

## Спектральный анализ ЭЭС испытуемых с тревожно-фобическими расстройствами в среде виртуальной реальности

### Аннотация

Виртуальная реальность на настоящем этапе развития информационных технологий находит широкое применение в различных сферах жизнедеятельности человека, в том числе для оценки психоэмоционального состояния здоровья. Спектральный анализ максимальной мощности ЭЭГ на различных частотных диапазонах позволит определить маркеры тревожно-фобических расстройств. В рассматриваемой работе проведен эксперимент по оценке психоэмоционального состояния людей с акробией в различных состояниях: покой, нахождение в шлеме виртуальной реальности, воздействие стрессового стимула (высота в сцене виртуальной реальности). Приведены диаграммы плотности распределения максимальной мощности в отдельных частотных диапазонах ЭЭГ. Полученные значения могут быть использованы в качестве критериев оценки тревожно-фобических расстройств с применением технологии виртуальной реальности.

### Введение

На современном этапе развития информационных технологий наблюдается тенденция глобальной цифровизации различных сфер жизнедеятельности человека, в том числе здравоохранения. Технология виртуальной реальности (VR) является тому наглядным подтверждением. В настоящее время VR используется в игровой индустрии, симуляторах различного назначения, для диагностики различных патологических состояний в медицине, для проведения реабилитационных мероприятий. Одним из ключевых направлений применения VR в медицине стала область неврологии и психиатрии [1]. Причиной этому послужили продолжительные ковидные ограничения, ввиду которых населению потребовались системы удаленной коммуникации, позволяющие организовать связь человека с врачом, в том числе дистанционно.

В настоящее время существует явный пробел в объективной оценке тревожно-фобических расстройств при помощи инструментальных и удаленных методов исследования. На современном этапе развития оценка тревожно-фобических расстройств проводится путем анкетирования и опроса врачом. В настоящее время инструментальные и лабораторные методы исследования используются только как дополнительные и не регламентированы медицинским стандартом, а применяются только с целью исключения органических патологий.

В рассматриваемой работе предлагается использовать технологию VR для создания новых способов объективной оценки тревожно-фобических расстройств.

### Виртуальная реальность в диагностике и лечении тревожно-фобических расстройств

Виртуальная реальность – это иммерсивная технология компьютерного представления информации, генерируемая при помощи реалистичных изображений, звуков и других ощущений, которая дает пользователю ощущение пребывания в альтернативной среде. Основная цель VR – заменить реальность виртуальной средой, созданной компьютером [2].

Согласно [3], технология VR развивается с момента выпуска первых гарнитур VR в 1960-х годах. В настоящее время различные гарнитуры VR стали доступнее и безопаснее, благодаря чему вызвали наибольший интерес у исследователей в медицинском направлении. Первый опыт взаимодействия с VR получен более пятидесяти лет назад. В настоящее время число пользователей VR насчитывает более 50 млн. человек. По различным прогнозам, к 2030 году число пользователей VR составит 1 млрд человек.

В современной медицине испытания, направленные на клиническое применение VR в работе с пациентами, имеющими тревожно-фобические расстройства, немногочисленны.

Использование VR, в отличие от классических терапевтических методов воздействия, позволяет передавать аудиови-

зуальную информацию с большим уровнем реалистичности и моделировать устойчивую во времени среду, позволяющую человеку (пользователю, пациенту) в полной мере испытать эмоции. Прогнозируется, что VR будет иметь более высокую эффективность при работе с людьми, имеющими тревожно-фобические расстройства, в сравнении с классическими терапевтическими методами лечения [4].

Тревожно-фобические расстройства регистрируются у 25 % населения Земли. Большинство фобий, кроме социальных, чаще наблюдаются у женщин. Соотношение женщин и мужчин при агорафобии – 4:1; при социофобии – 1:1; при специфических (изолированных) фобиях – 2:1.

Среди специфических фобий наиболее распространены страхи высоты и животных, которые чаще встречаются в детском и подростковом возрасте [5]. Фобии могут проявляться в течение нескольких лет или десятилетий и являются предиктором возникновения погранично-психических расстройств.

Тревожно-фобическое расстройство – это тип тревожного расстройства, определяемый как постоянный страх перед каким-либо объектом или ситуацией.

В классификации тревожно-фобических расстройств выделяют [6], [7]:

- 1) агорафобию – синдром измененного пространственного восприятия, когнитивных искажений относительно безопасного передвижения, вызванных страхом ограничений подвижности. Людям с агорафобией свойственна боязнь и избегание общественных мест и больших скоплений людей;
- 2) социальные фобии – наиболее распространенное тревожное расстройство, которому свойственно крайнее избегание и постоянный страх перед большинством социальных ситуаций;
- 3) специфические фобии – навязчивый страх животных (собак, кошек, пауков, змей), людей, окружающей среды (темнота, высота, грозы) или ситуации (полет на самолете, езда на поезде, нахождение в замкнутом пространстве).

Согласно [8], акробия классифицируется как одна из распространенных специфических фобий. Пациенты, страдающие акробией, характеризуются выраженной тревогой при воздействии высоты. Поведенческая дисфункция включает в себя вмешательство в нормальную рутину или межличностные отношения. Экспозиция стимула, приводящего к появлению акробии, может оказывать сильное влияние на пользователя.

Экспозиционная терапия тревожно-фобических расстройств с использованием технологии VR состоит из поэтапного погружения в обстановку или ситуацию, которая вызывает страх. Постепенно чувство страха у пользователей становится менее выраженным и ситуация становится более комфортной. Технология VR позволяет оперативно погрузиться в смоделированную стрессовую ситуацию за счет воздействия на зрительные, слуховые и тактильные рецепторы человека [4].

Терапия тревожно-фобических расстройств с применением ВР заключается в экспозиции человеку ситуации, при погружении в которую возникает иррациональный страх. Тренинг экспозиционной терапии – дозированная стрессовая нагрузка под контролем индивидуальных стрессовых реакций. Например, если у человека акрофобия, то он погружается в сцену с минимальной высотой над уровнем земли. С постепенным привыканием пользователя к окружающей обстановке уровень высоты увеличивается. Таким образом, чувство страха ослабевает и обстановка, которая его вызывала, становится комфортной. За счет использования ВР человек может погрузиться в ситуацию и испытать спектр положительных, нейтральных или отрицательных эмоций [9], [10].

### Постановка эксперимента исследования

Для оценки тревожно-фобических расстройств с применением технологии ВР разработана схема проведения эксперимента (рис. 1). Цель эксперимента – продемонстрировать и систематизировать ответную реакцию испытуемого, погружаемого в среду ВР, на стрессовый стимул, вызывающий иррациональный страх высоты. Все исследования проводились в соответствии с протоколом клинического исследования, утвержденным на заседании локального комитета по этике ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» (протокол № 8 от 29 апреля 2022 г.).

Всем испытуемым был осуществлен физикальный осмотр врачом-неврологом, проведено исследование неврологического статуса, нейропсихологическое обследование с использованием шкал тревоги.

Для проведения исследования была сформирована группа испытуемых из 12 условно здоровых мужчин в возрасте от 23 до 26 лет, которые отрицали хронические соматические заболевания в анамнезе и органические заболевания головного мозга. Все испытуемые дали согласие на погружение в виртуальную среду и не получали компенсации за участие.

На начальном этапе эксперимента каждый испытуемый был проинформирован о целях и ходе его проведения (блок 1) и подписал согласие на обработку персональных данных (блок 2).

В процессе подготовки к эксперименту (блок 3) испытуемый 10 мин находился в состоянии покоя с закрытыми глазами для стабилизации психоэмоционального и физического состояния. Затем (блок 4) регистрировался электроэнцефалографический сигнал (ЭЭГ) в состоянии покоя. Регистрация ЭЭС осуществлялась посредством электроэнцефалографа

«Нейрософт Нейрон-спектр» по восьми отведениям. В качестве последующего анализа использовались зарегистрированные ЭЭГ в лобных отведениях (Fp1, Fp2).

Регистрация физиологических данных производилась в период фоновой активности пользователя (блоки 4, 5) и в период активной фазы (блок 6). По завершении регистрации ЭЭГ испытуемый проходил этап субъективной оценки своего состояния во время погружения в систему ВР (блок 7). Результаты тестирования и физиологические данные заносятся в хранилище для последующей предварительной обработки и анализа результатов измерений (блоки 8-11).

Для реализации системы ВР использовали персональный компьютер (32 ГБ оперативной памяти DDR4, графическая карта «GeForce GTX 1060 6 ГБ», процессор «Intel Core i-3 3570») и систему виртуальной реальности «HTC VIVE Pro», включающую в себя головной дисплей, базовые станции для отслеживания перемещения шлема и джойстики управления.

Для проведения настоящего исследования была разработана авторская сцена ВР «Новый город» в среде моделирования «Unreal Engine 4», позволяющей создать реалистичные сцены и добиться максимального эффекта погружения в ВР.

При создании сцены были использованы объекты окружения, созданные при помощи технологии фотограмметрии, что позволило добиться максимальной реалистичности сцены при малой ресурсной стоимости внутренних компонентов (требований к персональному компьютеру). Для этого были выдержаны единый стиль оформления и цветовое решение. Также учитывались такие факторы, как освещение – естественные и искусственные источники освещения, туман, горизонт.

### Результаты и выводы

На основании эксперимента проведен спектральный анализ максимальной мощности ЭЭГ в различных частотных диапазонах: альфа (8...12 Гц), бета (12...35 Гц), тета (4...8 Гц), дельта (0,5...4 Гц). Анализ произведен в среде статистического программирования R версии 4.1.2 [11] с использованием свободно распространяемой интегрированной среды для разработки (Integrated Development Environment, IDE) на языке R – RStudio 2021.09.0+351 [12]. Для обработки и визуализации данных использованы пакеты для языка R: easyalluvial, GGally, ggplot2, parcats, readxl, scales, tidyverse [13]-[17].

Спектральный анализ является одним из стандартных методов, используемых для количественной оценки ЭЭГ. Спектральная плотность мощности (спектр мощности) исследуемых

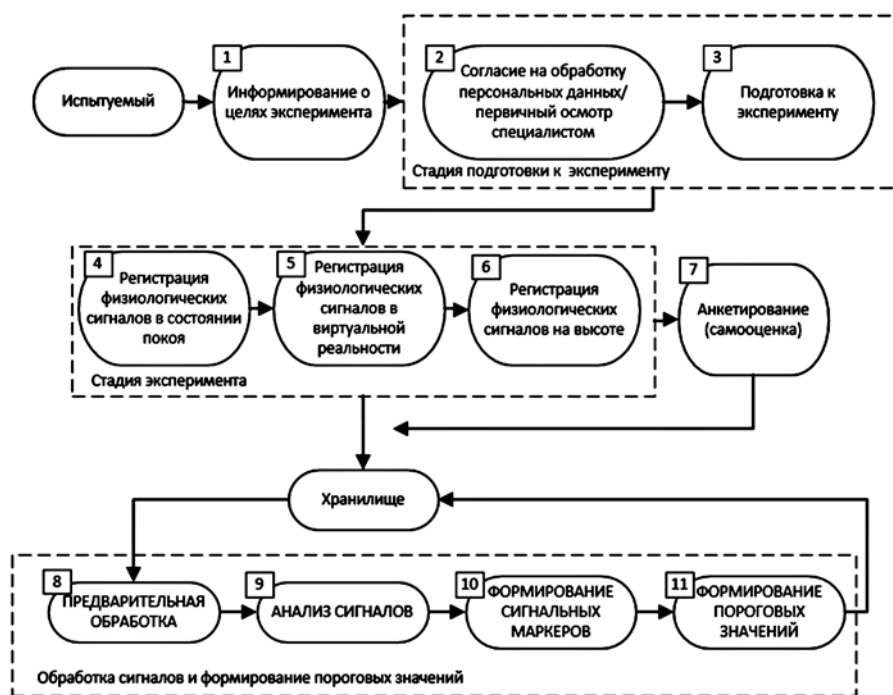


Рис. 1. Схема проведения эксперимента оценки тревожно-фобических расстройств с применением технологии ВР

ЭЭГ в пределах отдельных ритмов представлена на *рис. 2-4* и отражает «частотный состав» сигнала, или распределение мощности сигнала по частоте [18].

Представленные графики плотности распределения мощности исследуемых ЭЭГ позволяют количественно оценить и сравнить значения мощности конкретного спектра (различных ритмов) в состоянии покоя и высокой эмоциональной нагрузки, когда пользователь подвержен воздействию стимула, вызывающего иррациональный страх (страх высоты). Показатели мощности выражены в абсолютных значениях. Сравнение производится относительно значений, принятых за эталонные (состояние покоя испытуемого).

На *рис. 2* видно, что в состоянии «Покой-EEG FP1-A1» значение мощности составляет 0...1500 мкВт. При погружении пользователя в стрессовую ситуацию в среде ВР значение мощности составляет 250...6000 мкВт. Среднее значение мощности ЭЭГ в состоянии покоя равно 200 мкВт. На большинстве регистрируемых ЭЭГ (80 % испытуемых) значение спектральной мощности находится в пределах 150...250 мкВт. В состоянии стрессовой нагрузки спектральная мощность частотного диапазона, соответствующего дельта-ритму, составляет 250...6000 мкВт. Среднее значение мощности ЭЭГ равно 2000 мкВт. На большинстве зарегистрированных ЭЭС (70 % испытуемых) в состоянии «Доска-EEG FP1-A1» спектральная мощность составляет 250...3000 мкВт.

В рамках проведения эксперимента (*рис. 2*) отмечается наличие группы испытуемых, имеющих наибольшую восприимчивость к иррациональному страху высоты (20 % испытуемых), спектральная мощность ЭЭГ которых составляет 4500...6000 мкВт. Во время эксперимента данная группа испытуемых проявила сильную эмоциональную реакцию на стресс (уровень высоты). При осмотре врачом регистрировались учащение пульса, усиленное потоотделение и легкое головокружение (киберболезнь). В состоянии «Покой-EEG FP2-A2» значение мощности составляет 0...1600 мкВт. График распределения совпадает с состоянием «Покой-EEG FP1-A1». Однако в состоянии «Доска-EEG FP2-A2» значение мощности находится в пределах 150...4600 мкВт. Наибольшая распространенность спектральной мощности дельта-ритма составила 600...1500 мкВт. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что симуляция ситуации нахождения на высоте у различных пользователей независимо от интенсивности проявления страха вызывает увеличение мощности дельта-спектра в 5...20 раз относительно состояния покоя.

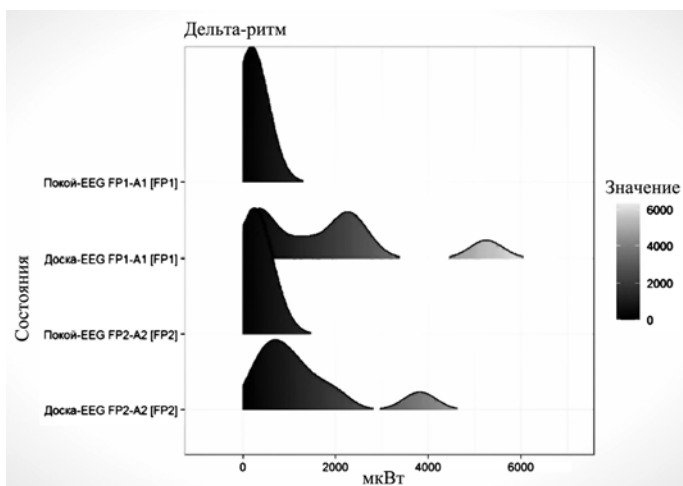


Рис. 2. Плотность распределения максимальной мощности дельта-спектра

На *рис. 3* плотность распределения максимальной мощности альфа-ритма составляет 0...18 мкВт. Плотность распределения максимальной мощности альфа-ритма в различных состояниях практически неизменна. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что экспозиция ситуации нахождения на высоте у различных пользователей независимо от

интенсивности проявления страха не вызывает изменения максимальной мощности альфа-ритма относительно состояния покоя.

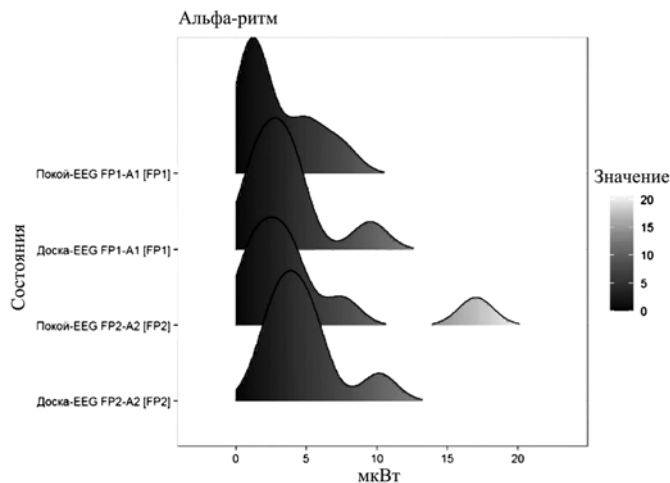


Рис. 3. Плотность распределения максимальной мощности альфа-спектра

На *рис. 4* плотность распределения максимальной мощности бета-ритма в состоянии «Покой-EEG FP1-A1» составляет 0...5 мкВт. В момент погружения пользователя в стрессовую ситуацию в среде ВР значение мощности находится в пределе 0...9 мкВт. В состоянии «Покой-EEG FP2-A2» значение мощности составляет 0...10 мкВт. При погружении пользователя в ВР значение мощности составляет 0...18 мкВт. Плотность распределения в состоянии покоя максимальна при мощности 3 мкВт, а при погружении в ВР при мощности 9 мкВт.

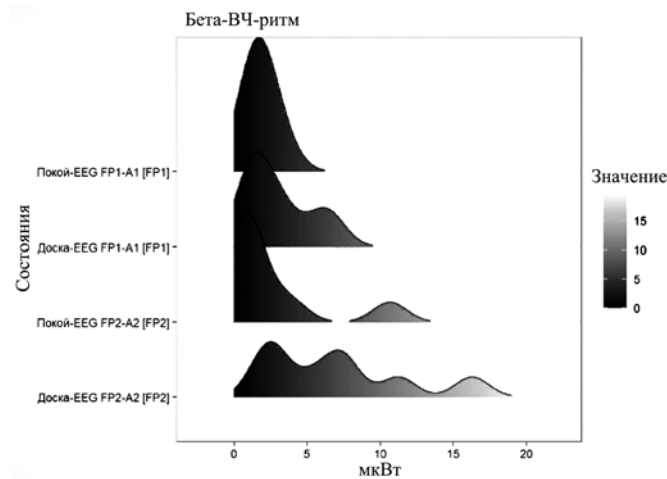


Рис. 4. Плотность распределения максимальной мощности бета-спектра

Полученные результаты (*рис. 4*) позволяют сделать вывод о том, что экспозиция ситуации нахождения на высоте у различных пользователей независимо от интенсивности проявления страха вызывает увеличение мощности бета-спектра в 2...3 раза относительно состояния покоя.

## Заключение

В рамках проведенного эксперимента оценки тревожно-фобических расстройств с применением технологии ВР у всех условно здоровых испытуемых после погружения в среду ВР (сцена на высоте) уровень тревожности превышал нормальные показатели более чем в два раза относительно состояния покоя.

Полученные результаты позволяют выдвинуть гипотезу о наличии объективных электрофизиологических маркеров, которые ассоциированы с уровнем тревоги у пользователя. Дан-

ные показатели могут быть использованы в качестве критериев оценки тревожно-фобических расстройств посредством применения технологии ВР. В дальнейшем авторами статьи предполагается провести дополнительные исследования испытуемых с тревожно-фобическими расстройствами в среде ВР, применив при этом новые стимулы воздействия.

*Список литературы:*

1. *Aminifar F., Fotuhi M.* Multidimensional assessment of virtual reality applications in clinical neuropsychology: The «VR-check» protocol / International Conference on Virtual Rehabilitation. 2019. 12 p.
2. *Kanagaraj R.* Live beyond fear: A virtual reality serious game platform to overcome phobias / 5th International Conference on Devices, Circuits and Systems. 2020. PP. 336-339.
3. *Boros B., Novac K.* Developing cognitive processes as a major goal in designing e-health information provider VR environment in information science / 10th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications. 2019. 6 p.
4. *Tychkov A. Y., Chernyshov D.S., Bofanova N.S., Alimuradov A.K.* Virtual reality implementation for assessment and treatment of phobic anxiety disorders / 5th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications. 2021. PP. 202-205.
5. *Botella J.* Recent Progress in Virtual Reality Exposure Therapy for Phobias: A Systematic Review // Current Psychiatry Reports. 2017. Vol. 7. № 19. 13 p.
6. *Conti I., Lacquaniti A., Staab S.* Lower functional connectivity in vestibular-limbic networks in individuals with subclinical agoraphobia // Frontiers in Neurology. 2019. Vol. 10. 13 p.
7. *Hasani J., Ali R.* The comparison of implicit and explicit memory bias to negative information processing in adolescents with high and low trait anxiety // Journal of Psychology. 2010. Vol. 8. 10 p.
8. *Jang D. et al.* The development of virtual reality therapy (VRT) system for the treatment of acrophobia and therapeutic case // IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed. 2002. Vol. 6 (3). PP. 213-217.
9. *Бофанова Н.С., Петрова Е.В., Калистратов В.Б., Нестеренко Е.Н., Чиж Д.И.* Применение технологии виртуальной реальности для лечения болевого синдрома у детей // Ульяновский медико-биологический журнал. 2020. № 4. С. 19-29.
10. *Бофанова Н.С., Буланов А.А., Яворский А.С., Алехина Е.В.* Технология виртуальной реальности как современное направление в реабилитации пациентов с фантомной болью // Российский журнал боли. 2021. № 19. С. 33-37.
11. A language and environment for statistical computing / <https://www.gbif.org/ru/tool/81287/r-a-language-and-environment-for-statistical-computing#citation> (дата обращения: 11.03.2022).
12. Integrated Development Environment for R / [https://hbsrcs.github.io/R\\_Intro-garminder/rstudio-ide/](https://hbsrcs.github.io/R_Intro-garminder/rstudio-ide/) (дата обращения: 15.04.2022).
13. Generate alluvial plots with a single line of code. R package version 0.3.0 / <https://cran.r-project.org/src/contrib/Archive/easyalluvial/> (дата обращения: 15.04.2022).
14. GGally: extension to «ggplot2» / <https://CRAN.R-project.org/package=GGally> (дата обращения: 20.05.2022).

15. Interactive parallel categories diagrams for «easyalluvial» / <https://cran.r-project.org/src/contrib/Archive/parcats/> (дата обращения: 11.06.2022).
16. Read excel files. R package version 1.3.1 / <https://CRAN.R-project.org/package=readxl> (дата обращения: 11.06.2022).
17. Scale functions for visualization / <https://CRAN.R-project.org/package=scales> (дата обращения: 11.06.2022).
18. *Schneider D., Stockmanns G., Kochs G.* Awareness and the EEG power spectrum: Analysis of frequencies // British Journal of Anaesthesia. 2005. Vol. 6. № 93. PP. 806-809.

*Александр Юрьевич Тычков,*  
*д-р техн. наук, профессор,*  
*Денис Сергеевич Чернышов,*  
*студент,*  
*кафедра «Радиотехника и*  
*радиоэлектронные системы»,*  
*Наталья Сергеевна Бофанова,*  
*канд. мед. наук, доцент,*  
*кафедра «Неврология, нейрохирургия*  
*и психиатрия»,*  
*Петр Павлович Чураков,*  
*д-р техн. наук, профессор,*  
*кафедра «Информационно-измерительная*  
*техника и метрология»,*  
*ФГБОУ ВО «Пензенский*  
*государственный университет»,*  
*г. Пенза,*  
*Зафар Мухамедович Юлдашев,*  
*д-р техн. наук, зав. кафедрой,*  
*кафедра «Биотехнические системы»,*  
*ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский*  
*государственный электротехнический*  
*университет «ЛЭТИ»,*  
*им. В.И. Ульянова (Ленина)»,*  
*г. С.-Петербург,*  
*Валерий Николаевич Горбунов,*  
*канд. эконом. наук, директор,*  
*Центр трансфера технологий,*  
*Руслан Валерьевич Золотарев,*  
*инженер,*  
*кафедра «Радиотехника и*  
*радиоэлектронные системы»,*  
*Алан Казанферович Алимуратов,*  
*канд. техн. наук, директор,*  
*Студенческий научно-производственный*  
*бизнес-инкубатор,*  
*ФГБОУ ВО «Пензенский*  
*государственный университет»,*  
*г. Пенза,*  
*e-mail: tychkov-a@mail.ru*

\* \* \* \* \*