

А.В. БОГОМОЛОВ
**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОЙ
АДАПТАЦИОННОЙ МЕДИЦИНЫ**

Богомолов А.В. Информационные технологии цифровой адаптационной медицины.

Аннотация. В статье дана комплексная характеристика информационных технологий цифровой адаптационной медицины. Акцент сделан на применимость к разработке специализированных автоматизированных комплексов, программных моделей и систем изучения адаптационных возможностей человека к условиям внешней среды. Сформулированы требования к информационным технологиям повышения этих возможностей. Отражены особенности информационных технологий применительно к проведению прикладных системных исследований обеспечения жизнедеятельности, сохранения профессионального здоровья и продления долголетия человека.

Охарактеризованы шесть базовых концепций адаптационной медицины с акцентом на особенности математического обеспечения обработки информации, определены приоритеты совершенствования информационных технологий, применяемых в этих концепциях.

Рассмотрены информационные технологии, применяемые в задачах обеспечения профессиональной работоспособности человека с акцентом на необходимость применения адекватных методов диагностики состояния человека на всех этапах профессиональной деятельности и необходимости разработки технологий цифровых двойников, адекватно моделирующих адаптационные процессы и реакции организма в реальных условиях.

Дана характеристика информационных технологий персонализированного мониторинга рисков здоровью, позволяющих объективизировать воздействия физических факторов условий деятельности и реализовать индивидуальное и коллективное информирование персонала об опасности окружающей среды.

Показана насущная необходимость стандартизации методов обработки информации при разработке информационных технологий цифровой адаптационной медицины в интересах обеспечения физиологической адекватности и математической корректности подходов к получению и обработке информации о состоянии человека.

Сделаны выводы о том, что приоритеты совершенствования информационных технологий цифровой адаптационной медицины связаны с внедрением достижений четвертой промышленной революции, в том числе, концепции социкиберфизических систем.

Ключевые слова: цифровая медицина, цифровое здравоохранение, медицинская информатика, адаптационная медицина, профилактическая медицина, социкиберфизическая система.

1. Введение. Интенсивное развитие цифровых технологий во всех сферах жизнедеятельности человека и их ускоренное внедрение в экономике и социальной сфере отнесено к национальным целям и стратегическим задачам развития Российской Федерации. Одним из ключевых приоритетов достижения этих целей и решения поставленных задач является разработка и реализация технологий цифровой медицины [1-3].

Цифровая медицина – отрасль медицины, ключевыми факторами которой являются данные в цифровом виде, обработка больших объемов и использование результатов анализа которых по сравнению с традиционными формами позволяют существенно повысить эффективность профилактики, диагностики, лечения и реабилитации [4-7].

Анализируя достижения цифровой медицины, следует отметить, что подавляющее большинство из них относятся к созданию:

«умных больниц» (мониторинг траекторий перемещения пациентов и врачей, адресная доставка лекарств, телемедицина, технологии жизнеобеспечения пациентов в клинических условиях и т.п.) [8-12];

технологий индивидуального мониторинга состояния человека («умные часы», фитнес-браслеты, датчики-регистраторы и программное обеспечение для смартфонов и др.) [13-16];

технологий медицинской диагностики (обработка медицинских изображений, медицинские информационные системы, интеллектуальные медицинские системы и т.п.) [17-20];

систем электронного документооборота (электронные медицинские книжки, электронные назначения, технологии «одного окна» и др.) [21-29].

Вместе с тем, в последнее время существенно повышается роль *профилактической медицины*, направленной на предупреждение возникновения заболеваний и устранение (минимизацию) факторов риска их развития. При этом переход от здоровья к болезни рассматривается как стадийно протекающий процесс адаптации организма к условиям среды, в ходе которого возникновению качественно нового состояния – болезни – предшествуют изменения напряжения регуляторных механизмов [30, 31]. В связи с этим акцент с фиксации процесса перехода здорового в больного смещается на контроль резервов здоровья в интересах недопущения их истощения [32-34].

Реализация такого контроля основана на концепции *персонализированной* (персонализированной) медицины, предполагающей реализацию медицинского обеспечения пациентов с учетом индивидуальных особенностей состояния как всего организма, так и его отдельных органов, тканей, клеток (в том числе, на генетическом уровне) с акцентами на прогностичность (мониторинг индивидуальных рисков здоровью), проактивность (индивидуальная профилактика заболеваний) и превентивность (ориентация на лечение пациента, а не болезни).

Для достижения целей профилактической медицины необходимо изучение адаптационных возможностей человека к условиям внешней среды, разработка методов и средств для повышения этих возможностей, а также проведение прикладных системных исследований ме-

дицинских, физиолого-гигиенических, психологических, инженерно-психологических и эргономических аспектов обеспечения жизнедеятельности, эффективности, надежности деятельности, сохранения профессионального здоровья и продления профессионального долголетия человека [35-37]. Решением этих задач занимается *адаптационная медицина*.

В этом аспекте ключевое значение для достижений национальных целей и решения стратегических задач развития Российской Федерации имеет развитие *информационных технологий*, определяющих процессы, методы поиска, сбора, хранения, обработки, предоставления, распространения информации и способы осуществления таких процессов и методов при решении задач адаптационной медицины.

Информационные технологии цифровой адаптационной медицины имеют те же ограничения и требования к реализации, что и информационные технологии цифровой клинической медицины: обеспечение надежной работы, целостности собираемых и хранимых данных, а также доказательности, точности, достоверности и физиологической адекватности алгоритмов обработки информации и их реализации в виде программного и аппаратного обеспечения.

Однако анализ современных отечественных и зарубежных публикаций в области цифровой медицины показал, что информационным технологиям цифровой адаптационной медицины уделяется недостаточное внимание.

Существенное значение для адаптационной медицины имеют информационные технологии персонализированного (персонализированного) мониторинга состояния человека, однако в подавляющем большинстве они не доведены до уровня интеграции в концепции адаптационной медицины, а технические средства и программное обеспечение мониторинга не верифицированы и во многих случаях не обеспечивают адекватное решение задач определения:

функциональных возможностей организма по отношению к тем нагрузкам, в условиях которых осуществляется жизнедеятельность человека;

способностей организма восстанавливать свои резервы в отведенное трудовым регламентом время;

потенциальных возможностей пополнения резервов здоровья.

Основная причина этого очевидна: решение задач клинической медицины приносит существенную экономическую прибыль в ближайшей, а решение задач профилактической медицины – в отдаленной перспективе.

Цель статьи - дать общую характеристику информационных технологий цифровой адаптационной медицины для координации усилий специалистов различных предметных областей по их развитию в соответствии с достижениями научно-технического прогресса и требованиями адаптационной медицины.

2. Базовые концепции адаптационной медицины. Современные информационные технологии цифровой адаптационной медицины реализуют концепции, мониторинга и повышения адаптационных возможностей человека, важнейшими из которых являются [38, 39].

1. *Профессиональное здоровье* как характеристика генетически детерминированного и эволюционного процесса нормально протекающего биологического старения человека в конкретной социально-экономической формации с акцентом на обеспечение надежной профессиональной деятельности, здоровья и долголетия индивида [40].

Обеспечение профессионального здоровья обуславливает необходимость использования соответствующих информационных технологий, а также реализации управления компенсаторными свойствами и резервами организма.

Математическое обеспечение этой концепции основано на методах взвешенных сверток первичных показателей в интегральные, характеризующие различные аспекты профессионального здоровья, а также на технологиях адаптивной индивидуальной нормы его показателей [39, 41].

Примером реализации концепции является компьютерная методика «Навигатор здоровья», позволяющая сформировать индивидуальный паспорт здоровья и рекомендации по повышению уровня функциональных резервов организма [33]. По этой методике обследовано более 650 тысяч человек в возрасте от 6 до 60 лет, разделенных на 17 возрастных групп, построены рейтинговые шкалы для балльной оценки показателей здоровья, используемые при расчете индекса физического здоровья [33, 39]. Показано, что система восстановительных мероприятий, реализованная на базе концепции, позволила снизить общую заболеваемость в 1,7 раза, повысить надежность профессиональной деятельности в 1,6 раза и продлить профессиональное долголетие на 20-30% [39].

2. *Профилактическая каскадная концепция изменения здоровья*, отличительной чертой которой является реализация дозового рискометрического подхода к действию факторов риска здоровью и соответствующая классификация направлений его обеспечения: от медицинского и профессионального отбора до восстановления и реабилитации [41, 42]. На основе каскадной схемы реализуют важнейшие для

персонализированной адаптационной медицины технологии планирования затрат с точки зрения полезности того или иного медицинского вмешательства для изменения качества, продолжительности жизни и «витальной» потребности индивида [42].

Математическое обеспечение этой концепции составляют методы построения кривых «доза-эффект», характеризующих зависимости реакций биологического объекта на воздействия стресс-факторов различных интенсивностей [42].

Концепция успешно апробирована при решении задач управления рисками здоровью операторов атомных электростанций, ликвидаторов последствий радиационных аварий, персонала объектов по уничтожению химического оружия и работников химически опасных производств [41, 42].

3. *Концепция синдромосходных состояний*, основанная на результатах, подтверждающих, что изменение здоровья вследствие воздействия различных физических факторов сопровождается синдромосходным комплексом изменений на молекулярно-клеточном и тканевом уровнях [41, 42].

Математическое обеспечение этой концепции составляют методы деревьев решений, экстраполяции по принципу «модель-фактор» и мягких вычислений, позволяющие получать решающие правила синдромной диагностики, устойчивые как к неточности знания, заключенного в решающем правиле, так и к неточности, связанной с возможной вариабельностью характеристик состояния человека. За счет этого обеспечивается высокое качество синдромной диагностики, позволившее, в том числе, реализовать персонализированные программы профилактики и повышения адаптационных возможностей человека [41].

Концепция синдромосходных состояний успешно применена для решения комплекса практических задач медицинского обеспечения специалистов опасных профессий, подвергающихся воздействию физических факторов экстремальной и субэкстремальной интенсивности, экспериментальное изучение медико-биологических эффектов с участием испытуемых-добровольцев которых не представляется возможным [41, 42].

4. *Биологический возраст и профессиональное долголетие*, в понятиях которых возрастные изменения функциональных систем индивида сопоставляются со средними популяционными изменениями на основе биомаркеров старения (показателей состояния человека, значительно изменяющихся с возрастом и имеющих малый индивидуальный разброс) [39, 41, 43]. Биологический возраст, помимо наследственно-

сти, в большой степени зависит от условий жизнедеятельности и образа жизни индивида. Выявляемые различия хронологического и биологического возраста позволяют оценить интенсивность старения и функциональные возможности индивида [44, 45]. Концепция ориентирована на выработку стратегии коррекции наиболее вероятных или уже наступивших неблагоприятных изменений здоровья с учетом диапазона возможных изменений активности функциональных систем организма, который может быть обеспечен его активационными механизмами [46].

Математическое обеспечение этой концепции составляют методы сокращения размерности пространства признаков, методы восстановления зависимостей и методы синтеза интегральных показателей [41]. Для определения биологического возраста и профессионального долголетия разработано большое число специальных программно-аппаратных комплексов, ориентированных на представителей различных социо-профессиональных групп населения.

Концепция биологического возраста и профессионального долголетия успешно применена при решении комплекса задач мониторинга адаптационного потенциала летного состава государственной авиации, населения территорий, неблагоприятных в экологическом отношении, и персонала, работающего на таких территориях [42-46].

5. Концепция *качества жизни*, связанного со здоровьем, как интегральной характеристики физического, эмоционального, психологического и социального благополучия человека, основанная на его субъективной оценке, позволяющая дать многоплановый анализ важнейших составляющих здоровья [41, 42, 47]. Известно более 200 методик квалиметрии жизни, среди которых наиболее распространены опросники, рекомендованные Всемирной организацией здравоохранения, а также опросники SF-36 и EQ-5D.

Особенностью автоматизированных систем исследования качества жизни является ориентированность на выявление скрытых факторов риска здоровью, что позволяет обеспечить «расшифровку» причин риска и необходимые фактографические данные. Такие технологии эффективны для реализации в качестве интернет-приложений, предназначенных для самоконтроля здоровья с персонифицированным управлением его рисками.

Математическое обеспечение этой концепции ориентировано на обработку результатов анкетирования с использованием компьютерных вопросников. Широкое распространение при обработке результатов анкетирования получили методы многофакторного анализа, методы аналитических сетей (анализа иерархий), а также метод анализа и

синтеза показателей состояния сложных систем при информационном дефиците [41, 48, 49].

Концепция качества жизни успешно применена для решения задач анализа изменения здоровья населения во взаимосвязи с состоянием окружающей среды в интересах разработки и реализации технологий управления рисками здоровью, исследования соотношений между затратами на лечение и его эффективностью (фармакоэкономика), стандартизации методов лечения, разработки прогностических моделей развития болезней и т.п. [50, 51]. Показатели качества жизни населения являются ключевыми показателями эффективности реализации приоритетных национальных проектов долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации.

6. Концепция *рискометрии здоровья здоровых*, позволяющая обеспечить поддержку принятия решений о принадлежности текущего состояния человека системы к одному из альтернативных классов состояний с определением выраженности проявления признаков состояния определенного класса [41].

Концепция ориентирована на анализ, наряду со среднестатистическими (популяционными) показателями, необходимыми для планирования медицинской помощи, единичных отклонений в показателях состояния. Такие отклонения не считаются артефактами, а подлежат анализу, поскольку могут свидетельствовать о наличии донологических изменений, которые способны перейти в патологические изменения. Причем аномальные значения показателей состояния анализируются системно – во взаимосвязи с показателями состояния других функциональных систем организма, множество которых определяется, основываясь на теории доминанты и теории функциональных систем организма [41, 51].

Математическое обеспечение этой концепции составляют методы многоуровневого характера, включающие: математические методы компьютерного анкетирования и анализа его результатов на первом уровне, математические методы обработки результатов лабораторных и инструментальных исследований – на втором уровне и математические методы анализа многомерных данных на заключительном уровне позволяют эффективно решать задачи персонифицированного мониторинга резервов здоровья.

Концепция *рискометрии здоровья здоровых* эффективно применена при решении комплекса практических задач обеспечения работоспособности и сохранения здоровья операторов эргатических систем, в том числе, летного состава государственной авиации [41].

Несмотря на то, что базовые медико-биологические концепции адаптивной медицины созданы более 30 лет назад, подтверждены практикой и позволяют решать задачи цифровой адаптивной медицины, информационные технологии, реализующие эти концепции, нуждаются в совершенствовании. Приоритетом такого совершенствования должно быть внедрение в медико-биологические концепции современных:

технологий искусственного интеллекта, когнитивных вычислений и математической логики;

алгоритмов обработки больших массивов («BigData») структурных и иных физиологических данных, анализа временных рядов, сигналов, изображений и видеоданных, а также текстов и символьных последовательностей;

моделей молекулярно-генетических, биофизических, экосистемных и биосферных процессов, а также физиологической организации поведения при интеграции сенсорных, когнитивных и управляющих процессов;

технологий интернета вещей, разработки, сопровождения и анализа программ и информационно-коммуникационных систем;

вычислительных методов и алгоритмов для компьютерных систем высокой производительности, глобальных и интегрированных информационно-вычислительных и телекоммуникационных систем и сетей, облачных и грид-технологий;

достижений высокопроизводительных вычислений, нано- и микросистемной техники;

технологий управления распределенными вычислительными средами на основе технологий распределенного реестра (блокчейн и смарт-контрактов).

В свою очередь новые возможности сбора и обработки информации, открывающиеся за счет реализации современных информационных технологий, обусловят развитие изложенных и создание новых базовых медико-биологических концепций адаптивной медицины. Прогресс в реализации фундаментальных научных достижений в прикладные теории, технологии и методы, которые позволяют связать воедино достижения различных предметных областей для решения задач адаптивной медицины, связывается с прогрессом *трансляционной медицины*.

Специфической особенностью трансляционной медицины является реализации двухкомпонентного замкнутого контура обмена информацией [52, 53]:

от исследования к пациенту, направленного на повышение эффективности испытаний новых технологий, разработанных в результате научных исследований,

от пациента к исследованию, предполагающего обратную связь относительно применения технологий и определения приоритетов их совершенствования.

Прогресс трансляционной медицины существенным образом зависит от применяемых информационных технологий, ключевые значение имеют методы технологии системного анализа (абстрагирование и конкретизация, анализ и синтез, индукция и дедукция, формализация и конкретизация, реинжиниринг и другие).

3. Информационные технологии в задачах обеспечения профессиональной работоспособности человека. *Профессиональная работоспособность* человека отражает характеристики систем и функций организма, необходимые для выполнения профессиональных задач. Исходя из этого информационные технологии обеспечения профессиональной работоспособности человека должны обеспечивать диагностику состояния человека на всех этапах профессиональной деятельности и подготовки к ней.

Исследования показали, что встречающиеся на практике ситуации, требующие диагностики состояния человека в аспекте обеспечения его профессиональной работоспособности, подразделяются на пять типов [54]:

- 1) выявление устойчивых свойств организма человека, необходимых для надёжного выполнения задач профессиональной деятельности или препятствующих этому (профессиональный отбор);
- 2) решение о допуске конкретных специалистов к выполнению задач профессиональной деятельности (предсменный контроль);
- 3) определение максимально возможной продолжительности успешного решения профессиональных задач при воздействии неблагоприятных факторов условий деятельности;
- 4) выявление изменений состояния человека в процессе деятельности;
- 5) объективизация психофизиологических явлений, не имеющих выраженного прикладного характера (исследование активации внимания, мотивации и т.п.).

Одним из ключевых аспектов обеспечения надёжной деятельности, реализуемый в рамках подготовки к ней, является профессиональный отбор. Технологии профессионального отбора специалистов различных социо-профессиональных групп отработаны десятилетиями и включают определение множества профессионально важных качеств,

формирование системы тестов, позволяющих оценить выраженность этих качеств, и методы синтеза интегральных показателей, характеризующих профессиональную пригодность индивида.

Среди современных трендов совершенствования профессионального отбора – применение для решения его задач информационных технологий анализа полиморфизма генов, определяющих успешность адаптации индивида к нагрузкам, специфичным для конкретной профессиональной деятельности. Так, в результате экспериментальных исследований доказана актуальность скринингового исследования полиморфизма генов ACTN3, TFAM, PPARA и PPARGC1A при проведении военно-профессионального отбора для прохождения службы в подразделениях, выполняющих специальные задачи, связанные с высокими физическими нагрузками [55], известны результаты эффективного применения таких технологий в спортивной медицине [56].

Состояние человека в процессе деятельности изменяется под воздействием внешних и внутренних факторов ее условий. Переносимость человеком воздействия внешних неблагоприятных факторов условий деятельности зависит не только от их вида, продолжительности, интенсивности воздействия, но и от внутренних факторов («исходное» состояние человека, его опытность, общая физическая тренированность, психофизиологическая готовность и др.). Общие и специфические эффекты изменения состояния человека при воздействии факторов условий деятельности говорят о существовании закономерностей, в том числе [41, 42]:

немонотонная нелинейная зависимость изменения состояния человека от интенсивности и продолжительности внешних воздействий;

фазность, цикличность изменений характеристик состояния при длительном внешнем воздействии;

отсутствие однозначности и параллелизма физиологических и психологических сдвигов состояния (часто важную роль играет целевая установка).

Следует также учитывать, что в отличие от клинической медицины адаптационная медицина оперирует с состояниями человека, характеризующимися индивидуальной специфичностью, невыраженностью и обратимостью.

Ключевой особенностью изучения состояний человека является понимание их как реакций, формируемых организмом. Одним из наиболее важных моментов при этом является наличие комплекса причин, определяющих состояние человека в каждой конкретной ситуации, и выделение множества факторов, вносящих определённый

вклад в формирование ответной реакции организма. Качественная неоднородность разных состояний обуславливается, прежде всего, различиями в основных причинах, их вызывающих, и в условиях, в которых осуществляется воздействие факторов условий деятельности в каждом конкретном случае.

Таким образом, *состояние человека* – это сложная системная реакция, являющаяся результатом взаимодействия функциональных систем его организма и определяющая профессиональную работоспособность человека. Однако многообразие возможных состояний человека приводит к тому, что построить их универсальную классификацию не удаётся [41].

Поэтому вопрос выбора адекватного подхода к диагностике состояния в адаптационной медицине рассматривается в том смысле, насколько тот или иной подход является перспективным для дальнейшего продвигания, углубления в понимании проблемы и возможностях поиска средств контроля, прогнозирования и управления состоянием человека.

Несмотря на различие изложенных типовых постановок задач диагностики состояний человека – статичность или динамичность, оценивание или прогнозирование состояния – в формальном математическом смысле они являются тождественными, позволяющими свести задачу диагностики состояния человека к задаче *распознавания образов* [41]. В общем случае решение задачи распознавания образов заключается в разработке на основании исходных данных (набора описаний образов с указанием некоторой идентифицирующей характеристики) процедуры, позволяющей идентифицировать образ по его описанию с минимальным риском неправильной идентификации и, при необходимости, сравнить различные образы по некоторому критерию. При таком подходе к постановке задачи диагностики состояний человека целесообразно использовать их разделение на экстенсивные и интенсивные.

Экстенсивные состояния имеют разную основу, выраженное качественное своеобразие: сопоставление их внутри некоторой единой шкалы невозможно. К классу экстенсивных состояний относятся, например, диагнозы, имеющиеся у человека (согласно расписанию болезней и международной классификации болезней). Экстенсивные состояния являются «фоном» для развития интенсивных состояний, определяя устойчивые свойства организма человека. Информационные технологии распознавания экстенсивных состояний ориентированы на отнесение текущего состояния к одному из типов (классов), как правило, с указанием количественной оценки степени (меры) соответствия.

Интенсивные состояния имеют принципиальное сходство по своему содержанию: их можно упорядочить посредством единой шкалы, а изменение состояния может быть представлено в виде подвижной точки внутри этой шкалы. К классу интенсивных состояний человека относятся, например, функциональные состояния (утомление, эмоциональная и операционная напряженность, монотония и т.п.). Информационные технологии распознавания интенсивных состояний ориентированы на получение количественной оценки выраженности текущего состояния применительно к заранее заданным классам.

Таким образом, целью диагностики состояния является получение его оценки, под которой понимают заранее описанный класс (вид, тип), к которому отнесено текущее состояние в результате его идентификации.

При этом существенные различия в используемых на практике способах описания состояний человека не позволяют говорить о возможности решения всех типовых задач диагностики состояния с помощью какого-либо одного математического метода и требуют специального рассмотрения.

Формальное описание состояния человека задаётся совокупностью (кортежем) его характеристик (параметров, индексов, показателей). Используемые на практике способы описания состояния можно разделить на два типа: описания динамическим рядом характеристик и описания набором характеристик (табл. 1).

Таблица 1. Сопоставление типов описания состояния человека

| Описание | Динамическим рядом характеристик | Набором характеристик |
|---|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Размерность описания | До нескольких тысяч характеристик | До нескольких десятков характеристик |
| Физиологическая интерпретация характеристик | Одинаковая | Различная |

Выбор математического метода диагностики состояния определяется особенностями его описания (параметрами или показателями/индексами) состояния и типом исходных данных (гетероассоциативные или автоассоциативные).

Для обеспечения корректности математического обеспечения диагностики состояния человека при сборе исходных данных необходимо гарантировать их однородность, репрезентативность, достаточность и отсутствие аномальных наблюдений, а выбор показателей качества созданного математического обеспечения диагностики состоя-

ния человека следует производить исходя из того, к какому типу – экстенсивных или интенсивных – относится оцениваемое состояние.

При апробации математического метода диагностики экстенсивных состояний в качестве характеристик качества следует использовать: чувствительность, специфичность, прогностическую ценность положительного и отрицательного результата, отношение правдоподобия положительного и отрицательного результата, а при апробации математического метода диагностики интенсивных состояний – число допущенных гиподиагностических (первого рода) и гипердиагностических (второго рода) ошибок.

При этом в любом случае необходимо обеспечивать возможность интерпретации результатов диагностики состояния человека медицинским персоналом – понимания «внутреннего содержания» математического подхода к обработке информации о состоянии. С этих позиций, в частности, обуславливается сложность применения для построения интегральных показателей и решающих правил диагностики состояния человека на основе искусственных нейронных сетей. Решающие правила, реализованные на основе искусственных нейронных сетей, крайне сложны для интерпретации – поэтому такие результаты диагностики состояния человека подвергаются сомнению и воспринимаются с недоверием. Кроме того, имеет место проблема переобучения искусственной нейронной сети, которая состоит в неадекватной реакции на примеры, не применявшиеся при ее настройке: формируются существенно разные выходные данные для близких входных данных.

Реализация технологий обеспечения профессиональной работоспособности тесно связана с разработкой информационных технологий решения задач мониторинга состояния человека в условиях комбинированного воздействия факторов условий деятельности. При решении этих задач необходимо учитывать специфические особенности:

одинаковый медико-биологический эффект могут дать суммация или аддитивное взаимодействие факторов, потенциация, антагонизм и их комбинирование (потенциация при малых величинах и антагонизм – при больших и наоборот);

медико-биологические эффекты и зависимости равных эффектов соотношений «интенсивность-длительность» для большинства комбинаций факторов условий деятельности человека недостаточно изучены.

Решение задач диагностики состояния человека в условиях комбинированного воздействия факторов условий деятельности традиционно связывается с применением информационных технологий экс-

траполяции медико-биологических эффектов воздействия с животных на человека и методов планирования экспериментов [42, 57].

Прогресс в решении этих задач, важных для адапционной медицины, связывается с развитием технологий *цифровых двойников* – программных комплексов, адекватно моделирующих адаптационные процессы и реакции организма в реальных условиях. С применением технологий цифровых двойников появится возможность комплексных исследований реакций функциональных систем организма на изолированное и комбинированное воздействие факторов условий деятельности (в том числе, экстремальной интенсивности) без проведения экспериментов с участием человека. С развитием этих технологий также связывают прогресс в развитии средств и методов проектирования защитного снаряжения, эргономической экспертизы рабочих мест и оптимизации условий деятельности человека.

4. Персонализированный мониторинг рисков здоровью. Достижения информационных технологий открывают новые возможности мониторинга рисков здоровью, обусловленных воздействием факторов условий деятельности, в интересах решения задач адапционной медицины. Цифровые технологии обеспечивают прогресс в двух направлениях:

объективизация воздействия физических факторов условий деятельности;

реализация индивидуального и коллективного информирования персонала об опасности окружающей среды.

Объективизация воздействия физических факторов условий деятельности предполагает получение информации о дозах факторов условий деятельности, полученных индивидом в процессе рабочих смен и/или за любой период выполнения деятельности. Это достигается за счет реализации персонализированного гигиенического мониторинга. С этой целью на предприятиях промышленности должно быть создано рабочее место мониторинга рисков, на обмундировании (снаряжении) каждого работника перед началом выполнения профессиональной деятельности должен закрепляться транспондер (метка радиочастотной идентификации – *RFID-метка*), а каждый объект – источник потенциально опасных физических факторов условий профессиональной деятельности должен быть оборудован параметрическим регистратором [58, 59].

Рабочее место мониторинга рисков должно обеспечивать ведение медико-дозиметрического гигиенического регистра, содержащего информацию о дозах физических факторов, получаемых каждым работником в процессе профессиональной деятельности.

Тип применяемых транспондеров (RFID-меток) по рабочей частоте, по источнику питания, по типу памяти, по исполнению и другим характеристикам выбирают в зависимости от специфики организаций (структурных подразделений) и от специфики профессиональной деятельности работника. В частности, за работником может быть закреплен уникальный идентификатор (для использования работником изготавливается один или несколько транспондеров с уникальным идентификатором) или же транспондер может выдаваться работнику перед началом деятельности (в этом случае идентификатор транспондера каждый раз связывается с конкретным работником) [60].

Параметрический регистратор, устанавливаемый на каждом объекте – источнике потенциально опасных физических факторов условий профессиональной деятельности, должен обеспечивать:

фиксацию в реальном времени перемещения нескольких маркированных объектов (работников, имеющих транспондер), либо идентификацию их положения в пространстве;

расчет интенсивности физического фактора, образующегося при функционировании оборудования (в зависимости от режима функционирования) в точке нахождения каждого фиксируемого объекта в реальном времени;

беспроводную передачу комбинации «идентификатор объекта – интенсивность физического фактора» на рабочее место мониторинга рисков.

Таким образом, при включении промышленного оборудования активируется параметрический регистратор, радиус считывания транспондеров (радиус идентификации) которого должен превышать расстояние, на котором вероятность превышения максимально возможной интенсивности физических факторов, сопровождающих функционирование оборудования, предельно допустимых уровней отлична от нуля.

При идентификации работника (попадании транспондера в зону идентификации) параметрический регистратор обеспечивает расчет в реальном времени интенсивности физического фактора в точке нахождения каждого фиксируемого объекта (работника). Расчет может осуществляться как на основании верифицированных математических моделей физических полей, так и на результатах интерполяции прямых измерений полей физических факторов, полученных при санитарно-гигиенической паспортизации объектов. Частота (дискретность) расчетов определяется для каждого объекта (или для каждого физического фактора, если объект является источником нескольких потенци-

ально опасных физических факторов) в зависимости от специфики решаемых задач [61, 62].

Информационные технологии, применяемые при решении этих задач, обеспечивают сопоставление траектории работника с расположением и режимами работы источников физических факторов, определяя дозы факторов, реально полученные работником в процессе деятельности. Полученная информация учитывается в *медико-дозиметрическом регистре*, обеспечивающем определение текущих и кумулятивных доз физических факторов, полученных работником, с привязкой к информации об индивидуальных особенностях здоровья. Это обеспечивает выработку персонализированных рекомендаций по сохранению профессионального здоровья и принятию управленческих решений, направленных на его сохранение [60].

Реализация *индивидуального информирования* персонала об опасности окружающей среды осуществляется с помощью применения персонализированных индикаторов опасности окружающей среды. Такие индикаторы могут быть построены по традиционной схеме – как миниатюрные дозиметры. Однако такой подход существенно усложняет конструктивное исполнение индикаторов (особенно при необходимости одновременного мониторинга нескольких физических факторов).

Перспективным является реализация индикаторов в изложенной системе объективизации воздействия физических факторов. Текущие риски работоспособности и здоровью рассчитываются в реальном времени по результатам сопоставления траектории работника с расположением и режимом работы источников физических факторов с учетом эффекта «защита временем», характеристик защитного снаряжения, применяемого работником, и индивидуальных особенностей его здоровья.

При получении сигнала об опасности окружающей обстановки, в зависимости от особенностей деятельности, работник должен зайти в средство коллективной защиты, перейти на другой участок работы и т.п.

Реализация *коллективного информирования* персонала об опасности окружающей среды обеспечивается с помощью специальных свето/звукосигнальных табло, размещаемых в местах, видимых большому количеству работников. В состав табло входят измерители интенсивностей и времени экспозиции физических факторов условий деятельности и вычислитель, рассчитывающий уровень опасности окружающей обстановки. В случае сигнала опасности работник должен применить средство индивидуальной защиты, зайти в средство

коллективной защиты либо реализовать другие меры, определенные инструкцией по охране труда [60].

Изложенный подход к мониторингу рисков здоровью успешно апробирован в процессе обеспечения надежной деятельности инженерно-технического состава государственной авиации [60] и может быть распространен на любую социо-профессиональную группу работников, подвергающихся воздействию потенциально опасных физических факторов условий деятельности.

5. Стандартизация методов обработки информации при разработке информационных технологий цифровой адаптационной медицины. Важнейшим аспектом эффективного применения информационных технологий цифровой адаптационной медицины является обеспечение адекватности подходов к сбору и обработке информации [63]. При этом необходимо учитывать:

1. Физиологическую адекватность подходов к получению информации о состоянии человека. Информационные технологии диагностики состояния человека для решения задач адаптационной медицины должны быть ориентированы на рассмотрение его как особого психофизиологического явления со специфическими закономерностями, которое заложено в архитектуре функциональных систем организма и проявляется на биохимическом, физиологическом, психологическом и поведенческом уровнях с учетом изменения эффективности выполняемой деятельности, проявляющейся в ее результативности, внутренней цене и содержании [41, 64-67].

Методы диагностики состояний человека в процессе деятельности должны ориентироваться на то, что каждому состоянию соответствует специфическая доминанта, т. е. для обеспечения формирования и развития этого состояния мобилизуются различные функциональные системы организма, причем степень их вовлечения в формирование состояния различная у каждого индивида (этим, собственно, и объясняется индивидуальность реакций человека на воздействие факторов условий деятельности).

Однако анализ опыта диагностики состояния человека, особенно с применением свободно распространяемых приложений для мобильных устройств, показывает, что разработчики таких приложений часто не учитывают специфику формирования диагностируемых состояний человека. Например, нервно-эмоциональное напряжение диагностируется только по изменению частоты пульса без учета информации о состоянии центральной нервной системы.

2. Математическую корректность подходов к сбору и обработке информации о состоянии человека. Разработчики информационных

технологий в большинстве случаев считают информацию об особенностях применяемого математического обеспечения коммерческой тайной, что не позволяет проверить его корректность и обеспечить сопоставимость идентичных (по сути) результатов, полученных различными программно-аппаратными комплексами. Например, при расчете оценок одних и тех же спектральных показателей используют различные окна, процедуры заполнения нулями и другие техники спектрального анализа, приводящие к несопоставимости его результатов [68-72].

В частности, исследования [73], проведенные путем ввода в альтернативные образцы приборов, выполняющих спектральный анализ ритмокардиограмм, 23 идентичных тестовых последовательностей QRS-комплексов с различными характеристиками мощности в стандартных диапазонах сердечного ритма показал, что все приборы не обеспечивают повторяемых результатов исследований.

Результаты решения задачи стандартизации методики расчета оценок спектральных показателей квазипериодических низкочастотных неэквидистантно квантованных физиологических сигналов и исследования их точности на основе имитационного моделирования представлены в [72, 74, 75].

Изложенное обуславливает насущную актуальность разработки и реализации единых подходов к стандартизации методов обработки информации при разработке информационных технологий цифровой адаптационной медицины.

6. Заключение. Цифровая адаптационная медицина пока находится в начальной стадии развития, что обусловлено комплексом причин: от неготовности материально-технической базы организаций, приоритетом которых является решение задач адаптационной медицины, до отсутствия нормативно-правового регулирования решения таких задач.

Результаты анализа информационных технологий цифровой адаптационной медицины свидетельствуют о том, что их математическое и программно-аппаратное обеспечение нуждаются в совершенствовании. Приоритеты такого совершенствования связываются, прежде всего, с внедрением достижений четвертой промышленной революции (Индустрии 4.0) и концепции социкиберфизических систем. Перспективные информационные технологии цифровой адаптационной медицины должны обеспечить решение задач адаптационной медицины с максимально полным применением для этого достижений научно-технического прогресса в интересах обеспечения:

увеличения объемов доступной для анализа информации о состоянии человека с возможностью ее получения без каких-либо помех

деятельности за счет реализации миниатюрных (в том числе, бесконтактных) датчиков и источников энергии, а также миниатюрных высокопроизводительных процессоров;

получения новых знаний о механизмах формирования адаптационных реакций человека на условия жизнедеятельности за счет применения цифровых двойников;

обеспечения сохранения конфиденциальности персональной информации о здоровье и защищенности информации от искажений.

За счет этого будет обеспечен прогресс в развитии потенциальных и адаптационных возможностей организма человека и увеличения продолжительности его активной жизни с помощью направленного пациент-ассоциированного воздействия на основе учета влияний генетических факторов и среды, что является приоритетом адаптационной медицины.

Литература

1. *Заболотная Н.В., Гатилова И.Н., Заболотный А.Т.* Цифровизация здравоохранения: достижения и перспективы развития // Экономика. Информатика. 2020. Т. 47. № 2. С. 380-389.
2. *Зарубина Т.В.* Актуальные вопросы внедрения информационных технологий в здравоохранении // Вестник Росздравнадзора. 2018. № 3. С. 20-25.
3. *Карпов О.Э., Субботин С.А., Шишканов Д.В., Замятин М.Н.* Цифровое здравоохранение: необходимость и предпосылки // Врач и информационные технологии. 2017. № 3. С. 6-22.
4. *Гусев А.В., Плисс М.А., Левин М.Б., Новицкий Р.Э.* Тренды и прогнозы развития медицинских информационных систем в России // Врач и информационные технологии. 2019. № 2. С. 38-49.
5. *Mathews S.C., McShea M.J., Hanley C.L., Ravitz A., Labrique A.B., Cohen A.B.* Digital health: a path to validation // Digital Medicine. 2019. No. 2. P. 38. Doi: 10.1038/s41746-019-0111-3.
6. *Meldo A., Utkin L., Kovalev M., Kasimov E.* The natural language explanation algorithms for the lung cancer computer-aided diagnosis system // Artificial Intelligence in Medicine. 2020. Vol. 108. Pp. 101952. Doi: 10.1016/j.artmed.2020.101952
7. *Столяр В.П., Крайнюков П.Е., Калачёв О.В.* Цифровая трансформация здравоохранения и ведомственной медицины. М.: Планета, 2020. 200 с.
8. *Nazarenko G.I., Kleimenova E.B., Yashina L.P., Payushchik S.A., Konstantinova M.V., Mokin M.V., Otdelenov V.A., Molodchenkov A.I., Sychev D.A.* Development of the ontology of patient management technological records for modeling of clinical workflows in a general hospital // Scientific and Technical Information Processing. 2015. Vol. 42. No. 6. Pp. 455-462.
9. *Atreja A., Francis S., Kurra S., Kabra R.* Digital Medicine and Evolution of Remote Patient Monitoring in Cardiac Electrophysiology: A State-of-the-Art Perspective // Current Treatment Options in Cardiovascular Medicine. 2019. Vol. 21. No. 12. P. 92. Doi: 10.1007/s11936-019-0787-3.
10. *Györfly Z., Radó N., Mesko B.* Digitally engaged physicians about the digital health transition // PLoS One. 2020. Vol. 15. No. 9, e0238658. Doi: 10.1371/journal.pone.0238658.

11. *Kvedar J.C.* Evidence for the effectiveness of digital health // *Digital Medicine*. 2020. No. 3. P. 34. Doi: 10.1038/s41746-020-0231-9.
12. *Стефанова Н.А., Андропова И.В.* Проблемы цифровизации сферы здравоохранения: российский и зарубежный опыт // *Вестник Самарского университета. Экономика и управление*. 2018. Т. 9. № 3. С. 31-35.
13. *Mentsiev A.U., Yunaeva S.M.* Advantages and disadvantages of digital technology in healthcare system // *Medical Institute Bulletin*. 2019. Vol. 16. No. 2. Pp. 122-124.
14. *Orlov O.I., Perevedentsev O.V., Mamonova E.Y., Levanov V.M.* An integrated automated method for analyzing occupational health and medical provision under the extreme conditions of industrial activity // *Human Physiology*. 2018. Vol. 44. No. 7. Pp. 819-823.
15. *Engelhard M.M., Oliver J.A., McClernon F.J.* Digital envirotyping: quantifying environmental determinants of health and behavior // *Digital Medicine*. 2020. Vol. 12. No. 3. P. 36. Doi: 10.1038/s41746-020-0245-3.
16. *Labrique A., Agarwal S., Tamrat T., Mehl G.* WHO Digital Health Guidelines: a milestone for global health // *Digital Medicine*. 2020. No. 3. P. 120. Doi: 10.1038/s41746-020-00330-2.
17. *Смагулов С.М., Смагулова В.К.* Новейшие технологические тренды в медицине // *Инновации и инвестиции*. 2019. № 3. С. 289-290.
18. *Аллаберганов Р.Д., Махмуджанов С.У.* Интернет вещей в медицине: цифровые больницы // *Интернаука*. 2019. Т. 11. № 93. С. 6-7.
19. *Sandle T., Chesca A., Abdulina G.* Digital advances in modern pathology // *Bulletin of the Karaganda university. Biology. Medicine. Geography Series*. 2018. Vol. 90. No. 2. Pp. 86-94.
20. *Zhuravlev Yu.I., Nazarenko G.I., Vinogradov A.P., Dokukin A.A., Katerinochkina N.N., Kleimenova E.B., Konstantinova M.V., Ryazanov V.V., Sen'ko O.V., Cherkashov A.M.* Methods for discrete analysis of medical data on the basis of recognition theory and some of their applications // *Pattern Recognition and Image Analysis (Advances in Mathematical Theory and Applications)*. 2016. Vol. 26. No. 3. Pp. 643-664.
21. *Howarth A., Quesada J., Silva J., Judycki S., Mills P.R.* The impact of digital health interventions on health-related outcomes in the workplace: A systematic review // *Digit Health*. 2018. No. 4. 2055207618770861. Doi: 10.1177/2055207618770861.
22. *Kobrinskii B.A., Grigoriev O.G., Molodchenkov A.I., Smirnov I.V., Blagosklonov N.A.* Artificial intelligence technologies application for personal health management. IFAC-PapersOnLine // 19th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability, TECIS 2019. Pp. 70-74.
23. *Кобринский Б.А.* Системы искусственного интеллекта в медицинской практике: состояние и перспективы // *Вестник Росздравнадзора*. 2020. № 3. С. 37-43.
24. *Истомина Т.В.* Современное состояние и перспективы применения информационно-коммуникационных технологий в российской медицине // *Медицинская техника*. 2021. № 1. С. 30-33.
25. *Гальцова О.М., Пронькин Н.Н.* Современные информационные технологии для здравоохранения будущего // *International Journal of Professional Science*. 2020. № 1. С. 39-44.
26. *Сертакова О.В.* Цифровые технологии Индустрии 4.0 в системе повышения качества медицинской помощи: телемедицина // *Экономика и социум: современные модели развития*. 2020. Т. 10. № 4. С. 367-380.
27. *Шенель Р.Н., Кутчер А.В., Ваховская Т.В., Дранкина О.М.* История развития телемедицины в Российской Федерации // *Неотложная кардиология и кардиоваскулярные риски*. 2019. Т. 3. № 2. С. 765-771.
28. *Уткин Л.В., Мелдо А.А., Ковалев М.С., Касимов Э.М.* Обзор методов объяснения и интерпретации принятия решений в интеллектуальных системах диагностики

онкологических заболеваний // Искусственный интеллект и принятие решений. 2020. № 4. С. 55-65.

29. *Морозова Ю.А.* Цифровая трансформация российского здравоохранения как фактор развития отрасли // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2020. № 2. С. 36-47.

30. *Баевский Р.М.* Прогнозирование состояний на грани нормы и патологии. М.: Медицина, 1979. 298 с.

31. *Ushakov I.B., Chernikova A.G., Baevskiy R.M., Simakova T.G., Zipa O.M.* Prenosological approach to attaining the objectives of aviation medical expert assessment // Human Physiology. 2016. Vol. 42. No. 7. Pp. 724-730.

32. *Баранов В.М., Баевский Р.М., Берсенева А.П., Михайлов В.М.* Оценка адаптационных возможностей организма и задачи повышения эффективности здравоохранения // Экология человека. 2004. № 6. С. 25-29.

33. *Baevsky R.M., Baevsky A.R., Bersenev E.Y., Isaeva O.N., Pougachev V.I., Chernikova A.G.* Development of space technologies and problems of "home medicine" // Cardiometry. 2015. No. 6. Pp. 30-40.

34. *Fogel A.L., Kvedar J.C.* Artificial intelligence powers digital medicine // Digital Medicine. 2018. No. 1. P. 5. Doi: 10.1038/s41746-017-0012-2.

35. *Монахов Д.Н., Прончев Г.Б.* Политика цифровизации здравоохранения // Вопросы национальных и федеративных отношений. 2020. Т. 10. № 6 (63). С. 1582-1592.

36. *Судаков К.В., Кукес В.Г., Хоманов К.З., Жестовская А.С.* Возможность восстановления функционального состояния адаптационных систем организма с применением методологии персонализированной медицины // Лекарственные препараты и рациональная фармакотерапия. 2013. № 2. С. 3-5.

37. *Труханов А.И., Скакун С.Г., Гречко А.В.* Современная роль персонифицированной цифровой медицины в развитии медицинской реабилитации // Вестник восстановительной медицины. 2018. № 1 (83). С. 2-13.

38. *Ушаков И.Б., Богомолов А.В.* Информатизация программ персонифицированной адаптационной медицины // Вестник Российской академии медицинских наук. 2014. Т. 69. № 5-6. С. 124-128.

39. *Пономаренко В.А., Разумов А.Н., Пискунов В.А.* Здоровье здорового человека. М.: Медицина, 1997. 205 с.

40. *Разумов А.Н., Пономаренко В.А.* Концепция «здоровье здорового человека»: интеграция медицины, психологии и религии // Психологический журнал. 2015. Т. 36. № 6. С. 88-93.

41. *Богомолов А.В., Гридин Л.А., Кукушкин Ю.А., Ушаков И.Б.* Диагностика состояния человека: математические подходы. М.: Медицина, 2003. 464 с.

42. *Ушаков И.Б.* Комбинированные воздействия в экологии человека и экстремальной медицине. М.: Издатцентр, 2013. 442 с.

43. *Прохоров Н.И., Донцов В.И., Крутько В.Н., Ходыкина Т.М.* Биологический возраст как метод оценки уровня здоровья при наличии экологических рисков (обзор литературы) // Гигиена и санитария. 2019. Т. 98. № 7. С. 761-765.

44. *Dontsov V.I., Krut'ko V.N.* Biological age as a method for systematic assessment of ontogenetic changes in the state of an organism // Russian Journal of Developmental Biology. 2015. Vol. 46. № 5. Pp. 246-253.

45. *Prilipko N.S., Turbinsky V.V., Bobrovniksky I.P.* Hygienic evaluation of personalized health risk for prevention of environmentally diseased diseases in the primary health care system: overview // Russian Journal of Rehabilitation Medicine. 2020. No.3. Pp. 5-35.

46. *Крутько В.Н., Донцов В.И., Митрохин О.В., Матвеев А.А., Ермакова Н.А., Потемкина Н.С.* Искусственный интеллект для здоровьесбережения и развития личностного потенциала (обзор) // Труды Института системного анализа Российской академии наук. 2020. Т. 70. № 3. С. 86-100.

47. Павлова Л.Л., Барбаков О.М. Качество жизни человека в регионе под влиянием процессов цифровизации: программы реализации, оценка // Известия высших учебных заведений. Социология. Экономика. Политика. 2021. № 2. С. 86-101.
48. Хованов Н.В. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. СПб: СПбГУ, 1996. 196 с.
49. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети. М.: URSS, 2021. 360 с.
50. Иванова Г.Н., Окрепилов В.В., Окрепилова И.Г. Развитие теории управления качеством с целью устойчивого развития и повышения качества жизни // Качество и жизнь. 2016. № 1 (9). С. 3-9.
51. Rakhmanin Yu.A., Bobrovniksky I.P. Scientific and organizational-methodological bases of environmental medicine as the integrative direction of medical science and practical health care // Hygiene and sanitation. 2017. Vol. 96. No.10. Pp. 917-921.
52. Pereginya O.V., Lutsenko T.M. Translation medicine, biomedicine and medical biotechnology: the transition to personalized medicine // Biotechnologia Acta. 2020. Vol. 13. No. 2. Pp. 5-11.
53. Клеймёнова Е.Б., Назаренко Г.И., Яшина Л.П., Пающик С.А. Проблема трансляции знаний в здравоохранении: инструменты для ее решения в области безопасности пациентов // Вестник Российской академии медицинских наук. 2018. Т. 73. № 2. С. 105-114.
54. Генкин А.А., Медведев В.И. Прогнозирование психофизиологических состояний. Л.: Наука, 1973. 78 с.
55. Пятибрат А.О., Мельнов С.Б., Козлова А.С., Пятибрат Е.Д. Физиологическая оценка наследственной предрасположенности к экстремальным видам профессиональной деятельности // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. 2015. № 2 (14). С. 73-78.
56. Трифонова О.П., Балашова Е.Е., Маслов Д.Л., Григорьев А.И., Лисица А.В., Пономаренко Е.А., Арчаков А.И. Метаболомный анализ крови для создания цифрового образа здорового человека // Биомедицинская химия. 2020. Т. 66. № 3. С. 216-223.
57. Иванов И.В., Ушаков И.Б. Принципы экстраполяции экспериментальных данных с лабораторных животных на человека // Военно-медицинский журнал. 2019. № 12. С. 50-56.
58. Ушаков И.Б., Богомолов А.В., Драган С.П., Солдатов С.К. Методологические основы персонифицированного гигиенического мониторинга // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2017. Т. 51. № 6. С. 53-56.
59. Ронжин А.Л., Соколов Б.В., Джао В.Ю.Д., Миронова Е.Г., Стышкин М.М. Применение технологии радиочастотной идентификации для построения системы контроля оборота бортового оборудования // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2020. №. 1. С. 13-20.
60. Ушаков И.Б., Богомолов А.В., Драган С.П., Солдатов С.К. Методологические основы персонифицированного акустического мониторинга // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 10. С. 33-39. Doi: 10.24000/0409-2961-2020-10-33-39
61. Kuleshov S.V., Zaytseva A.A., Ronzhin A.L. The development of soft defined distributed infocommunication systems architecture based on the active data technology // Lecture Notes in Networks and Systems. 2020. Vol. 95. Pp. 257-265.
62. Алёхин М.Д., Богомолов А.В., Кукушкин Ю.А. Методики анализа паттернов дыхания при бесконтактном мониторинге психофизиологических состояний операторов эргатических систем // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53. № 2. С. 99-101.
63. Максимов И.Б., Столяр В.П., Богомолов А.В. Прикладная теория информационного обеспечения медико-биологических исследований. М.: Бином, 2013. 312 с.

64. Ушаков И.Б., Богомолов А.В. Диагностика функциональных состояний человека в приоритетных исследованиях отечественных физиологических школ // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2021. № 3. С. 91-100. Doi: 10.25016/2541-7487-2021-0-3-91-100

65. Luzhnov P.V., Pika T.O., Shamaev D.M. Developing the structure of a hardware and software system for quantitative diagnosis of microhemodynamics // International Journal of Biomedicine. 2015. Vol. 5. No. 4. Pp. 228-230.

66. Ильин Е.П. Психофизиология состояний человека. СПб: Питер, 2005. 412 с.

67. Ушаков И.Б., Богомолов А.В., Кукушкин Ю.А. Психофизиологические механизмы формирования и развития функциональных состояний // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 2014. Т. 100. № 10. С. 1130-1137.

68. Sandercock G., Shelton C., Bromley P., Brodie D. Agreement between three commercially available instruments for measuring short-term heart rate variability // Physiological Measurement. 2004. Vol. 25. No. 5. Pp. 1115-1124.

69. Kukushkin Y.A., Bogomolov A.V., Maistrov A.I. Rhythmocardiogram approximation methods for calculation of spectral parameters of cardiac rhythm variability // Biomedical Engineering. 2010. Vol. 44. No. 3. Pp. 92-103.

70. Nunan D., Jakovljevic D., Donovan G. Levels of agreement for RR-intervals and short-term heart rate variability obtained from the Polar S810 and an alternative system // European Journal of Applied Physiology. 2008. Vol. 103. No. 5. Pp. 529-537.

71. Lytaev S. Modeling and estimation of physiological, psychological and sensory indicators for working capacity // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1201 AISC. Pp. 207-213. Doi: 10.1007/978-3-030-51041-1_28

72. Bogomolov A.V., Maistrov A.I. Theoretical-experimental analysis of convergence of heart rate variability spectral measures estimated via heart rate and heart period signals // Biomedical Engineering. 2009. Vol. 43. No. 2. Pp. 75-80.

73. Воробьев К.П., Паламарчук Е.А. Результаты независимого тестирования трех программ вычисления показателей вариабельности сердечного ритма // Украинский медицинский часопис. 2007. Т. 3. № 59. С. 45-51.

74. Майстров А.И., Богомолов А.В., Алехин М.Д., Зарецкий А.П. Математическое моделирование ритмокардиографических сигналов для стандартизации методов их спектрального анализа // Труды Московского физико-технического института (национального исследовательского университета). 2015. Т. 7. № 3 (27). С. 116-130.

75. Maistrov A.I., Alekhin M.D., Bogomolov A.V., Zaretskiy A.P. Mathematical modeling of rhythmocardiographic signals spectrum // Proceedings - The Second International Conference on Engineering and Telecommunication. En&T-2015. 2015. Pp. 85-86. Doi: 10.1109/EnT.2015.27

Богомолов Алексей Валерьевич — д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, лаборатория технологий больших данных социкиберфизических систем, СПб ФИЦ РАН. Область научных интересов: информационные технологии, компьютерные технологии, медицинская информатика, биофизика, применение методов математики и информатики в медико-биологических исследованиях. Число научных публикаций — 200. a.v.bogomolov@gmail.com; 14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178, РФ; р.т. +7(812)328-3311, факс +7(812)328-4450.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-17-50056).

A. BOGOMOLOV
**INFORMATION TECHNOLOGIES OF DIGITAL ADAPTIVE
MEDICINE**

Bogomolov A. Information technologies of digital adaptive medicine.

Abstract. The article provides a comprehensive description of information technologies of digital adaptive medicine. The emphasis is on the applicability to the development of specialized automated complexes, software models and systems for studying the adaptive capabilities of a person to environmental conditions. Requirements for information technologies to enhance these capabilities are formulated. The features of information technologies are reflected in relation to the implementation of applied systemic studies of life support, preservation of professional health and prolongation of human longevity.

Six basic concepts of adaptive medicine with an emphasis on the features of the mathematical support for information processing are characterized, priorities for improving information technologies used in these concepts are determined.

The information technologies used in the tasks of ensuring the professional performance of a person with an emphasis on the need to use adequate methods for diagnosing the state of a person at all stages of professional activity and the need to develop technologies for digital twins that adequately simulate the adaptation processes and reactions of the body in real conditions are considered.

The characteristics of information technologies for personalized monitoring of health risks are given, which make it possible to objectify the effects of physical factors of the conditions of activity and to implement individual and collective informing of personnel about environmental hazards.

The urgent need to standardize information processing methods in the development of information technologies for digital adaptive medicine in the interests of ensuring physiological adequacy and mathematical correctness of approaches to obtaining and processing information about a person's state is shown.

It is concluded that the priorities for improving information technologies of digital adaptive medicine are associated with the implementation of the achievements of the fourth industrial revolution, including the concept of socio-cyberphysical systems.

Keywords: digital medicine, digital health, medical informatics, adaptive medicine, preventive medicine, socio-cyberphysical systems.

Bogomolov Alexey — Ph.D., Dr. Sci., Professor, Chief Researcher, Laboratory of Big Data Technologies of Socio-cyberphysical Systems, SPC RAS. Research interests: information technology, computer technology, medical informatics, biophysics, application of methods of mathematics and informatics in biomedical research. The number of publications — 200. a.v.bogomolov@gmail.com; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328-3311, fax +7(812)328-4450.

Acknowledgements. This research is supported by RFBR (grant 20-17-50056).

References

1. Zabolotnaya N.V., Gatilova I.N., Zabolotnyy A.T. [Digitalization of healthcare: achievements and development prospects]. *Ekonomika. Informatika*. [Economy. Computer science]. 2020, vol. 47, no. 2, pp. 380-389. (In Russ.).

2. Zarubina T.V. [Topical issues of the implementation of information technologies in health care]. *Vestnik Roszdravnadzora*. [Roszdravnadzor Bulletin]. 2018, no. 3, pp. 20-25. (In Russ.).
3. Karpov O.E., Subbotin S.A., Shishkanov D.V., Zamyatin M.N. [Digital health care: necessity and prerequisites]. *Vrach i informatsionnyye tekhnologii*. [Physician and information technology]. 2017, no. 3, p. 6-22. (In Russ.).
4. Gusev A.V., Pliss M.A., Levin M.B., Novitsky R.E. [Trends and forecasts for the development of medical information systems in Russia]. *Vrach i informatsionnyye tekhnologii*. [Physician and information technology]. 2019, no. 2, pp. 38-49. (In Russ.).
5. Mathews S.C., McShea M.J., Hanley C.L., Ravitz A., Labrique A.B., Cohen A.B. Digital health: a path to validation. *Digital Medicine*. 2019, no. 2, p. 38. doi: 10.1038/s41746-019-01111-3.
6. Meldo A., Utkin L., Kovalev M., Kasimov E. The natural language explanation algorithms for the lung cancer computer-aided diagnosis system. *Artificial Intelligence in Medicine*. 2020, vol. 108, pp. 101952. Doi: 10.1016/j.artmed.2020.101952
7. Stolyar V.P., Krainyukov P.Ye., Kalachov O.V. *Tsifrovaya transformatsiya zdoravookhraneniya i vedomstvennoy meditsiny*. [Digital transformation of healthcare and departmental medicine]. Moscow: Planeta, 2020. 200 p. (In Russ.).
8. Nazarenko G.I., Kleimenova E.B., Yashina L.P., Payushchik S.A., Konstantinova M.V., Mokin M.V., Otdelenov V.A., Molodchenkov A.I., Sychev D.A. Development of the ontology of patient management technological records for modeling of clinical workflows in a general hospital. *Scientific and Technical Information Processing*. 2015, vol. 42, no. 6, pp. 455-462.
9. Atreja A., Francis S., Kurra S., Kabra R. Digital Medicine and Evolution of Remote Patient Monitoring in Cardiac Electrophysiology: A State-of-the-Art Perspective. *Current Treatment Options in Cardiovascular Medicine*. 2019, vol. 21, no. 12, p. 92. Doi: 10.1007/s11936-019-0787-3.
10. Györfly Z., Radó N., Mesko B. Digitally engaged physicians about the digital health transition. *PLoS One*. 2020, vol. 15, no. 9, e0238658. Doi: 10.1371/journal.pone.0238658.
11. Kvedar J.C. Evidence for the effectiveness of digital health. *Digital Medicine*. 2020, no. 3, p. 34. Doi: 10.1038/s41746-020-0231-9.
12. Stefanova N.A., Andronova I.V. Problems of digitalization of the healthcare sector: Russian and foreign experience. *Vestnik Samarskogo universiteta. Ekonomika i upravleniye*. [Samara University Bulletin. Economics and Management]. 2018, vol. 9, no. 3, pp. 31-35. (In Russ.).
13. Mentsiev A.U., Yunaeva S.M. Advantages and disadvantages of digital technology in healthcare system. *Medical Institute Bulletin*. 2019, vol. 16, no. 2, pp. 122-124.
14. Orlov O.I., Perevedentsev O.V., Mamonova E.Y., Levanov V.M. An integrated automated method for analyzing occupational health and medical provision under the extreme conditions of industrial activity. *Human Physiology*. 2018, vol. 44, no. 7, pp. 819-823.
15. Engelhard M.M., Oliver J.A., McClernon F.J. Digital envirotyping: quantifying environmental determinants of health and behavior. *Digital Medicine*. 2020, vol. 12, no. 3, p. 36. Doi: 10.1038/s41746-020-0245-3.
16. Labrique A., Agarwal S., Tamrat T., Mehl G. WHO Digital Health Guidelines: a milestone for global health. *Digital Medicine*. 2020, no. 3, p. 120. Doi: 10.1038/s41746-020-00330-2.
17. Smagulov S.M., Smagulova V.K. [The latest technological trends in medicine]. *Innovatsii i investitsii*. [Innovation and investment]. 2019, no. 3, pp. 289-290.
18. Allabergenov R.D., Makhmudzhanov S.U. [The Internet of Things in Medicine: Digital Hospitals]. *Internauka*. [Internauka]. 2019, vol. 11, no. 93, pp. 6-7.

19. Sandle T., Chesca A., Abdulina G. Digital advances in modern pathology. Bulletin of the Karaganda university. Biology. Medicine. Geography Series. 2018, vol. 90, no. 2, pp. 86-94.
20. Zhuravlev Yu.I., Nazarenko G.I., Vinogradov A.P., Dokukin A.A., Katerinokhina N.N., Kleimenova E.B., Konstantinova M.V., Ryazanov V.V., Sen'ko O.V., Cherkashov A.M. Methods for discrete analysis of medical data on the basis of recognition theory and some of their applications. Pattern Recognition and Image Analysis (Advances in Mathematical Theory and Applications). 2016, vol. 26, no. 3, pp. 643-664.
21. Howarth A., Quesada J., Silva J., Judycki S., Mills P.R. The impact of digital health interventions on health-related outcomes in the workplace: A systematic review. Digit Health. 2018, no. 4, 2055207618770861. Doi: 10.1177/2055207618770861.
22. Kobrinskii B.A., Grigoriev O.G., Molodchenkov A.I., Smirnov I.V., Blagosklonov N.A. Artificial intelligence technologies application for personal health management. IFAC-PapersOnLine. 19th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability, TECIS 2019, pp. 70-74.
23. Kobrinskii B.A. [Artificial intelligence systems in medical practice: state and prospects]. *Vestnik Roszdravnadzora*. [Roszdravnadzor Bulletin]. 2020, no. 3, pp. 37-43. (In Russ.).
24. Istomina T.V. [Current state and prospects of using infocommunication technologies in Russian medicine]. *Meditsinskaya tekhnika*. [Medical equipment]. 2021, no. 1, pp. 30-33. (In Russ.).
25. Galtsova O.M., Pronkin N.N. [Modern information technologies for the healthcare of the future]. *International Journal of Professional Science*. 2020, no. 1, pp. 39-44. (In Russ.).
26. Sertakova O.V. [Digital technologies of Industry 4.0 in the system of improving the quality of medical care: telemedicine]. *Ekonomika i sotsium: sovremennyye modeli razvitiya*. [Economy and society: modern development models]. 2020, vol. 10, no. 4, pp. 367-380. (In Russ.).
27. Shepel R.N., Kutcher A.V., Vakhovskaya T.V., Drapkina O.M. [The history of the development of telemedicine in the Russian Federation]. *Neotlozhnaya kardiologiya i kardiovaskulyarnyye riski*. [Emergency cardiology and cardiovascular risks]. 2019, vol. 3, no. 2, pp. 765-771. (In Russ.).
28. Utkin L.V., Meldo A.A., Kovalev M.S., Kasimov E.M. [Review of methods for explaining and interpreting decision-making in intelligent systems for diagnosing oncological diseases]. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatiye resheniy*. [Artificial intelligence and decision making]. 2020, no. 4, pp. 55-65. (In Russ.).
29. Morozova Yu.A. [Digital transformation of Russian healthcare as a factor in the development of the industry]. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii*. [Intelligence. Innovation. Investments]. 2020, no. 2, pp. 36-47. (In Russ.).
30. Baevsky R.M. *Prognozirovaniye sostoyaniy na grani normy i patologii*. [Prediction of conditions on the verge of norm and pathology]. Moscow: Medicine, 1979. 298 p. (In Russ.).
31. Ushakov I.B., Chernikova A.G., Baevskiy R.M., Simakova T.G., Zipa O.M. Prenosological approach to attaining the objectives of aviation medical expert assessment. *Human Physiology*. 2016, vol. 42, no. 7, pp. 724-730.
32. Baranov V.M., Baevsky R.M., Berseneva A.P., Mikhailov V.M. [Assessment of the body's adaptive capabilities and the tasks of improving the efficiency of health care]. *Ekologiya cheloveka*. [Human ecology]. 2004, no. 6, pp. 25-29. (In Russ.).
33. Baevsky R.M., Baevsky A.R., Bersenev E.Y., Isaeva O.N., Pougachev V.I., Chernikova A.G. Development of space technologies and problems of "home medicine". *Cardiometry*. 2015, no. 6, pp. 30-40.
34. Fogel A.L., Kvedar J.C. Artificial intelligence powers digital medicine. *Digital Medicine*. 2018, no. 1, p. 5. Doi: 10.1038/s41746-017-0012-2.

35. Monakhov D.N., Pronchev G.B. [Healthcare digitalization policy]. *Voprosy natsional'nykh i federativnykh otnosheniy*. [Questions of national and federal relations]. 2020, vol. 10, no. 6 (63), pp. 1582-1592. (In Russ.).
36. Sudakov K.V., Kukes V.G., Khomanov K.Z., Zhestovskaya A.S. [The possibility of restoring the functional state of the body's adaptive systems using the methodology of personalized medicine]. *Lekarstvennyye preparaty i ratsional'naya farmakoterapiya*. [Medicines and rational pharmacotherapy]. 2013, No. 2, pp. 3-5. (In Russ.).
37. Trukhanov A.I., Skakun S.G., Grechko A.V. [The modern role of personalized digital medicine in the development of medical rehabilitation]. *Vestnik vosstanovitel'noy meditsiny*. [Herald of restorative medicine]. 2018, no. 1 (83), pp. 2-13. (In Russ.).
38. Ushakov I.B., Bogomolov A.V. [Computerization of programs of personalized adaptive medicine]. *Vestnik Rossiyskoy akademii meditsinskikh nauk*. [Bulletin of the Russian Academy of Medical Sciences]. 2014, vol. 69, no. 5-6, pp. 124-128. (In Russ.).
39. Ponomarenko V.A., Razumov A.N., Piskunov V.A. *Zdorov'ye zdorovogo cheloveka*. [Health of a healthy person]. Moscow: Medicine, 1997. 205 p. (In Russ.).
40. Razumov A.N., Ponomarenko V.A. [The concept of "health of a healthy person": the integration of medicine, psychology and religion]. *Psikhologicheskii zhurnal*. [Psychological journal]. 2015, vol. 36, no. 6, pp. 88-93. (In Russ.).
41. Bogomolov A.V., Gridin L.A., Kukushkin Yu.A., Ushakov I.B. *Diagnostika sostoyaniya cheloveka: matematicheskiye podkhody*. [Diagnostics of the human condition: mathematical approaches]. Moscow: Medicine, 2003. 464 p. (In Russ.).
42. Ushakov I.B. *Kombinirovannyye vozdeystviya v ekologii cheloveka i ekstremal'noy meditsine*. [Combined effects in human ecology and extreme medicine]. Moscow: Izdatcentr, 2013. 442 p. (In Russ.).
43. Prokhorov N.I., Dontsov V.I., Krutko V.N., Khodykina T.M. [Biological age as a method for assessing the level of health in the presence of environmental risks (literature review)]. *Gigiyena i sanitariya*. [Hygiene and sanitation]. 2019, vol. 98, no. 7, p. 761-765. (In Russ.).
44. Dontsov V.I., Krut'ko V.N. Biological age as a method for systematic assessment of ontogenetic changes in the state of an organism. *Russian Journal of Developmental Biology*. 2015, vol. 46, № 5, pp. 246-253.
45. Prilipko N.S., Turbinsky V.V., Bobrovniky I.P. Hygienic evaluation of personalized health risk for prevention of environmentally diseased diseases in the primary health care system: overview. *Russian Journal of Rehabilitation Medicine*. 2020, no.3, pp. 5-35.
46. Krut'ko V.N., Dontsov V.I., Mitrokhin O.V., Matveev A.A., Ermakova N.A., Potemkina N.S. [Artificial Intelligence for Health Preservation and Development of Personal Potential (Review)]. *Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk*. [Proceedings of the Institute for Systems Analysis of the Russian Academy of Sciences]. 2020, vol. 70, no. 3, pp. 86-100. (In Russ.).
47. Pavlova L.L., Barbakov O.M. [The quality of human life in the region under the influence of digitalization processes: implementation programs, assessment]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Sotsiologiya. Ekonomika. Politika*. [Proceedings of higher educational institutions. Sociology. Economy. Politics]. 2021, no. 2, pp. 86-101. (In Russ.).
48. Khovanov N.V. *Analiz i sintez pokazateley pri informatsionnom defitsite*. [Analysis and synthesis of indicators for information deficit]. SPb: SPbGU, 1996. 196 p. (In Russ.).
49. Saati T.L. *Prinyatiye resheniy pri zavisimostyakh i obratnykh svyazyakh: analiticheskiye seti*. [Dependency and Feedback Decision Making: Analytical Networks]. Moscow: URSS, 2021. 360 p. (In Russ.).
50. Ivanova G.N., Okrepilov V.V., Okrepilova I.G. [Development of the theory of quality management with the aim of sustainable development and improving the quality of life]. *Kachestvo i zhizn'*. [Quality and life]. 2016, no. 1 (9), pp. 3-9. (In Russ.).

51. *Rakhmanin Yu.A., Bobrovniksky I.P.* Scientific and organizational-methodological bases of environmental medicine as the integrative direction of medical science and practical health care. *Hygiene and sanitation*. 2017, vol. 96, no.10, pp. 917-921.

52. *Pereginya O.V., Lutsenko T.M.* Translation medicine, biomedicine and medical biotechnology: the transition to personalized medicine. *Biotechnologia Acta*. 2020, vol. 13, no. 2, pp. 5-11.

53. Kleymonova Ye.B., Nazarenko G.I., Yashina L.P., Payushchik S.A. [The problem of knowledge translation in healthcare: tools for solving it in the field of patient safety]. *Vestnik Rossiyskoy akademii meditsinskikh nauk*. [Bulletin of the Russian Academy of Medical Sciences]. 2018, vol. 73, no. 2, pp. 105-114. (In Russ.).

54. Genkin A.A., Medvedev V.I. *Prognozirovaniye psikhofiziologicheskikh sostoyaniy*. [Prediction of psychophysiological states]. Leningrad: Nauka, 1973. 78 p. (In Russ.).

55. Pyatibrat A.O., Melnov S.B., Kozlova A.S., Pyatibrat E.D. [Physiological assessment of hereditary predisposition to extreme types of professional activity]. *Mediko-biologicheskiye problemy zhiznedeyatel'nosti*. [Biomedical problems of life]. 2015, no. 2 (14), pp. 73-78. (In Russ.).

56. Trifonova O.P., Balashova E.E., Maslov D.L., Grigoriev A.I., Lisitsa A.V., Ponomarenko E.A., Archakov A.I. [Metabolic blood test to create a digital image of a healthy person]. *Biomeditsinskaya khimiya*. [Biomedical Chemistry]. 2020, vol. 66, no. 3, pp. 216-223. (In Russ.).

57. Ivanov I.V., Ushakov I.B. [Principles of extrapolation of experimental data from laboratory animals to humans]. *Voyenno-meditsinskiy zhurnal*. [Military Medical Journal]. 2019, no. 12, pp. 50-56. (In Russ.).

58. Ushakov I.B., Bogomolov A.V., Dragan S.P., Soldatov S.K. [Methodological foundations of personalized hygienic monitoring]. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*. [Aviation and Space and Environmental Medicine]. 2017, vol. 51, no. 6, pp. 53-56. (In Russ.).

59. Ronzhin A.L., Sokolov B.V., Dzhaov V.Yu.D., Mironova E.G., Styskin M.M. [Application of radio frequency identification technology to build a control system for the turnover of onboard equipment]. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*. [Radio electronics issues. Series: Television technology]. 2020, no. 1, pp. 13-20. (In Russ.).

60. Ushakov I.B., Bogomolov A.V., Dragan S.P., Soldatov S.K. [Methodological foundations of personalized acoustic monitoring]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. [Labor safety in industry]. 2020, no. 10, pp. 33-39. Doi: 10.24000 / 0409-2961-2020-10-33-39 (In Russ.).

61. *Kuleshov S.V., Zaytseva A.A., Ronzhin A.L.* The development of soft defined distributed infocommunication systems architecture based on the active data technology. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2020, vol. 95, pp. 257-265.

62. Alekhin M.D., Bogomolov A.V., Kukushkin Yu.A. [Methods for analyzing breathing patterns during non-contact monitoring of psychophysiological states of operators of ergatic systems]. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*. [Aerospace and Environmental Medicine]. 2019, vol. 53, no. 2, pp. 99-101. (In Russ.).

63. Maksimov I.B., Stolyar V.P., Bogomolov A.V. *Prikladnaya teoriya informatsionnogo obespecheniya mediko-biologicheskikh issledovaniy*. [Applied theory of information support for biomedical research]. Moscow: Binom, 2013. 312 p. (In Russ.).

64. Ushakov I.B., Bogomolov A.V. [Diagnostics of human functional states in priority studies of domestic physiological schools]. *Mediko-biologicheskiye i sotsial'no-psikhologicheskiye problemy bezopasnosti v chrezvychaynykh situatsiyakh*. [Medico-biological and socio-psychological problems of safety in emergency situations]. 2021, no. 3, pp. 91-100. Doi: 10.25016 / 2541-7487-2021-0-3-91-100 (In Russ.).

65. Luzhnov P.V., Pika T.O., Shamaev D.M. Developing the structure of a hardware and software system for quantitative diagnosis of microhemodynamics. *International Journal of Biomedicine*. 2015, vol. 5, no. 4, pp. 228-230.

66. Ilyin E.P. *Psikhofiziologiya sostoyaniy cheloveka*. [Psychophysiology of human states]. Saint Petersburg: Piter, 2005. 412 p. (In Russ.).

67. Ushakov I.B., Bogomolov A.V., Kukushkin Yu.A. [Psychophysiological mechanisms of formation and development of functional states]. *Rossiyskiy fiziologicheskiy zhurnal im. I.M. Sechenova*. [Russian physiological journal named after I.M. Sechenov]. 2014, vol. 100, no. 10, pp. 1130-1137. (In Russ.).

68. Sandercock G., Shelton C., Bromley P., Brodie D. Agreement between three commercially available instruments for measuring short-term heart rate variability. *Physiological Measurement*. 2004, vol. 25, no. 5, pp. 1115-1124.

69. Kukushkin Y.A., Bogomolov A.V., Maistrov A.I. Rhythmocardiogram approximation methods for calculation of spectral parameters of cardiac rhythm variability. *Biomedical Engineering*. 2010, vol. 44, no. 3, pp. 92-103.

70. Nunan D., Jakovljevic D., Donovan G. Levels of agreement for RR-intervals and short-term heart rate variability obtained from the Polar S810 and an alternative system. *European Journal of Applied Physiology*. 2008, vol. 103, no. 5, pp. 529-537.

71. Lytaev S. Modeling and estimation of physiological, psychological and sensory indicators for working capacity. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021, vol. 1201 AISC, pp. 207-213. Doi: 10.1007/978-3-030-51041-1_28

72. Bogomolov A.V., Maistrov A.I. Theoretical-experimental analysis of convergence of heart rate variability spectral measures estimated via heart rate and heart period signals. *Biomedical Engineering*. 2009, vol. 43, no. 2, pp. 75-80.

73. Vorobiev K.P., Palamarchuk E.A. [Results of independent testing of three programs for calculating heart rate variability indices]. *Ukrains'kiy medichniy chasopis*. [Ukrainian medical clock]. 2007, vol. 3, no. 59, pp. 45-51. (In Russ.).

74. Maystrov A.I., Bogomolov A.V., Alekhin M.D., Zaretsky A.P. [Mathematical modeling of rhythmocardiographic signals to standardize the methods of their spectral analysis]. *Trudy Moskovskogo fiziko-tehnicheskogo instituta (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)*. [Proceedings of the Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)]. 2015, vol. 7, no. 3 (27), pp. 116-130. (In Russ.).

75. *Maistrov A.I., Alekhin M.D., Bogomolov A.V., Zaretsky A.P.* Mathematical modeling of rhythmocardiographic signals spectrum. *Proceedings - The Second International Conference on Engineering and Telecommunication. En&T-2015*. 2015, pp. 85-86. Doi: 10.1109/EnT.2015.27