

Лебедева Светлана Алексеевна

**ОЦЕНКА ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СТАТУСА ОПЕРАТОРА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЧИ**

3.3.7 – Авиационная, космическая и морская медицина

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата медицинских наук

Москва 2024

**Работа выполнена** в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Государственном научном центре Российской Федерации – Институте медико-биологических проблем Российской академии наук (ГНЦ РФ – ИМБП РАН).

**Научный руководитель:** кандидат медицинских наук Швед Дмитрий Михайлович

**Официальные оппоненты:**

**Зибарев Евгений Владимирович**, доктор медицинских наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, заместитель директора по научной работе.

**Енгальчев Вали Фатехович**, доктор психологических наук, Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, руководитель научно-исследовательского центра судебной экспертизы и криминалистики, профессор кафедры общей и социальной психологии Института психологии.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение

«Центральный научно-исследовательский институт  
Военно-воздушных сил» Министерства обороны  
Российской Федерации.

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.1.023.01 в ГНЦ РФ – ИМБП РАН по адресу: 123007, г. Москва, Хорошевское шоссе, д. 76А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНЦ РФ – ИМБП РАН и на сайте <http://www.imbp.ru/WebPages/win1251/ScienceN/DisserSov/Lebedeva2024/Lebedeva.html>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат биологических наук

Светлана Викторовна Поддубко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Влияние рабочего стресса на функциональное состояние оператора принято описывать в контексте изменения в физиологических системах организма человека, на психическом и поведенческом уровне (Ильин, 1978; Леонова, 1984). Эти параметры доступны объективной регистрации при помощи физиологических проб, количественных показателей выполненной деятельности и психометрических методик (Ильин, 1978; Begum et al., 2013; Чепурных и др., 2015). Однако использование этих методов в большинстве случаев сопряжено с отвлечением оператора от своих непосредственных обязанностей, что в условиях повышенной напряжённости, свойственной условиям космического полёта, является нежелательным.

В подобной ситуации для измерения психофизиологического состояния оператора используют неинвазивные, дистанционные, а в некоторых случаях даже автоматизированные способы наблюдения и контроля за деятельностью (Begum et al., 2013; Sparrow et al., 2019; Xia et al., 2022). Среди методов, соответствующим указанным требованиям, особенно выделяется анализ речи человека-оператора во время рабочих переговоров (Григорьев и др., 1997; Хроматиди, 2005; Чепурных и др., 2015; Baykaner et al., 2015; Slavich et al., 2019; Despotovic et al., 2022).

В зависимости от поставленных задач исследования специалисты используют контент-анализ (анализ содержательной стороны высказывания) и анализ акустических характеристик речи (изучение невербальной составляющей речи) (Морозов, 1998; Агарков и др., 2002; Картавенко, 2005; Воронцова и др., 2006; Богданова-Бегларян, 2016; Gushin et al., 2016). И если первый метод в большей степени позволяет определить факторы деятельности, опосредованные когнитивными и волевыми возможностями человека, то второй метод в большей степени соответствует эмоциональному и психофизиологическому состоянию человека, практически лишённому волевого компонента (Никонов, 1985; Мясников и др., 1997; Морозов, 2001).

Показано, что изменения частотных характеристик речи могут быть связаны с изменением эмоционального состояния оператора и колебаниями уровня активации – утомлением или возбуждением (Никонов, 1985; Потапова и др., 2008; Pohjalainen и др., 2016; Huang et al., 2021). Однако более обширное исследование параметров речевого сигнала может помочь специалистам лучше понять и предсказать изменение психофизиологического состояния оператора, чтобы оценить его способность выполнять текущую деятельность и предоставить индивидуальные рекомендации.

**Целью работы** являлось изучение связи между изменениями психофизиологического состояния человека-оператора и физическими параметрами его произвольной устной речи под воздействием моделируемых факторов космического полёта.

В рамках данной цели в диссертации решаются следующие **задачи**:

1. Определить релевантные теме исследования акустические характеристики речевого сигнала.
2. Разработать и апробировать методику оценки психофизиологического состояния человека-оператора с помощью анализа акустических характеристик произвольной речи.
3. Провести количественный анализ акустических характеристик речи, а также показателей когнитивной работоспособности, эмоционального и физиологического состояния человека-оператора, находящегося под воздействием моделируемых факторов космического полёта, включающих микрогравитацию, изоляцию и автономность, а также различные режимы угловых ускорений.
4. Провести анализ полученных данных с целью выявления устойчивых паттернов акустических показателей, отражающих психофизиологическое состояние человека-оператора.
5. Определить связи, имеющие прогностическую значимость для оценки когнитивной работоспособности в различных модельных условиях.

## **Научная новизна**

Впервые в строго контролируемых условиях наземных экспериментов изучалась произвольная речь человека-оператора (переговоры с ЦУП, ежедневные отчёты), находящегося под воздействием ряда моделируемых факторов космического полёта: различных режимов угловых ускорений, повышенного шума, эффектов «микрогравитации», а также изоляции и автономности.

С помощью продолжительного (сутки, недели, месяцы) анализа акустических характеристик речи были выявлены периоды острой адаптации к различным условиям жизнедеятельности. Описана динамика изменения основных акустических показателей под влиянием моделируемых факторов и их связь с субъективно оцениваемым самочувствием обследуемых.

Проведено сопоставление различных акустических характеристик речи с сенсомоторными и когнитивными показателями, физиологическими показателями (ЧСС, АД), данными анализа эмоциональной экспрессии по мимике, полученными в ходе длительных экспериментальных воздействий. Впервые определены акустические паттерны, указывающие на функциональные состояния человека-оператора, определяющие его когнитивную работоспособность.

## **Теоретическая и практическая значимость работы**

В качестве основного **научного результата** исследований впервые были установлены акустические паттерны, имеющие высокую прогностическую ценность для определения когнитивной работоспособности и уровня ситуативной тревожности: изменения частоты основного тона (средней и медианной ЧОТ), громкости, процента пауз в речи, количества голосовых импульсов, а также шиммера (вариабельности акустического сигнала по амплитуде) и джиттера (вариабельности акустического сигнала по частоте).

**Практический результат** работы заключается в разработке научного обоснования для создания автоматизированной экспертной системы, предназначенной для автономного мониторинга функционального состояния человека-оператора, оценки его готовности к стрессовым воздействиям, а также составления рекомендаций по психологической поддержке.

**Личный вклад автора** заключается в постановке задач, планировании и проведении экспериментов, анализе, оформлении и представлении результатов на научных конференциях и подготовке статей к публикации в научных журналах.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Акустические характеристики речи являются надёжным индикатором функционального состояния человека-оператора под воздействием моделируемых факторов космического полёта.

2. Изучение акустических показателей речи в динамике позволяет выявить начало и завершение острого периода адаптации к стрессовому воздействию моделируемых факторов космического полёта, а также определить последующие фазы адаптации.

3. Акустические паттерны, включающие изменения частоты основного тона (средней и медианной ЧОТ), громкости, процента пауз в речи, количества голосовых импульсов, а также шиммера (вариабельности акустического сигнала по амплитуде) и джиттера (вариабельность акустического сигнала по частоте), могут прогнозировать субъективно воспринимаемый уровень ситуативной тревожности у человека-оператора, а также его когнитивную работоспособность. Внутри акустических паттернов наиболее информативными для прогнозирования когнитивной работоспособности показателями являются ЧОТ, а также шиммер, джиттер и процент пауз в речи.

## **Степень достоверности результатов проведенных исследований**

Диссертационная работа выполнена с использованием современных методов клеточной и молекулярной биологии, а также адекватной статистической обработкой данных.

Выносимые на защиту положения и выводы основаны на достоверных результатах экспериментов, проиллюстрированных графиками и таблицами.

### **Апробация результатов**

Основные результаты и положения диссертационной работы доложены и обсуждены на Симпозиуме «Человек в космосе» 2019 (22nd IAA Humans in Space Symposium), (ОАЭ, Дубай, 2019), Научно-практической конференции учёных России и Хорватии (Москва, 2019), XVIII Конференции молодых ученых, специалистов и студентов, посвящённая 50-летию высадки человека на Луну (Москва, 2019), 54-х Научных чтениях памяти К.Э. Циолковского (Калуга, 2019), Конференции с международным участием «Современные методические подходы к бесконтактной оценке функционального состояния работников» (Москва, 2020), VI Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (Красноярск, 2020), IV Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы судебной психологической экспертизы и комплексной экспертизы с участием психолога. Современные компьютерные технологии в экспертной практике» (Калуга, 2020), XIV Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос» (Звездный городок, 2021) и Симпозиуме «Человек в космосе» 2021 (23rd IAA Humans in Space Symposium) (Москва, 2021), Симпозиуме COSPAR 2022 44th Scientific Assembly (Афины, 2022), Международной научно-практической конференции «Психология без границ: интеграция науки и практики» (Москва, 2023), Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос» (Звездный городок, 2023).

**По теме диссертации опубликованы** 22 печатные работы: 10 статей в рецензируемых изданиях, индексируемые аналитическими базами Scopus, WoS, RSCI и соответствующих перечню ВАК, и 12 тезисов в сборниках докладов международных и всероссийских научных конференций.

### **Связь работы с научными программами**

Работа выполнена при поддержке Программы Фундаментальных научных исследований РАН FMFR-2024-0034 (ранее 63.2) и Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2022-298 от 18.04.2022.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация изложена на 173 страницах и состоит из 4 основных глав, введения, заключения, выводов, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. Работа иллюстрирована 37 рисунками и 21 таблицей. Список цитируемой литературы включает 182 источника, из них 79 на русском и 103 на иностранном языке.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Материалы и методы исследования**

Используемый в диссертационной работе метод акустического анализа речи был апробирован на 24 обследуемых (15 женщин, 9 мужчин), находящихся на своём рабочем месте (студенты, члены дежурных бригад), без воздействия изучаемых в данной работе факторов. Надёжность-согласованность методики акустического анализа речи проверялась с помощью коэффициента альфа Кронбаха.

В рамках диссертационной были проанализированы данные, полученные в экспериментах, моделирующих факторы космического полёта разной длительности и интенсивности:

1. Часовое воздействие угловых ускорений на центрифуге короткого радиуса (1-3g) (эксперимент «ЦКР-2018»: 10 обследуемых-мужчин, 30 аудиозаписей) и 2-часовое воздействие шума 65 dB с применением профилактических мер (эксперимент «Шум-2020»: 10 обследуемых-мужчин, 24 аудиозаписи).

2. Воздействие эффектов «микрогравитации», имитируемое с помощью ванн «сухой» иммерсии (3, 7 и 21 сут.): 23 обследуемых-мужчин, 678 аудиозаписей и 6 обследуемых-женщин, 42 аудиозаписи.
3. Воздействие эффектов длительной скученности, автономизации и сенсорной депривации в условиях изоляционных экспериментов в гермообъекте (14 сут. и 4 месяца): 7 мужчин-обследуемых, 832 аудиозаписи и 5 женщин-обследуемых, 776 аудиозаписей.

В целом, в исследованиях с воздействием моделируемых факторов космического полёта принял участие 51 человек (11 женщин и 40 мужчин) в возрасте от 21 до 45 лет. Все испытуемые подписывали информационное согласие на участие в исследовании. Каждый из представленных экспериментов был одобрен Комиссией по биомедицинской этике ГНЦ РФ ИМБП РАН. В соответствии с биоэтическими требованиями, все представленные данные анонимны, обследуемым присвоены идентификационные номера.

#### **Акустический анализ речи**

В качестве объекта исследования использовались аудиозаписи произвольной речи участников наземных экспериментов, моделирующих факторы космического полёта (всего проанализировано 2310 аудиозаписей). Речь записывалась с помощью портативных диктофонов Zoom H1. При отсутствии стационарного места работы (в ванне «сухой» иммерсии), обследуемый держал диктофон в руке на расстоянии ок. 15 см от рта. При наличии стационарного места работы обследуемый помещал диктофон в специальное крепление на краю стола, расстояние до рта составляло ок. 20-25 см (см. Рис.1). При краткосрочном интенсивном воздействии аудиозапись производилось непосредственно во время воздействия, во время переговоров обследуемого с ЦУП («ЦКР-2018» и «Шум-2020»). При менее интенсивном, но более длительном воздействии («сухая» иммерсия и изоляционные эксперименты), аудиозапись произвольной речи проводится дважды в день (утром и вечером), при этом обследуемые сообщали:

1. Своё имя, фамилию (либо код/позывной);
2. Дату, время;
3. Произвольный рассказ о своём самочувствии, настроении;
4. Краткий отчёт о проведённом дне / ночи.

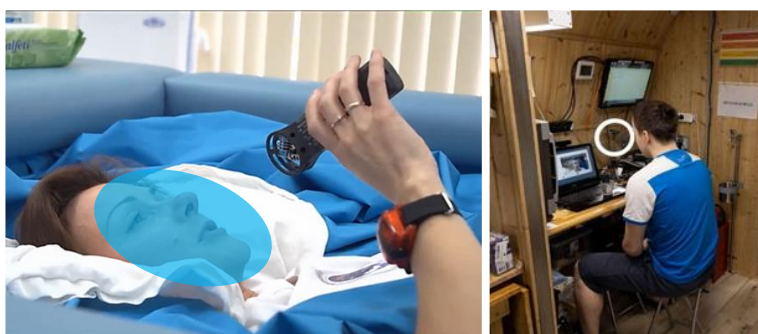


Рисунок 1. Положение обследуемых во время записи аудиофайла в условиях «сухой» иммерсии и в изоляционных экспериментах

С помощью ПО Praat в динамике исследовалась частота основного тона (ЧОТ, средняя и медианная), интенсивность (громкость) речи, количество голосовых импульсов, процент пауз в речи, длительность фраз, шиммер- и джиттер- эффекты. Акустическому анализу подвергались только унифицированные протоколом отрезки речи: начало аудио-отчёта (произнесение имени, даты и времени записи). Такой формат позволяет минимизировать варьирующийся контент высказываний и, что немаловажно, снизить возможную эмоциональную окраску последующего отчёта.

### **Психологические методы изучения функционального состояния оператора**

В исследовании использовались психологические методики, такие как опросник настроения POMS, опросник совладания со стрессом COPE, методика «Тест цветовых выборов» в модификации Л.Н. Собчик, тест Спилбергера (оценка уровня ситуативной тревожности). С помощью ПО FaceReader проводился анализ эмоциональной экспрессии в мимике по параметрам 6 базовых эмоций (счастье, удивление, печаль, гнев, страх, отвращение) полученных во время ежедневных аудио- и видео-отчётов видеозаписей, сделанных в рамках методик, входящим в научную программу экспериментов SIRIUS-19 и 3-суточная «сухая» иммерсия (шифры «Контент» и «Психофизиология»).

### **Когнитивное тестирование**

С целью изучения когнитивной работоспособности обследуемые проходили диагностику, включающую батарею когнитивных тестов космического эксперимента «Пилот-Т», содержащую тесты на зрительно-моторную реакцию (РДО Координация и РДО Экстраполяция) и тест на выполнение простых математических операций (Чёт-нечет), в котором оценивалось время принятия решения и его правильность.

### **Психофизиологические методы и физиологические показатели**

С целью оценки физиологического состояния человека нами использовались данные, полученные в ходе ежедневного медицинского контроля, проходящего в модельных экспериментах утром и вечером. В частности, для целей исследования были использованы АД, ЧСС и температура тела.

### **Статистическая обработка данных**

Полученные нами данные были проверены на нормальность распределения в соответствии с критерием Шапиро-Уилка. Надёжность-согласованность методики акустического анализа речи проверялась с помощью коэффициента альфа Кронбаха.

В соответствии с задачами исследования применявшиеся статистические методы включали в себя корреляционный анализ (коэффициент корреляции Пирсона), факторный анализ методом выделения главных компонент (метод вращения Варимакс с нормализацией Кайзера) и сравнение двух независимых выборок (коэффициент корреляции Манна-Уитни). Для определения достоверности различий применялись следующие критерии:

- для парных выборок – критерий Пирсона;
- для независимых выборок – критерий Манна-Уитни;
- непараметрический дисперсионный анализ по Фридману.

Различия считались значимыми при вероятности ошибки первого рода меньше 5% ( $p < 0,05$ ).

В соответствии с задачей поиска и определения акустических паттернов с помощью уравнения множественной регрессии была построена модель с несколькими факторами (акустическими показателями), и было определено влияние каждого из них, а также их совокупное воздействие на показатели когнитивной и сенсомоторной деятельности. Далее была проведена оценка значимости уравнений регрессии для каждой построенной модели с помощью дисперсионного анализа (критерий Фишера).

Статистический анализ выполнялся с помощью программного обеспечения MS Excel и SPSS 18.0.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **Акустический анализ речи в условиях интенсивных воздействий и помех**

Были проведены исследования в экспериментах с кратковременным интенсивным воздействием на обследуемых во время регистрации акустических показателей, а также с шумовым загрязнением акустического фона: «ЦКР-2018» и «Шум-2020».

Первоначально предложенная методика акустического анализа речи была применена в рамках эксперимента ЦКР-2018 с применением центрифуги короткого радиуса (ЦКР). Во

время вращения при различных угловых ускорениях проводилась запись разговоров между испытуемым и Центром управления. Было выявлено, что громкость голоса и длительность пауз между словами во время общения с Центром управления зависели от интенсивности нагрузки, что, предположительно, связано с процессами вработываемости, утомления и субкомпенсации. Изменения в средней и медианной частоте основного тона голоса наблюдались в начале каждого периода ускорения у 5 испытуемых, снижение – у 2 испытуемых, а у одного не было явной разницы между высокими и низкими тональностями. Показатели громкости и длительности пауз во время предварительных записей свидетельствовали о степени активации испытуемых до начала вращения, что в целом соотносится с данными проводившихся перед началом каждого вращения «Теста цветовых выборов» (8-цветовой тест Люшера) и теста ситуативной тревожности Спилбергера.

Следующее исследование возможностей акустического анализа речи проводилось в рамках эксперимента «Шум-2020» («Изучение влияния дыхания искусственными газовыми смесями и приёма бетагистина в условиях воздействия шума»). Аудиозаписи до начала и после окончания воздействия значимо отличались от записей, сделанных в условиях интенсивного шума: во время двухчасовой экспозиции отмечалось повышение громкости и значительное возрастание процента пауз ( $p < 0,05$ ), а также значительное снижение процента джиттер- и шиммер- эффекта ( $p < 0,05$ ).

### **Влияние значимых периодов адаптации к экспериментальным условиям на акустические характеристики речи. Эксперименты с воздействием моделируемой невесомости.**

#### **Эксперимент с 21-суточной «сухой» иммерсией без средств профилактики с участием мужчин**

В данном исследовании было выявлено наличие острого периода адаптации, который нашёл отражение в особенностях изменения акустических характеристик речи, результатах психологических опросников (POMS, тест ситуативной тревожности Спилбергера, «Тест цветовых выборов»), а также когнитивном тестировании.

В начале воздействия факторов «микрогравитации», на 1-2 сут, у испытуемых отмечалось пиковое повышение ЧОТ, значительно возросло количество голосовых импульсов (см. Рис.2). В это же время испытуемые в самооценочной методике POMS сообщали о значительном нарастании подавленного настроения, усталости и тревожности, в то время как их дружелюбие и активность снижались. В указанный период обследуемые сообщали о появлении болезненных симптомов и нарастании дискомфорта.

Начиная с 3-4 суток, судя по снижению ЧОТ до нормальных значений, уменьшению шиммер-эффекта и количества голосовых импульсов, выравниванию громкости и уменьшению процента пауз можно сделать вывод об адаптации испытуемых к воздействию микрогравитации и гиподинамии.

В период окончания воздействия испытуемые, в среднем, демонстрировали наименьший уровень тревожности и фрустрации за всё время эксперимента, опросник POMS показывал возросшую активность, дружелюбие и некоторую растерянность, при том, что возросшее количество голосовых импульсов и повышение ЧОТ могло говорить о фоновой усталости и напряжённости.



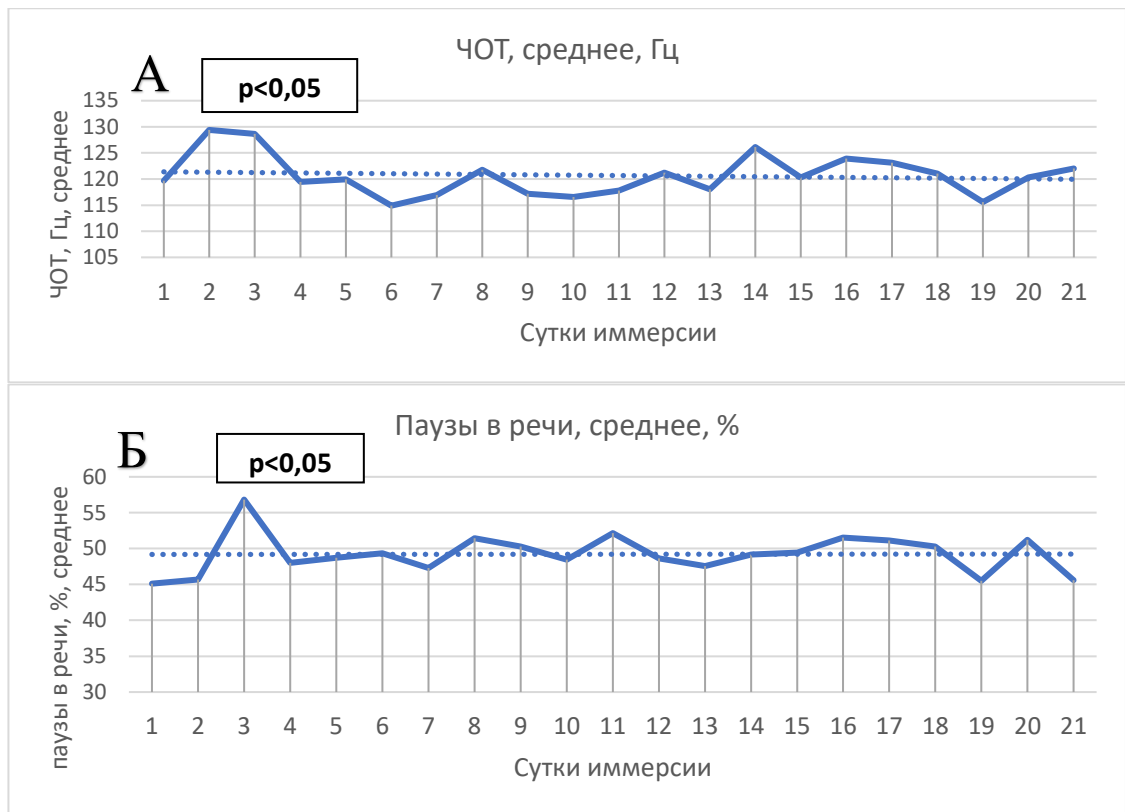


Рисунок 2 (А и Б). Динамика акустических характеристик речи испытуемых в ходе 21-суточной «сухой иммерсии»: А - частоты основного тона (ЧОТ), Б – процента пауз (значения указаны в среднем по обследуемым, n = 10)

### Эксперимент 21-суточная «сухая» иммерсия с использованием ЦКР в целях профилактики с участием мужчин

В данном эксперименте на 2-е сутки ЧОТ обследуемых снизилась ( $p=0,05$ ), в то время как в аналогичный период СИ без профилактического воздействия данный показатель повышался. Повышение процента пауз ( $p=0,04$ ) регистрировалось в вечерние часы тех суток, в которые производилось вращение на ЦКР (см. Рис.3). На протяжении 5-ти первых суток анализ акустических показателей речи обследуемых продолжал показывать эффекты адаптации к новым воздействиям. Самыми напряжёнными у всех троих обследуемых стали 7-ые сутки: отмечалось резкое повышение ЧОТ, увеличивалось количество голосовых импульсов, увеличивалась доля пауз в речи.

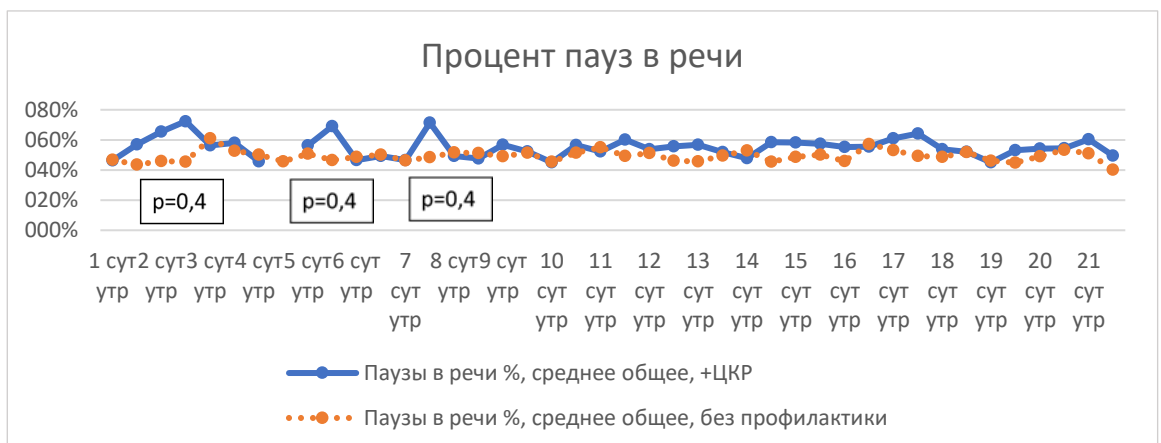


Рисунок 3. Сравнение динамики пауз в речи обследуемых в ходе 21-суточной «сухой» иммерсии с применением ЦКР и без профилактики

К концу эксперимента (18-21 сутки), несмотря на относительно нормальные уровни частоты основного тона и громкости голоса, у обследуемых наблюдалось увеличение количества голосовых импульсов и уменьшение процента пауз в речи. Это могло быть связано с предчувствием завершения экспериментального воздействия у испытуемых, и началом опережающей реадaptации.

### Эксперимент 7-суточная «сухая» иммерсия без средств профилактики с участием мужчин

Острый этап адаптации выражался у обследуемых по-разному: у группы, в которую входили «опытные» обследуемые (участвовавшие в подобных исследованиях ранее) процесс адаптации к безопорности проходил мягче и быстрее (примерно до утра 2 суток). В то же время, у «новичков» (впервые испытавших на себе эффекты «сухого» погружения) первые 3 суток были отмечены более резкими перепадами ЧОТ и процента пауз в речи. Также более значимыми с психоэмоциональной точки зрения для «новичков» оказались дни, связанные с пробой мышечной биопсии (вечер 6 суток – утро 7 суток).

Группа обследуемых, впервые принимавших участие в «сухой» иммерсии, демонстрировала значительно более низкую ЧОТ, более высокий процент джиттера в голосе, а также более ярко реагировала на знаковые «точки» 7-суточного эксперимента, чем их более опытные «коллеги» ( $p < 0,01$ ).

Динамика воспринимаемой тревожности имеет схожую динамику и разделение: «новички» меньше тревожились сразу после начала эксперимента, но затем уровень их общей тревожности был значительно выше их опытных «коллег» ( $p < 0,05$ ). Наибольший уровень тревожности у обеих групп был зафиксирован утром 2 суток.

### Эксперимент 3-суточная «сухая» иммерсия без средств профилактики с участием женщин

Острый период адаптации у женщин, в среднем, начинался (вечер 1 сут.) и завершался (утро 3 сут.) раньше, чем у мужчин – на его начало указывают понижение ЧОТ ( $p < 0,05$ ), повышение громкости ( $p < 0,05$ ) и шиммер-эффекта в речи, а также возросший уровень ситуативной тревожности ( $p < 0,05$ ). В связи со стрессом ЧОТ у женщин понижалась и далее не показывала значительных перепадов, в отличие от мужчин в аналогичных экспериментах (см. Рис.4). В то же время изменения в громкости голоса оказались практически идентичными с показателями громкости речи мужчин-испытателей в аналогичный период острой адаптации.

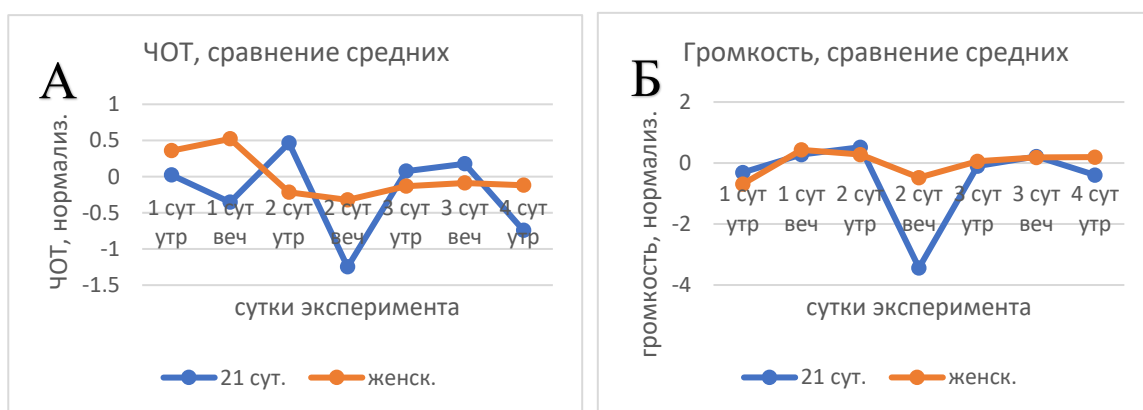


Рисунок 4. Сравнение динамики частоты основного тона речи (ЧОТ) (А) и громкости (Б) в виде нормализованных значений в 3-х суточном эксперименте с участием женщин 21-суточном эксперименте с участием мужчин

## Эксперименты с воздействием изоляции

### Эксперимент с 4-месячной гермокамерной изоляцией

Анализ изменений основных звуковых параметров речи за первый месяц эксперимента показал, что в начальные дни (1–4-е сутки) изоляции все испытуемые проявляли повышенную ЧОТ и громкость речи, что, вероятно, отражало наличие стресса в период адаптации к новым условиям жизни. Затем, на 5-е сутки, показатели голоса членов экипажа возвращались к индивидуальной норме. Следующим значимым этапом стало нарастание задержки связи с «внешним миром», 8–12-е сутки изоляции: вновь повышалась ЧОТ и громкость речи, увеличивались процент пауз и количество голосовых импульсов.

На протяжении эксперимента у обследуемых наблюдались общие тенденции: снижение ЧОТ и процента пауз в речи, увеличение процента шиммер-эффекта и количества голосовых импульсов (см. рис. 5). Помимо этого, у групп, разделённых по половому признаку, отмечались различия в динамике характеристик речевого сигнала:

- У женщин отмечалось снижение громкости речи к концу эксперимента
- У мужчин отмечалось большее, чем у женщин, снижение ЧОТ речи.
- У мужчин отмечалось большее, чем у женщин, уменьшение количества пауз в речи.

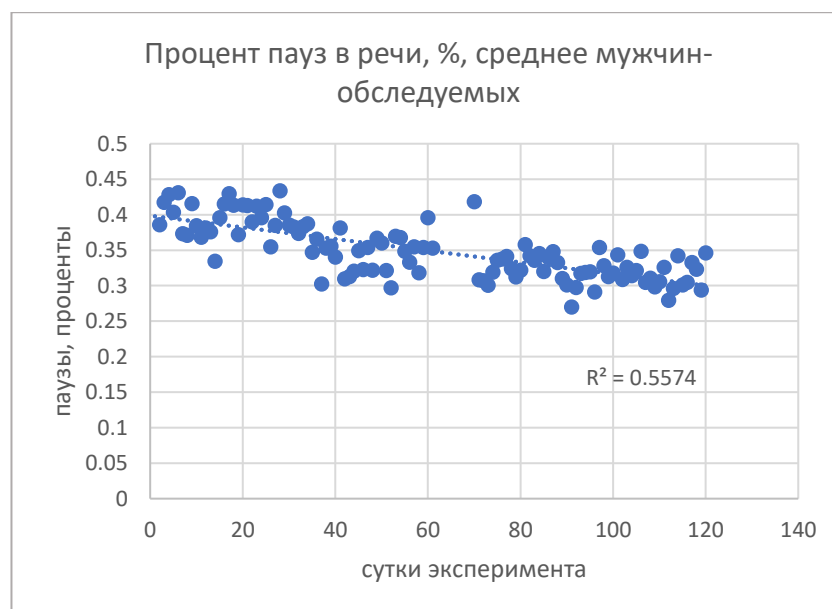


Рисунок 5. Динамика процента пауз в речи у мужчин-обследуемых в 4-х месячном изоляционном эксперименте «SIRIUS-19»

### Эксперимент с 14-суточной гермокамерной изоляцией и скученностью

В течение периода изоляции наблюдалась тенденция к уменьшению процента пауз в речи, повышение скорости решения простых математических уравнений и уменьшение количества ошибок в них. В начале изоляции наблюдался острый период адаптации, выражающийся в возрастании субъективно воспринимаемой тревожности и процента пауз в речи. Было отмечено, что участники испытывали наибольшую тревожность уже за несколько дней до начала воздействия, что было связано с ожиданием эксперимента и возросшей нагрузкой в связи со значительным количеством обследований.

### Оценка влияния индивидуальных и типологических особенностей обследуемых на адаптацию к экспериментальным воздействиям

Полученные данные личностных опросников играют важную роль в качественном описании психологических черт обследуемых, а также их динамики по завершении

экспериментального воздействия. Тем не менее, не было установлено статистически достоверных связей, удовлетворительных для дальнейшей интерпретации, включая типологическую группировку обследуемых и установление взаимосвязей между индивидуальными особенностями и динамикой функционального состояния (изменения акустики речи и когнитивной работоспособности) в ходе адаптации. Предположительная причина этого – недостаточный объём выборок по числу обследуемых и наличие выраженных индивидуальных различий, как и существенных различий в экспериментальных условиях.

### **Взаимосвязь акустических характеристик речи и показателей эмоциональной экспрессии в мимике**

В двух экспериментах (3-суточной «сухой» иммерсии с участием женщин и в изоляционном эксперименте с 4-месячной изоляцией) в рамках утренних и вечерних отчётов параллельно с аудиозаписью проводилась видеосъёмка обследуемых. Это позволило провести количественный анализ мимики человека для определения его эмоционального состояния с использованием валидизированной методики (ПО FaceReader).

Результаты корреляционного анализа (коэффициент корреляции Пирсона) в рамках эксперимента с 3-суточной «сухой» иммерсией с участием женщин показал наличие взаимосвязей только с одним показателем мимического выражения – нейтральной эмоцией – и акустическими характеристиками речи, такими как процент пауз в речи ( $p < 0,01$ ) и количество голосовых импульсов ( $p < 0,02$ ).

В рамках 4-месячного изоляционного эксперимента удалось установить значимые корреляции: у мужчин-обследуемых по значениям «Грусти» и «Страха» были найдены идентичные закономерности: прямая корреляционная связь с громкостью ( $p < 0,001$ ) и обратные связи – с ЧОТ ( $p < 0,001$ ), голосовыми импульсами ( $p < 0,001$ ), процентом пауз ( $p < 0,001$ ), джиттера ( $p < 0,05$ ) и шиммера ( $p < 0,001$ ). У женщин-обследуемых похожие корреляции обнаружились между акустическими параметрами и такими эмоциями как злость, страх и отвращение: положительные корреляции с громкостью ( $p < 0,001$ ), ЧОТ ( $p < 0,001$ ), процентом пауз ( $p < 0,001$ ) и джиттера ( $p < 0,001$ ) в речи, и отрицательные – с количеством голосовых импульсов ( $p < 0,001$ ).

### **Взаимосвязь акустических характеристик речи и физиологических показателей**

Было проведено сопоставление данных акустического анализа и данных медицинского контроля (ЧСС, АД, температура тела) в экспериментах: 21-суточной «сухой иммерсии, 3-суточной «сухой» иммерсии с участием женщин, 14-суточном и 4-месячном изоляционном эксперименте.

Наиболее информативным во взаимосвязи с ЧСС оказались такие акустические параметры, как ЧОТ и число голосовых импульсов. В трёх экспериментах ЧОТ у мужчин отрицательно коррелировала с ЧСС ( $p < 0,001$ ). Отдельно стоит рассмотреть измерения физиологических параметров в изоляциях: в 4-месячном эксперименте было показано, что у обследуемых-мужчин с ЧСС обратно коррелировали ЧОТ, голосовые импульсы ( $p < 0,001$ ) и громкость ( $p < 0,001$ ), в то время как процент шиммера ( $p < 0,01$ ) коррелировал положительно. В этом же эксперименте у женщин наблюдались противоположные тенденции: с ЧСС положительно коррелировали ЧОТ ( $p < 0,001$ ) и голосовые импульсы ( $p < 0,001$ ), и отрицательно – процент пауз в речи ( $p < 0,001$ ) и джиттера ( $p < 0,001$ ). Но если у мужчин в 4-месячном и 14-суточном эксперименте ЧОТ была ниже в периоды, когда их ЧСС был повышен, то у женщин в понижение ЧОТ в связи с повышением ЧСС обнаруживалось только в короткой, 14-суточной изоляции (см. Таб.1).

Данные о систолическом артериальном давлении были получены в 3-суточной «сухой» иммерсии с участием женщин и в изоляционных экспериментах с участием обоих полов – 4-месячном и 14-суточном. Во всех измерениях громкость положительно коррелировала с систолическим АД ( $p < 0,01$ ), шиммер, напротив, коррелировал отрицательно ( $p < 0,01$ ).

Аналогичные результаты были получены по диастолическому артериальному давлению (см. Табл.2).

Таблица 1. Корреляция акустических параметров и частоты сердечных сокращений (ЧСС)

Корреляции		ЧОТ среднее	ЧОТ медиан	Громкость	Голосовые Импульсы	Паузы	Джиттер	Шиммер
21-сут «сухая» иммерсия с участием обследуемых-мужчин								
ЧСС	Корреляция	-,1**	-,2**		-,18**		,15**	,12*
	Пирсона							
	Знч.(2-сторон)	0,005	0,0003		0,001		0,006	0,02
	N	313	313		313		313	313
4-мес изоляционный эксперимент с участием обследуемых-женщин								
ЧСС	Корреляция	,1**	,12**		,15**	-,13**	-,1**	
	Пирсона							
	Знч.(2-сторон)	0,005	0,001		0,0001	0,0002	0,007	
	N	702	700		702	702	702	
4-мес изоляционный эксперимент с участием обследуемых-мужчин								
ЧСС	Корреляция	-,3**	-,48**	-,32**	-,39**			,28**
	Пирсона							
	Знч.(2-сторон)	0,0001	0,00	0,00	0,00			0,00
	N	671	671	671	671			671
** . Корреляция значима на уровне 0.01 (2-сторон.).								
* . Корреляция значима на уровне 0.05 (2-сторон.).								

Таблица 2. Корреляция акустических параметров и систолического артериального давления (сАД)

Корреляции		ЧОТ среднее	ЧОТ медиан	Громкость	Голосовые Импульсы	Паузы	Джиттер	Шиммер
3-сут «сухая» иммерсия с участием обследуемых-женщин								
сАД	Корреляция			,480**	,318*			-,512**
	Пирсона							
	Знч.(2-сторон)			,001	,040			,001
	N			42	42			42
4-мес изоляционный эксперимент с участием обследуемых-женщин								
сАД	Корреляция			,084*				-,090*
	Пирсона							
	Знч.(2-сторон)			0,02				0,01
	N			702				702
4-мес изоляционный эксперимент с участием обследуемых-мужчин								
сАД	Корреляция			,278**	,332**			-,234**
	Пирсона	,405**	,502**					
	Знч.(2-сторон)	,0	,0	,0	,0			,0
	N	671	671	671	671			671
** . Корреляция значима на уровне 0.01 (2-сторон.).								
* . Корреляция значима на уровне 0.05 (2-сторон.).								

### Выявление устойчивых паттернов акустических и когнитивных параметров с целью прогнозирования когнитивной работоспособности в различных условиях

Для того, чтобы выяснить, возможно ли с помощью параметров акустических характеристик речи спрогнозировать эффективность когнитивной деятельности, была

применена модель множественной регрессии и проведён дисперсионный анализ полученных уравнений.

Для этого полученные данные акустического анализа и результатов когнитивных тестов были сгруппированы с учётом типа экспериментального воздействия и половой принадлежности обследуемых. Таким образом получилось четыре прогностические модели:

1. для мужчин в условиях «сухой» иммерсии (по результатам 3 экспериментов, 23 человека,  $n=678$ ),

2. для женщин в условиях «сухой» иммерсии (результаты одного 3-суточного эксперимента, 6 человек,  $n=42$ ),

3. для мужчин в условиях изоляционного эксперимента (4-месячный и 14-суточный эксперименты, 7 человек,  $n=832$ ),

4. для женщин в условиях изоляционного эксперимента (4-месячный и 14-суточный эксперименты, 5 человек,  $n=776$ ).

Были получены 4 паттерна акустических характеристик речи, связанных с эффективностью выполнения когнитивного тестирования:

1. В экспериментах с «сухой» иммерсией у обследуемых-мужчин предикторами менее точных ответов в сенсомоторных тестах был голос с повышенным процентом джиттера и сниженным процентом шиммера, а также низким ЧОТ. На меньшую точность ответов при выполнении простых математических операций указывали сниженные ЧОТ и громкость, и повышенное количество голосовых импульсов. Низкие показатели процента пауз и количества голосовых импульсов были предикторами более долгого выполнения простых математических операций. Пониженная громкость речи и повышенная медианная ЧОТ были также предикторами повышенной тревожности.

2. В эксперименте с 3-суточной «сухой» иммерсией у обследуемых-женщин предикторами менее точных ответов в сенсомоторных тестах был голос со сниженным процентом шиммера, пониженной громкостью и количеством голосовых импульсов в речи. На меньшую точность ответов при выполнении простых математических операций указывал пониженный джиттер. Предикторами более долгого решения простых математических операций были повышение процента пауз и «выравненная» ЧОТ (средняя ЧОТ показывала отрицательную связь паттерна с параметром, а медианная ЧОТ – положительную, что можно интерпретировать как увеличение медианы при уменьшении средних значений тонов, и, как следствие, более однородный частотный «ландшафт»). Повышенная медианная и пониженная средняя ЧОТ также являлись предикторами повышенной тревожности в данном эксперименте.

3. В изоляционных экспериментах у обследуемых-мужчин предикторами большего времени принятия решений, а также большего количества сенсомоторных и когнитивных ошибок, был сниженный процент шиммера и количества голосовых импульсов, повышенная громкость и процент пауз, «скачкообразное» изменение ЧОТ (средняя ЧОТ показывала положительную связь паттерна с параметром, а медианная ЧОТ – отрицательную, что можно интерпретировать как увеличение средних при уменьшении медианных значений тонов, и, как следствие, более разнообразный и менее однородный частотный «ландшафт»). Предиктором большего количества ошибок при выполнении простых математических операций была повышенная средняя ЧОТ. Повышенный процент шиммера в речи и повышение медианной ЧОТ были предикторами повышенной тревожности.

4. У обследуемых-женщин в аналогичных условиях предикторами худшей когнитивной работоспособности были снижение шиммера, повышение медианной ЧОТ и влияние циркадных ритмов (повышение количества сенсомоторных ошибок и времени выполнения математических операций наблюдалось преимущественно в утренние часы). Предикторами более долгого выполнения простых математических операций были сниженный процент шиммера, утренние часы выполнения методики, а также повышенная медианная ЧОТ. Повышенный процент пауз в речи был предиктором повышенной тревожности.

Дисперсионная модель показала, что уравнения множественной регрессии позволяют делать достоверный прогноз во всех случаях применения: нормированная по Стьюденту сигма

регрессии для разных обследуемых в разных экспериментах не превышала стандартного отклонения 1,5. В дополнение к этому, были выявлены индивидуальные паттерны распределения показателей относительно математического ожидания, характерные для части обследуемых обоого пола и позволяющие уточнить прогностическую модель для каждого индивидуального случая. К примеру, у обследуемого 1 в эксперименте с 4-месячной изоляцией разброс среднеквадратического отклонения параметров выполнения заданий, связанных со скоростью реакции («Время решения простых математических операций (Чёт-нечет Время)») по своей величине отчётливо выделялся в сравнении с показателями других членов группы (см. Рис.6).

В большинстве проведённых исследований наибольшим прогностическим значением в группе акустических параметров обладали процент шиммер-эффекта и процент пауз в речи. Во всех экспериментах наблюдалась обратная связь величины шиммер-эффекта и параметров когнитивной работоспособности: снижение шиммера соответствовало повышению числа ошибок в сенсомоторных тестах и времени на выполнение математических операций.

Уточнить описание психофизиологического состояния, проявляющегося через характеристики когнитивной работоспособности обследуемых, позволяют прочие акустические характеристики речи: средняя и медианная ЧОТ, количество голосовых импульсов, а также циркадная вариабельность акустических характеристик (утро-вечер).

В то же время, не удалось установить универсальных акустических паттернов (т.е. групп акустических характеристик, влияющих на когнитивную работоспособность), действующих одинаково в различных экспериментальных условиях. Прогностическая значимость акустических паттернов возможна только в контексте нелинейной внутренней связи между показателями акустики речи в представленных экспериментах. Для прогнозирования когнитивной работоспособности оператора вне зависимости от условий деятельности и других переменных необходимо создание более совершенных нелинейных математических моделей, которые помогут выявить повторяющиеся закономерности в контуре «голос – работоспособность».

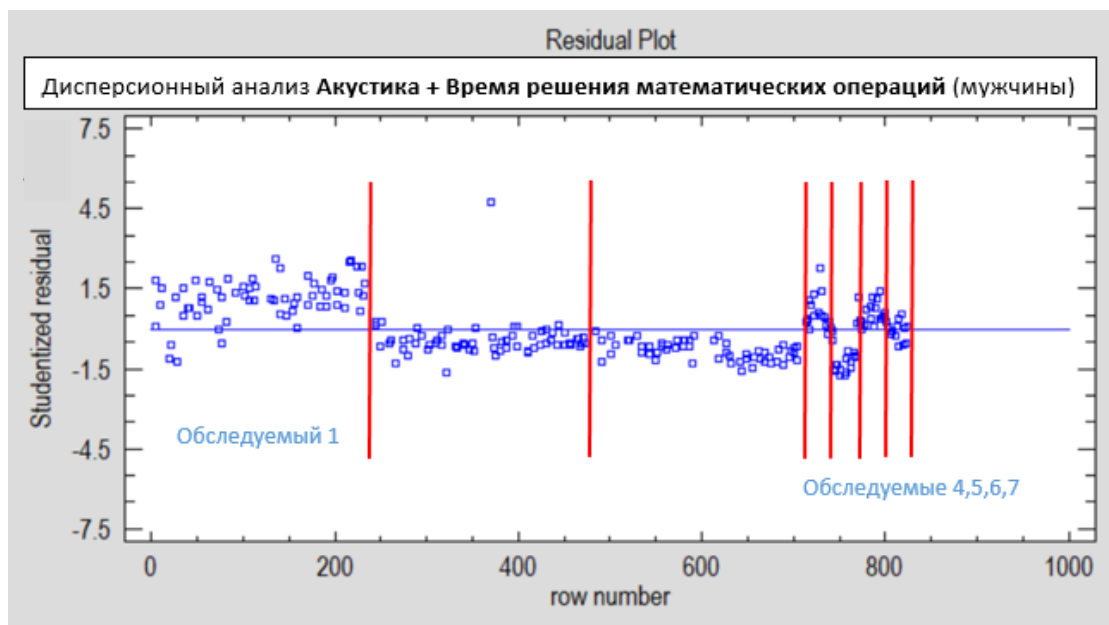


Рисунок 6. Индивидуальные паттерны показателей математического ожидания в дисперсионной модели «Акустические паттерны и время решения простых математических операций (Чёт-нечет)» для обследуемых в изоляционных экспериментах (4-месячный эксперимент «SIRIUS-19» и 14-суточный эксперимент «ЭСКИЗ»)

## ОБСУЖДЕНИЕ

Большая часть противоречий, с которыми сталкиваются исследователи акустических

характеристик речи, может быть объяснена механизмами баланса системы активации человека, лежащими в основе высшей нервной деятельности. В зависимости от типов нагрузки и готовности к ней человека, его голос (как и работоспособность) будет различаться. Исследователи под руководством Van Puyvelde (2018) в своём мета-обзоре убедительно показали изменчивость ЧОТ (и её диапазона) и джиттера в зависимости от условий и состояний, в которых человек находился в момент записи. Повышение ЧОТ и её диапазона соотносилось авторами со снижением нисходящей регуляции (снижением влияния префронтальной коры), достигающем повышенной тревожности и потери самоконтроля в опасных для жизни ситуациях (авиакатастрофа и др.). Понижение ЧОТ, напротив, регистрировалось в ситуациях высокой когнитивной нагрузки и повышенного самоконтроля. Однако значительное понижение ЧОТ также могло указывать на истощение ресурсов и ситуацию, близкую к критической (такие результаты, например, были получены в экспериментах с гипоксией, депривацией сна и интоксикацией). Таким образом, значительное повышение или понижение ЧОТ, а также обратная динамика его вариабельности, джиттер-эффекта, указывают на состояние сильной тревоги в опасных для человека чрезвычайных ситуациях, и на недостаток существующих когнитивных ресурсов (см. Рис. 7).

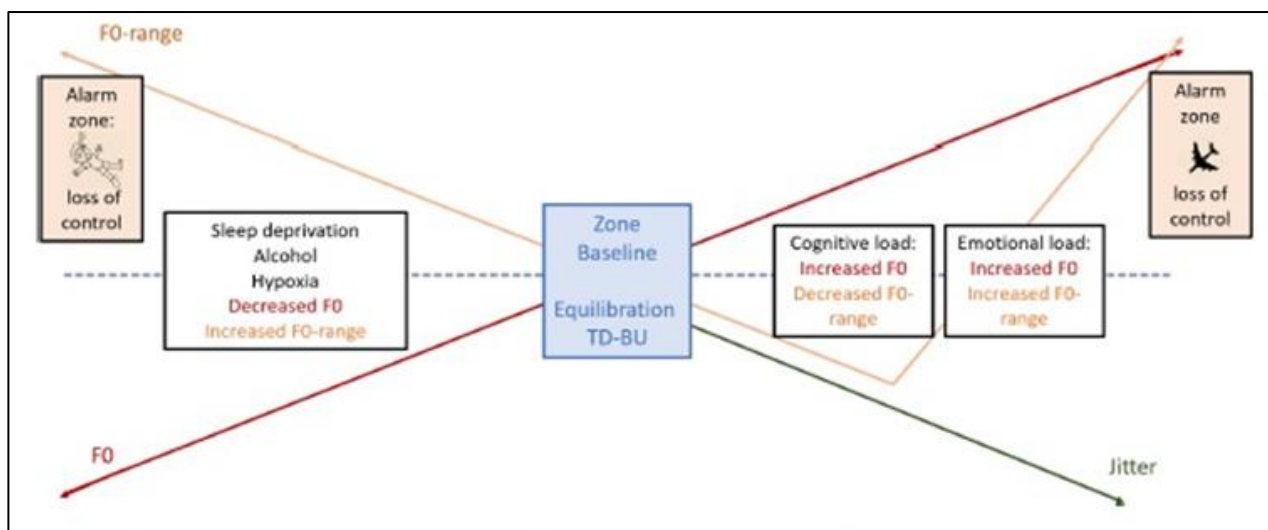


Рисунок 7. Изменение ЧОТ (F0), диапазона ЧОТ (F0-range) и джиттера (Jitter) в различных экстремальных условиях жизнедеятельности человека (Van Puyvelde et al., 2018)

Данные 6 экспериментов с одинаковым дизайном исследования (длительное воздействие моделируемых факторов КП, утренние и вечерние аудиозаписи, утренние и вечерние сеансы когнитивных тестов и опросника STAI) были проанализированы с целью выявления общих акустических паттернов, которые могли бы служить целям прогнозирования когнитивной работоспособности и ситуативной тревожности обследуемых под воздействием различных факторов КП. Полученные результаты акустического анализа и когнитивных тестов были сгруппированы с учётом типа экспериментального воздействия (исследования в «сухой» иммерсии и в изоляционных экспериментах) и половой принадлежности обследуемых. Были описаны картины «возбуждённого» и «астенического» состояний, которые отражались как в физиологических данных медицинского контроля (ЧСС, АД), так и в показателях акустики речи и когнитивной работоспособности.

Анализ данных акустики речи и медицинского контроля в проведённых экспериментах позволил установить значимые корреляции между рядом акустических и физиологических показателей. В частности, с АД положительно коррелировала громкость речи, и отрицательно – процент шиммера (вариабельность акустического сигнала по амплитуде). Похожие закономерности подчёркивает в своём мета-обзоре Giddens с соавторами (2013).



Сниженный от индивидуальной нормы процент шиммер-эффекта у обследуемых был сопряжён с большим числом сенсомоторных и когнитивных ошибок вне зависимости от типа экспериментального воздействия. Однако прочие сопутствующие акустические характеристики в экспериментах с изоляцией и с «сухой» иммерсией имели различную динамику, ввиду чего затруднительно сделать однозначный вывод о влиянии тех или иных функциональных состояний на операторскую работоспособность. Выяснилось, что в различных условиях жизнедеятельности функциональные состояния «возбуждения» и «астении» играют разные роли.

В условиях иммерсионных экспериментов состояние человека, при котором в голосе регистрировался больший процент джиттера, а ЧОТ, громкость, число пауз и количество голосовых импульсов были снижены, указывало на утомление и неспособность в полной мере выполнять операторские задачи. В изоляционных экспериментах, напротив, излишняя активация (повышение громкости и ЧОТ, снижении шиммера) на фоне астенизации (проявлявшаяся в повышении джиттера) снижала эффективность выполнения когнитивных и сенсомоторных задач.

В долгосрочных изоляционных экспериментах ведущими факторами, влияющими на психофизиологическое состояние человека-оператора, являются автономность, монотония, социальная и сенсорная депривация. Можно предположить, что состояние «астенизации», свойственное обследуемым в таких условиях, снижает порог эмоционального реагирования, делая реакцию на необычные эмоциональные переживания более острой (Мясников и др., 2002).

Условия «сухой» иммерсии отличаются от изоляционных: присутствующая монотония связана с двигательной и сенсорной депривацией, значительно сниженной бытовой и рабочей активностью. В ситуации монотонии «сухой» иммерсии «бодрый» голос (более высокая громкость, ЧОТ, большее количество голосовых импульсов) без дополнительного джиттера мог указывать на состояние оптимальной активации нервной системы человека, при которой он был готов выполнить операторские задачи с наибольшей эффективностью. В изоляционных экспериментах, напротив, излишняя активация (повышенная ЧОТ и громкость) на фоне астенизации (проявлявшаяся в повышении джиттера), скорее, снижала эффективность выполнения когнитивных и сенсомоторных задач.

Это предположение подтверждает такая акустическая характеристика, как громкость, позволяющая определить степень активации нервной системы человека (Asutay and Västfjäll, 2012; Quinto et al., 2013; Huang et al., 2021). В изоляционных экспериментах повышенная громкость речи в совокупности с другими акустическими характеристиками была предиктором большего времени принятия решений при выполнении простых математических операций у обследуемых-мужчин. В «сухих» иммерсиях с участием представителей обоих полов сниженная громкость указывала на вероятность большего количества ошибок при математическом счёте и большей степени ситуативной тревожности (мужчины), либо большего количества ошибок в сенсомоторных тестах (женщины). Значительно повышенная или пониженная громкость в данном случае сопоставима с аналогичной изменчивостью ЧОТ и джиттер-эффекта, описанной в работе Van Puyvelde et al. (2018) – она указывает на нахождение ЦНС обследуемого на различных концах спектра активации, каждый из которых в определённых условиях может приводить к критическим ошибкам в когнитивных операциях.

Совокупности физических характеристик голоса почти всегда были взаимосвязаны с ситуативной тревожностью, измеренной с помощью автоматизированного опросника STAI. Как правило, в полученных акустических паттернах с повышенной тревожностью прямо была связана ЧОТ. В отдельных случаях её дополняли возрастающий процент пауз в речи, снижение громкости и повышение процента шиммера. Данные закономерности ранее обнаруживались в работах Mendoza et al. (1998) и Park et al. (2011): исследовательскими коллективами были обнаружены прямые корреляции ситуативной тревожности (и «высокого уровня напряжения» по POMS) и ЧОТ, а также обратные корреляции с джиттер- и шиммер- эффектом. Повышение

ЧОТ в ответ на высокую ситуативную тревожность, отмеченную самими обследуемыми, фиксировали в своих исследованиях также Tolkmitt et al. (1986) и Brenner et al. (1994). Стоит отметить, что именно ЧОТ в представленных работах была центральным показателем тревожности, остальные же акустические характеристики (джиттер, шиммер, расширенный диапазон ЧОТ) служили исследователям для дифференциации реакций участников эксперимента по вовлечённости и личностным и половым особенностям.

Статистический анализ эмоциональной экспрессии в мимике с показателями акустики речи обнаружил сходства в выражении эмоций грусти и страха у мужчин (повышенная громкость и пониженные ЧОТ, количество голосовых импульсов, процент пауз, джиттера и шиммера) и злости, страха и отвращения у женщин (повышенная громкость, ЧОТ, процент пауз и джиттера и сниженное количество голосовых импульсов). Полученные результаты соответствуют представлениям об акустическом «портрете» данных эмоциональных состояний (Juslin, Laukka, 2003; Potapova et al., 2014; Buchanan et al., 2014; Huang et al., 2021), а более надёжная связь акустических характеристик речи и негативных эмоций в мимике была ранее показана при исследовании в клинических условиях коллективом, также работавшим с ПО Praat и FaceReader (Villanueva-Valle et al., 2021).

В проведённых экспериментах ни один из параметров голоса по отдельности не ведёт себя линейно по отношению к показателям когнитивных функций, что объясняет противоречивые данные, полученные в других исследованиях, посвящённых теме анализа акустических характеристик речи в целях оценки функционального состояния человека (Van Ruyvelde et al., 2018; Karpen et al., 2022). Наибольшую прогностическую значимость при акустическом анализе получают паттерны, совмещающие в себе несколько количественных показателей, часто противоположных по динамике изменений (Giddens et al., 2013; Van Ruyvelde et al., 2018; Karpen et al., 2022). Благодаря нелинейной внутренней связи между ними, обнаруженные в данной работе акустические паттерны являются эффективным инструментом анализа психофизиологического состояния человека.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для точной диагностики функционального статуса человека-оператора необходимо использовать комплексную систему анализа множества параметров психофизиологического состояния организма, среди которых важную роль играет речевое поведение. Изучение акустических характеристик речи доказало свою перспективность как объективный метод клинической оценки поведения и самочувствия людей, работающих удалённо, в экстремальных условиях жизнедеятельности.

В представленной работе был проведён анализ отечественной и зарубежной литературы, посвящённой исследованию функционального состояния операторов. Описаны факторы, влияющие на характеристики речевого сигнала и методы их технического анализа и интерпретации.

Была разработана и апробирована методика оценки психофизиологического состояния человека-оператора с помощью анализа акустических характеристик речи. Наиболее информативными и надёжными оказались такие количественные параметры речевого сигнала как частота основного тона (средняя и медианная ЧОТ), громкость речи, количество голосовых импульсов, процент пауз в речи, длительность фраз, шиммер- и джиттер- эффекты.

Во всех 8 проведённых экспериментах используемый метод акустического анализа речи позволил установить связь динамики акустических показателей речи обследуемых с интенсивностью и длительностью воздействия. Так, в кратковременных, но интенсивных по воздействию экспериментах (ЦКР-18 и Шум-2020) была показана динамика громкости, шиммера и джиттера, а также ЧОТ в ответ на меняющийся уровень нагрузки (возрастающие перегрузки на ЦКР) и длительность нахождения в неблагоприятных шумовых условиях (Шум-2020). Для продолжительных, но менее интенсивных с точки зрения физиологической напряжённости экспериментальных условий (воздействие моделируемой микрогравитации в рамках «сухой» иммерсии) характерен острый период адаптации длительностью до 3-4 дней:

за это время ЧОТ и громкость у обследуемых-мужчин вначале резко повышаются (1-2 сутки), а затем приходит к значениям нормы (3-4 сутки). У обследуемых-женщин ЧОТ повышается незначительно (вечер 1-х суток), но затем значительно понижается (вечер 2-х суток), в то время как остальные показатели остаются практически неизменными. Для длительных экспериментов без выраженного воздействия на физиологию человека (изоляционные эксперименты) острый период адаптации по данным динамики акустических показателей составляет 2-4 дней и выражается в последовательном плавном снижении изначально незначительно повышенных ЧОТ, громкости и процента пауз к средним значениям как у мужчин, так и у женщин. В длительных экспериментах наблюдаются различные тенденции к изменению акустических характеристик речи: у мужчин на протяжении 4-х месячного эксперимента слегка повышалась громкость голоса, снижался процент пауз в речи и увеличивалось количество голосовых импульсов. У женщин снижалась громкость голоса и понижалась ЧОТ. Также у всех испытуемых было отмечено повышение значений шиммера в голосе к концу эксперимента.

В экспериментах, в которых параллельно с записью аудио-сообщений проводилась видеозапись для анализа эмоциональной экспрессии по мимике были обнаружены значимые корреляции между акустическими характеристиками речи и выражением базовых эмоций. Полученные результаты указывают на возможность описания эмоций в том числе и через количественные показатели акустики речи, особенно, если оценивать отрицательные эмоции, такие как злость, страх, грусть.

Было проведено сопоставление данных акустического анализа и данных медицинского контроля (ЧСС, АД, температура тела) в экспериментах: 21-суточной «сухой иммерсии, 3-суточной «сухой» иммерсии с участием женщин, 14-суточном и 4-месячном изоляционном эксперименте. Наиболее информативным во взаимосвязи с ЧСС оказались такие акустические параметры, как ЧОТ и число голосовых импульсов. В трёх экспериментах ЧОТ у мужчин отрицательно коррелировала с ЧСС. В трёх экспериментах как у женщин, так и у мужчин громкость голоса положительно коррелировала с систолическим и диастолическим АД. Достоверность показанных взаимосвязей указывает на сопоставимость результатов акустического анализа речи с измерением физиологических показателей организма человека.

Чтобы определить возможность прогнозирования когнитивной работоспособности посредством анализа акустических характеристик речи в данной работе была использована модель множественной регрессии и проведён дисперсионный анализ полученных уравнений. Были получены 4 паттерна акустических характеристик речи, связанных с эффективностью выполнения когнитивного тестирования. В большинстве проведённых исследований наибольшим прогностическим значением в группе акустических параметров обладали процент шиммер-эффекта и процент пауз в речи. Во всех экспериментах наблюдалась обратная связь величины шиммер-эффекта и параметров когнитивной работоспособности: снижение шиммера соответствовало повышению числа ошибок в сенсомоторных тестах и времени на выполнение математических операций. Уточнить описание психофизиологического состояния, проявляющегося через характеристики когнитивной работоспособности обследуемых, позволяют прочие акустические характеристики речи: средняя и медианная ЧОТ, количество голосовых импульсов, а также циркадная вариабельность акустических характеристик (утро-вечер).

Характер показателей, получаемых с помощью разработанной и апробированной в рамках данной работы методики, позволяет создать на её основе автоматизированную систему дистанционного мониторинга функционального состояния человека-оператора, находящегося и работающего в экстремальных условиях жизнедеятельности.

## ВЫВОДЫ

1. На основании проведённых экспериментальных исследований с участием 51 обследуемого определены релевантные задачам исследования характеристики акустического сигнала произвольной речи: частота основного тона (ЧОТ, средняя и медианная), громкость, количество голосовых импульсов, процент пауз в речи, длительность фраз, процент шиммер- и джиттер- эффекта.
2. Разработана и успешно апробирована (24 человека,  $n=72$ ) методика оценки психофизиологического состояния человека-оператора на основе анализа акустических характеристик произвольной речи.
3. Комплексный анализ акустических характеристик речи, когнитивной работоспособности и ситуативной тревожности человека-оператора позволяет уточнить динамику развития острого периода адаптации к моделируемым факторам космического полёта. Показано, что наиболее значимую роль в определении начала и окончания острого периода адаптации играют ЧОТ ( $p<0,05$ ), процент пауз ( $p<0,05$ ) и количество голосовых импульсов ( $p<0,05$ ) в речи обследуемых.
4. Для моделей «сухой» иммерсии и длительной изоляции с учётом полового фактора выделены 4 паттерна акустических показателей, значимые для оценки когнитивной работоспособности. Дисперсионный анализ подтвердил высокую прогностическую значимость данных моделей ( $p<0,001$ ) для прогнозирования показателей когнитивной работоспособности и ситуативной тревожности человека-оператора в представленных экспериментах.
5. В составе акустических паттернов наиболее информативными для прогнозирования когнитивной и сенсомоторной работоспособности показателями является ЧОТ (средняя и медианная), а также шиммер (вариабельность акустического сигнала по амплитуде), джиттер (вариабельность акустического сигнала по частоте) и процент пауз в речи.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК России

1. **Лебедева С.А.**, Швед Д.М., Гушин В.И. Предварительные результаты изучения функционального состояния человека-оператора методом анализа акустических характеристик речи в условиях моделируемых факторов космического полета // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2019. Т. 53. № 2. С. 50–56.
2. **Лебедева С.А.**, Швед Д.М., Федяй С.О. Изучение психофизиологического состояния человека в условиях воздействия моделируемой микрогравитации методом анализа акустических характеристик речи // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2020. Т. 54. № 2. С. 45–51.
3. Федяй С.О., Томиловская Е.С., Гушин В.И., Рукавишников И.В., **Лебедева С.А.** Динамика двигательной активности испытуемых в условиях 21-суточной «сухой» иммерсии как отражение особенностей адаптации к экспериментальным условиям. // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2020. Т. 54. № 4. С. 28-32.
4. **Лебедева С.А.**, Швед Д.М., Гушин В.И. Возможности компьютерного анализа акустических характеристик речи человека-оператора в условиях космического полёта // *Пилотируемые полёты в космос*, 2020. Т.36. №3.
5. Гушин В.И., Швед Д.М., Юсупова А.К., Суполкина Н.С., Чекалина А.И., Савинкина А.О., **Лебедева С.А.** Влияние моделируемых факторов межпланетного полета на автономизацию коммуникации изолированного международного гетерогендерного экипажа. // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2020. Т. 54. № 3. С. 28-35.
6. **Лебедева С.А.**, Швед Д.М. Сравнение психофизиологического состояния человека в условиях воздействия моделируемой микрогравитации без средств профилактики и при вращении на центрифуге короткого радиуса // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2021. Т. 55. № 2. С. 98-101.
7. Supolkina N., Yusupova A., Shved D., Gushin V., Savinkina A., **Lebedeva S.A.**, Chekalina A., Kuznetsova P. External Communication of Autonomous Crews Under Simulation of Interplanetary Missions // *Frontiers in Physiology*. 2021, 12:751170. doi: 10.3389/fphys.2021.751170
8. **Лебедева С.А.**, Швед Д.М. Изучение когнитивной работоспособности и психофизиологического состояния человека-оператора в условиях изоляции // *Медицина труда и промышленная экология* — 2022; 62(4). С. 225-231
9. **Lebedeva S.A.**, Shved D., Savinkina A. Assessment of the Psychophysiological State of Female Operators Under Simulated Microgravity // *Frontiers in Physiology*. 2022, 12:751016. doi: 10.3389/fphys.2021.751016
10. Shved D., Kuznetsova P., Rozanov I.A., **Lebedeva S.A.**, Vinokhodova A., Savinkina A., Shishenina K., Rey N.D., Gushin V. Effects of isolation, crowding, and different psychological countermeasures on crew behavior and performance // *Frontiers in Physiology*. 2022, 13:963301. doi: 10.3389/fphys.2022.963301

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АД – артериальное давление

ГНЦ РФ ИМБП РАН (ИМБП РАН) – Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем Российской академии наук

ДАД – диастолическое артериальное давление

КП – космический полёт

МКС – международная космическая станция

РДО – реакция на движущийся объект

САД – систолическое артериальное давление

ЦКР – центрифуга короткого радиуса

ЦНС – центральная нервная система

ЦУП – центр управления полётами

ЧОТ – частота основного тона речи

ЧСС – частота сердечных сокращений

POMS – Profile of Mood States, профиль состояний настроения

STAI – State-Trait Anxiety Inventory, тест оценки ситуативной тревожности