

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ НАРУШЕНИЙ КРОВΟΣНАБЖЕНИЯ ГОЛОВНОГО МОЗГА ЧЕЛОВЕКА

М.В. Ковальчук¹, Н.Н. Каркищенко², Д.Б. Чайванов^{1,*}, Ю.А. Чудина¹,
А.А. Николаев¹, А.А. Вартанов¹

¹ ФГБУН Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, Российская Федерация, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

² ФГБУН «Научный центр биомедицинских технологий ФМБА России»
143442, Российская Федерация, Московская обл., Красногорский р-н, п. Светлые горы, 1

В настоящей работе описан новый метод диагностики нарушений кровоснабжения головного мозга, основанный на физико-математических, биомедицинских, психофизиологических методах и информационных технологиях. Предложенный метод состоит в сравнении и выявлении степени соответствия длительности сердечного цикла, регистрируемой методами электрокардиографии и фотоплетизмографии. Методом электрокардиографии сердечный цикл фиксировали в виде длительности кардиоинтервалов, которые отражают преимущественно интракардиальные регуляторные механизмы; метод фотоплетизмографии использовали для записи сердечного цикла в виде длительности пульсовых волн, которые являются отражением экстракардиальных механизмов регуляции сердечно-сосудистой системы. Первоначально значения длительности кардиоинтервалов и пульсовых волн сравнивали у здоровых добровольцев, при записи электросигнала в стандартном отведении и фотосигнала в трёх разных отведениях обнаружили наибольшее совпадение при записи фотоплетизмограммы от ушного датчика. Далее сравнение длительности кардиоинтервалов и пульсовых волн проводили на примере патологических состояний, сопровождающихся нарушениями кровоснабжения головного мозга, среди которых рассматривали синдром позвоночной артерии при остеохондрозе шейного отдела позвоночника и синдром вегетативной дисфункции. Обнаружили уменьшение степени совпадения длительности кардиоинтервалов и пульсовых волн у добровольцев с рассмотренными патологиями по сравнению с нормой. Затем определили принадлежность к группе нормы и к группам с рассмотренными патологиями. Наконец, на основе результатов дискриминантного анализа удалось выявить набор показателей, позволяющих различать три рассмотренные группы между собой.

Ключевые слова: нарушения кровоснабжения головного мозга, синдром позвоночной артерии при остеохондрозе шейного отдела позвоночника, синдром вегетативной дисфункции, длительность кардиоинтервалов, длительность пульсовой волны, электрокардиограмма, фотоплетизмограмма

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Ковальчук М.В., Каркищенко Н.Н., Чайванов Д.Б., Чудина Ю.А., Николаев А.А., Вартанов А.А. Электрооптический метод диагностики нарушений кровоснабжения головного мозга человека. *Биомедицина*. 2022;18(1):8–21. <https://doi.org/10.33647/2074-5982-18-1-8-21>

Поступила 08.11.2021

Принята после доработки 14.02.2021

Опубликована 10.03.2022

ELECTROOPTICAL DIAGNOSTIC METHOD OF BLOOD SUPPLY DISORDERS IN THE HUMAN BRAIN

Mikhail V. Kovalchuk¹, Nikolay N. Karkischenko², Dmitry B. Chaivanov^{1,*},
Yulia A. Chudina¹, Andrey A. Nikolaev¹, Alexander A. Vartanov¹

¹ National Research Centre "Kurchatov Institute"
123182, Russian Federation, Moscow, Akademika Kurchatova Square, 1

² Scientific Center of Biomedical Technologies of the Federal Medical and Biological Agency of Russia
143442, Russian Federation, Moscow Region, Krasnogorsk District, Svetlye Gory Village, 1

The article describes stages in the development of an electrooptical method for diagnosing blood supply disorders in the human brain. The proposed method is based on the comparison and identification of the correspondence of cardiac cycle durations recorded by electrocardiography and photoplethysmography. Electrocardiography was used to record the cardiac cycle as the duration of cardiointervals, which reflect mainly intracardial regulatory mechanisms. Photoplethysmography was used to record the cardiac cycle as the duration of pulse waves, which reflect extracardial regulative mechanisms of the cardiovascular system. Initially, the duration of cardiointervals and pulse waves were recorded and compared in healthy volunteers. The most pronounced coincidence was observed when recording a photoplethysmogram from an ear sensor. Further, the obtained data was compared with that recorded in pathological conditions accompanied by impaired blood supply to the brain, including vertebral artery syndrome in cervical spine osteochondrosis and autonomic dysfunction syndrome. A decrease in the degree of correspondence between the durations of cardiac intervals and pulse waves was found in volunteers with the considered pathologies compared to the norm. Subsequently, based on the duration of cardiac intervals and pulse waves, the volunteers were divided into three groups: the norm group and two groups of the considered pathologies. Finally, based on the results of a discriminant analysis, a set of indicators was identified, allowing the three groups to be differentiated.

Keywords: brain blood supply disorders, spinal artery syndrome in cervical spine osteochondrosis, autonomic dysfunction syndrome, cardio interval duration, pulse wave duration, electrocardiogram, photoplethysmogram

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Kovalchuk M.V., Karkischenko N.N., Chaivanov D.B., Chudina Yu.A., Nikolaev A.A., Vartanov A.A. Electrooptical Diagnostic Method of Blood Supply Disorders in the Human Brain. *Journal Biomed.* 2022;18(1):8–21. <https://doi.org/10.33647/2074-5982-18-1-8-21>

Submitted 08.11.2021

Revised 14.02.2022

Published 10.03.2022

Введение

Электрооптический метод предназначен для диагностики сосудистых нарушений, проявляющихся как самостоятельные заболевания или как симптомы различных соматических патологий. Главным преимуществом нового метода электрооптической диагностики, в отличие от всех используемых в настоящее время методов диа-

гностики сосудов, является возможность осуществления холтеровского мониторинга их состояния. Холтеровское мониторирование позволяет осуществлять непрерывную фиксацию состояния сосудов в течение суток или дольше, проводить её вне стен медицинского стационара, а также в условиях физической активности.

Ещё одно преимущество электрооптического метода состоит в том, что он подходит для ранней диагностики патологий сосудов головного мозга и может применяться для выявления доклинической стадии сосудистых нарушений, заменяя такие сложные аппаратные методы, как ультразвуковая и магнитно-резонансная диагностика, ангиография и т. п. В этой связи перспективным является изучение возможности использования электрооптического метода для выявления сосудистых нарушений различных органов и тканей, являющихся начальными признаками их патологических изменений.

Создание электрооптического метода было связано с обнаружением расхождений в продолжительности сердечного цикла, записанной методами электрокардиограммы и фотоплетизмограммы. Такого рода расхождения фиксировали и ранее, но они всегда считались артефактом и их связывали с особенностями записи электрических и фото сигналов [17]. Первоначально мы также придерживались данной традиционной точки зрения, и результаты нашего исследования на здоровых добровольцах являются тому подтверждением [19]. Однако экспериментально обнаруженное несоответствие между длительностью кардиоинтервалов и пульсовых волн при патологиях, сопровождающихся недостаточностью кровоснабжения головного мозга [8, 13], позволило рассматривать это несоответствие как признак нарушения механизмов регуляции сердечно-сосудистой системы. Проведённый дискриминантный анализ позволил выявить критерии, по которым начальные проявления недостаточности мозгового кровоснабжения можно отличить от нормы [14].

Электрооптический метод был апробирован на примере патологий, представляющих начальную стадию недостаточности кровоснабжения головного мозга, которая характеризуется нарушениями регуляторных механизмов. Следовательно, данный

метод является пригодным для диагностики различных заболеваний и патологических состояний, сопровождающихся расстройством механизмов регуляции сердечно-сосудистой системы. Кроме того, в силу особенностей регистрации (комфорт для пациентов) и простоты обработки данных электрооптический метод может быть использован в варианте как длительного непрерывного мониторингирования, так и экспресс-диагностики.

Поиск возможностей применения электрооптического метода для диагностики не только нарушений, затрагивающих интракардиальные и экстракардиальные механизмы регуляции, заболеваний сердечно-сосудистой системы, но и широкого спектра других патологий является новым и перспективным направлением биомедицинских исследований.

Патологии, связанные с нарушениями кровоснабжения головного мозга

Актуальность разработки методов ранней диагностики нарушения кровоснабжения головного мозга обусловлена, с одной стороны, ростом количества таких нарушений среди трудоспособного населения развитых стран, а с другой стороны — наибольшей эффективностью профилактических мер и терапии на ранних стадиях развития патологии.

В настоящее время самыми распространёнными являются заболевания сердечно-сосудистой системы, на долю которых приходится более 50% от общего числа летальных исходов, в большинстве случаев происходящих по причине цереброваскулярной патологии [6]. Показатель смертности вследствие цереброваскулярной патологии в России является одним из самых высоких в мире и занимает второе место в общей структуре смертности населения нашей страны [12].

Традиционно ишемические поражения головного мозга, связанные с нарушениями

ми мозгового кровообращения, считаются присущими людям пожилого и старческого возраста. Однако, согласно современным данным, более 10% острых нарушений мозгового кровообращения обнаруживаются у лиц в возрасте от 15 до 45 лет [24], представляющих трудоспособную группу населения. Острые нарушения мозгового кровообращения плохо поддаются лечению и требуют длительной реабилитации, что делает целесообразным проведение диагностических и терапевтических мероприятий на ранних стадиях развития цереброваскулярных заболеваний.

Признаками начальной стадии развития цереброваскулярных заболеваний являются начальные проявления недостаточности кровоснабжения головного мозга (НПНКМ), которые со временем преобразуются в хроническую недостаточность мозгового кровообращения. У пациентов данной группы впоследствии развиваются дисциркуляторная энцефалопатия, преходящие нарушения мозгового кровообращения и мозговой инсульт [6].

Основной предпосылкой развития НПНКМ являются общие сосудистые заболевания различного генеза, такие как атеросклероз, артериальная гипертензия, синдром вегетативной дистонии [6] или соматоформная вегетативная дисфункция [2]. В этих случаях патогенез НПНКМ связан с изменениями тонуса и структуры стенок сосудов головного мозга, повышением их проницаемости, изменением реологических свойств и липидного состава крови, общего гормонального статуса, нарушением обмена веществ и т. п.

Предпосылкой развития НПНКМ также может стать вертебробазилярная недостаточность, формирующаяся на фоне нарушений шейного отдела позвоночника, например при шейном остеохондрозе [11, 16].

Экспериментально было показано, что доклиническая стадия дисфункций, приводящих к развитию НПНКМ, среди которых

соматоформная вегетативная дисфункция, остеохондроз шейного отдела позвоночника, артериальная гипертензия, церебральный атеросклероз, ожирение, депрессивные расстройства, характеризуется двухсторонним снижением скорости кровотока по передней мозговой и позвоночной артериям, диффузным гипертонусом магистральных артерий головы со снижением их эластичности в каротидных бассейнах и пульсового кровенаполнения мозга в бассейне левой позвоночной артерии; диффузным гипертонусом артериол и мозговых вен и т. п. [1, 2, 21].

Нарушение кровотока в магистральных артериях головы, в т. ч. в сосудах вертебробазилярной системы, к которой относятся позвоночные артерии, является одной из основных причин недостаточности кровоснабжения головного мозга, часто приводящей к цереброваскулярным нарушениям. Такого рода дисциркуляции в 25% случаев протекают бессимптомно и могут быть обнаружены только при проведении специального многоэтапного обследования. В случае недоступности такого обследования актуальной становится необходимость разработки методов экспресс-диагностики ранних проявлений доклинической стадии НПНКМ.

Целью настоящей статьи является описание этапов разработки электрооптического метода, предназначенного для ранней диагностики нарушений кровоснабжения головного мозга по показателям длительности сердечного цикла. Предполагается выявить возможности данного метода и отличать добровольцев с патологиями, сопровождающимися ранними нарушениями кровоснабжения головного мозга, от здоровых добровольцев без каких-либо сосудистых заболеваний.

Методические основы электрооптического метода

Электрооптический метод основан на сопоставлении длительности сердеч-

ного цикла, зафиксированной по данным электрокардиограммы (ЭКГ) и фотоплетизмограммы (ФПГ). С помощью ЭКГ регистрировали длительность кардиоинтервалов (ДКИ) или RR-интервалов в стандартном отведении. ДКИ представляет полный сердечный цикл, связанный с возбуждением синусового узла, и отражает изменения сердечного ритма [7]. Закономерно предположить, что длительность сердечного цикла, фиксированная с помощью метода ЭКГ, отражает реализацию механизмов интракардиальной регуляции сердечно-сосудистой системы.

С помощью метода ФПГ записывали длительность пульсовых волн (ДПВ). Пульсовая волна формируется за счёт выброса крови в сосудистое русло; её пики отражают систолический и диастолический периоды сердечного цикла. По длительности пульсовой волны судят о продолжительности сердечного цикла, продолжительности систолы и частично диастолы и их соотношении [20]. Известно, что в целом продолжительность пульсовой волны зависит от особенностей работы сердца, а величина и форма её пиков определяется состоянием сосудистой стенки [17]. Длительность сердечного цикла, регистрируемая с помощью метода ФПГ, является отражением механизмов преимущественно экстракардиальной регуляции сердечно-сосудистой системы.

ДКИ и ДПВ являются показателями продолжительности сердечного цикла, зафиксированной соответственно в виде электрической активности сердца и светопроницаемости сосуда в зависимости от его кровенаполнения. В идеальных условиях величины ДКИ и ДПВ должны полностью совпадать, особенно если они будут зафиксированы одновременно. Следовательно, сопоставление ДКИ и ДПВ возможно на основе синхронной записи ЭКГ и ФПГ (рис. 1).

На рис. 1 видно, что при синхронной записи получение данных ФПГ по сравне-

нию с данными ЭКГ происходит с некоторой задержкой. Длительность такой задержки зависит от локализации датчика ФПГ. В обычных условиях кровь достигает пальцевого датчика через 3–5 с, а ушного датчика она достигает через 2–3 с после сердечного сокращения [23]. Длительность задержки получения данных не влияет на сами данные. Таким образом, величины ДКИ и ДПВ должны полностью совпадать вне зависимости от локализации датчиков. Проверка этого положения проводилась на первом этапе разработки электрооптического метода.

Фиксация длительности сердечного цикла с помощью методов ЭКГ и ФПГ

В экспериментальном исследовании [19] на здоровых добровольцах было показано, что точность совпадения продолжительности сердечного цикла по данным ЭКГ и ФПГ зависит от расположения датчика ФПГ. В качестве показателя степени совпадения длительности сердечного цикла по данным ЭКГ и ФПГ использовали среднеквадратичное отклонение ДКИ от ДПВ.

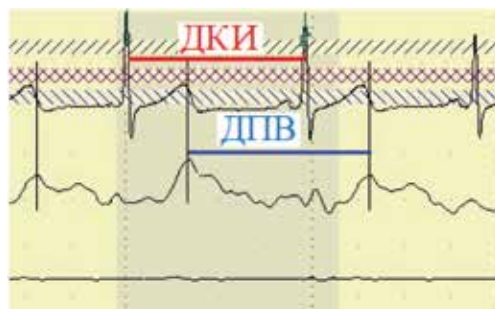


Рис. 1. Пример синхронной записи кардиоинтервалов (сверху) и пульсовых волн (снизу). Красной линией обозначена ДКИ – длительность кардиоинтервала между соседними R пиками; синей линией показана ДПВ – длительность пульсовой волны между соседними пиками волны пульса [13].

Fig. 1. An example of synchronous recording of cardiac intervals (above) and pulse waves (below). The red line indicates the DCI (ДКИ) – the duration of a cardio interval – between adjacent R peaks; the blue line shows the DPW (ДПВ) – the duration of a pulse wave – between adjacent peaks of the pulse wave [13].

ДПВ фиксировали одновременно от трёх датчиков с разной локализацией: от пальцевого датчика, расположенного на концевой фаланге указательного пальца левой руки; от ушного датчика, расположенного на мочке левого уха; от шейного датчика, расположенного на поверхности шеи в проекции сонной артерии с левой стороны. Наибольшая степень совпадения ДКИ и ДПВ была обнаружена при записи ФПГ от ушного датчика, что позволило сделать вывод о том, что запись данных с этого датчика меньше всего подвержена влиянию случайных факторов.

В данном исследовании также было показано, что степень совпадения ДКИ и ДПВ увеличивалась в зависимости от этапа исследования и не зависела от функционального состояния добровольцев [19].

Показатели степени совпадения длительности сердечного цикла, фиксируемой с помощью методов ЭКГ и ФПГ, при патологиях сосудов

Следующий этап разработки электрооптического метода был посвящён изучению вопроса о том, как повлияют на совпадение ДКИ и ДПВ патологии сосудов. Известно, что характер пульсовой волны зависит не только от сердечной активности, но и от состояния сосудов, которое определяется эластичностью сосудистой стенки, шириной просвета сосудов, извитостью сосудистого русла [17, 20]. Закономерно предположить, что при сосудистых патологиях, сопровождающихся сужением или расширением просвета сосуда, нарушением эластичности сосудистой стенки и изменением скорости кровотока, ДПВ может подвергаться некоторым искажениям.

Для проверки этого предположения необходимо было выбрать патологии, которые отвечали бы следующим условиям: 1) были связаны с нарушением сосудов; 2) представляли доклиническую стадию НПНКМ; 3) имели различную этиологию. Для анали-

за нами были выбраны синдром позвоночной артерии при остеохондрозе шейного отдела позвоночника (ОШОП) и синдром вегетативной дисфункции (СВД), представляющие доклиническую стадию НПНКМ, диагностика которой важна для первичной профилактики инсульта [1].

Нарушения мозгового кровообращения при ОШОП возникают в результате смещения или сдавливания позвоночных артерий и их нервных элементов. Раздражение периаптериального симпатического сплетения деформированными крючковидными образованиями приводит к рефлекторному сужению позвоночной артерии [18]. Раздражение позвоночного нерва, повышая тонус позвоночной артерии, может уменьшать скорость кровотока в ней на 1/3 от исходной величины, а длительное воздействие на сосудистую стенку становится причиной образования атеросклеротических бляшек в позвоночной артерии [4]. В результате развивается ангиодистоническое состояние и ограничение кровотока по всей вертебробазилярной системе [15, 16, 21].

Нарушения мозгового кровообращения при СВД развиваются в результате нарушения нейрогуморальной регуляции деятельности внутренних органов, в т. ч. сердечно-сосудистой системы [5]. Причинами таких нейрогуморальных нарушений считают наследственные и приобретённые особенности активности вегетативной нервной системы, проявляющиеся в виде надсегментарных вегетативных расстройств, преимущественно ваготонических [9, 22]. СВД является причиной начальных стадий хронической ишемии мозга, возникающей на фоне недостаточности его кровоснабжения, которое обусловлено гипертонусом парасимпатической нервной системы, гипокинетическим типом центрального кровообращения; двусторонним снижением линейных скоростей кровотока по передних и средней мозговым артериям; ангио-

дистоническим типом церебральной гемодинамики [2, 3].

Экспериментальное исследование длительности сердечного цикла по данным ЭКГ и ФПГ проводили на добровольцах с ОШОП и СВД [8, 13]. В этих исследованиях были выявлены показатели, отражающие степень совпадения ДКИ и ДПВ в норме и при таких патологиях, как СВД и ОШОП, представляющих доклиническую стадию НПНКМ.

Два показателя, отражающие степень различия между ДКИ и ДПВ, — это мера различия (МР) и квадрат меры различия (КМР). КМР вычисляли как среднее арифметическое суммы квадратов разностей ДКИ и ДПВ, а МР вычисляли как корень квадратный из КМР. Показатели КМР и МР отражают, насколько различаются между собой ДКИ и ДПВ: чем больше значение данных показателей, тем больше отличается длительность сердечного цикла, зафиксированная по данным ЭКГ и ФПГ. Значения показателей КМР и МР минимальны (стремятся к нулю) у здоровых добровольцев и увеличиваются у добровольцев с такими патологиями, как СВД и ОШОП. Это позволяет говорить о наличии высокой степени совпадения между ДКИ и ДПВ в норме, которая снижается у добровольцев с сосудистыми патологиями.

Следующий показатель отражает степень вариативности длительности сердечного цикла, зафиксированной с помощью ЭКГ и ФПГ. Отклонение ДКИ и ДПВ от их среднего значения (ОС) вычисляли как корень квадратный из среднего арифметического от суммы квадратов разностей значений ДКИ и ДПВ от их общего среднего. Показатель ОС отражает отклонение ДКИ и ДПВ от их общего среднего арифметического: чем больше значение этого показателя, тем больше отклоняется длительность кардиоинтервалов и пульса от средней длительности сердечного цикла. Показатель ОС у здоровых добровольцев

принимает значение выше среднего, которое у добровольцев с патологиями отличается в сторону значительного снижения или повышения. Следовательно, в норме вариативность — выше среднего, а при патологиях она увеличивается или уменьшается.

Три следующие показателя отражают наличие линейной связи или степень схождения (корреляцию) между ДКИ и ДПВ. Среди них коэффициент наклона (КН) аппроксимирующей прямой зависимости ДКИ от ДПВ, коэффициент смещения (КС) аппроксимирующей прямой зависимости ДКИ от ДПВ и коэффициент достоверности аппроксимации (КДА) зависимости ДКИ от ДПВ. Показатели КН, КС и КДА отражают степень совпадения ДКИ и ДПВ в течение некоторого промежутка времени, в котором осуществляется запись данных. Эти показатели были выявлены в ходе линейной аппроксимации ДКИ и ДПВ, которая осуществлялась методом наименьших квадратов. Линейная зависимость ДКИ и ДПВ описывается средней линией, которая в общем виде может быть представлена уравнением 1:

$$y = ax + b \quad (1),$$

где a — коэффициент наклона аппроксимирующей прямой; b — коэффициент смещения или отклонения точек от прямой в системе координат.

В случае высокой степени совпадения ДКИ и ДПВ значения КН и КДА растут, а значение КС — уменьшается.

По результатам экспериментальных исследований [8, 13] было показано, что добровольцы с ОШОП и СВД отличаются от нормы более низкой степенью совпадения ДКИ и ДПВ по показателям линейной связи. Для иллюстрации ниже представлены графики линейных зависимостей ДКИ и ДПВ для добровольцев из разных групп (рис. 2–4).

На рис. 2 представлен график линейной зависимости между ДКИ и ДПВ для типичного добровольца из группы нормы, кото-



Рис. 2. Графическое представление линейной зависимости между длительностью кардиоинтервалов и длительностью пульсовых волн добровольца Б.А. из группы нормы. Показатели совпадения ДКИ и ДПВ: $KH = 0,985$; $KC = 12$; $КДА = 0,989$.

Fig. 2. Linear relationship between the duration of cardio intervals and the duration of pulse waves in volunteer B.A. from the norm group. Coincidence indicators of DCI and DPW: KH (slope factor) = 0.985; KC (bias factor) = 12; $КДА$ (approximation confidence factor) = 0.989.

рый демонстрирует наибольшую степень совпадения ДКИ и ДПВ. Добровольцы из группы нормы имеют наибольшее значение показателей KH и $КДА$ и наименьшее значение KC . У добровольцев из группы ОШОП и СВД по сравнению с нормой обнаружены меньшие значения показателя KH и $КДА$ и большие значения показателей KC , что указывает на более низкую степень совпадения ДКИ и ДПВ у представителей из групп с исследуемыми патологиями.

Сравнение линейной зависимости между ДКИ и ДПВ у добровольцев из групп ОШОП (рис. 3) и СВД (рис. 4) позволяет сразу увидеть разницу между ними. Для добровольца из группы ОШОП характерна упорядоченность точек аппроксимирующей прямой, а у добровольца из группы СВД точки расположены более хаотично.

Меньшее совпадение ДКИ и ДПВ в группах с патологиями, связанными с нарушением тонуса и уменьшением просвета сосудов, является маркером неблагоприятного состояния сосудов. Именно сосудистые на-

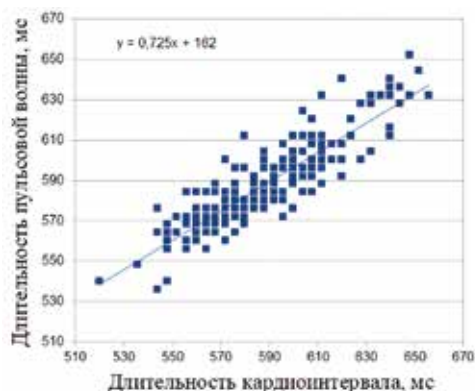


Рис. 3. Графическое представление линейной зависимости между длительностью кардиоинтервалов и длительностью пульсовых волн добровольца Ч.Д. из группы ОШОП. Показатели совпадения ДКИ и ДПВ: $KH = 0,725$; $KC = 162$; $КДА = 0,758$.

Fig. 3. Linear relationship between the duration of cardio intervals and the duration of pulse waves in volunteer Ch.D. from the group of cervical spine osteochondrosis. Coincidence indicators of DCI and DPW: KH (slope factor) = 0.725; KC (bias factor) = 162; $КДА$ (approximation confidence factor) = 0.758.

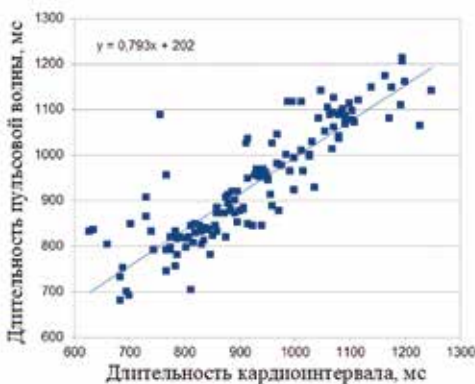


Рис. 4. Графическое представление линейной зависимости между длительностью кардиоинтервалов и длительностью пульсовых волн добровольца Г.О. из группы СВД. Показатели совпадения ДКИ и ДПВ: $KH = 0,793$; $KC = 202$; $КДА = 0,773$.

Fig. 4. Linear relationship between the duration of cardio intervals and the duration of pulse waves in volunteer G.O. from the group of autonomic dysfunction syndrome. Coincidence indicators of DCI and DPW: KH (slope factor) = 0.793; KC (bias factor) = 202; $КДА$ (approximation confidence factor) = 0.773.

рушения вносят шумовую составляющую в ДПВ, которая выявляется при сравнении

её с ДКИ. Экспериментально было показано, что эта шумовая составляющая отсутствует в группе нормы (рис. 2) и выявляется в группах с патологиями. Шумовая составляющая отличается в группах с патологиями: для группы с ОШОП характерно упорядоченное расположение точек линейной зависимости ДКИ от ДПВ (рис. 3), а группа СВД отличается более хаотическим расположением точек (рис. 4). Это указывает на то, что шумовая составляющая является маркером патологического процесса, происходящего в сосудах при соответствующей патологии. Изменение состояния сосудов при ОШОП характеризуется механическим сдавливанием сосудистых и нервных элементов, что отражается в виде упорядоченной шумовой составляющей, выявляемой при сопоставлении ДКИ и ДПВ. СВД характеризуется нарушением вегетативной регуляции сосудистого тонуса, проявляющимся в виде спастических явлений, что представлено хаотической шумовой составляющей. Особенности линейной зависимости между ДКИ и ДПВ хорошо различимы графически, и их следует учитывать при дифференциации патологий друг от друга.

Результаты экспериментальных исследований [8, 13] указывают на различия в значениях показателей линейной связи ДКИ и ДПВ между группой нормы и группами добровольцев с сосудистыми патологиями. Добровольцы из группы нормы характеризуются устойчивой линейной связью ДКИ и ДПВ, при которой определяются высокие значения показателей КН и КДА и низкие значения показателя КС. Добровольцы с сосудистыми патологиями характеризуются снижением устойчивости линейной связи по сравнению с нормой: при патологиях значения показателей КН и КДА ниже, а значения показателя КС значительно выше по сравнению с нормой. Следовательно, обнаруживается наличие меньшей степени совпадения ДКИ и ДПВ

в группах добровольцев с ОШОП и СВД по сравнению с нормой, что позволяет считать электрооптический метод пригодным для ранней диагностики нарушений кровоснабжения головного мозга. Однако остаётся нерешённым вопрос о конкретных критериях, позволяющих определить то, к какой группе может быть отнесён новый обследуемый.

Дискриминантный анализ показателей степени совпадения длительности сердечного цикла, фиксируемой с помощью методов ЭКГ и ФПГ

Следующий этап разработки электрооптического метода был посвящён определению критериев принадлежности добровольцев к одной из трёх групп: группы практически здоровых, группы ОШОП и группы СВД. Для этого провели дискриминантный анализ показателей степени совпадения ДКИ и ДПВ по трём заданным группам [14]. В результате дискриминантного анализа были определены показатели совпадения ДКИ и ДПВ, обладающие дискриминантной способностью разделять три заданные группы. Наилучшим образом дискриминация трёх групп осуществлялась с помощью трёх показателей, среди которых мера различия между ДКИ и ДПВ, вариативность ДКИ и ДПВ (ОС) и теснота линейной связи между ДКИ и ДПВ (КДА). Заданные группы характеризуются определёнными паттернами значений трёх дискриминантных показателей совпадения ДКИ и ДПВ, на основе сравнения которых возможно определение принадлежности новых добровольцев к одной из трёх заданных групп: здоровые, ОШОП и СВД.

Сравнение дискриминантных показателей в группах с патологиями и в группе нормы позволило выявить количественные расхождения в их значениях, которые отражают особенности регуляции сердечно-сосудистой системы. Группы с рассмо-

тренными патологиями характеризуются уменьшением тесноты линейной связи между ДКИ и ДПВ по сравнению с нормой, что указывает на наличие общей несогласованности в работе интракардиальных и экстракардиальных регуляторных механизмов.

Мера различия между ДКИ и ДПВ при рассмотренных патологиях увеличивается по сравнению с нормой, что указывает на нарушение механизмов экстракардиальной регуляции, проявляющееся в форме механического или спастического сдавливания сосудов, приводящего к уменьшению просвета сосудов и затруднению кровообращения и в итоге — к недостаточности кровоснабжения органов и тканей.

Изменение вариативности ДКИ и ДПВ при рассмотренных патологиях в сторону значительного уменьшения и значительного увеличения по сравнению с нормой указывает на изменения в соотношении вклада интракардиальных и экстракардиальных механизмов в общую регуляцию. В норме интракардиальная и экстракардиальная регуляция реализуются по принципу взаимодополнения, обеспечивая наилучшее состояние сердечно-сосудистой системы в зависимости от изменяющихся условий. При ОШОП обнаруживается чрезмерная стабильность во взаимодействии интракардиальных и экстракардиальных механизмов, а при СВД наблюдается чрезмерная изменчивость в их взаимодействии. Искажения механизмов регуляции сердечно-сосудистой системы при рассмотренных патологиях обусловлены сопровождающими их характерными изменениями, приводящими к нарушениям мозгового кровообращения.

В результате дискриминантного анализа были выявлены грубые нарушения согласованности в работе центральных механизмов нейровегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы, нервно-мышечного автоматизма сердца и его афферентной регуляции при рассмотренных патологиях,

сопровождающихся нарушениями кровоснабжения головного мозга.

Описание результатов, полученных в ходе разработки электрооптического метода, позволило сформулировать следующие выводы:

- электрооптический метод основан на сопоставлении длительности сердечного цикла, зафиксированной по данным ЭКГ и ФПГ, по показателям совпадения которых можно судить о соотношении интракардиальных и экстракардиальных механизмов регуляции;
- экспериментально у здоровых добровольцев была выявлена наибольшая степень совпадения между длительностями сердечного цикла, зафиксированными по данным ЭКГ в стандартном отведении и по данным ФПГ в ушном отведении;
- вариант регистрации длительности сердечного цикла по данным ЭКГ в стандартном отведении и по данным ФПГ в ушном отведении подходит для диагностики начальных проявлений недостаточности кровоснабжения головного мозга, изученных на примере ОШОП и СВД;
- по результатам дискриминантного анализа были выявлены показатели совпадения длительности сердечного цикла, зафиксированной по данным ЭКГ и ФПГ, на основе которых возможна дифференциальная диагностика начальных проявлений недостаточности кровоснабжения головного мозга, изученных на примере ОШОП и СВД;
- мера различия между длительностью сердечного цикла, зафиксированной по данным ЭКГ и ФПГ, является показателем сохранности (в норме) и нарушения (при патологиях) механизмов экстракардиальной регуляции сердечно-сосудистой деятельности;
- теснота линейной связи длительности сердечного цикла, зафиксированной по данным ЭКГ и ФПГ, является показателем наличия (в норме) или отсутствия (при патологиях) общей согласованности в работе

интракардиальных и экстракардиальных регуляторных механизмов;

- вариативность различий между длительностью сердечного цикла, зафиксированной по данным ЭКГ и ФПГ, является показателем сбалансированного (в норме) и несбалансированного (при патологиях) соотношения вкладов интракардиальных и экстракардиальных механизмов в общую регуляцию сердечно-сосудистой системы.

Заключение

Электрооптический метод предназначен для ранней диагностики нарушений кровоснабжения головного мозга. Этот метод позволяет определить наличие нарушений сосудов на ранней доклинической стадии, при начальных проявлениях недостаточности кровоснабжения головного мозга. С помощью данного метода можно определить наличие сосудистых искажений, отсутствующих в норме. Метод является чувствительным в отношении патологических состояний сосудов, вызванных механическим сдавливанием сосудистого русла, при котором развивается синдром позвоночной артерии при остеохондрозе шейного отдела

позвоночника, и вызванных спазмами сосудов, характерными для синдрома вегетативной дисфункции. Для определения наличия или отсутствия сосудистой патологии и её спецификации используется набор дифференциальных показателей соотношения длительности сердечного цикла, зафиксированной по данным ЭКГ и ФПГ, обладающих способностью разделять три заданные группы. Дифференциальная диагностика начальных проявлений недостаточности кровоснабжения головного мозга осуществляется на основе трёх показателей соответствия между длительностью сердечного цикла, зафиксированной по данным ЭКГ и ФПГ, которые отражают сохранность, согласованность и сбалансированность интракардиальных и экстракардиальных механизмов регуляции сердечно-сосудистой системы. В отличие от нормы, патологии, приводящие к развитию недостаточности кровоснабжения головного мозга, характеризуются нарушениями экстракардиальной регуляции, несогласованностью и несбалансированностью интракардиальных и экстракардиальных регуляторных механизмов сердечно-сосудистой системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Антонен Е.Г., Буркин М.М., Хяникяйнен И.В., Кручек М.М. Характеристика начальных проявлений недостаточности мозгового кровообращения на доклинической стадии у лиц трудоспособного возраста. *Профилактическая и клиническая медицина*. 2011;3(40):94–98. [Antonen E.G., Burkin M.M., Hyanikyajnen I.V., Kruchek M.M. Harakteristika nachal'nyh proyavlenij nedostatochnosti mozgovogo krovoobrashcheniya na doklinicheskoy stadii u lic trudospobnogo vozrasta [Characteristics of the initial manifestations of cerebral circulatory insufficiency at the preclinical stage in people of working age]. *Profilakticheskaja i klinicheskaja medicina* [Preventive and Clinical Medicine]. 2011;3(40): 94–98. (In Russian)].
2. Антонен Е.Г., Хяникяйнен И.В. Соматоформная вегетативная дисфункция как предиктор хронической ишемии мозга. *Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Медицинские науки*. 2014;4:43–48. [Antonen E.G., Hyajnikyajnen I.V. Somatoformnaya vegetativnaya disfunkciya kak prediktor hronicheskoy ishemii mozga [Somatoform autonomic dysfunction as a predictor of chronic cerebral ischemia]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Medicinskie nauki* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Medical Sciences]. 2014;4:43–48. (In Russian)].
3. Антонен Е.Г., Хяникяйнен И.В. Электрофизиологическая характеристика доклинической стадии начальных проявлений недостаточности мозгового кровообращения у декретированных лиц в республике Карелия. *Вестник РУДН. Серия Медицина*. 2010;1:112–119. [Antonen E.G., Hyanikyajnen I.V. Elektrofiziologicheskaya harakteristika doklinicheskoy stadii nachal'nyh proyavlenij nedostatochnosti mozgovogo krovoobrashcheniya u dekretirovannyh lic v respublike Kareliya [Electrophysiological characteristics of the preclinical stage of initial manifestations of cerebral circulatory insufficiency in decreed persons in the Republic of Karelia]. *Vestnik RUDN*.

- Seriya Medicina [RUDN Journal of Medicine]*. 2010;1: 112–119. (In Russian)].
4. Антонов И.П., Гиткина Л.С. *Вертебрально-базиллярные инсульты*. Минск: Беларусь, 1977:240. [Antonov I.P., Gitkina L.S. *Vertebral'no-bazilyarnye insulyty [Vertebrobasilar strokes]*. Minsk: Belarus Publ., 1977:240. (In Russian)].
 5. Ацель Е.А., Газизов Р.М. Соматоформная дисфункция вегетативной нервной системы у подростков: особенности диагностики и лечения. *Практическая медицина*. 2008;4(28):65–67. [Atsel E.A., Gazizov R.M. Somatoformnaya disfunkciya vegetativnoj nervnoj sistemy u podrostkov: osobennosti diagnostiki i lecheniya [Somatoform dysfunction of the autonomic nervous system in adolescents: features of diagnosis and treatment]. *Prakticheskaja medicina [Practical Medicine]*. 2008;4(28):65–67. (In Russian)].
 6. Бабченко Н.В. Начальные проявления недостаточности кровоснабжения головного мозга: патоморфология, клиника, диагностика, принципы терапии. *Медицинские новости*. 2004;1:17–20. [Babchenko N.V. Nachal'nye proyavleniya nedostatochnosti krovosnabzheniya golovnogogo mozga: patomorfologiya, klinika, diagnostika, principy terapii. *Medicinskie novosti [Medical News]*. 2004;1:17–20. (In Russian)].
 7. Бокерия Л.А., Бокерия О.Л., Волковская И.В. Вариабельность сердечного ритма: методы измерения, интерпретация, клиническое использование. *Анналы аритмологии*. 2009;4:21–32. [Bokeriya L.A., Bokeriya O.L., Volkovskaya I.V. Variabel'nost' serdechnogo ritma: metody izmereniya, interpretaciya, klinicheskoe ispol'zovanie [Heart rate variability: measurement methods, interpretation, clinical use]. *Annaly aritmologii [Annals of Arrhythmology]*. 2009;4:21–32. (In Russian)].
 8. Вартанов А.А., Николаев А.А., Чайванов Д.Б., Чудина Ю.А. Показатели согласованности и рассогласования временных характеристик ЭКГ и ФПГ у лиц с особенностями кровоснабжения головного мозга, обусловленными сужением кровеносных сосудов вследствие потери их эластичности. *Вестник психофизиологии*. 2018;3:91–100. [Vartanov A.A., Nikolaev A.A., Chaivanov D.B., Chudina Yu.A. Pokazатели soglasovannosti i rassoglasovaniya vremennykh harakteristik EKG i FPG u lic s osobennostyami krovosnabzheniya golovnogogo mozga, obuslovlennymi suzheniem krovynosnykh sosudov vsledstvie poteri ih elastichnosti [Indicators of consistency and mismatch of temporal characteristics of ECG and FPG in persons with peculiarities of blood supply to the brain caused by narrowing of blood vessels due to loss of their elasticity]. *Vestnik psichofiziologii [Psychophysiology News]*. 2018;3:91–100. (In Russian)].
 9. *Вегетативные расстройства: клиника, лечение, диагностика* / Под ред. А.М. Вейна. М.: Медицинское информационное агентство, 2000:752. [*Vegetativnye rasstrojstva: klinika, lechenie, diagnostika [Vegetative disorders: clinic, treatment, diagnosis]*. Ed. by A.M. Veyn. Moscow: Medicinskoe informacionnoe agentstvo Publ., 2000:752. In Russian]].
 10. Верещагин Н.П. *Патология вертебрально-базиллярной системы и нарушения мозгового кровообращения*. М.: Медицина, 1980:312. [Vereshchagin N.P. *Patologiya vertebral'no-bazilyarnoy sistemy i narusheniya mozgovogo krovoobrashcheniya [Pathology of the vertebral-basilar system and disorders of cerebral circulation]*. Moscow: Medicina Publ., 1980:312. (In Russian)].
 11. Ермолаева А.И., Баранова Г.А., Коврыгин С.И. Особенности диагностики вегетативно-сосудистых расстройств при вертеброгенной патологии. *Вестник новых медицинских технологий*. 2018;1:66–69. [Ermolaeva A.I., Baranova G.A., Kovrygin S.I. Osobennosti diagnostiki vegetativno-sosudistyh rasstrojstv pri vertebrogennoj patologii [Particularities of diagnosis of vegetative-vascular disorders in patients with vertebrogenic pathology]. *Vestnik novykh medicinskih tekhnologii [Journal of New Medical Technologies]*. 2018;1:66–69. (In Russian)]. DOI: 10.24411/2075-4094-2018-15891.
 12. Захарова Е.М. Современные представления о цереброваскулярных заболеваниях. *Медицинский альманах*. 2010;2(11):42–47. [Zakharova E.M. Sovremennye predstavleniya o cerebrovaskulyarnykh zabolevaniyah [Modern ideas about cerebrovascular diseases]. *Medicinskij al'manah [Medical Almanac]*. 2010;2(11):42–47. (In Russian)].
 13. Каркищенко Н.Н., Николаев А.А., Чудина Ю.А., Чайванов Д.Б., Вартанов А.А. Показатели согласованной работы сердца и сосудов при сосудистой патологии вертеброгенной и невертеброгенной природы. *Биомедицина*. 2020;16(2):47–59. [Karkischenko N.N., Nikolaev A.A., Chudina Yu.A., Chaivanov D.B., Vartanov A.A. Pokazатели soglasovannoj raboty serdca i sosudov pri sosudistoj patologii vertebrogennoj i nevertebrogennoj prirody [Indicators of coordinated work of the heart and blood vessels in vascular pathology of vertebrogenic and non-vertebrogenic nature]. *Biomedicina [Journal Biomed]*. 2020;16(2):47–59. (In Russian)]. DOI: 10.33647/2074-5982-16-2-47-59.
 14. Каркищенко Н.Н., Чайванов Д.Б., Чудина Ю.А., Вартанов А.А., Николаев А.А. Дискриминантный анализ показателей согласованной работы сердца и сосудов в норме и при патологиях сосудов. *Биомедицина*. 2021;17(2):8–21. [Karkischenko N.N., Chaivanov D.B., Chudina Yu.A., Vartanov A.A., Nikolaev A.A. Diskriminantnyj analiz pokazatelej soglasovannoj raboty serdca i sosudov v norme i pri patologiyah sosudov [Discriminant analysis of indicators of coordinated work of the heart and blood vessels in normal and vascular pathologies]. *Biomedicina*

- [*Journal Biomed.*]. 2021;17(2):8–21. (In Russian)]. DOI: 10.33647/2074-5982-17-2-8-21.
15. Мамонова Е.Ю. Клинико-гемодинамические нарушения у подростков с вертеброгенным синдромом позвоночной артерии. *Хирургия позвоночника*. 2006;3: 68–70. [Mamonova E.Yu. Kliniko-gemodinamicheskie narusheniya u podrostkov s vertebrogennym sindromom pozvonochnoj arterii [Clinical and hemodynamic disorders in adolescents with vertebrogenic vertebral artery syndrome.]. *Hirurgiya pozvonochnika [Spine Surgery]*. 2006;3:68–70. (In Russian)].
 16. Мамонова Е.Ю., Калинина М.Ю. Гемодинамические нарушения при шейном остеохондрозе у нефтяников Западной Сибири. *Сибирский медицинский журнал*. 2008;2(3):69–72. [Mamonova E.Yu., Kalinina M.Yu. Gemodinamicheskie narusheniya pri shejnom osteohondroze u neftyanikov Zapadnoj Sibiri [Hemodynamic disorders in cervical osteochondrosis in oilmen of Western Siberia]. *Sibirskij medicinskij zhurnal [Siberian Medical Journal]*. 2008;2(3):69–72. (In Russian)].
 17. Мошкевич В.С. *Фотоплетизмография*. М.: Медицина, 1970:154. [Moshkevich V.S. *Photoplethysmography*. Moscow: Medicina Publ., 1970:154. (In Russian)].
 18. Мугерман Б.И., Багманова Р.Г. Механизмы нарушения вертебробазиллярного кровообращения у лиц среднего возраста, страдающих остеохондрозом. *Педагогико-психологические и медико-биологические проблемы физической культуры и спорта*. 2007;3(2):80–85. [Mugerman B.I., Bagmanova R.G. Mekhanizmy narusheniya vertebrobazilyarnogo krovoobrashcheniya u lic srednego vozrasta, stradayushchih osteohondrozom [Mechanisms of violation of vertebrobasilar circulation in middle-aged people suffering from osteochondrosis]. *Pedagogiko-psihologicheskie i mediko-biologicheskie problemy fizicheskoy kul'tury i sporta [Russian Journal of Physical Education and Sport]*. 2007;3(2):80–85. (In Russian)].
 19. Стригина М.И., Чайванов Д.Б., Чудина Ю.А. Исследования погрешностей данных фотоплетизмограммы для анализа вариабельности сердечного ритма. *Биомедицина*. 2013;4:139–148. [Strigina M.I., Chaivanov D.B., Chudina Yu.A. Issledovaniya pogreshnostej dannyh fotopletizmogrammy dlya analiza variabel'nosti serdechnogo ritma [Studies of errors in photoplethysmogram data for the analysis of heart rate variability]. *Biomedicina [Journal Biomed.]*. 2013;4:139–148. (In Russian)].
 20. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Вагарин А.Ю., Рытик А.П. *Методы и аппаратура для диагностики состояния сердечно-сосудистой системы по характеристикам пульсовой волны*. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2009:96. [Usanov D.A., Skripal' A.V., Vagarin A.Yu., Rytik A.P. *Metody i apparatura dlya diagnostiki sostoyaniya serdechnososudistoj sistemy po harakteristikam pul'sovoj volny [Methods and equipment for diagnosing the state of the cardiovascular system by pulse wave characteristics]*. Saratov: Saratov University Publ., 2009:96. (In Russian)].
 21. Черноротов В.А. Экспертно-реабилитационная диагностика больных с вертебробазиллярной недостаточностью при остеохондрозе шейного отдела позвоночника. *Вестник физиотерапии и курортологии*. 2014:51–56. [Chernorotov V.A. Ekspertno-reabilitacionnaya diagnostika bol'nyh s vertebrobazilyarnoj nedostatochnost'yu pri osteohondroze shejnogo otdela pozvonochnika [Expert rehabilitation diagnostics of patients with vertebrobasilar insufficiency in osteochondrosis of the cervical spine]. *Vestnik fizioterapii i kurortologii [Bulletin of Physiotherapy and Balneology]*. 2014:51–56. (In Russian)].
 22. Чутко Л.С. Соматоформные расстройства. *Медицинский совет*. 2011;1-2:84–87. [Chutko L.S. Somatoformnye rasstrojstva [Somatoform disorders]. *Medicinskij sovet [Medical Council]*. 2011;1-2:84–87. (In Russian)].
 23. Шурыгин И.А. *Мониторинг дыхания: пульсоксиметрия, капнография, оксиметрия*. СПб.: Невский Диалект; М.: Изд-во БИНОМ, 2000:301. [Shurygin I.A. *Monitoring dyhaniya: pul'soksimetriya, kapnografiya, oksimetriya [Respiratory monitoring: pulse oximetry, capnography, oximetry]*. St. Petersburg: Nevskij Dialekt Publ.; Moscow: BINOM Publ., 2000:301. (In Russian)].
 24. Provenzale J.M., Barboriak D.P. Brain infarction in young adults: etiology and imaging findings. *Am. J. Roentgenol.* 1997;169(4):1161–1168.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ковальчук Михаил Валентинович, д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН, ФГБУН Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»;
e-mail: Kovalchuk_MV@nrcki.ru

Mikhail V. Kovalchuk, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, National Research Center “Kurchatov Institute”;
e-mail: Kovalchuk_MV@nrcki.ru

Каркищенко Николай Николаевич, д.м.н., проф., акад. РАН, чл.-корр. РАН, ФГБУН «Научный центр биомедицинских технологий ФМБА России»;

e-mail: niknik2808@yandex.ru

Чайванов Дмитрий Борисович*, к.ф.-м.н., ФГБУН Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»;

e-mail: Chayvanov_DB@nrcki.ru

Чудина Юлия Александровна, ФГБУН Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»;

e-mail: Chudina_YA@nrcki.ru

Николаев Андрей Андреевич, ФГБУН Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»;

e-mail: Nikolaev-AA@nrcki.ru

Вартанов Александр Александрович, ФГБУН Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»;

e-mail: Vartanov_AA@nrcki.ru

Nikolay N. Karkischenko, Dr. Sci. (Med.), Prof., Academician of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Scientific Center of Biomedical Technologies of the Federal Medical and Biological Agency of Russia;

e-mail: niknik2808@yandex.ru

Dmitry B. Chaivanov*, Cand. Sci. (Phys.-Math.), National Research Center “Kurchatov Institute”;

e-mail: Chayvanov_DB@nrcki.ru

Yulia A. Chudina, Cand. Sci. (Psych.), National Research Center “Kurchatov Institute”;

e-mail: Chudina_YA@nrcki.ru

Andrey A. Nikolaev, National Research Center “Kurchatov Institute”;

e-mail: Nikolaev-AA@nrcki.ru

Alexander A. Vartanov, National Research Center “Kurchatov Institute”;

e-mail: Vartanov_AA@nrcki.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author