. Радиолокационный метод в функциональной диагностике человека/ В.А. Федоров, В.А. Филатов, А.В. Щукин – М. : Изд-во МЭИ, 2020. – 301 с.
4. F. N. Masana, "Lung/airway dynamic model using ABM elements and PSPICE," 2015 22nd International Conference Mixed Design of Integrated Circuits & Systems (MIXDES), Torun, Poland. – 2015 – p. 204-209.
5. Kebe, M.; Gadhaifi, R.; Mohammad, B.; Sanduleanu, M.; Saleh, H.; Al-Qutayri, M. Human Vital Signs Detection Methods and Potential Using Radars: A Review. Sensors. – 2020 – p.1454.
6. Beltrão G, Stutz R, Hornberger F, Martins WA, Tatarinov D, Alae-Kerahroodi M, Lindner U, Stock L, Kaiser E, Goedicke-Fritz S, Schroeder U, R BSM, Zemlin M. Contactless radar-based breathing monitoring of premature infants in the neonatal intensive care unit. – 2022 – p. 15.
7. mathworks.com [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/75012-medical-ventilator-model-in-simscape>.
8. mathworks.com [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/75335-simulation-of-respiratory-mechanics-on-simulink-with-gui>.

◆

**МОНИТОРИНГ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНО-ТКАНЕВЫХ СИСТЕМ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА ВО ВРЕМЯ СНА С ПОМОЩЬЮ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПОРТАТИВНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ**

Янушин В.С.,<sup>1\*</sup> Локтионова Ю.И.,<sup>1</sup> Жарких Е.В.,<sup>1</sup> Клеева Д.Ф.,<sup>2</sup> Сидоров В.В.,<sup>3</sup> Крупаткин А.И.,<sup>4</sup> Дунаев А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева», Россия, г. Орел, \*slava.yanushin@bk.ru,

<sup>2</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия

<sup>3</sup> Общество с ограниченной ответственностью Научно производственное предприятие «ЛАЗМА», Россия, г. Москва,

<sup>4</sup> Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени Н.Н. Приорова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Москва, Россия

Ключевые слова: микроциркуляторно-тканевая система, лазерная доплеровская флоуметрия, флуоресцентная спектроскопия, фазы сна, сомнология.

Аннотация. В статье обсуждается важность мониторинга микроциркуляторно-тканевых систем (МТС) организма человека во время сна. Представлен разработанный метод оценки функционального состояния МТС во время сна, который включает в себя использование распределённой системы портативных мультимодальных анализаторов, реализующих методы лазерной доплеровской флоуметрии и флуоресцентной спектроскопии. Результаты исследования демонстрируют циклические изменения параметров микроциркуляции и окислительного метаболизма в различные фазы сна, подчеркивая важность мониторинга МТС для выявления патологий и оценки эффективности терапии нарушений сна.

Контроль состояния микроциркуляции крови во время сна является важным аспектом мониторинга общего состояния здоровья организма человека. Микроциркуляция крови (МЦК) – это процесс движения крови через мельчайшие сосуды организма, такие как капилляры, артериолы и вены [1]. МЦК играет ключевую роль в обеспечении тканей кислородом и питательными веществами, а также в удалении метаболических продуктов. Во время сна, при процессах восстановления организма и репарации, оптимальная микроциркуляция особенно важна для поддержания клеточного здоровья и функции органов [2]. Недостаточное кровообращение может привести к нарушению этих процессов, что, в свою очередь, может способствовать развитию различных заболеваний, включая сердечно-сосудистые расстройства, нейродегенеративные заболевания и ухудшение когнитивных функций. Диагностика состояния обеспечивающих доставку питательных веществ непосредственно к биотканям микроциркуляторно-тканевых систем (МТС) во время сна позволит не только выявлять нарушения периферического кровотока и окислительного метаболизма, но и оценивать эффективность терапии сомнологических расстройств. Тераностика проблем сна, в частности разработка устройств терапии для коррекции сомнологических расстройств [3], является активно развивающимся направлением современности, требующим получения комплексной диагностической информации о физиологии организма во время различных фаз сна. В связи с чем целью данной работы явилась разработка метода контроля функционального состояния МТС организма человека во время сна.

В настоящее время существует общепринятое деление сна на четыре фазы на основе электроэнцефалографии (ЭЭГ) [4], что представлено таблице 1.

Таблица 1 – Фазы сна

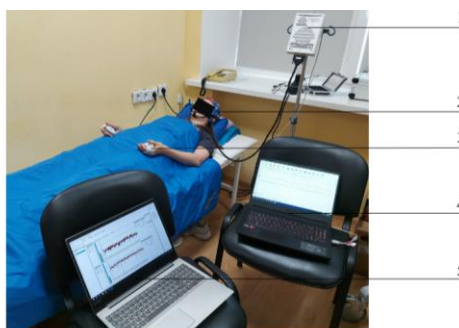
Фаза сна	Описание
Фаза 1 (NREM1)	Дремота, переход от бодрствования ко сну
Фаза 2 (NREM2)	Лёгкий сон, возникновение К-комплексов и сонных веретён
Фаза 3 (NREM3)	Глубокий сон, активация парасимпатической регуляции, возникновение медленных дельта-волн на ЭЭГ
Фаза REM	Быстрый сон, парадоксальная активация симпатического отдела вегетативной нервной системы при активации мозговой деятельности

Одним из наиболее распространённых в настоящее время методов оптической неинвазивной диагностики функционального состояния микрососудистого русла является лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ) [2]. Метод ЛДФ основан на зондировании тканей когерентным лазерным излучением в ближнем инфракрасном диапазоне и анализе отражённого от биологических структур, в том числе форменных элементов крови (эритроцитов), излучения. ЛДФ позволяет оценивать работу механизмов регуляции периферического кровотока, каждый из которых формирует колебания микрососудов в определённом частотном диапазоне. Принято выделять три активных механизма, модулирующих поперечные колебания потока крови со стороны сосудистой стенки через её мышечный компонент, и два пассивных механизма, которые вызывают продольные колебания кровотока вне системы МЦК и проявляются как изменение объёма крови в артериальном и венозном отделах сосудистого русла [1]. К активным механизмам относятся эндотелиальный (0,0095-0,021 Гц), обусловленный продуцированием клетками эндотелия вазодилатирующего соединения – оксида азота NO, нейрогенный (0,021-0,052 Гц), который формируется в результате симпатического адренергического влияния на гладкомышечные стенки артериол, и миогенный вазомоторный (0,052-0,145 Гц), связанный с мышечным тонусом прекапиллярных сфинктеров, регулирующих эффективную составляющую перфузии. Пассивными механизмами являются дыхательный (0,145-0,6 Гц), формируемый динамикой давления венозного отдела ввиду механической активности грудной клетки, и сердечный (0,6–2 Гц), связанный с изменением скорости движения эритроцитов в систолической и диастолической фазах работы сердца.

Для регистрации параметров окислительного метаболизма используется метод флуоресцентной спектроскопии (ФС), основанный на облучении биоткани оптическим излучением с длиной волны в УФ или видимой области спектра с последующей записью спектров автофлуоресценции эндогенных и экзогенных флуорофоров биологической ткани [2].

В ходе выполнения исследования был разработан протокол для долгосрочного мониторинга МТС организма человека с использованием портативных мультимодальных анализаторов «ЛАЗМА ПФ» (ООО НПП «ЛАЗМА», г. Москва), реализующих методы ЛДФ и ФС. Анализаторы размещались симметрично на ладонной поверхности проксимальных фаланг третьих пальцев рук. С целью обеспечения лазерной безопасности и для оптимизации расхода заряда аккумулятора осуществлена модификация режима работы ФС-канала устройства, заключающаяся в увеличении скважности лазерного диода от 4 до 8. Устройства имеют встроенные идентичные каналы регистрации параметра микроциркуляции крови (ПМ), а также кожный термометр и акселерометр для компенсации температурных и двигательных артефактов. В качестве источника излучения в устройствах используется одномодовый вертикально-излучающий лазер с рабочей длиной волны 850 нм и мощностью излучения 1 мВт. Также устройство оснащено каналом ФС, позволяющим регистрировать такие параметры, как обратно отражённое излучение на длине волны источника 365 нм ( $A_{365}$ ), интенсивность флуоресценции НАДН, кофермента участвующего в процессе окислительного метаболизма [5], на длине волны 460 нм ( $A_{460}$ ), а также показатель нормированной амплитуды флуоресценции  $A_{460}/A_{365}$ . Полученные записи разделялись на 10-минутные фрагменты, для каждого из которых проводились расчёты средней перфузии, амплитуд колебаний кровотока, характеризующих активность механизмов регуляции микроциркуляции крови, нутритивного ( $M_{\text{нутр}}$ ) и шунтового ( $M_{\text{шунт}}$ ) кровотока, а также средней нормированной амплитуды интенсивности флуоресценции НАДН.

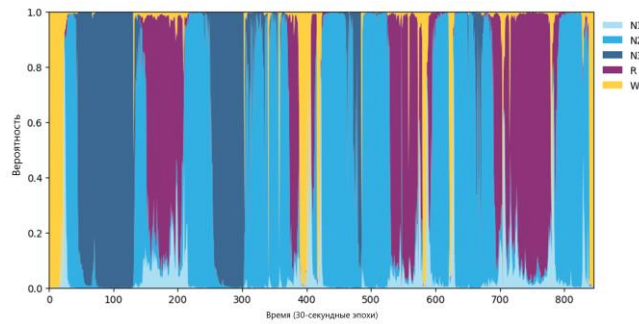
Одновременно с регистрацией параметров МТС проводилась запись электроэнцефалограммы с помощью устройства «Нейрон-Спектр-3» (ООО «Нейрософт», г. Иваново) и электродного шлема MCSCAP Clinic. Исследования проводились на 6 условно-здоровых добровольцах в ночное время суток (с 00:00 до 7:00 ч) во время ночного сна без предварительной депривации в положении лёжа на спине, время каждого измерения составляло от 6 до 7 часов. Расположение добровольцев во время измерения представлено на рисунке 1.



1 – электроэнцефалограф «Нейрон-Спектр-3»; 2 – электродный шлем MCSCAP; 3 – анализаторы «ЛАЗМА ПФ»; 4 – запись параметров электроэнцефалографа; 5 – запись параметров микроциркуляции крови

**Рисунок 1** – Расположения добровольца и устройств во время проведения исследования

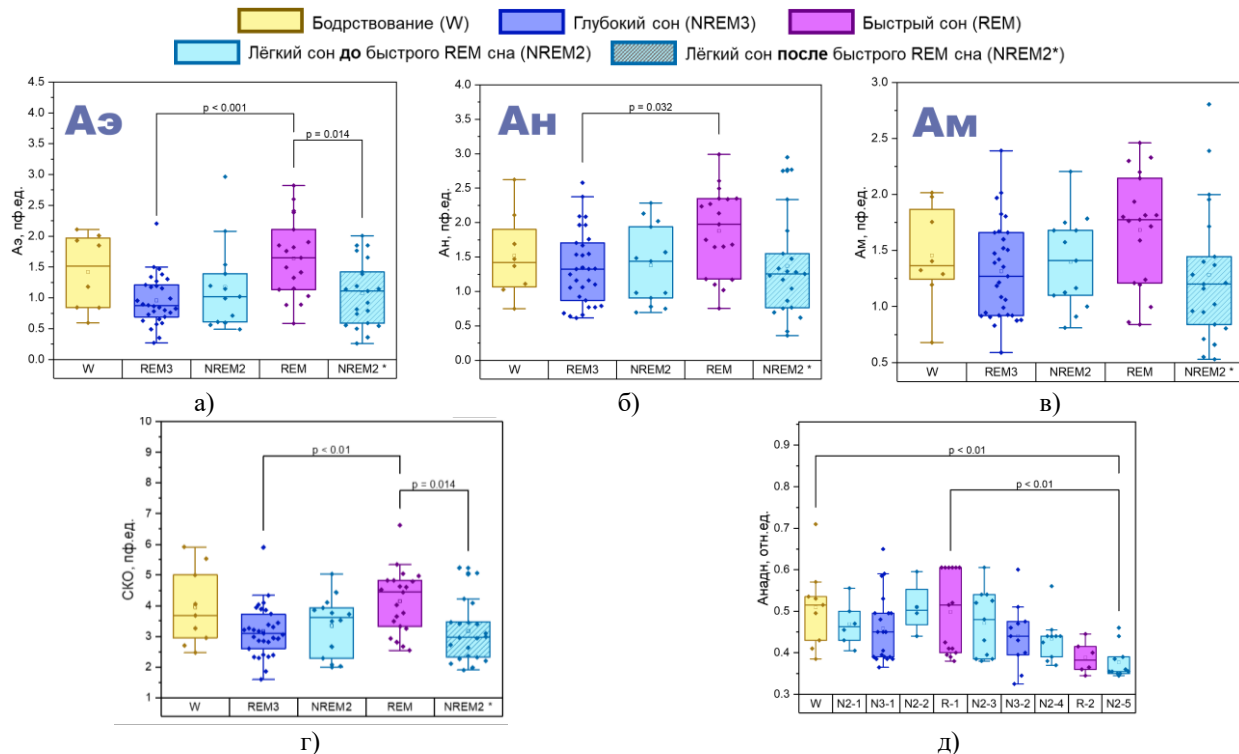
Пример выделения фаз сна на основе ЭЭГ показан на рисунке 2. Запись ЭЭГ разбивается на 30-секундные отрезки (эпохи), после чего для каждого такого временного отрезка определяется вероятность нахождения мозга в одной из фаз сна или в состоянии бодрствования.



**Рисунок 2** – Карта вероятностей фаз сна

(N1 – дремота, N2 – легкий сон, N3 – глубокий сон, R – быстрый сон, W – бодрствование)

Для изучения параметров микроциркуляции крови и окислительного метаболизма во время сна, были рассчитаны среднее квадратическое отклонение ПМ всех добровольцев в течение всего измерения, амплитуды активных ритмов кровотока, таких как эндотелиальные колебания ( $A_э$ ), нейрогенные колебания ( $A_н$ ), миогенные колебания ( $A_м$ ), интенсивность нормированной амплитуды флуоресценции НАДН  $A_{460}/A_{365}$ . Полученные результаты представлены на рисунке 3.



**Рисунок 3** – Анализ параметров МТС: амплитуды колебаний эндотелиального (а), нейрогенного(б) и миогенного (в) механизмов регуляции МЦК, среднеквадратическое отклонение ПМ (г) и нормированная амплитуда флуоресценции НАДН (д)

(статистически значимая разница была подтверждена с использованием U-критерия Манна-Уитни,  $p < 0,05$ )

Результаты исследования показали увеличение среднеквадратического отклонения ПМ во время фазы быстрого сна (REM-фазы). Данное изменение свидетельствует об увеличении модуляции кровотока со стороны активных факторов – рост амплитуд эндотелиальных, нейрогенных и миогенных колебаний во время быстрого сна, как по сравнению со стадией лёгкого сна (NREM2-фазы), так и по сравнению непосредственно с фазой глубокого сна (NREM3-фазы). Такое изменение параметров отражает развитие процессов дилатации микрососудов, и может свидетельствовать о парадоксальном мышечном расслаблении,

характерном для REM-фазы [4]. В то же время в утренние часы у добровольцев наблюдается уменьшение нормированной амплитуды  $A_{460}/A_{365}$ , что свидетельствует об усилении процессов окислительного метаболизма к утру.

В ходе данной работы был разработан протокол длительного мониторинга МТС во время сна с помощью распределённой системы портативных анализаторов, и выполнена оценка функционального состояния МТС во время различных фаз сна. Использование методов лазерной доплеровской флоуметрии и флуоресцентной спектроскопии позволило детально изучить параметры периферического кровотока и окислительного метаболизма в биотканях. Отмечены циклические изменения регуляции микроциркуляторного звена системы кровообращения во время различных фаз сна и постепенные изменения параметров окислительного метаболизма в течение всего сна, характеризующиеся увеличением в начале ночи и снижением в утренние часы. Полученные результаты свидетельствуют о важности мониторинга МТС организма человека во время сна для поддержания здоровья и выявления различных патологий. Эти методы также показывают потенциал для использования в клинической практике для диагностики и оценки эффективности лечения сомнологических расстройств.

Жарких Е.В. и Локтионова Ю.И. благодарят РНФ за финансовую поддержку исследований в рамках проекта №23-25-00522.

#### Библиографический список

1. Крупаткин, А.И. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем: Колебания, информация, нелинейность. Руководство для врачей. Изд. 2-е. / А.И. Крупаткин, В.В. Сидоров – М.: ЛЕНАНД, 2016. – 496 с.
2. Дунаев, А.В. Мультимодальная оптическая диагностика микроциркуляторно-тканевых систем организма человека / А.В. Дунаев. – Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2022. – 440 с.
3. Патент № 2796872 С1 Российская Федерация, МПК А61N 5/06. Устройство для транскраниальной фототерапии в состоянии глубокого сна: № 2022118857: заявл. 11.07.2022: опубл. 29.05.2023 / В.Б. Агеев, И.В. Федосов, О.В. Семячкина-Глушковская; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».
4. Miller, D. J. A Validation of Six Wearable Devices for Estimating Sleep, Heart Rate and Heart Rate Variability in Healthy Adults / D. J. Miller, Ch. Sargent, G. D. Roach // Sensors. – 2022. – V. 22. – № 16. – P. 6317.
5. Жеребцов, Е.А. Флуоресцентная диагностика митохондриальной функции в эпителиальных тканях in vivo: монография / Е.А. Жеребцов, В.В. Дрёмин, А.И. Жеребцова, Е.В. Потапова, А.В. Дунаев. – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2018. – 107 с.
6. Dunaev, A.V. Wearable Devices for Multimodal Optical Diagnostics of Microcirculatory-Tissue Systems: Application Experience in the Clinic and Space / A.V. Dunaev // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. – 2023. – V. 9. – № 2. – P. 020201.
7. Altevogt, B.M. Sleep disorders and sleep deprivation: an unmet public health problem / B.M. Altevogt, H.R. Colten. – National Academies Press, 2006. – 424 p.
8. Локтионова, Ю.И. Портативные мультимодальные анализаторы в мониторинге микроциркуляторно-тканевых систем организма человека во время сна / Ю.И. Локтионова, Е.В. Жарких, Д.Ф. Клеева, В.Е. Паршакова, В.В. Сидоров, А.И. Крупаткин, А.В. Дунаев // Современные методы исследования в клеточной биологии и медицине: сборник трудов Всероссийской конференции, г. Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2023. – С. 45.

#### MONITORING OF THE MICROCIRCULATORY-TISSUE SYSTEMS OF THE HUMAN BODY DURING SLEEP USING MULTIMODAL PORTABLE ANALYZERS

Yanushin V.S.,<sup>1\*</sup> Loktionova Yu.I.,<sup>1</sup> Zharkikh E.V.,<sup>1</sup> Kleeva D.F.,<sup>2</sup> Sidorov V.V.,<sup>3</sup> Krupatkin A.I.,<sup>4</sup> Dunaev A.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Orel State University, Orel, Russia \*slava.yanushin@bk.ru,

<sup>2</sup> National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia



<sup>3</sup> SPE “LAZMA” Ltd, Moscow, Russia

<sup>4</sup> Priorov Central Research Institute of Traumatology and Orthopaedics, Moscow, Russia

Key words: microcirculatory-tissue systems, laser Doppler flowmetry, fluorescence spectroscopy, sleep phases, somnology.

Abstract. The paper discusses the importance of monitoring the microcirculatory-tissue systems (MTS) of the human body during sleep. The developed method for assessing the functional state of MTS during sleep is presented, which includes the use of distributed system of portable multimodal analyzers implementing laser Doppler flowmetry and fluorescence spectroscopy methods. The study results demonstrate cyclic changes in microcirculation and oxidative metabolism parameters during different sleep phases, emphasizing the importance of MTS monitoring for detecting pathologies and evaluating the effectiveness of sleep disorder therapy.

## СТРУКТУРА АНАЛИЗА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Саиф М. Г.; Р.М. Аббас

[Saifmohammed24000@gmail.com](mailto:Saifmohammed24000@gmail.com)

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

### Аннотация

Анализ главных компонент — это метод аппроксимации данных при сохранении большей части вариаций данных. Цель анализа главных компонент достигается путем расчета ковариационной матрицы данных, а затем идентификации собственных векторов ковариационной матрицы, вдоль которых вариация данных максимальна, которые представляют главные компоненты. После того как собственные векторы ковариационной матрицы идентифицированы, точки данных проецируются вдоль выбранных собственных векторов. В этой статье представлены основы анализа главных компонент, чтобы показать, как он работает.

### Ключевые слова

Анализ главных компонент; ковариационная матрица; собственные векторы; собственные значения.

### Введение

Анализ главных компонент — это метод аппроксимации данных при сохранении большей части вариаций данных [1]. Хотеллинг [2] и Пирсон [3] впервые представили метод главных компонент. Однако практическое применение метода главных компонент было связано с появлением компьютерных технологий [4]. Анализ главных компонент стал более частым явлением в науке о данных с быстрым развитием искусственного интеллекта и машинного обучения [5]. Идея анализа главных компонент заключается в уменьшении размерности данных при сохранении большей изменчивости набора данных [4]. Анализ главных компонент широко используется при визуализации многомерных данных [6]. Кроме того, анализ главных компонент используется как метод извлечения признаков в машинном обучении [7]. Математическая основа анализа главных компонент называется собственным анализом, что означает вычисление собственных векторов, соответствующих собственным значениям ковариационной матрицы данных [4, 8]. Собственный вектор, соответствующий наибольшему собственному значению, определяет направление первого главного компонента; второе по величине собственное значение определяет второй собственный вектор и так далее. Цель этой статьи — предоставить четкий рабочий процесс и математическую основу анализа главных компонент.

### Рабочий процесс анализа главных компонент

Набор трехмерных данных, показанный в таблице 1, взят в этой статье в качестве примера для иллюстрации рабочего процесса анализа главных компонент.

#### Шаг 1: Стандартизация

Первым шагом в рабочем процессе анализа главных компонент является стандартизация переменной, как показано в таблице 2; стандартизация — это процесс объединения переменных в одной шкале со средним значением, равным нулю, и стандартным отклонением, равным единице. Стандартизация является важным шагом, поскольку анализ главных компонент направлен на то, чтобы показать дисперсии переменных, поэтому важно, чтобы все переменные имели потенциал, чтобы вносить равный вклад в главные компоненты [9]. В противном случае переменные более крупного масштаба будут оказывать большее влияние на главные компоненты за счет переменных более мелкого масштаба. Кроме того, нулевое среднее