



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-104-111>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.358

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧЕЛОВЕКА ВО ВРЕМЯ НАХОЖДЕНИЯ В ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

С. В. МАЗУР, А. И. ГОЛОВАТЫЙ

Белорусский государственный университет (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 24.02.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Проведено исследование по контролю пульса человека в обычном состоянии и во время нахождения в виртуальной реальности. Установлено, что пульс человека может значительно учащаться, когда он находится в виртуальной реальности. При этом могут существовать различные стрессовые ситуации, во время которых пульс резко учащается в несколько раз. В процессе исследований был спрогнозирован пульс человека на основе нескольких моделей машинного обучения, что позволило предсказать состояние человека в ближайшее время и скоординировать ряд действий по предотвращению рисков. Наиболее подходящими моделями оказались линейная регрессия и SSA, которые показали самые точные и правдоподобные результаты. Благодаря контролю частоты сердечных сокращений человека в виртуальной реальности можно классифицировать сцены виртуальной реальности по степени их влияния на организм человека. Это позволяет учесть людей с различными хроническими заболеваниями и не предоставлять им доступ к сценам, которые им противопоказаны. Результатом исследований является программный комплекс, позволяющий непрерывно собирать показатели частоты сердечных сокращений во время нахождения в виртуальной реальности с устройства Bluetooth Low Energy.

Ключевые слова: виртуальная реальность, устройства для удаленного мониторинга здоровья, частота сердечных сокращений, технология Bluetooth Low Energy, фитнес-браслет, прогнозирование временного ряда.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мазур, С. В. Автоматизированный контроль физиологических параметров человека во время нахождения в виртуальной реальности / С. В. Мазур, А. И. Головатый // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 5. С. 104–111. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-104-111>.

AUTOMATED MONITORING OF HUMAN PHYSIOLOGICAL PARAMETERS WHILE BEING IN VIRTUAL REALITY

STANISLAV V. MAZUR, ALEXANDR I. GOLOVATY

Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 24.02.2023

Abstract. A study was conducted on the control of a person's pulse in the normal state and while in virtual reality. It has been established that a person's pulse can increase significantly when he is in virtual reality. In this case, there may be various stressful situations, during which the pulse sharply quickens several times. In the process of research, a person's pulse was predicted based on several machine learning models, which made it possible to predict a person's condition in the near future and coordinate a series of actions to prevent risks. The most suitable models were linear regression and SSA, which showed the most accurate and plausible results. By monitoring

the human heart rate in virtual reality, virtual reality scenes can be classified according to the degree of their effect on the human body. This allows to take into account people with various chronic diseases and to limit their access to scenes that are contraindicated for them. The result of the research was a software package that allows to continuously collect heart beat rate data while in virtual reality from a Bluetooth Low Energy device.

Keywords: virtual reality, wearable health devices, heart rate, Bluetooth Low Energy technology, fitness bracelet, time series prediction.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Mazur S. V., Golovaty A. I. (2023) Automated Monitoring of Human Physiological Parameters While Being in Virtual Reality. *Doklady BGUIR*. 21 (5), 104–111. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-104-111> (in Russian).

Введение

В настоящее время происходит бурное развитие технологий взаимодействия компьютера и человека. Порой интеграция таких технологий может быть весьма непредсказуемой. Виртуальная реальность (VR) и средства ее достижения – не исключение. Данная технология «обманывает» мозг человека. Движение и положение тела в пространстве фиксируются вестибулярным аппаратом, который подает сигналы в мозг. Но вместе с этим в мозг поступает еще и зрительная информация. Показатели могут расходиться, поэтому человек во время нахождения в виртуальной реальности может испытывать различные недомогания, такие как головокружение, головная боль, тошнота. Этому способствуют различные стрессовые ситуации, присутствующие в некоторых виртуальных сценах. Соответственно необходимо контролировать состояние человека во время нахождения в виртуальной реальности. Однако данный процесс следует автоматизировать, привлекая различные средства мониторинга здоровья. Нужно учесть тот факт, что не все медицинские приспособления могут подойти для контроля показателей организма человека в виртуальной реальности.

Виртуальная реальность помещает участников в многомерную компьютерную виртуальную среду, создавая иллюзию пребывания внутри искусственного мира, а также предоставляя способность действовать там. Технология VR позволяет заменить тело участника виртуальным телом, видимым от первого лица, что дает возможность проводить широкий спектр различных задач (научные исследования, развлечения и др.). Для полного погружения требуются визуальные, слуховые и тактильные устройства вместе с системой слежения, чтобы информационная технология могла доставить участнику иллюзию нахождения в каком-то месте и то, что происходит в этом месте [1]. Но ей требуется отслеживать движение участника, чтобы адаптировать отображение виртуальной среды к этим движениям. Поэтому необходимо отслеживать как положение головы, тела, так и движение глаз.

Физиологические показатели человека

Здоровье человека – это состояние организма, как живой системы, характеризующееся полной ее уравновешенностью с внешней средой и отсутствием каких-либо выраженных изменений, связанных с болезнью [2].

Артериальное давление (АД) – сила, с которой кровь воздействует на стенки артерий. Сердце работает, как насос, с каждым ударом обеспечивая определенный уровень артериального давления.

Частота дыхания – это количество вдохов-выдохов за единицу времени. Обычно в ходе объективного исследования сначала определяют и подсчитывают пульс, а затем – число дыхательных движений за одну минуту, определяют тип (грудной, брюшной или смешанный) и глубину дыхания, его ритм.

Температура тела представляет комплексный показатель теплового состояния организма человека и является одним из основных и старейших биомаркеров.

Гемоглобин показывает количество кислорода в организме, которое находится одновременно и постоянно. Если падает количество гемоглобина в крови, то увеличивается число дыхательных движений.

Любое отклонение от нормы перечисленных выше параметров отражается на частоте сердечных сокращений человека (ЧСС), учащая или замедляя ее.

Частота сердечных сокращений – это физическая величина, получаемая в результате измерения числа сердечных систол в единицу времени. ЧСС используется в медицинской и спор-

тивной практике как физиологический показатель нормального ритма сердцебиения и является важным признаком для первичного различения нормального ритма сердца и разнообразных нарушений его ритма.

Так или иначе, перечисленные показатели связаны между собой, и изменение одного из них приводит к изменению других. Следовательно, при контроле наличия непредсказуемых изменений состояния человека в некоторых случаях можно ограничиться измерением ЧСС.

Средства мониторинга здоровья и беспроводная система регистрации и передачи данных

В 90-е годы XX века была создана технология, которая позволяла удаленно контролировать физиологические показатели человека. Устройства для удаленного мониторинга здоровья (Wearable Health Devices, WHDs) – это совокупность средств, предназначенных для непрерывного амбулаторного контроля жизненно важных показателей здоровья человека в повседневной жизни (во время работы, дома, при занятиях спортом) или в условиях клиники [3]. Их преимущество – минимизация дискомфорта и вмешательства в обычную жизнедеятельность человека.

Гибкие медицинские датчики являются ключевыми элементами в удаленной системе мониторинга здоровья, которые могут преобразовывать физиологические сигналы человеческого тела в электрические сигналы для количественного анализа и оценки состояния организма. Физиологические сигналы собираются в режиме реального времени. С помощью устройств удаленного мониторинга здоровья можно регистрировать различные физиологические показатели человека: ЭКГ, ЧСС, температуру, артериальное давление, сатурацию и др. Для того чтобы не сковывать движения человека во время нахождения в VR, необходимо применять средства мониторинга здоровья, которые поддерживают беспроводную передачу данных. Для этого можно использовать технологию Bluetooth Low Energy (BLE), ориентированную на применение в системах мониторинга и сбора данных с автономным питанием.

Концепция технологии направлена на оптимизацию минимального энергопотребления, на уменьшение пикового тока передачи и времени приема за счет коротких пакетов. Технология BLE позволяет построить сенсорную сеть для того, чтобы связать датчики [3]. Стек BLE состоит из двух основных частей – контроллера и узла сети. Контроллер реализуется в виде системы на кристалле (СнК) и включает в себя физический и канальный уровни. Узел сети реализован на микроконтроллере приложений и включает в себя протокол адаптации (Adaptation Protocol – L2CAP), протокол атрибутов (Attribute Protocol – ATT), протокол атрибутов профилей устройств (Generic Attribute Profile – GATT), протокол обеспечения безопасности (Security Manager – SM), протокол обеспечения доступа к функциям профиля устройств (Generic Access Profile – GAP). Взаимодействие между контроллером и узлом сети осуществляется с помощью Host Controller Interface (HCI).

Для мониторинга и прогнозирования физиологических показателей человека во время нахождения в виртуальной реальности необходимо использовать технические средства для измерения показателей вместе с приложением и сервером обработки данных, которые представлены на рис. 1. Важной задачей являются непрерывный сбор информации и ее передача с BLE-устройства на персональный компьютер (ПК). Не стоит забывать про базу данных, которая должна хранить различные типы данных, которые будут использованы для исследований и обучений различных моделей прогнозирования.

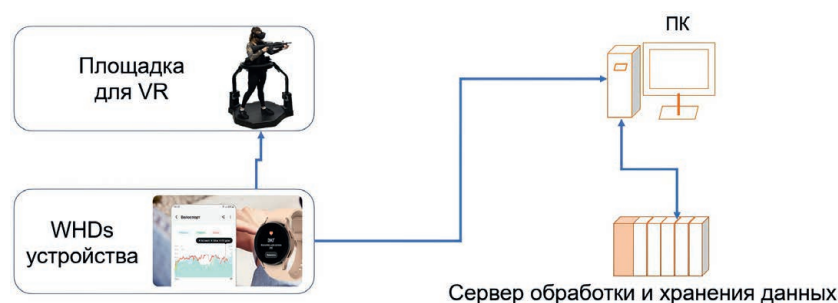


Рис. 1. Архитектура мониторинговой системы
Fig. 1. Monitoring system architecture

Построение приложения для взаимодействия с BLE-устройством

Архитектура BLE представляет собой стек протоколов, где большое внимание уделяется протоколу доступа к атрибутам и самим атрибутам. Центральное устройство должно знать, что существует периферийное устройство для связи с ним. Поэтому периферийное устройство будет рекламировать свое присутствие в широкопередаточном режиме BLE. В этом режиме устройство использует профиль общего доступа GAP для отправки небольшого количества информации («рекламы») с постоянной скоростью. После обнаружения обмен данными между устройствами выполняется с помощью протокола GATT [4].

BLE-устройство располагает базой данных переменных состояния, где эти переменные группируются в службы на основе функциональности. Обычно данные переменные называют характеристиками. Каждая характеристика содержит описание типа значения [4]. Сервисы, характеристики и их вспомогательные атрибуты (дескрипторы) являются основными объектами подключенного режима.

Для контроля ЧСС человека было разработано приложение. В качестве языка программирования выбрали C#, так как Майкрософт предоставляет подробную документацию по работе с BLE-устройствами. В качестве платформы выбрали WPF. Для того чтобы приложение было легко расширяемым, тестируемым, а также удобным для рефакторинга использовали паттерн MVVM, который пришел вместе с WPF. Поскольку в качестве устройства для мониторинга ЧСС предполагалось использовать фитнес-браслет Mi Band 3, необходимо было убедиться, что к нему можно подключиться и у него существуют все службы и характеристики, требуемые под рассматриваемые задачи. Для этого воспользовались приложением nRF Connect, интерфейс которого представлен на рис. 2. С помощью данного приложения можно находить и просматривать службы, характеристики Mi Band 3. В исследованиях использовали службу Heart Rate и характеристику Heart Rate Measurement. Подписавшись на обновления данной характеристики, можно получать ЧСС человека. После этих действий можно подключаться к службам и подписываться на уведомления от характеристик.

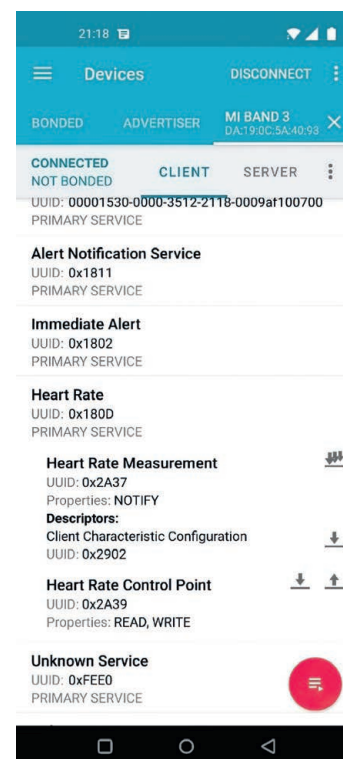


Рис. 2. Службы и характеристики Mi Band 3
Fig. 2. Services and characteristics of Mi Band 3

Контроль частоты сердечных сокращений человека в виртуальной реальности

В процессе исследований проводили контроль ЧСС человека во время его нахождения в виртуальной реальности, а также прогнозирование его состояния. Отслеживали, меняется ли физиологическое состояние человека, когда запущена виртуальная сцена. Испытания проводили с несколькими сценами и различными людьми. В качестве сцен использовали игровые, космические и др. Контролировали пульс человека до включения сцены. В качестве шлема виртуальной реальности использовали HTC VIVE Pro 2.

В ходе первого вида испытания была игровая сцена с микрострессовыми ситуациями и небольшой физической активностью пользователя. Полученные результаты показывали временную зависимость изменения ЧСС, представленную на рис. 3. Как можно заметить из рис. 3, у пользователя был достаточно стабильный пульс до включения сцены, то есть, когда он не находился в виртуальной реальности. После включения сцены пульс человека стал расти, однако позже организм адаптировался к новым условиям. Спустя некоторое время случился скачок пульса, но это не выброс, так как это не единичное значение. Можно сказать, что данный скачок связан с микрострессом, который появился как реакция организма на происходящее в сцене. В дальнейшем ЧСС человека была достаточно стабильной.

На рис. 4 показаны изменения ЧСС человека при проведении экспериментов, в которых два человека находились в одинаковой сцене. Исходя из графика, можно сделать вывод, что виртуальная реальность оказывает разное воздействие на двух людей, находящихся в одной и той же

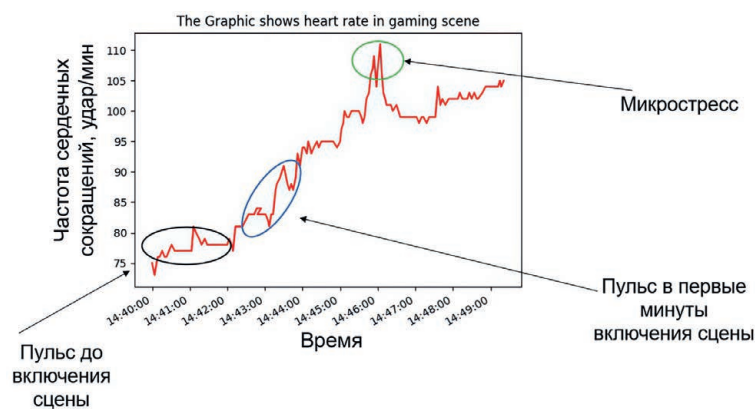


Рис. 3. Изменение частоты сердечных сокращений человека в игровой сцене

Fig. 3. Changing the heart rate of person in a game scene

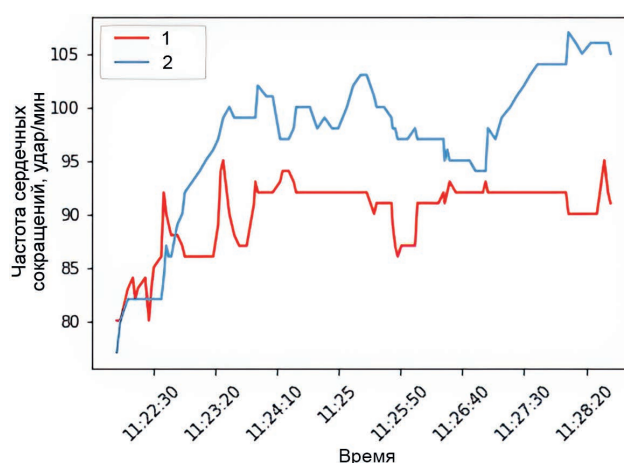


Рис. 4. Изменение частоты сердечных сокращений двух человек (1, 2) в одинаковой сцене

Fig. 4. Changing the heart rate of two people (1, 2) in the same scene

сцене. Поэтому, чтобы контролировать состояние человека, необходимо подбирать индивидуальные параметры, что было реализовано в приложении. В качестве индивидуальных параметров в исследованиях принимались возраст и частота сердечных сокращений покоя.

Прогнозирование частоты сердечных сокращений человека в виртуальной реальности

Большинство данных, связанных с аритмией, представляют собой временной ряд – последовательность значений некоторой переменной, регистрируемых через определенные промежутки времени (регулярные или нерегулярные). Существует множество статистических методов анализа составляющих временного ряда и его прогнозирования.

Цель прогнозирования довольно проста. Необходимо предсказывать значение ЧСС человека для того, чтобы не навредить ему и смягчить влияние сцен виртуальной реальности, динамически изменяя их уровень сложности. Рассмотрим несколько методов для прогнозирования ЧСС человека и сравним их между собой. Для прогнозирования ЧСС человека в виртуальной реальности использованы библиотеки Darts и ML.NET, но в соответствии с технологическим стеком приложения последняя – наиболее подходящая. Набором данных для обучения моделей является конкретный пульс человека во время нахождения в виртуальной реальности в одной из сцен. Проводили обучение модели прогнозирования на наборе данных пульса человека в разных сценах виртуальной реальности и сравнивали их эффективность.

Наивная модель. Установка базовой точности – стандартная практика. Для этого при проведении исследований создавали наивную модель. Наивный прогноз – самая простая методика прогнозирования. Он основывается на предположении о том, насколько прогнозируемое значе-

ние будет соответствовать значению в предшествующем периоде. Это поможет оценить производительность достаточно сложных моделей, которые теоретически должны иметь более высокую точность. Полученные результаты представлены на рис. 5. Как можно заметить из рисунка, наивная модель фактически повторяет кривые, взятые с определенным шагом.

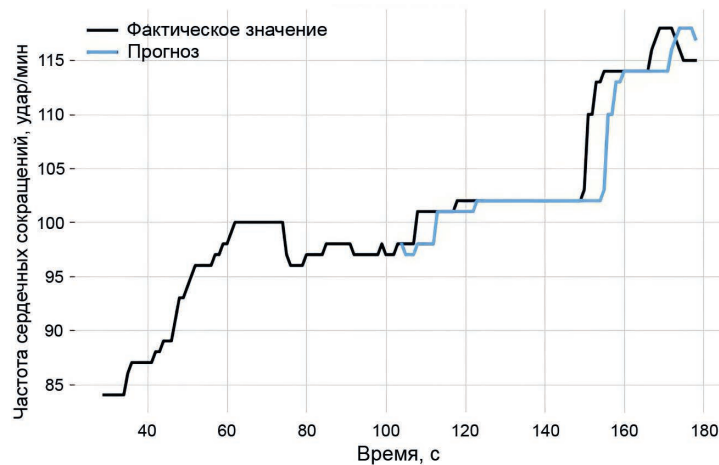


Рис. 5. Прогноз частоты сердечных сокращений с помощью наивной модели

Fig. 5. Heart rate prediction using the naive model

Экспоненциальное сглаживание. Данные модели используют средневзвешенные значения прошлых наблюдений для прогнозирования новых значений. Здесь идея состоит в том, чтобы придать большее значение недавним значениям в серии. Таким образом, по мере того, как наблюдения стареют (со временем), важность этих значений экспоненциально уменьшается. Полученные результаты представлены на рис. 6. Экспоненциальное сглаживание дает лучший прогноз в отличие от наивной модели.

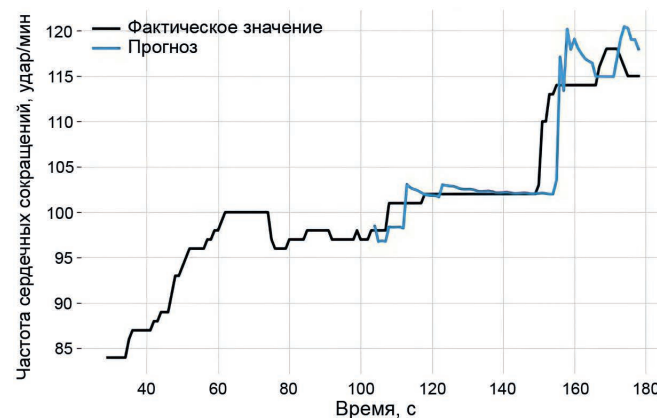


Рис. 6. Прогноз частоты сердечных сокращений с помощью экспоненциального сглаживания

Fig. 6. Heart rate prediction using exponential smoothing

Линейная регрессия. В последние годы модели машинного обучения широко использовались при прогнозировании временных рядов как альтернатива классическим подходам. Просто добавляя запаздывающие значения в качестве признаков в набор данных, можно превратить прогнозирование временных рядов в задачу регрессии. Полученные результаты представлены на рис. 7. Следует отметить, что линейная регрессия превосходит наивную модель и экспоненциальное сглаживание.

С помощью встроенных классов ML.NET можно обучать различные модели как для анализа, классификации, так и для прогнозирования данных. Перед применением модели ее обучили на конкретном наборе данных пульса человека, который получали из *.csv файла. Далее определяли модель, ее конкретные параметры, размер обучающей выборки, размер окна и выходного значения и т. д. Обучающая выборка ЧСС человека в виртуальной реальности представлена на рис. 8.

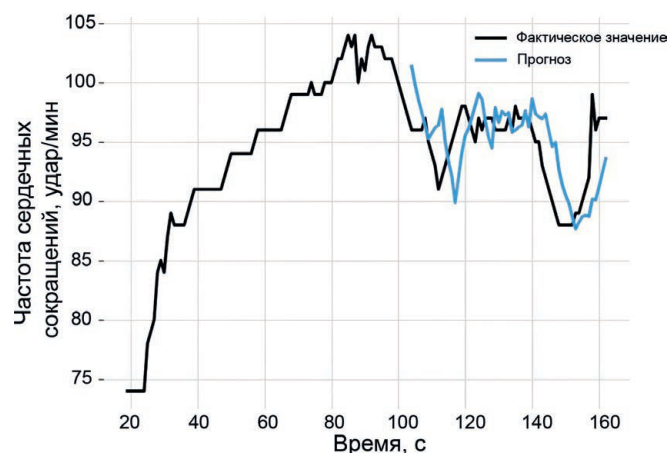


Рис. 7. Прогноз частоты сердечных сокращений с помощью линейной регрессии
Fig. 7. Heart rate prediction using linear regression

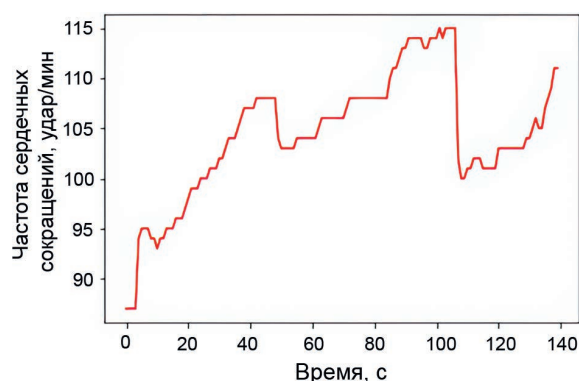


Рис. 8. Обучающая выборка частоты сердечных сокращений человека в виртуальной реальности
Fig. 8. Human heart rate training sample in virtual reality

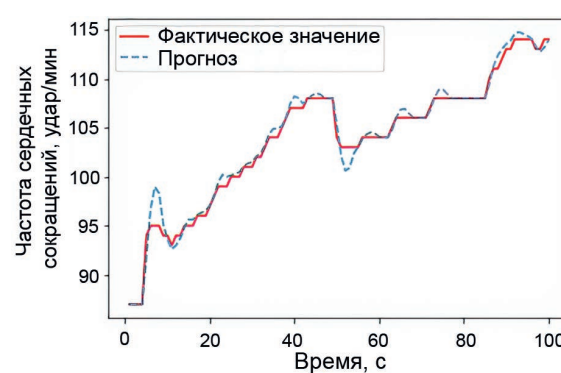


Рис. 9. Прогноз частоты сердечных сокращений человека с помощью SSA
Fig. 9. Human heart rate prediction with SSA

Библиотека ML.NET достаточно новая, поэтому в ней присутствуют не все модели для прогнозирования временных рядов. Наиболее подходящей моделью для анализа временных рядов в ML.NET будет SSA (метод гусеницы). С помощью нее провели прогноз ЧСС человека в одной из сцен виртуальной реальности [6]. Результаты приведены на рис. 9. Как видно из рис. 9, SSA справилась не хуже линейной регрессии.

Заключение

1. В результате исследования проведен контроль пульса человека в обычном состоянии и во время нахождения в виртуальной реальности. Установлено, что пульс человека может значительно учащаться, когда он находится в виртуальной реальности. При этом могут существовать различные стрессовые ситуации, во время которых пульс резко учащается в несколько раз. Поэтому необходимо контролировать состояние человека, чтобы свести вред виртуальной реальности к минимуму.

2. Выполнен прогноз пульса человека на основе нескольких моделей машинного обучения, что позволило предсказать его состояние и скоординировать ряд действий по предотвращению рисков. Наиболее подходящими моделями оказались линейная регрессия и SSA, которые показали более точные и правдоподобные результаты. Благодаря прогнозированию можно не только предсказывать значения частоты сердечных сокращений человека, но и динамически регулировать состояние виртуальной сцены, если она это позволяет.

3. При контроле частоты сердечных сокращений человека в виртуальной реальности можно классифицировать сцены виртуальной реальности по степени их влияния на организм челове-

ка. Это позволяет учесть людей с различными хроническими заболеваниями и не предоставлять им доступ к сценам, которые им противопоказаны.

Список литературы

1. How to Build an Embodiment Lab: Achieving Body Representation Illusions in Virtual Reality / B. Spanlang [et al.] // *Frontiers in Robotics and AI*. 2014. Vol. 1. P. 1–22. <https://doi.org/10.3389/frobt.2014.00009>.
2. Кухаренко, И. А. Анализ способов съема частоты сердечных сокращений для применения в носимых устройствах / И. А. Кухаренко // *Инновации в науке: матер. Междунар. науч. конф. Киев: Национ. техн. ун-т Украины «Киев. политех. ин-т им. Игоря Сикорского», 2016. С. 66–71.*
3. Персональные технологии мониторинга здоровья // *НИИ Организации здравоохранения и медицинского менеджмента. М., 2019. С. 1–28.*
4. Калачев, А. В. Основы работы с технологией Bluetooth Low Energy / А. В. Калачев, М. В. Лапин, М. Е. Пелихов. СПб.: Лань, 2020. 224 с.

References

1. Spanlang B., Normand J.-M., Borland D., Kilteni K., Giannopoulos E., Pomýs A., González-Franco M., Perez-Marcos D., Arroyo-Palacios J., Muncunill X. N., Slater M. (2014) *How to Build an Embodiment Lab: Achieving Body Representation Illusions in Virtual Reality*. 1, 1–22. <https://doi.org/10.3389/frobt.2014.00009>.
2. Kukharenko I. A. (2016) Analysis of Methods for Recording Heart Rate for Use in Wearable Devices. *Innovations in Science: Materials of the International. Scientific Conf. Kyiv. National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”*. 66–71 (in Russian).
3. Personal Health Monitoring Technologies (2019) *Research Institute of Organizations of Health and Medical Management. Moscow*. 1–28 (in Russian).
4. Kalachev A. V., Lapin M. V., Pelikhov M. E. (2020) *Bluetooth Low Energy Basics*. St. Petersburg, Lan Publ. 224 (in Russian).

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Мазур С. В., студент Белорусского государственного университета

Головатый А. И., к. ф.-м. н., доцент кафедры интеллектуальных систем Белорусского государственного университета

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Курчатова, 5
Белорусский государственный университет
Тел.: +375 29 175-23-43
E-mail: val_zur@mail.ru
Мазур Станислав Валерьевич

Information about the authors

Mazur S. V., Student at the Belarusian State University

Golovaty A. I., Cand. of Sci., Associate Professor at the Department of Intelligent Systems of the Belarusian State University

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Kurchatova St., 5
Belarusian State University
Тел.: +375 29 175-23-43
E-mail: val_zur@mail.ru
Mazur Stanislav Valerievich