

СНИЖЕНИЕ НЕКАРДИАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА В СИСТЕМАХ ДОЛГОСРОЧНОГО АМБУЛАТОРНОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ СЕРДЦА

М. И. Сафронов

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
safronov.maxim@inbox.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Поднимается проблема снижения некардиальной составляющей электрокардиосигнала в записях долгосрочного мониторинга электрической активности сердца, исследование которой в настоящее время строится на применении классических методов фильтрации дискретных сигналов, что не позволяет в полной мере оценить влияние некардиальных факторов на форму электрокардиограммы. *Материалы и методы.* Для снижения некардиальной составляющей электрокардиосигнала в записях долгосрочного мониторинга электрической активности сердца автором предлагается применять адаптивную фильтрацию электрокардиосигнала с помощью реконструкционного фильтра с нелинейной передаточной характеристикой, параметры которой определяются на основании измерения модуля биоимпеданса тканей грудного отдела пациента. *Результаты.* На основе результатов измерения модуля биоимпеданса была получена нелинейная характеристика реконструкционного фильтра, с помощью которого была проведена процедура восстановления формы электрокардиограммы и рассчитана относительная приведенная погрешность восстановления формы. *Выводы.* Принципиальное отличие предлагаемого автором подхода заключается в применении новых методов нелинейной фильтрации дискретных сигналов, основанных на применении дополнительной информации о характере влияющих воздействий.

Ключевые слова: фильтрация, биоимпеданс, электрокардиограмма, измерения, мобильный мониторинг, долгосрочный мониторинг

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90165.

Для цитирования: Сафронов М. И. Снижение некардиальной составляющей электрокардиосигнала в системах долгосрочного амбулаторного мониторинга состояния сердца // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2022. № 3. С. 179–186. doi:10.21685/2227-8486-2022-3-12

INCREASING THE INFORMATIVENESS OF CARDIAC CYCLES IN SYSTEMS OF LONG-TERM OUTPATIENT CARE HEART MONITORING

M.I. Safronov

Penza State University, Penza, Russia
safronov.maxim@inbox.ru

Abstract. *Background.* The paper raises the problem of reducing the non-cardiac component of the electrocardiosignal in the recordings of long-term monitoring of the electrical activity of the heart, a study that is currently based on the use of classical methods for filtering discrete signals, which does not allow to fully assess the influence of non-cardiac factors on the shape of the electrocardiogram. *Materials and methods.* To reduce the non-cardiac component of the electrocardiosignal in the recordings of long-term monitoring of the electrical activity of the heart, the author proposes to use adaptive filtering of the electrocardiosignal using a reconstruction filter with a nonlinear transfer characteristic, the parameters of which are determined based on the measurement of the bioimpedance modulus of the patient's thoracic tissues. *Results.* Based on the results of measuring the bioimpedance modulus, a nonlinear characteristic of the reconstruction filter was obtained, with the help of which the procedure for restoring the shape of the electrocardiogram was carried out and the relative reduced shape recovery error was calculated. *Conclusions.* The fundamental difference of the approach proposed by the author lies in the application of new methods of nonlinear filtering of discrete signals based on the use of additional information about the nature of the influencing impacts.

Keywords: filtration, bioimpedance, electrocardiogram, measurements, mobile monitoring, long-term monitoring

Acknowledgments: the reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90165.

For citation: Safronov M.I. Increasing the informativeness of cardiac cycles in systems of long-term outpatient care heart monitoring. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2022;(3):179–186. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2022-3-12

Введение

Контроль состояния пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями (ССЗ) производится с помощью долговременного мониторинга электрической активности сердца (ЭАС). В условиях медицинского стационара врач имеет возможность постоянного контроля состояния сердечно-сосудистой системы (ССС) пациента. Стационарные условия при долговременном мониторинге ЭАС характеризуются незначительным влиянием некардиальных процессов на форму электрокардиограммы (ЭКГ).

Кардиальными [1] процессами называют такие процессы, которые обусловлены функционированием сердца (процессы реполяризации и деполяризации желудочков и т.д.). К **некардиальным** процессам относят все остальные процессы, влияющие на форму кардиоцикла ЭКГ (электромагнитные помехи, двигательная активность пациента, потоотделение и т.д.). На основе анализа только ЭКГ **нельзя** оценить влияние некардиальных процессов на форму кривой ЭКГ.

При долговременном **амбулаторном** мониторинге ЭАС имеет место снижение информативности записей долговременного мониторинга за счет роста интенсивности влияния некардиальных процессов на форму ЭКГ [2]. При амбулаторном мониторинге ЭАС врач не имеет возможности постоянного контроля состояния ССС пациента, и для повышения эффективности работы врача-кардиолога современные медицинские информационные системы (МИС) предоставляют только информативные участки ЭКГ: функция определения информативных участков в записи долговременного мониторинга ЭАС выполняется медицинской системой (Холтеровским монитором) в автоматическом режиме на основе анализа ЭКГ.

В связи с вышесказанным актуальной задачей является определение критерия информативности кардиоцикла, позволяющего осуществлять контроль кардиоциклов с их разделением на *информативные* и *неинформативные* с учетом оценки влияния некардиальных процессов.

Материалы и методы

Для определения некардиальной составляющей электрокардиосигнала использовалась база данных сигналов *MIT-BIH Normal Sinus Rhythm Database (nsrdb 1.0.0)* [2] от *PhysioNet* [3]. Эта база данных включает 18 долгосрочных записей ЭКГ у пациентов, направленных в Лабораторию исследования аритмий Бостонской больницы Бет Исраэль (ныне Медицинский центр Бет Исраэль Диаконисс). Известно, что у субъектов, включенных в эту базу данных, отклонений в работе сердечно-сосудистой обнаружено не было.

Регистрация ЭКС и измерение мгновенных значений модуля биоимпеданса осуществлялись с помощью отладочного набора *MAX30001EVSYS_EVKIT* на базе специализированного АЦП для регистрации биопотенциалов *MAX30001*. Внешний вид отладочного набора *MAX30001EVSYS_EVKIT* представлен на рис. 1.

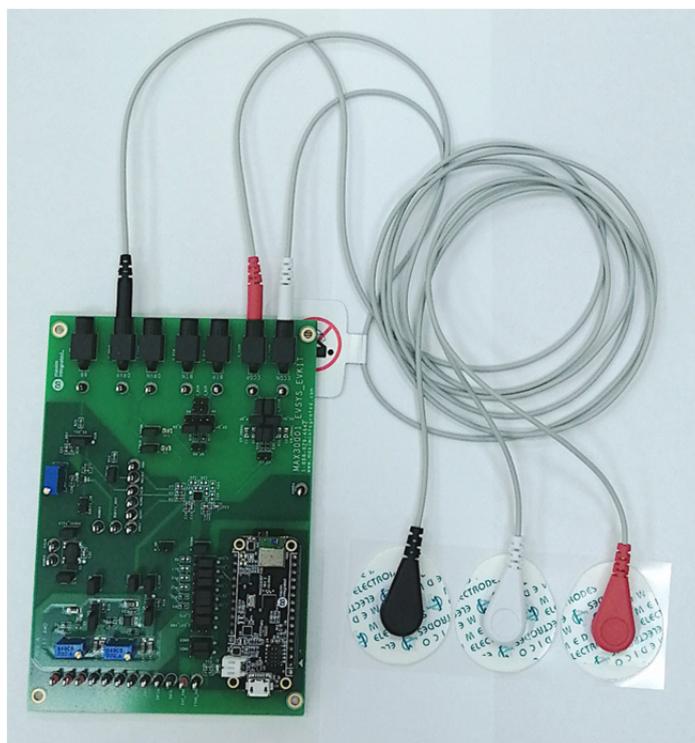


Рис. 1. Внешний вид отладочного набора *MAX30001EVSYS_EVKIT*

С помощью отладочного набора *MAX30001EVSYS_EVKIT* осуществлялись регистрация ЭКС и синхронное измерение модуля биоимпеданса. Далее с помощью специализированного программного обеспечения полученные сигналы передавались с отладочного набора в персональные компьютеры в виде структурированного текста в формате *.csv* по протоколу *USB* [4].

Отладочное программное обеспечение представляет собой графическое пользовательское приложение (рис. 2) для визуальной конфигурации всех функций отладочного набора, таких как настройка канала регистрации ЭКГ (*ECG Channel*), настройка канала измерения модуля биоимпеданса (*BioZ Channel*), настройка внутреннего мультиплексора, отображение графиков ЭКГ, модуля биоимпеданса и *RR*-интервала в реальном времени (*Plots*) и настройка функции записи данных регистрации ЭКС и измерений модуля биоимпеданса, а также выделенных *R*-зубцов и импульсов кардиостимулятора на *microSD*-карту (*MicroSD Log*).

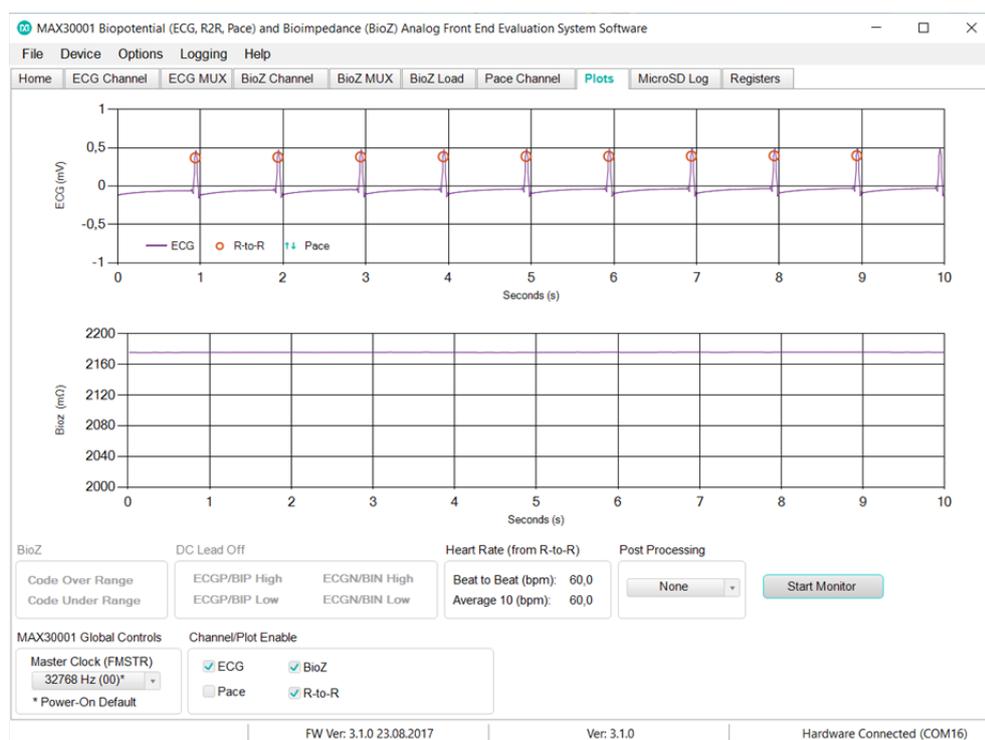


Рис. 2. Внешний вид ПО для взаимодействия с *MAX30001EVSYS*

Формат файлов с данными регистрации ЭКС имеет вид, приведенный в табл. 1.

Таблица 1

Формат данных регистрации ЭКС

Time (s)	ECG_DATA [17:0]	ETAG [2:0]	PTAG [2:0]	ECG (mV)	ECG Filtered (mV)	Filter Type,
0,01562	-1	0	7	-0,00038146...	-0,00038146...	None

Представленное программное обеспечение позволяет производить полный спектр операций с отладочным набором *MAX30001EVSYS_EVKIT*, а именно осуществлять одновременную регистрацию электрокардиосигнала с частотой 512 Гц [5] и измерение параметров комплексного сопротивления кожного покрова (*Z*) с частотой 32 Гц.

Результаты и обсуждение

Известно, что помимо нелинейного влияния электрокардиосигнал, биоимпеданс кожного покрова – величина нестационарная и, как следствие, может изменяться даже в рамках одного кардиоцикла [6]. Ключевой задачей является определение изменения значения биоимпеданса ($Z_{\text{смещ}}$) от некоего нормального значения (Z_0) [7]. Пример изменения значений модуля биоимпеданса представлен на рис. 3. Таким образом, необходимо компенсировать не влияние биоимпеданса в общем, а минимизировать влияние случайных изменений биоимпеданса, вызываемых некардиальными факторами. Приведение значений модуля биоимпеданса к нормальному значению Z_0 на протяжении всей записи долгосрочного мониторинга позволит добиться минимизации влияния некардиальных факторов [8].

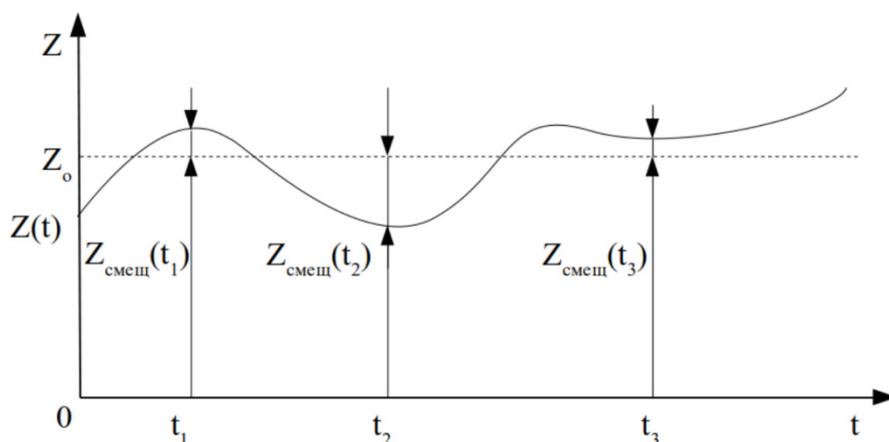


Рис. 3. Изменения параметров биоимпеданса кожного покрова во времени

Существующая модель формирования потенциала на поверхности сердца $\phi_{\text{от}i}$, представленная формулой (1), основана на представлении о чисто активном характере и неизменности значения сопротивления тканей организма в процессе регистрации электрокардиосигнала:

$$\sum_{i=1}^N \phi_{\text{от}i} = R_{\text{от}} \sum_{i=1}^N I'_{\text{ioni}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{от}}$ – сопротивление тканей тела; I'_{ioni} – значения тока реполяризации эпикарда в опорных точках модели сердца пациента.

Для учета кардинальной составляющей электрокардиосигнала была предложена модель, которая учитывает не только активную составляющую, но и реактивную составляющую импеданса тканей организма в процессе регистрации электрокардиосигнала. Предлагаемая модель представлена формулой

$$\sum_{i=1}^N \phi_{\text{от}i} = z_{\text{от}} e^{jPH} \sum_{i=1}^N I'_{\text{ioni}}. \quad (2)$$

Снижение некардиальной составляющей электрокардиосигнала в записях долгосрочного мониторинга ЭКС достигается путем коррекции формы

сигнала за счет введения поправок соответствующих отсчетах кардиоцикла [8]. В качестве оценки погрешности восстановления формы ЭКС целесообразно применять математическую модель погрешности, представленную формулой

$$\gamma = \frac{x_{\text{изм}} - x_{\text{дейст}}}{(2,5 - (-2,5)) \cdot 10^{-3}} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где $x_{\text{изм}}$ – результат измерения напряжения в момент времени t_n (напряжение до адаптивной фильтрации), В; $x_{\text{дейст}}$ – действующее значение напряжения (напряжение после адаптивной фильтрации), В; константы $\pm 2,5 \cdot 10^{-3}$ – границы диапазона измерений отладочного набора *MAX30001EVSYS_EVKIT* в вольтах.

Наиболее часто применяемая оценка в форме относительной погрешности в данном случае является неинформативной из-за того, что абсолютная погрешность сравнима со значением самой величины ввиду малой амплитуды сигналов (от 10^{-6} до 10^{-3} В) [9]. Форма сигнала связана с результатом измерения напряжения типовой чувствительности средства отображения ЭКС, равной $\frac{1 \text{ мВ}}{10 \text{ мм}}$.

Результат вычисления приведенной погрешности при измерении мгновенных значений напряжения при долгосрочной регистрации ЭКС с типовой чувствительностью $\frac{1 \text{ мВ}}{10 \text{ мм}}$ представлен на рис. 4.

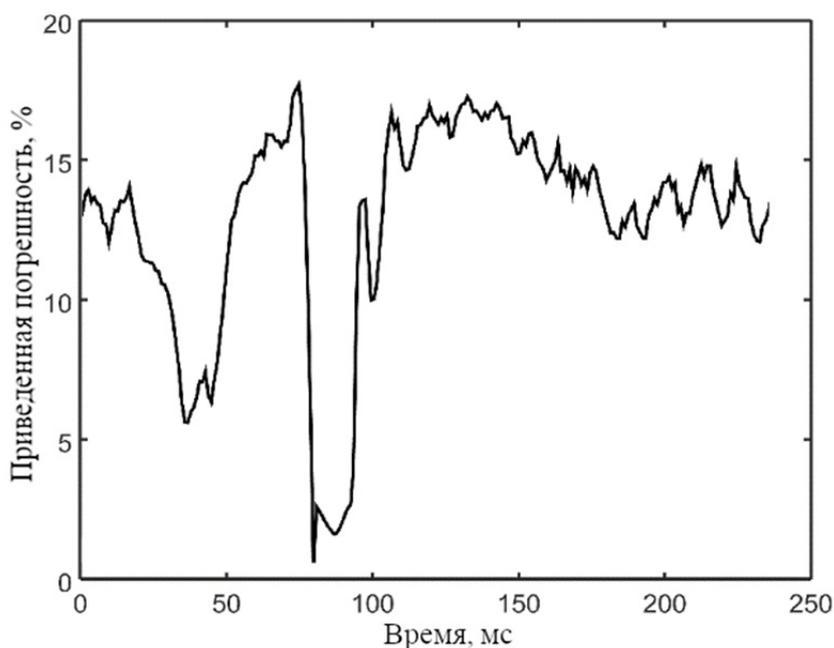


Рис. 4. Распределение приведенной погрешности внутри кардиоцикла

Так как адаптивная фильтрация электрокардиосигнала осуществляется с помощью фильтра с нелинейной характеристикой и на разных участках

сигнала может принимать разные значения, то для оценки величины приведенной погрешности для конкретного кардиоцикла необходимо рассчитать значение приведенной погрешности для каждого отсчета дискретного электрокардиосигнала в рамках этого кардиоцикла [10].

Заключение

Снижение некардиальной составляющей электрокардиосигнала в записях долгосрочного мониторинга ЭКС было достигнуто путем коррекции формы сигнала за счет введения поправок во всех дискретных отсчетах кардиоцикла. Поправочные коэффициенты были рассчитаны на основании новой модели формирования потенциала на поверхности сердца, учитывающей изменение некардиальной составляющей электрокардиосигнала. Влияние некардиальной составляющей электрокардиосигнала оценивалось как суммарное влияние активной и реактивной составляющей биоимпеданса кожного покрова.

Список литературы

1. Макаров Л. М., Комолятова В. Н., Куприянова О. О. [и др.]. Национальные российские рекомендации по применению методики холтеровского мониторирования в клинической практике // Российский кардиологический журнал. 2014. № 2. С. 6–71.
2. McSharry P. E., Clifford G. D., Tarassenko L., Smith L. A dynamical model for generating synthetic electrocardiogram signals // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2003. Vol. 50. P. 289–294.
3. Goldberger A., Amaral L., Glass L. [et al.]. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a new research resource for complex physiologic signals // Circulation. 2000. № 101. P. 215–220.
4. Карпов О. Э., Храмов А. Е. Информационные технологии, вычислительные системы и искусственный интеллект в медицине. М. : ДПК Пресс, 2022. 480 с.
5. Ефимова О. И., Павлова Т. В., Пыщева Л. В., Хохлунов С. М. Оценка эффективности комплексной системы амбулаторного мониторинга пациентов с фибрилляцией предсердий, перенесших кардиоэмболический инсульт // Российский кардиологический журнал. 2021. № 26 (1S). С. 4402.
6. Bera T. K. Bioelectrical Impedance Methods for Noninvasive Health Monitoring: A Review // Journal of Medical Engineering. 2014.
7. Braun F., Proença M., Wendler A. [et al.]. Noninvasive measurement of stroke volume changes in critically ill patients by means of electrical impedance tomography // Journal of Clinical Monitoring and Computing. 2020. Vol. 34. P. 903–911.
8. Сафронов М. И., Кузьмин А. В., Бодин О. Н. [и др.]. Способ и аппаратно-программные средства анализа биоимпеданса для систем мобильного мониторинга ЭКГ // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2020. № 3. С. 118–128.
9. Hafid A., Benouar S., Kadir-Talha M. [et al.]. Simultaneous recording of ICG and ECG using Z-RPI device with minimum number of electrodes // Journal of Sensors. 2018. № 9. P. 1–7.
10. Posada-Quintero H. F., Reljin N., Eaton-Robb C. [et al.]. Analysis of Consistency of Transthoracic Bioimpedance Measurements Acquired with Dry Carbon Black PDMS Electrodes, Adhesive Electrodes, and Wet Textile Electrodes // Sensors (Basel). 2018. Vol. 18, № 6.

References

1. Makarov L.M., Komolyatova V.N., Kupriyanova O.O. et al. National Russian recommendations on the use of Holter monitoring techniques in clinical practice. *Rossiyskiy kardiologicheskii zhurnal = Russian Journal of Cardiology*. 2014;(2):6–71. (In Russ.)
2. McSharry P.E., Clifford G.D., Tarassenko L., Smith L. A dynamical model for generating synthetic electrocardiogram signals. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2003;50:289–294.
3. Goldberger A., Amaral L., Glass L. et al. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a new research resource for complex physiologic signals. *Circulation*. 2000;(101):215–220.
4. Karpov O.E., Khramov A.E. *Informatsionnye tekhnologii, vychislitel'nye sistemy i iskusstvennyy intellekt v meditsine = Information technologies, computing systems and artificial intelligence in medicine*. Moscow: DPK Press, 2022:480. (In Russ.)
5. Efimova O.I., Pavlova T.V., Pyshcheva L.V., Khokhlunov S.M. Evaluation of the effectiveness of the complex system of outpatient monitoring of patients with atrial fibrillation who have suffered a cardioembolic stroke. *Rossiyskiy kardiologicheskii zhurnal = Russian Journal of Cardiology*. 2021;(26):4402. (In Russ.)
6. Bera T.K. Bioelectrical Impedance Methods for Noninvasive Health Monitoring: A Review. *Journal of Medical Engineering*. 2014.
7. Braun F., Proença M., Wendler A. et al. Noninvasive measurement of stroke volume changes in critically ill patients by means of electrical impedance tomography. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*. 2020;34:903–911.
8. Safronov M.I., Kuz'min A.V., Bodin O.N. et al. Method and hardware-software tools for bioimpedance analysis for mobile ECG monitoring systems. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2020;3:118–128. (In Russ.)
9. Hafid A., Benouar S., Kedir-Talha M. et al. Simultaneous recording of ICG and ECG using Z-RPI device with minimum number of electrodes. *Journal of Sensors*. 2018;(9):1–7.
10. Posada-Quintero H.F., Reljin N., Eaton-Robb C. et al. Analysis of Consistency of Transthoracic Bioimpedance Measurements Acquired with Dry Carbon Black PDMS Electrodes, Adhesive Electrodes, and Wet Textile Electrodes. *Sensors (Basel)*. 2018;18(6).

Информация об авторах / Information about the authors

Максим Игоревич Сафронов

аспирант,

Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: safronov.maxim@inbox.ru

Maksim I. Safronov

Postgraduate student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 30.06.2022

Поступила после рецензирования/Revised 11.08.2022

Принята к публикации/Accepted 02.09.2022