

## ОБЗОРЫ

### OVERVIEWS

УДК: 004.89:159.944:001.891.57:615.47:616-053-2-036:12-02.613.865

#### **ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ НАБОРОВ ДАННЫХ В ИЗОЛЯЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ ДЛЯ МАШИННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ УСТАЛОСТИ ЧЕЛОВЕКА ПО РЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕПРИВАЦИИ СНА КАК ОСНОВНОГО МЕТОДА ИНДУКЦИИ УТОМЛЕНИЯ**

Ю.А. Бубеев, А.А. Карпов, А.М. Кашевник, А.В. Иванов, В.М. Усов

Докт. мед. наук, проф. Ю.А. Бубеев; канд. мед. наук А.В. Иванов;  
докт. мед. наук, проф. В.М. Усов (ГНЦ РФ – ИМБП РАН)<sup>1</sup>  
Докт. техн. наук, проф. А.А. Карпов; канд. техн. наук А.М. Кашевник  
(СПб ФИЦ РАН)

Цель настоящей работы состоит в анализе литературных источников по проблеме индуцирования утомления посредством ограничения сна в интересах формирования оригинальных специализированных наборов данных для машинного распознавания утомления по речи, используя условия изоляционных экспериментов как имитируемую среду деятельности космонавтов. При решении задач настоящего исследования исходной точкой были обширные исследования медицины труда, психологии и космической физиологии по различным аспектам развития профессионального утомления и изучения речи как в наземных экспериментах, так и в условиях пилотируемых полетов, а также достигнутый высокий уровень внедрения методов количественной обработки акустических речевых данных.

С учетом возросших интересов к технологиям искусственного интеллекта (ИИ) в настоящем литературном обзоре показана возможность применения модели индуцирования утомления в изоляционных экспериментах для построения набора данных как одного из значимых этапов разработки искусственных нейронных сетей (ИНС).

**Ключевые слова:** эксперименты по изоляции, модели, вызывающие усталость, лишение сна, обнаружение усталости, методы машинного обучения, технологии искусственных нейронных сетей, наборы данных

---

<sup>1</sup> Исследование выполнено в рамках Программы Фундаментальных научных исследований РАН FMFR-2024-0034.

**Specific Features of Creating Datasets for Machine Learning  
Detection of Human Fatigue Via Speech Analysis in Isolation  
Experiments with Sleep Deprivation as the Primary Method of  
Fatigue Induction. Yu.A. Bubeev, A.A. Karpov, A.M. Kashevnik,  
A.V. Ivanov, V.M. Usov**

The purpose of this review is to analyze existing research on the fatigue induced via sleep deprivation, in order to generate new specialized datasets for machine-learning algorithms of detecting speech-manifested fatigue by means of ANN, where the isolation experiment conditions simulate work environment onboard orbital stations. The starting point for this study was the extensive body of research in occupational medicine, psychology and space physiology covering various aspects of professional fatigue development and approaches to speech analysis – both in ground-based experiments and during human spaceflights – as well as the use of the most advanced methods of quantitative acoustic speech processing. Given the growing interest in applying AI technologies to space medicine and cosmonaut work psychology and physiology, this research review shows feasibility of using fatigue-induction models in isolation experiments as a tool to create datasets for ANN development.

**Keywords:** isolation experiments, fatigue-induction models, sleep deprivation, fatigue detection, machine learning methods, artificial neural network technologies, datasets

## 1. Введение

Выполнение требований по сохранению работоспособности специалистов существенно зависит от полноты решения организационно-методических вопросов формирования рациональных режимов труда и отдыха, определения рациональных циклограмм работы, учета трудностей выполнения рабочих операций и влияния профессиональных вредностей. В оперативном режиме это приводит к необходимости наличия инструментов, позволяющих осуществлять контроль факторов, которые негативно влияют на качество труда и безопасность трудовой деятельности при решении сложных задач в напряженной оперативно-тактической обстановке. В частности, применение инструментария для мониторинга резервов работоспособности позволяет своевременно распознать стадии утомления даже в тех ситуациях, когда по соображениям обстановки исключается или отсутствует возможность проведения специально выделенных этапов обследований с отвлечением работника.

Для своевременного детектирования перехода в стадию критического снижения уровня работоспособности актуально применение информационных технологий, основанных на бесконтактных методах получения данных и технологиях ИИ.

Цель настоящей работы состоит в обобщении данных литературных источников по проблеме формирования наборов данных в интересах машинного распознавания утомления по речи на базе экспериментальных моделей

индуцирования утомления, в числе которых рассматривается модель депривации сна. Наличие высокого риска индукции утомления при нарушениях режима труда и отдыха, ограничениях и лишении сна на определенных этапах напряженной профессиональной деятельности в нестандартных условиях (например, в нештатных ситуациях) характерно для многих экстремальных профессий, в том числе для профессии космонавта. В этой связи одним из рациональных путей скорейшего внедрения технологий ИНС в практику обеспечения космических полетов и при профессиональной подготовке космонавтов в наземных условиях является формирование в изоляционных экспериментах наборов данных для детектирования утомления по речи с помощью ИНС.

Доказательство высокой результативности мониторинга состояния работоспособности этими перспективными инструментами в условиях изоляционных экспериментов может служить основанием для внедрения апробированных решений в реальную практику подготовки космонавтов и программы перспективных космических проектов, что является дополнительной мотивацией изучения состояния вопроса и перспектив развития технологий ИНС в цифровой медицине.

В последующих разделах представлены материалы, в которых исследуются вопросы построения моделей индукции утомления, выделения градаций утомления, применения методов сбора исходных данных, численного анализа сигналов и разметки массивов информации для построения датасетов, которые отражают специфику труда данного контингента специалистов экстремальной профессии.

Особое внимание в обзоре уделено протоколам организации эксперимента, настройке моделей депривации сна для индуцирования утомления и способам верификации градаций утомления с использованием верифицирующих методов и тестов.

## **2. Профессионально ориентированные модели индукции утомления для формирования наборов данных в изоляционных экспериментах в интересах мониторинга работоспособности с использованием искусственных нейросетей**

В последние годы уделяется повышенное внимание проблеме прогнозирования и детектирования утомления в режиме реального времени по речи. Имеются убедительные результаты разрабатываемых методов на базе технологий ИИ в разных областях современного производства и транспорта.

В основе сегодняшних достижений по машинной диагностике утомления по речи лежат многочисленные исследования, целью которых было установление связи выраженности утомления с результативностью и надежностью деятельности специалистов, выявление рисков для профессионального

здоровья и поиск методов и методик с целью повышения безопасности и снижения заболеваемости работников.

Внедрение в наземные эксперименты профессионально-ориентированных моделей индукции утомления с четко определяемыми параметрами интенсивности и длительности рабочей нагрузки на организм человека открывает возможность контролируемого формирования наборов, размеченных экспертами (маркированных) данных, на которых выполняется обучение и тестирование ИНС, также применительно и к профессии космонавта.

В данном разделе предпринят анализ прецедентов реализации в экспериментах моделей индукции утомления, когда проявления усталости правомерно относить к факторам, связанным с нарушениями сна.

### **2.1. Модель индукции утомления, основанная на феноменах отражении в речевой продукции усталости как последствий нерациональной организации режимов труда и отдыха и недостатка сна**

В настоящее время моделирование циклограмм деятельности с депривацией сна является распространенным методом индуцирования усталости. Длительная депривация сна влияет на физиологические ритмы человека, что отражается не только на биохимических показателях, которые изучены наиболее детально, а также проявляется в динамике физиологических функций и находит отражение при выполнении когнитивных операций. В дополнение к методам, предполагающим использование инструментальных систем медицинского контроля, которые требовательны к условиям проведения мониторинга состояния человека по условиям съема исходной информации, ранее получили распространение субъективные методы оценки утомления (специальные опросники). В настоящее время все больше внимания уделяется бесконтактным дистанционным методам детектирования утомления по видео- и аудиоданным.

В аспектах терминологии принято различать усталость, вызванную недосыпанием, и усталость, вызванную ограничением сна. Недостаток сна, вызванный недосыпанием, характеризуется как период длительного бодрствования, тогда как ограничение сна определяется как сокращение времени сна в течение нескольких дней подряд.

Учет последствий нерациональной организации режимов труда и отдыха, нарушения циклов сон-бодрствование и серьезных последствий для деятельности человека при недостатке (лишении) сна привлекает повышенное внимание специалистов в области охраны труда и безопасности рабочей среды [1]. По результатам анализа большого числа современных исследований авторы обзора [2] установили, что недостаток сна во время рабочей смены, плохое качество сна и работа в ночное время приводили к усилению усталости, снижению когнитивных функций и уменьшению бдительности, а также к увеличению рискованного поведения. В работе [2] утверждается, что для

эффективного управления рисками у таких специалистов необходимы как субъективные, так и объективные оценки утомления. В отношении наиболее распространенных методов мониторинга было выявлено, что большинство представленных результатов основаны на субъективных показателях усталости с использованием ряда опросников, таких как: EFRs (Fatigue in Emergency First Responders); SPFS (Samn-Perelli Fatigue Scale); CFS (Chalder Fatigue Scale) и OFERS (Occupational Fatigue Exhaustion Recovery Scale). Отмечено, что опросник SPFS часто используется ИКАО для оценки работоспособности пилотов на дальних и сверхдальних рейсах с целью выявления тех, кто подвержен риску усталости во время работы, поскольку он позволяет количественно оценить и различить острую и хроническую усталость, одновременно измеряя способность к восстановлению.

В отечественной медицине труда изучалось утомление, развивающееся у представителей экстремального профиля деятельности, особенно в тех случаях, когда оно является состоянием, угрожающим своевременной и эффективной работе на объектах, подверженных высокому риску чрезвычайных происшествий. В исследовании [3] достоверные отличия между показателями индивидуальной выраженности утомления выявлены в группах при наиболее сложном режиме моделируемой операторской деятельности. Автор в процессе исследования утомления операторов МЧС проводила оценку сомнологического статуса с помощью анкеты балльной оценки субъективных характеристик качества сна (модификация анкеты Шпигеля) и шкалы ESS (Epworth Sleepiness Scale). Уровень утомления оценивался с помощью методики FAS и шкалы CIS (Checklist Individual Strength). Эффективность операторской деятельности оценивалась с помощью диагностической модели сенсомоторного слежения.

Для исследований моделируемой операторской деятельности существенно, что развитие утомления проявляется в изменениях когнитивной сферы человека. Происходит снижение сенсорной чувствительности в различных модальностях, что отражается в увеличении абсолютных и дифференциальных порогов для этих модальностей. Одним из наиболее важных показателей утомления является сужение объема внимания, сложность его переключения и распределения, что может являться нарушением процессов сознательного контроля за выполнением деятельности. Также часто наблюдается снижение эффективности кратковременной памяти, связанной с ухудшением удержания информации в системе кратковременного хранения и операций семантического кодирования [4]. Аналогичная модель индукции утомления с использованием операторской деятельности была применена в серии исследований [5].

Существует обширный перечень литературы по вопросам утомления операторов в области авиационной и космической медицины. Во многих прикладных исследованиях широко применяются методы опроса и анкетирования. Наглядное выражение этой методологии можно найти в работе [7].

По результатам проведенного исследования авторами [7] установлено, что пилоты при ответе на вопросы об уровнях напряженности труда оценивают свой труд как напряженную операторскую деятельность. В то же время, по данным авторов, при оценке факторов, влияющих на утомление пилотов, выявлено, что более 44 % респондентов редко успевают отдохнуть между полетами; у 59,9 % членов экипажей воздушных судов сон между полетными сменами носит прерывистый характер и только 14,1 % респондентов всегда идут на ночную полетную смену после полноценного дневного сна. По данным цитируемой работы, среди всех анкетированных доля пилотов, которые замечали за собой возникновение внезапного сна во время полета, составляет 74,3 %, за коллегами – 82,9 % и частую замедленную реакцию на разные ситуации (нормальные, нестандартные или чрезвычайные).

Усталость вследствие депривации сна влияет на выполнение операторских функций [8]. В работе [8] приводятся данные о том, что увеличение времени бодрствования ухудшает способность точно выполнять задачи при решении операторских задач на авиационном тренажере. Измерялось влияние 34-часового непрерывного бодрствования на летные характеристики, сканирование приборов, субъективную усталость и активность ЭЭГ. Паттерны сканирования глаз были получены с помощью магнитного отслеживания головы и инфракрасного отслеживания глаз. Ошибки операторской деятельности достигли своего максимального значения примерно через 24–28 ч непрерывного бодрствования в соответствии с выраженностью субъективных оценок усталости. Увеличение количества ошибок пилотирования, достигающее пика примерно через 24 ч бодрствования, соответствовало субъективным отчетам о сонливости.

## **2.2. Особенности динамики работоспособности в длительных пилотируемых космических полетах и риски развития утомления**

В большом числе отечественных исследований были установлены закономерности динамики работоспособности в длительных пилотируемых космических полетах, выявлены факторы риска нарушения состояния, приводящих к снижению функциональных резервов организма, психической астенизации и развитию состояния умственного утомления. О высоких рисках снижения работоспособности свидетельствуют данные, приведенные в работах [9, 10], в которых рассмотрены вопросы рациональной организации труда и отдыха космонавтов, планирование работ с учетом медицинских лимитов рабочей занятости, а также результатов мониторинга режима труда и отдыха, психического состояния членов экипажей.

Из зарубежных публикаций обращает на себя внимание серия работ по вопросам мониторинга состояния космонавтов при полетах на МКС с использованием методик психофизиологического обследования и опросников [11–14]. В этих работах раскрываются приемы и методики проведения лонгитюдного исследования, в ходе которого с помощью компьютеризированных

психофизиологических тестов изучаются режим сна и бодрствования, нейроповеденческие функции, а также уровень стресса и рабочей нагрузки у астронавтов до-, во время- и после 6-месячных миссий на борту МКС. Согласно приведенным в работе [14] данным о негативных последствиях нарушений сна, изменения наблюдались во всех нейроповеденческих функциях. При этом продолжительность сна менее 6 ч коррелировала со значительным снижением скорости психомоторной реакции, повышенным уровнем стресса и более высокой нагрузкой. Показано, что продолжительность сна менее 5 ч отражалась в усилении негативных поведенческих состояний.

Для изучения этих состояний использовались данные тестов и наблюдений:

- PVT (the Psychomotor Vigilance Test) – объективно оценивает связанные с усталостью изменения бдительности, связанные с потерей сна, длительным бодрствованием, циркадным смещением и временем выполнения задачи;

- VAS (Visual Analog Scale) – оценивает поведенческие состояния по «визуальной аналоговой шкале»;

- фактические данные о времени, продолжительности и качестве сна.

Результаты приведенных исследований, на наш взгляд, свидетельствуют о правомерности рассмотрения модели депривации сна в составе перспективных исследовательских приемов для индукции утомления в условиях наземного моделирования деятельности экипажа в изоляционных экспериментах, построения специально организованной во времени циклограммы работы экипажа испытателей и получения наборов данных для обучения ИНС распознаванию утомления по речи.

Эта модель в настоящее время уже нашла практическую реализацию, например, в Международном проекте SIRIUS-23 депривация сна длилась 36 ч [15]. Все это время испытуемые продолжали выполнять научные задачи без отступления от циклограммы и своего обычного бытового распорядка.

### **2.3. Прототипы систем компьютерного анализа речи космонавтов, представленные в программах изоляционных экспериментов и научных бортовых экспериментов на МКС. Вычислительные методы обработки аудиосигналов в речевых информационных системах**

В ряде работ по космической медицине исследованы способы мониторинга психофизиологического состояния космонавтов непосредственно в ходе радиопереговоров без использования дополнительного оборудования и выделения дополнительного времени экипажу для проведения обследований [16]. Данное направление продолжают развивать как в условиях пилотируемых космических полетов [17], так и в условиях наземных изоляционных экспериментов [18]. В ряде работ подробно обсуждались методические проблемы постановки экспериментальных исследований в интересах коммуникации в группе и семантического анализа речи на базе информационных

признаков, извлекаемых из акустического сигнала, и способы их обработки и представления [19, 20]. Также способы компьютерного анализа речевых сигналов детально описаны в ряде других исследований [21–23].

В литературе достаточно широко представлены результаты, которые имеют непосредственное отношение к изучению акустических характеристик речи у специалистов космических профессий, с детализацией исследовательских задач в зависимости от диагностики и распознавания состояний человека [17, 25, 26]. Также вычислительные подходы и способы компьютерного анализа речевых сигналов и речи описаны в ряде других исследований и методической литературе [21–24].

На наш взгляд, современное состояние вопроса в области разработки систем для автоматического анализа акустических характеристик речи космонавта в условиях космического полета и испытываемого в условиях длительного изоляционного эксперимента детально изложено в работе [17] и не требует дополнительной детализации в настоящем обзоре.

Цитированные результаты базируются на ряде ранее выполненных исследований. Во многих работах отмечается, что для акустического анализа аудиозаписей речи может использоваться компьютерная программа Praat, которая позволяет оценивать основные акустические характеристики речевого аудиосигнала: частота основного тона (ЧОТ), форманты, интенсивность сигнала (громкость), число голосовых импульсов, число нуль-пересечений, вариативность речевого сигнала по амплитуде и др. [27–30]. В частности, показано, что выходные численные характеристики приложения Praat позволяют осуществлять контроль изменения функционального состояния человека и оценить степень психофизиологической напряженности говорящего.

Применительно к военным профессиям с уточнением назначения этапа компьютерного анализа признаков, которые можно извлечь из акустических сигналов для подготовки к разметке записей и формированию датасета, достаточно подробно изложено в работах [5, 6, 31].

### **3. Методические вопросы организации обработки данных в интересах создания наборов данных для распознавания утомления по речи с помощью ИНС**

В современной литературе, посвященной вопросам распознавания утомления по речи, большее внимание уделяется выбору топологии (архитектуры) и способам построения ИНС, а также доказательству корректности их применения, сравнению с прототипами и выявлению преимуществ при сравнении продуктов. При этом часто отмечается, что отсутствие отечественных оригинальных (специализированных) корпусов данных существенно ограничивает возможности продвижения ИТ-продуктов в специальных (в том числе чувствительных по критерию безопасности) областях. В этой связи представляют интерес систематизация рекомендаций по разработке корпусов

данных и отзывы к существующим продуктам в отношении пригодности к обучению собственных ИНС.

В литературе данный круг методологических вопросов находит отражение в описаниях дизайна лабораторных и полунатурных экспериментов с использованием ключевых слов: утомление, усталость, сонливость, обработка речи, корпус данных, рекомендации по разработке структуры корпуса, характеристики образов записи аудиоданных, критерии верификации, мета-данные эксперимента.

Для формирования корпусов данных для последующего использования при решении задачи компьютерного распознавания состояния утомления человека используются методики и аппаратно-программные комплексы, позволяющие синхронно регистрировать психофизиологические параметры, видеозаписи поведенческих реакций и аудиозаписи речи человека. Такие условия могут быть созданы в специально организованных наземных испытаниях с контролируемыми факторами экспозиции на состояние и деятельность испытуемых-добровольцев. Примером могут служить длительные изоляционные эксперименты ИМБП РАН [32, 33].

Во многих работах в методическом разделе статей приводится описание общей организации как самих экспериментов с привлечением различного контингента испытуемых (респондентов), так и вычислительного эксперимента с использованием предварительного этапа индукции утомления тем или иным видом нагрузки. Наибольшее число исследований проведено с верификацией записей речи по критериям выраженности утомления, по данным нагрузочного тестирования на велоэргометрах – с применением специальных опросников и традиционных методов электрофизиологии.

Обычно модели индукции утомления на основе приемов ограничения сна проводятся в лабораторных условиях и проектируются следующим образом. Участники случайным образом распределяются в одну из нескольких групп с разной длительностью сна (например, 4, 6 или 8 ч в сут), с постоянным выдерживанием выбранного режима в течение нескольких последовательных суток. Модель индукции строится таким образом, что в течение экспериментальной сессии участники проходят различные тесты для определения объективной и субъективной сонливости, а также влияния ограниченного сна на работоспособность.

Авторы работы [5] полагают, что для создания корпуса данных требуются получить ответы на ряд методических вопросов:

1. По верификации записей – что является достоверным критерием наступления состояния утомления?
2. Какие тексты должны быть использованы для чтения?
3. Какой длительности должны быть речевые фрагменты, достаточные для распознавания состояния утомления?
4. Микрофоны какого качества необходимо использовать для записи речи? Какой уровень «огрубления» исходных данных допустим при обучении?

Решение большинства вычислительных паралингвистических задач для детектирования усталости по речи имеет следующую структуру:

1) выбор набора акустических характеристик (информативных признаков), таких как:

- частота основного тона,
- форманты,
- спектральные и кепстральные коэффициенты,
- оценки длительности и функционалы этих характеристик;

2) уменьшение размерности набора акустических характеристик;

3) контролируемое обучение моделей и классификация поведения с использованием методов машинного обучения, таких как:

- метод опорных векторов (SVM),
- скрытые марковские модели (HMM),
- ИНС различной архитектуры (например, сверточные нейросети (CNN), рекуррентные нейросети (RNN), нейросетевые модели с длинной кратковременной памятью (LSTM), модели-трансформеры с механизмами внимания и др.) [21, 25, 34–37].

Рассмотрим вопросы применения такой структуры планирования на базе моделей индукции утомления для получения практических рекомендаций по детектированию усталости по речи на примере публикации [38]. Согласно выводам этой работы, записи речи содержат информацию, которая может быть использована в качестве акустических биомаркеров для мониторинга физиологического и психологического состояния при предложенном авторами сценарии мониторинга усталости с помощью шкалы воспринимаемого физического напряжения (RPE) Борга.

В описанном исследовании испытуемые должны были бодрствовать в течение 36-часовой продолжительности эксперимента. Далее они заполняли анкету усталости и записывали аудиофайлы в соответствии с экспериментальной процедурой. В качестве контрольной группы (группа без усталости) использовалась информация до начала эксперимента, а данные после 36 ч лишения сна – в качестве основной группы. Дополнительный контроль обеспечивали биохимические пробы.

Результаты проведенного анализа показывают, что предложенная система в тестированных случаях обеспечивает точность выше 92 %, что делает ее пригодной для использования на практике.

В одном из более ранних исследований был рассмотрен способ прогнозирования утомляемости по речи с учетом результатов психофизиологических тестов в критически важных для безопасности средах [25]. В цитируемой статье авторами представлен анализ голосовых записей и результатов психофизиологических тестов, полученных во время выполнения тренировочного задания, в ходе которого они бодрствовали в течение 60 ч. Участие в исследовании принимали специалисты из космической отрасли.

Всего для каждой полученной записи был сгенерирован вектор признаков, содержащий 1093 параметра. В работе были обобснваны численные показатели для описания формы частотного спектра речи и показатели временных различий для описания изменений с течением времени.

Авторы работы рассматривали область применения предлагаемой ими системы оценивания усталости по речи там, где операторы регулярно общаются в устной форме в рамках своих должностных обязанностей. Для космических экипажей именно такой способ коммуникации является доминирующим в пилотируемых полетах.

В числе проблемных вопросов формирования рекомендаций по созданию корпуса данных в области распознавания утомления по речи называются оценки субъективной усталости.

Значительная часть работ по машинному распознаванию усталости по речи демонстрировала, как уже отмечалось ранее, высокую результативность при целенаправленном контроле когнитивных функций, таких как бдительность и внимание, психомоторная активность и рабочая память с использованием модели индукции утомления недостатком сна [39].

На связь результативности автоматической обработки речи с составом наборов данных обращено внимание в статье [40]. Для доказательства этого положения авторами предлагается рассмотрение проблемы на примере четырех существующих корпусов, чтобы путем сравнения выявить методологические решения, которые были приняты при их разработке. На этой основе в цитируемой работе предложены рекомендации по созданию новых корпусов.

В своих публикациях авторы считают необходимым избегать практики прямого переноса обработки речи с использованием корпусов для диагностики некоторых заболеваний, в которых обнаруживаются нарушения речи, на ситуацию выявления утомления у практически здоровых работоспособных лиц. Возможно, что это предостережение адресовано в первую очередь специалистам IT-профиля, которым сложно уловить грани нормы и патологии применительно к такому сложному понятийному образованию как утомление. По мнению авторов работы [40] недопонимание базовых концепций диагностической задачи может привести к ненадлежащей маркировке данных, что приведет к потере смысла алгоритма машинного обучения, разработанного на таких корпусах.

При этом дополнительно отмечается, что внедрение систем на базе хорошо известных разработок такого рода в медицинскую практику еще не завершено либо из-за слишком низкой точности, либо вследствие исследований и проверки концепции, в частности, что касается проблем, связанных с применением субъективных оценок, где постановка вопросов играет важную роль. Например, в одном из исследований показано, что формулировка вопросов и используемые шкалы значительно влияют на реакцию испытуемых при самооценке продолжительности сна [41].

Так же точность определения задачи влияет на экспериментальные условия и маркировку данных. Если в общеупотребительном значении термины отсутствие бдительности, падение производительности, усталость или сонливость практически взаимозаменяемы, то в разных постановках задач эти термины могут иметь иные смысловые оттенки при анализе семантики речи.

На наш взгляд, в работе [40] правомерно уделено внимание руководящим принципам, которые должен задать себе разработчик корпуса при создании базы данных, ориентированной на ту или иную парадигму.

В цитируемой работе выделены следующие позиции:

- выбор контингента (информантов);
- балансировка набора данных;
- уровень читаемой и устной (разговорной) речи;
- качество технического оснащения при записи акустических данных.

При создании корпуса текстов одним из первых возникает вопрос о том, из какой популяции или контингента следует записывать голосовые данные. Так, например, в корпусах SLC и SLEEP записи речи были отобраны из общей популяции и проверены с помощью опросника PSQI (Pittsburgh Sleep Quality Index), чтобы убедиться, что у них нет нарушений сна.

Балансировка набора данных важна с той точки зрения, что на характеристики речи или измеряемые явления могут влиять пол, возраст и индекс массы тела испытуемых. Однако сбалансировать все эти характеристики технически невозможно. В этом случае определяющую роль играет качество дизайна постановочного эксперимента.

Уровень читаемой и устной речи – значимый фактор речепродукции, и составители корпусов должны исключать говорящих, у которых есть проблемы с чтением или которые не обладают достаточными способностями к чтению. Скорее всего, этот вопрос следует решать в сотрудничестве со специалистами в области патологии речеобразования – логопедами. Такую же осторожность следует соблюдать при работе с разговорной речью. В ряде случаев необходимо принимать во внимание профессиональную повышенную нагрузку в отношении речепродукции (дикторы, диспетчеры и другие специальности).

Наличие полного состава метаданных для разметки набора записей является важным признаком качества выполненного этапа сбора данных. Запись голоса информанта должна содержать информацию как об обследуемом испытуемом (пол, возраст, хроническая сонливость и т. д.), так и о цели распознавания его состояния (эмоциональное реагирование, усталость, кратковременная сонливость, циркадные ритмы и т. д.).

Качество записи – один из критически важных параметров регистрации акустических данных. На качество записи могут влиять различные источники шума, как в реальных условиях. Другим аспектом, влияющим на качество записей, является выбранное записывающее устройство.

В работе [5] для записи речи одновременно использовались два микрофона: профессиональный миниатюрный петличный микрофон AKG C 417111 и высокочувствительный метрологический микрофон РСВ 378А14 совместно с усилителем РСВ 482С. Для аналого-цифрового преобразования звукового сигнала микрофонов использовалась внешняя двухканальная звуковая карта M-AUDIO M-Track Plus (МКII).

Что касается подхода к заданию градаций усталости при использовании конкретной модели индуцирования утомления, то в отношении качества распознавания с помощью ИНС наилучшие результаты получены при бинарной классификации (точность более 80 %) [42].

#### 4. Заключение

Проблема изучения профессионально обусловленных факторов развития утомления является одной из центральных при обеспечении безопасности труда и профессионального долголетия работников. Контроль выполнения требований по формированию рациональных режимов труда и отдыха, построению циклограмм работы с учетом резервов работоспособности позволяет в долгосрочной перспективе обеспечивать снижение рисков профессионально обусловленных заболеваний, а в оперативном аспекте – активно влиять на качество труда и безопасность трудовой деятельности. В этой связи актуальна разработка методов своевременного распознавания утомления специалистов экстремального профиля деятельности, работающих в ненормированном режиме на протяжении длительного периода времени в напряженной оперативно-тактической обстановке. Такие риски характерны и для профессии космонавта, ввиду высокой вероятности возникновения ситуаций, приводящих к нарушениям и ограничениям сна в нештатных ситуациях на орбитальных станциях.

Мотивацией выбора направлений аналитического обзора послужили следующие аргументы:

1) использование в длительных изоляционных экспериментах моделей индицирования утомления и депривации сна создает условия сбора верифицированных исходных данных для выявления утомления и повышения качества медицинского обеспечения в полетах на МКС и в будущих миссиях;

2) применение информационных технологий, основанных на бесконтактных методах мониторинга состояния работоспособности специалиста непосредственно в ходе решения профессиональных задач в оперативном режиме, в настоящее время рассматривается как одно из базовых направлений развития инструментария мониторинга в физиологии и психологии труда космонавта;

3) решения в области детектирования утомления человека по речи существенно расширяют возможности оперативного контроля и в наименьшей степени вносят ограничения в работу испытателей.

Достижения последних лет в области использования технологий ИИ показывают возрастание возможностей ИНС для этих видов диагностики. Известные из литературы прототипы свидетельствуют как о значимых достижениях в этой области, так и о наличии ограничений при продвижении этих методов в практику.

Для преодоления существующих ограничений признается необходимым существенно наращивать усилия по разработке корпусов (наборов) данных (датасетов) с достаточно полным учетом специфики прикладных областей применения, целевого контингента и доказательной базы верификации градаций утомления. По этой причине детектирование утомления по речи и другим модальностям с использованием ИНС требует дополнительного изучения и отработки протоколов и организационно-технологических схем формирования наборов данных.

В настоящее время в ИМБП РАН в изоляционных экспериментах отработан большой комплекс профессионально ориентированных моделей воспроизведения в наземных условиях измененных состояний, специфичных для длительной работы на МКС, методик верификации и экспертной оценки выраженности расстройств состояния для целей прогноза работоспособности в условиях действия неблагоприятных факторов. Мониторинг утомления человека при решении разных видов профессиональных задач, включая управление сложными динамическими объектами, входит в число значимых целей проводимой серии изоляционных экспериментов. Для этого применяется современная измерительная аппаратура, включая технические средства видео- и аудиоинформации. В интересах изучения особенностей коммуникации в малых рабочих группах применяются отработанные математические методы обработки аудио- и речевой информации для получения исходных признаков распознавания. Все это в совокупности создает благоприятную почву для продвижения методов машинного распознавания утомления по речи в кооперации с ведущими учреждениями РАН в этой области. Необходимое звено – готовность информационной базы для разработки соответствующего программного обеспечения. И в этом отношении также созрели все предпосылки для инициирования разработки специального датасета распознавания утомления по речи на базе модели депривации сна в изоляционных экспериментах, что в дальнейшем может служить прототипом при разработке наборов данных для ИНС на базе других нагрузочных моделей, индуцирующих неблагоприятную динамику работоспособности человека.

## 5. Выводы

1. В настоящее время актуальной проблемой является рациональный выбор состава методов и показателей, которые помогают рационально построить циклограммы работ, режимы труда и отдыха, нормировать рабочую нагрузку, в том числе при выполнении экипажем космонавтов циклограммы работ на борту орбитальной станции.

2. Результаты проведенных многочисленных исследований показали принципиальную возможность дистанционного выявления признаков (как ранних индикаторов) состояния утомления человека с помощью компьютерных систем анализа речи.

3. Улучшение качества дистанционной диагностики с помощью технологий ИНС может существенно изменить результативность этого направления работ в области учета человеческого фактора в длительных пилотируемых космических полетах.

4. Начальный этап разработки и внедрения ИНС предполагает создание датасетов утомления с применением профессионально-ориентированных нагрузочных моделей, индуцирующих утомление. Скорейшее решение этой задачи возможно в условиях изоляционных экспериментов при взаимодействии с научными организациями, имеющими опыт построения ИНС в смежных областях.

#### ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Новожилова, А.А. Особенности исследования профессионального утомления в физиологии труда / А.А. Новожилова, А.М. Герегей, А.Г. Меркулова // Медицина труда и промышленная экология. – 2022. – № 62(4). – С. 238–246. – DOI: 10.31089/1026-94282022-62-4-238-246.  
Novozhilova, A.A. Specific Features of Studying Occupational Fatigue in Work Physiology (Literature Review) / A.A. Novozhilova, A.M. Geregei, A.G. Merkulova. – DOI: 10.31089/1026-9428-2022-62-4-238-246 // Occupational Medicine and Industrial Ecology. – 2022. – No 62(4). – P. 238–246 (in Russian).
2. Occupation-Induced Fatigue and Impacts on Emergency First Responders: A Systematic Review / G. Marvin, B. Schram, R. Orr, E.F.D. Canetti. – DOI: 10.3390/ijerph 20227055 // Int J Environ Res Public Health. – 2023, Nov 12. – No 20(22). – P. 7055.
3. Бубнова, А.Е. Комплексная оценка субъективных и объективных физиологических характеристик критического уровня утомления у операторов МЧС / А.Е. Бубнова. – DOI: 10.19163/1994-9480-2019-3(71)-91-95 // Вестник ВолгГМУ. – 2019. – № 3(71). – С. 91–95.  
Bubnova, A.E. Complex Assessment of Subjective and Objective Physiological Characteristics of Critical Fatigue Levels in Emercom Operators / A.E. Bubnova. – DOI: 10.19163/1994-9480-2019-3(71)-91-95 // Journal of Volgograd State Medical University. – 2019. – No 3(71). – P. 91–95 (in Russian).
4. Величковский, Б.Б. Когнитивные эффекты умственного утомления // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. – 2019. – № 1. – С. 108–122.  
Velichkovsky, B.B. Cognitive Effects of Mental Fatigue // Moscow University Psychology Bulletin. Seriya 14. Psikhologiya. – 2019. – P. 108–122 (in Russian).
5. Распознавание утомления человека на основе анализа его речи с помощью нейросетевых технологий / А.В. Яковлев, В.О. Матыцин, В.А. Велюга, К.А. Найденнова [и др.]. – DOI: 10.14529/cmse230103 // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2023. – Т. 12, № 1. – С. 46–60.

- Recognition of Human Fatigue Based on Speech Analysis Using Neural Network Technologies / A.V. Yakovlev, V.O. Matytsin, V.A. Veluga, K.A. Naidenova [et al.]. – DOI: 10.14529/cmse230103 // Bulletin of SUSU. Series: Computational Mathematics and Informatics. – 2023. – Vol. 12, No 1. – P. 46–60 (in Russian).
6. Яковлев, А.В. Использование нейронной сети для диагностики утомления военнослужащего-оператора по его речи / А.В. Яковлев, В.О. Матыцин, С.В. Матыцина. – DOI: 10.52424/00269050\_2023\_344\_9\_56 // Военно-медицинский журнал. – 2023. – Т. 344, № 9. – С. 56.
- Yakovlev, A.V. Using a Neural Network to Diagnose Fatigue in a Military Operator by Speech / A.V. Yakovlev, V.O. Matytsin, S.V. Matytsina. – DOI: 10.52424/00269050\_2023\_344\_9\_56 // Military Medical Journal. – 2023. – Vol. 344, No 9. – P. 56 (in Russian).
7. Оценка показателей напряженности труда и факторов, влияющих на утомление у пилотов гражданской авиации по результатам анкетирования / Е.В. Зибарев, И.В. Бухтияров, Е.А. Вальцева, А.В. Токарев. – DOI: 10.31089/1026-9428-2021-61-6-356-364 // Медицина труда и промышленная экология. – 2021. – № 61(6). – С. 356–364.
- Assessment of Work Intensity Indicators and Factors Contributing to Fatigue in Civil Aviation Pilots Based on Questionnaire Survey / E.V. Zibarev, I.V. Buhtijarov, E.A. Val'ceva, A.V. Tokarev. – DOI: 10.31089/1026-9428-2021-61-6-356-364 // Occupational Medicine and Industrial Ecology. – 2021. – No 61(6). – P. 356–364 (in Russian).
8. The Effects of Sleep Deprivation on Flight Performance, Instrument Scanning, and Physiological Arousal in Pilots / F. H. Previc, N. Lopez, W.R. Ercoline, C.M. Daluz [et al.]. – DOI: 10.1080/10508410903187562 // The International Journal of Aviation Psychology. – 2009. – No 19(4). – P. 326–346.
9. Теоретические и прикладные аспекты организации труда и отдыха участников экспедиций по российской лунной программе / С.И. Степанова, М.В. Королева, А.С. Карапетян, В.А. Галичий [и др.]. – DOI: 10.21687/0233-528X-2020-54-1-23-30 // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2020. – Т. 54, № 1. – С. 23–30.
- Theoretical and Applied Aspects of Work-And-Rest Scheduling for Participants of Expeditions Under the Russian Lunar Program / S.I. Stepanova, M.V. Koroleva, A.S. Karapetyan, V.A. Galichiy [et al.]. – DOI: 10.21687/0233-528X-2020-54-1-23-30 // Aerospace and Ecology Medicine. – 2020. – Vol. 54, No 1. – P. 23–30 (in Russian).
10. Оценка режима работы и отдыха российских членов экипажей 40/41–53/54 Международной космической станции на основе данных мониторинга полетов / С.И. Степанова, М.В. Королева, В.Ф. Нестеров, Н.С. Суполкина [и др.]. – DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-2-29-35 // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2019. – Т. 53, № 2. – С. 29–35.
- Evaluation of Work-And-Rest Schedules for Russian Members of International Space Station Crews 40/41-53/54 Based on Flight Monitoring Data / S.I. Stepanova, M.V. Koroleva, V.F. Nesterov, N.S. Supolkina [et al.]. – DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-2-29-35 // Aerospace and Ecology Medicine. – 2019. – Vol. 53, No 2. – P. 29–35 (in Russian).

11. Basner, M. Validity and Sensitivity of a Brief Psychomotor Vigilance Test (PVT-B) to Total and Partial Sleep Deprivation / M. Basner, D. Mollicone, D.F. Dinges. – DOI: 10.1016/j.actaastro.2011.07.015 // *Acta Astronaut.* – 2011. – No 69(11–12). – P. 949–959.
12. Response Speed Measurements on the Psychomotor Vigilance Test: How Precise is Precise Enough? / M. Basner, T.M. Moore, J. Nasrini, R.C. Gur [et al.]. – DOI: 10.1093/sleep/zsaa121 // *Sleep.* – 2021. – No 44(1).
13. Psychological and Behavioral Changes During Confinement in a 520-Day Simulated Interplanetary Mission to Mars / M. Basner, D.F. Dinges, D.J. Mollicone, I. Savelev [et al.]. – DOI: 10.1371/journal.pone.0093298 // *PLoS ONE.* – 2014. – No 9(3). – e93298.
14. Sleep Deficiency in Spaceflight is Associated With Degraded Neurobehavioral Functions and Elevated Stress in Astronauts on Six-Month Missions Aboard the International Space Station / C.W. Jones, M. Basner, D.J. Mollicone, C.M. Mott [et al.]. – DOI:10.1093/sleep/zsac006 // *Sleep.* – 2022. – No 45(3). – zsac006.
15. Международный проект «SIRIUS-23». Научная программа «SIRIUS-23» // Sirius.ru: [официальный сайт]. – URL: <http://sirius.imbp.ru>.  
SIRIUS'23 International Project. SIRIUS'23 Research Program // Sirius.ru: [official website]. – URL: <http://sirius.imbp.ru>.
16. Мясников, В.И. Предварительные результаты психического анализа коммуникаций экипажей Международной космической станции / В.И. Мясников, В.И. Гушчин, А.К. Юсупова // *Вестник Томского государственного педагогического университета.* – 2005. – № 1. – С. 112–118.  
Myasnikov, V.I. Preliminary Results of the Psychological Capacity Analysis of Crew Communication Aboard the International Space Station / V.I. Myasnikov, V.I. Gushchin, A.K. Yusupova // *Bulletin of the Tomsk State Pedagogical University.* – 2005. – No 1. – P. 112–118 (in Russian).
17. Лебедева, С.А. Возможности компьютерного анализа акустических характеристик речи человека-оператора в условиях космического полета / С.А. Лебедева, Д.М. Швед, В.И. Гушчин. – DOI 10.34131/MSF.20.3.109-124 // *Пилотируемые полеты в космос.* – 2020. – № 36(3). – С. 109–124.  
Lebedeva, S.A. The Potentials of Computer Analyzing the Acoustic Characteristics of a Human Speech under Space Flight Conditions / S.A. Lebedeva, D.M. Shved, V.I. Gushchin. – DOI: 10.34131/MSF.20.3.109-124 // *Manned Spaceflight.* – 2020. – No 36(3). – P. 109–124 (in Russian).
18. Анализ акустических и семантических показателей речи как перспективный метод дистанционной оценки психоэмоционального состояния членов космического экипажа / А.А. Егорова, Н.С. Суполкина, А.К. Юсупова, Д.М. Швед [и др.] // *Всероссийская XXII Конференция молодых ученых, специалистов и студентов, посвященная 300-летию Российской академии наук, 10–11 октября 2024 г., сборник материалов.* – Москва: ГИЦ РФ – ИМБП РАН, 2024. – 84 с.  
Analysis of Acoustic and Semantic Features as a Prospective Method of Remote Estimation of Psychological and Emotional Status of Spacecraft Crew Members / A.A. Egorova, N.S. Supolkina, A.K. Jusupova, D.M. Shved [et al.] // *XXII Russian national conference of young scientists and students, dedicated to 300th anniversary*

- of the Russian Academy of Science, October 10–11, 2024. – Moscow: GNC RF – IMBP RAN, 2024. – 84 p.
19. Лебедева, С.А. Предварительные результаты изучения функционального состояния человека-оператора методом анализа акустических характеристик речи в условиях воздействия моделируемых факторов космического полета / С.А. Лебедева, Д.М. Швед, В.И. Гушин. – DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-2-50-56 // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. – 2019. – Т. 53, № 2. – С. 50–56.  
Lebedeva, S.A. Preliminary Results of Studying the Functional State of Human Operator Using Acoustic Analysis of Speech in Spaceflight Simulated Environment / S.A. Lebedeva, D.M. Shved, V.I. Gushchin. – DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-2-50-56 // *Aerospace and Environmental Medicine*. – 2019. – Vol. 53, No 2. – P. 50–56 (in Russian).
  20. Лебедева, С.А. Изучение когнитивной работоспособности и психофизиологического состояния человека-оператора в условиях изоляции / С.А. Лебедева, Д.М. Швед. – DOI: 10.31089/1026-9428-2022-62-4-225-231 // *Медицина труда и промышленная экология*. – 2022. – Т. 62, № 4. – С. 225–231.  
Lebedeva, S.A. The Study of Cognitive Performance and Psychophysiological State of an Operator in Conditions of Isolation and Crowding / S.A. Lebedeva, D.M. Shved. – DOI: 10.31089/1026-9428-2022-62-4-225-231 // *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. – 2022. – Vol. 62, No 4. – P. 225–231 (in Russian).
  21. Столбов М.Б. Основы анализа и обработки речевых сигналов. – СПб.: НИУ ИТМО, 2021. – 101 с.  
Stolbov, M.B. Basics of Analysis and Processing of Speech Signals – St. Petersburg: NIU ITMO, 2021. – 101 p. (in Russian).
  22. Мошкарлова, Л.А. Методы извлечения акустических признаков в задаче распознавания речи рекуррентными нейронными сетями с долгой краткосрочной памятью / Л.А. Мошкарлова, О.А. Тельминов. – DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.5s.838.841 // *Наноиндустрия*. – 2020. – Т. 13, № S5-3(102). – С. 838–841.  
Moshkarova, L.A. Methods for Extraction of Acoustic Characteristics in the Speech Recognition Problem by Recurrent Neural Networks with Long Short-Term Memory / L.A. Moshkarova, O.A. Telminov. – DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.5s.838.841 // *Nanoindustry Russia*. – 2021. – Vol. 13, No S5-3(102). – P. 838–841 (in Russian).
  23. Гуртуева, И.А. Аналитический обзор и классификация методов выделения признаков акустического сигнала в речевых системах / И.А. Гуртуева, К.Ч. Бжихатлов. – DOI: 10.35330/1991-6639-2022-1-105-41-58 // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. – 2022. – № 1(105). – С. 41–58.  
Gurtueva, I.A. Analytical Review and Classification of Methods for Features Extraction of Acoustic Signals in Speech Systems / I.A. Gurtueva, K.Ch. Bzhikhatlov. – DOI: 10.35330/1991-6639-2022-1-105-41-58 // *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. – 2022. – No 1(105). – P. 41–58 (in Russian).
  24. Кипяткова, И.С. Автоматическая обработка разговорной русской речи / И.С. Кипяткова, А.Л. Ронжин, А.А. Карпов; Федеральное гос. бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский ин-т информатики и автоматизации Российской академ. наук. – Санкт-Петербург: ГУАП, 2013. – 313 с.

- Kipyatkova, I.S. Automatic Processing of Spoken Russian Speech / I.S. Kipyatkova, A.L. Ronzhin, A.A. Karpov; Federal State Budgetary Institution of Science St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences. – St. Petersburg: GUAP, 2013. – 313 p. (in Russian).
25. The Prediction of Fatigue Using Speech as a Biosignal. In: Dediu, AH., Martín-Vide, C., Vicsi, K. (eds) Statistical Language and Speech Processing. SLSP 2015. Lecture Notes in Computer Science / K. Baykaner, M. Huckvale, I. Whiteley [et al.]. – DOI: 10.1007/978-3-319-25789-1\_2 // Springer. – 2015. – Vol. 9449.
26. Лебедева, С.А. Изучение паттернов акустических характеристик речи операторов с целью прогнозирования когнитивной работоспособности в условиях моделируемых факторов космического полета // Пилотируемые полеты в космос. Материалы XV Международной научно-практической конференции 15–17 ноября 2023 года. – Звездный городок. – С. 332–334.
- Lebedeva, S.A. Studying Patterns of Acoustic Characteristics of Operators' Speech in Order to Predict Cognitive Performance in Conditions of Simulated Space Flight Factors // In the collection of Manned Space Flights. Materials of the XV International Scientific and Practical Conference on November 15–17, 2023. – Star City. – P. 332–334 (in Russian).
27. Картавенко, М.В. Об использовании акустических характеристик речи для диагностики психических состояний человека // Известия ТРТУ. – 2005. – № 5. – С. 164–180.
- Kartavenko, M.V. On the Use of Acoustic Characteristics of Speech for the Diagnosis of Human Mental States // Izvestiya TRTU. – 2005. – No 5. – P. 164–180 (in Russian).
28. Boersma, P. PRAAT, a System for Doing Phonetics by Computer / P. Boersma, D. Weenink // Glot International. – 2001. – No 5. – P. 341–345.
29. Сороколетова, Н.Ю. Функциональные возможности компьютерного приложения PRAAT // Иностранные языки: лингвистические и методические аспекты. – 2014. – № 27. – С. 127–131.
- Sorokoletova, N.Y. Functionalities of the Computer Application PRAAT. Foreign Languages: Linguistic and Methodical Aspects // Interuniversity Collection of Scientific Works. – 2014. – No 27. – P. 127–131 (in Russian).
30. Фролов, М.В. Особенности контроля состояния человека-оператора по показателям основного тона и спектра его речи / М.В. Фролов, Г.Б. Милованова // Физиология человека. – 2009. – Т. 35, № 2. – С. 136–138.
- Frolov, M.V. Monitoring the Functional State of Human Operators by the Parameters of the Fundamental Tone and Spectrum of Speech / M.V. Frolov, G.B. Milovanova // Human Physiology. – 2009. – Vol. 35, No 2. – P. 136–138 (in Russian).
31. Яковлев, А.В. Использование многослойных сетей-автоэнкодеров для распознавания усталости человека на основе речевых данных / А.В. Яковлев. – DOI: 10.31799/978-5-8088-1701-2-2022-2-87-94 // Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах 22. Сборник докладов Второй Международной научной конференции. Санкт-Петербург, 2022. – Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022. – С. 87–94.

- Yakovlev, A.V. The use of Multilayer Autoencoder Networks for Recognizing Human Fatigue Based on Speech Data / A.V. Yakovlev. – DOI: 10.31799/978-5-8088-1701-2-2022-2-87-94 // Processing, Transmission and Protection of Information in Computer Systems 22. Collection of reports of the Second International Scientific Conference. St. Petersburg, 2022. – St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 2022. – P. 87–94 (in Russian).
32. Основные результаты психофизиологических исследований в эксперименте «Марс-500» / И.Б. Ушаков, Б.В. Морук, Ю.А. Бубеев, В.И. Гушин [и др.] // Вестник Российской академии наук. – 2014. – Том 84, № 3. – С. 18–27.  
Main Results of Psychophysiological Studies in the Experiment “Mars-500” / I.B. Ushakov, B.V. Morukov, Yu.A. Bubeev, V.I. Gushchin [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. – 2014. – Vol. 84, No 3. – P. 18–27 (in Russian).
33. Эксперименты с изоляцией: прошлое, настоящее, будущее / В.И. Гушин, А.Г. Виноходова, Д.В. Комиссарова, М.С. Белаковский [и др.]. – DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-4-5-16 // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2018. – Т. 52, № 4. – С. 5–16.  
Experiments With Isolation: Past, Present, Future / V.I. Gushchin, A.G. Vinokhodova, D.V. Komissarova, M.S. Belakovsky [et al.]. – DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-4-5-16 // Aerospace and Environmental Medicine. – 2018. – Vol. 52, No 4. – P. 5–16.
34. Особенности разработки программного обеспечения для моделирования операторской деятельности при создании датасетов утомления операторов / М.А. Мужиков, Э.С. Галимов, В.О. Матыцин, А.В. Яковлев // Всероссийская научно-техническая конференция: Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Биотехнические системы и технологии». – Анапа, 2025. – С. 22–30.  
Features of Software Development for Modeling Operator Activity When Creating Operator Fatigue Datasets / M.A. Muzhikov, E.S. Galimov, V.O. Matytsin, A.V. Yakovlev // All-Russian Scientific and Technical Conference: The State and Prospects of Development of Modern Science in the Field of “Biotechnical Systems and Technologies”. – Anapa, 2025. – P. 22–30.
35. Методы и модели автоматического распознавания речи: учебное пособие / И.С. Кипяткова, А.А. Карпов, С.В. Кулешов, А.А. Зайцева. – СПб: СПб ФИЦ РАН. – 2021. – 116 с.  
Methods and Models of Automatic Speech Recognition: a Textbook / I.S. Kipyatkova, A.A. Karpov, S.V. Kuleshov, A.A. Zaitseva. – St. Petersburg: SPb FRC RAS 2021. – 116 p. (in Russian).
36. Тампель, И.Б. Автоматическое распознавание речи: учебное пособие / И.Б. Тампель, А.А. Карпов. – СПб: Университет ИТМО. 2017. – 152 с.  
Tampel, I.B. Automatic Speech Recognition: a Textbook / I.B. Tampel, A.A. Karpov. – St. Petersburg: ITMO University. 2017. – 152 p. (in Russian).
37. Системы детектирования утомления при моделировании операторской деятельности космонавтов / А.А. Кашевник, А.А. Карпов, Ю.А. Бубеев, В.М. Усов [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2023. – № 4(49). – С. 106–121.  
Fatigue Detection Systems for Modeling Cosmonauts’ Operational Activities / A.A. Kashevnik, A.A. Karpov, Yu.A. Bubeev, V.M. Usov [et al.] // Manned Spaceflight. – 2023. – No 4(49). – P. 106–121.

38. A Rapid, Non-Invasive Method for Fatigue Detection Based on Voice Information / X. Gao, K. Ma, H. Yang, K. Wang [et al.]. – DOI: 10.3389/fcell.2022.994001 // *Front. Cell Dev. Biol.* – 2022. – No 10. – P. 994001.
39. Sleep Deprivation Measured by Voice Analysis / E. Thoret, T. Andrillon, C. Gauriau, D. Léger [et al.]. – DOI: 10.1371/journal.pcbi.1011849 // *PLOS Computational Biology*. – 2024, February 5.
40. How to Design a Relevant Corpus for Sleepiness Detection Through Voice? / V.P. Martin, J.L. Rouas, J.A. Micoulaud-Franchi, P. Philip, J. Krajewski. – DOI: 10.3389/fdgth.2021.686068 // *Front Digit Health*. – 2021, Sep. – No 22(3). – P. 686068.
41. Self-Reported Sleep Duration and Timing: a Methodological Review of Event Definitions, Context, and Timeframe of Related Questions / R. Robbins, S.F. Quan, L.K. Barger, C.A. Czeisler [et al.]. – DOI: 10.1101/2020.09.09.20191379 // *Public Glob Health*. – 2020.
42. Günzel, B. Sleepiness Detection from Speech by Perceptual Features / B. Günzel, C. Sezgin, J. Krajewski. – DOI: 10.1109/ICASSP.2013.6637756 // In *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing – Proceedings*. – 2013. – P. 788–792.