

Счастливецва Дарья Владимировна

**ИНДИВИДУАЛЬНО-ТИПОЛОГИЧЕСКИЕ ЭЭГ-ПАТТЕРНЫ  
В ДИНАМИКЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БИОПОТЕНЦИАЛОВ ГОЛОВНОГО МОЗГА  
ЧЕЛОВЕКА ПРИ ДЕЙСТВИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ**

3.3.7 – Авиационная, космическая и морская медицина

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата биологических 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).

**Научные руководители:**

**Котровская Татьяна Ивановна**, кандидат биологических наук, доцент

**Официальные оппоненты:**

**Джебраилова Тамара Джебраиловна**, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры нормальной физиологии Института клинической медицины им. Н.В.Склифосовского Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет)»

**Каримова Екатерина Дмитриевна**, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией прикладной физиологии высшей нервной деятельности человека Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Российской академии наук

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил» Министерства обороны Российской Федерации (ФГБУ «ЦНИИ ВВС» Минобороны России)

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.1.023.01, на базе 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/Schastlivtseva2024/Schastlivtseva.html>

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

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат биологических наук

С.В. Поддубко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Профессиональная деятельность специалистов космического, авиационного и морского профиля имеет определенное сходство по характеру и условиям труда [Столбов А., Порунов Н., 2009; Маркова Т.Л., Новиков В.С., Сороко С.И., 2017]. Для деятельности этих специалистов характерен высокий темп, совмещение различных задач, переработка больших объемов информации в условиях дефицита времени, высокая ответственность и большая «цена» ошибки [Власов П.Н., Харламов М.М., Курицын А.А. и др., 2018; 2018; Савельев А.И., 2019; Хуе Н., Haugseggen O., et al., 2024]. Условия профессиональной деятельности специалистов, отличаются от обычных практически постоянным действием негативных факторов среды: перегрузок, невесомости, вибрации, шума, сенсорной депривации, оторванности от привычной среды и социальных контактов и т.п. [Пономаренко В.А. 2014; Новиков В.С., Сороко С.И., 2017; Орлов О.И., Колотева М.И., 2017; Степанова С.И., Королёва М.В., Нестеров В.Ф. и др., 2019]. В этих условиях качество профессиональной деятельности существенно зависит от моральных, волевых и других личностных качеств специалистов, а также от свойств их нервной системы [Душков Б.А., Королев А.В., Смирнов Б.А., 2005; Одинцова М.А., Самаль Е.В., 2017].

Исследование влияния неблагоприятных факторов среды на организм специалиста проводится как непосредственно при осуществлении профессиональной деятельности, так и в экспериментах, моделирующих действие реальных производственных факторов. Искусственные условия позволяют достаточно быстро и эффективно установить причину и механизмы наблюдаемых явлений, проанализировать воздействие отдельных факторов и спрогнозировать последствия их влияния на организм [Зароченцев К.Д., Худяков А.И., 2005; Гудвин Д., 2004], однако у такого рода исследований имеется существенный недостаток – комплекс всех факторов космического, надводного и подводного пространства, а также пилотажных нагрузок невозможно воспроизвести в искусственных условиях.

Интенсивное или длительное воздействие негативных факторов, как в реальных, так и в моделируемых экспериментах приводит к развитию функциональных состояний (ФС) организма, требующих максимальной централизации функций управления, которую обеспечивает центральная нервная система (ЦНС), при этом успешность профессиональной деятельности определяется эффективной работой головного мозга - главного органа ЦНС человека [Гора Е.П., 2007]. Самым доступным способом оценки работы мозга специалистов во время профессиональной деятельности является метод электроэнцефалографии (ЭЭГ) [Leroy A., De Saedeleer C., Bengoetxea A. et al., 2007; Petit G., Cebolla A.M., Fattinger S. et al., 2019; Dinatolo, M.F., Cohen, L.Y 2022; Pusil S., Zegarra-Valdivia J., et al., 2023].

ФС мозга и индивидуальные нейрофизиологические особенности человека определяются ЭЭГ паттерном, т.е. закономерным распределением различных компонентов ЭЭГ по всей конвексальной поверхности коры головного мозга [Поворинский А.Г., Заболотных В.А., 1987]. ЭЭГ-паттерн, преимущественно содержащий регулярный по частоте, четко модулированный в веретена, с хорошо выраженными зональными различиями и средней амплитудой альфа-ритм, указывает на оптимальные корково-подкорковые взаимоотношения и свойственен лицам со значительной резистентностью к экстремальным воздействиям [Сороко С.И., Бекшаев С.С., Сидоров Ю.А., 1990; Джунусова Г.С., Сатаева Н.У., Садыкова Г.С., 2018; Горнов С. В., 2020]. Формирование таких ЭЭГ-паттернов зависит от регуляторных процессов, обеспечивающих баланс активности коры и подкорковых структур головного мозга [Куряев И.А., 2012]. ЭЭГ-паттерн с высоким индексом регулярных альфа-колебаний, с низкочастотной бета- или тета-активностью без зональных различий отражает ослабление активирующих влияний на кору со стороны ретикулярной формации ствола мозга и усиление дезактивирующих влияний других отделов лимбико-ретикулярного комплекса. Десинхронная («плоская» ЭЭГ), характеризующаяся отсутствием или резким снижением альфа-активности, увеличением количества бета- и тета-колебаний невысокой, низкой или очень низкой амплитуды, не имеющих зональных различий, свидетельствует об усилении активирующих влияний со стороны ретикулярной формации ствола мозга. При ЭЭГ-паттерне с дезорганизованной (нерегулярной по частоте и амплитуде) альфа-активностью, преобладающей практически во всех областях мозга, можно говорить о

неустойчивом взаимодействии корковых и модулирующих систем мозга. Адаптация к негативным условиям среды у лиц с гиперсинхронной, десинхронной и деорганизованной ЭЭГ требует большего напряжения со стороны регуляторных систем ЦНС [Жирмунская Е.А., 1996; Жирмунская Е.А., Лосев В.С., 1984; Неробкова Л.Н., Авакян Г.Г., Воронина Т.А., Авакян Г.Н., 2018; Дик О.Е., Ноздрачев А.Д., 2019].

Общими для специалистов факторами, приводящими к значительному напряжению ЦНС и регуляторных систем организма, являются: 1) десинхроноз, развивающийся в результате бимодального циркадианного ритма, который характеризуется «разорванным» графиком сон-бодрствование с наличием более одного периода сна [Костенко Е.В., Маневич Т.М., Разумов Н.А., 2013]; 2) изменение силы тяжести: от микрогравитации до перегрузок [Дворников М.В., 2006; Орлов О.И., Колотева М.И., 2017; Виль-Вильямс И.Ф., Котовская А.Р., 2003]; 3) применяемые в герметически замкнутых объектах искусственные газовые среды, которые обеспечивают пожаробезопасность при условии поддержания высокой работоспособности специалистов [Павлов Н.Б. 2006; Солдатов П.Э. 2006; Иванов А.О., Петров В.А., Безкишкий Э.Н. и др., 2018]. Воздействие этих факторов на биоэлектрическую активность головного мозга специалистов авиационного, космического и морского профиля практически не изучено.

Таким образом, исследование биоэлектрических показателей работы мозга с учетом индивидуально-типологических нейрофизиологических особенностей человека при действии на него десинхроноза, возрастающих перегрузок на центрифуге короткого радиуса, искусственных газовых сред в гермообъекте является актуальным для оценки влияния экстремальных профессиональных факторов на функциональное состояние организма специалистов авиационно-космического и морского профиля.

**Цель работы:** установить степень влияния индивидуально-типологических ЭЭГ-паттернов на динамику показателей биопотенциалов головного мозга человека при моделировании действия экстремальных факторов.

**Задачи:**

1) выявить зависимость динамики ЭЭГ-показателей от индивидуально-типологических свойств ЭЭГ-паттерна специалистов при нарушении распорядка режима труда и отдыха во время краткосрочной изоляции в гермообъекте;

2) определить степень действия возрастающих перегрузок центрифуги короткого радиуса в направлении «голова-таз» (+Gz) на параметры биопотенциалов головного мозга добровольцев со сходными индивидуально-типологическими ЭЭГ-паттернами;

3) оценить действие комплекса факторов (искусственных дыхательных газовых сред и уровня атмосферного давления) на динамику биопотенциалов головного мозга добровольцев с различными индивидуально-типологическими ЭЭГ-паттернами во время краткосрочной изоляции в гермообъекте.

**Научная новизна**

Впервые установлена степень влияния индивидуально-типологических ЭЭГ-паттернов на динамику относительного значения мощности частотных диапазонов ЭЭГ у добровольцев малых выборок при действии экстремальных факторов различной природы.

В краткосрочной изоляции в гермообъекте при нарушения режима труда и отдыха в группе добровольцев с регулярным по частоте, зонированным по амплитуде и модулированным в веретена альфа-ритмом (организованный во времени и пространстве ЭЭГ-паттерн) и лиц с резким уменьшением количества альфа-волн и отсутствием зональных различий (десинхронный ЭЭГ-паттерн) основной вклад в динамику относительного значения мощности частотных диапазонов ЭЭГ вносили показатели добровольцев организованного во времени и пространстве ЭЭГ-паттерна.

В группе добровольцев с организованным во времени и пространстве ЭЭГ-паттерном сравнительный анализ позволил установить период церебрального ответа на действие возрастающего по силе фактора (перегрузки на ЦКР в направлении «голова-таз» (+Gz)) по значениям относительного показателя динамики, позволившего нивелировать различия начального функционального состояния головного мозга, относительного значения мощности частотных диапазонов ЭЭГ.

В группе добровольцев с различными индивидуально-типологическими особенностями ЭЭГ-паттерна (с организованным во времени и пространстве, с десинхронным и с дезорганизованным ЭЭГ-паттернами) однонаправленные реакции мозга на действия факторов гипоксических газовых сред и уровня искусственной гипербарии в условиях краткосрочной изоляции в гермообъекте выявлялось при увеличении силы фактора гипербарии по параметрам относительного показателя динамики относительного значения мощности частотных диапазонов ЭЭГ

Обнаруженные закономерности влияния индивидуально-типологических ЭЭГ-паттернов на динамику показателей биопотенциалов головного мозга человека при моделировании действия экстремальных факторов профессиональной среды позволили представить схему формирования функциональной системы церебрального ответа.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

В данной работе с позиций теории функциональных систем П.К. Анохина в развитии К.В. Судакова сформировано представление об организации целостного церебрального ответа (зарегистрированного методом электроэнцефалографии) на действие экстремальных факторов профессиональной среды. В модельных экспериментах факторами пусковой афферентации являлись нарушение режима труда и отдыха, искусственная гравитация, измененная гипербарическая гипоксическая газовая среда. Обстановочная афферентация обуславливалась как изоляцией в Глубоководном комплексе и Научно-исследовательском стенде и вращением на центрифуге короткого радиуса, так и обстановочной монотонией, гиподинамией, оторванностью от привычной среды и социальных контактов и др. Реакция на экстремальные факторы профессиональной среды иерархически объединенных структур головного мозга, определяющих принятие решения, программу действия и акцептор результата действия, зависит от подкорковых образований (таламуса, гипоталамуса, ретикулярной формации ствола), которые при действии на кору головного мозга формируют ЭЭГ-паттерн здорового человека.

Практическая значимость работы заключается в определении индивидуально-типологических различий ЭЭГ-паттернов для адекватного обнаружения тех свойств воздействующего фактора и/или комплекса факторов на работу головного мозга, которые оценивались с помощью количественных параметров ЭЭГ. Было выявлено, что добровольцы с организованным во времени и пространстве ЭЭГ-паттерном с хорошо выраженным альфа-ритмом, с одной стороны, демонстрировали высокую адаптивную способность и оптимальную реактивность при действии экстремальных факторов, с другой - параметры их ЭЭГ позволили определить временной период, силу и направленность действия фактора. Это может иметь широкое практическое применение в области диагностики функциональных состояний, а также в разработке научного подхода для подготовки специалистов, работающих в экстремальных условиях – космонавтов, летчиков, моряков и др. Полученные в данном исследовании результаты позволят проводить отбор участников малых экспериментальных групп, поскольку для понимания эффектов и механизмов действия факторов различной природы, интенсивности и продолжительности, наиболее предпочтительной является выборка добровольцев с организованным во времени и пространстве ЭЭГ-паттерном с хорошо выраженным альфа-ритмом. На основании литературных и собственных данных по исследованию роли индивидуально-типологических ЭЭГ-паттернов в динамике показателей биопотенциалов головного мозга человека при действии экстремальных факторов предложен алгоритм оценки перехода из оптимального функционального состояния, как в сторону активации и гиперактивации коры головного мозга с гипермобилизацией и постепенным расходом функциональных резервов, так и в сторону торможения со снижением уровня функциональных резервов специалистов, с учетом типа их ЭЭГ-паттерна. Данный алгоритм применялся в экспериментальных исследованиях в реальных и моделируемых условиях.

**Личный вклад автора** заключается в планировании и проведении исследований, интерпретации и анализе полученных результатов, написании статей и подготовки докладов. При выполнении диссертационной работы автор самостоятельно зарегистрировал, обработал и проанализировал 237 записей ЭЭГ общей длительностью 1 557 минут у 56 добровольцев; обобщил полученные результаты, на основании чего сделал адекватные выводы.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Динамика ЭЭГ показателей добровольцев, находившихся в гермообъекте в течение 21-суток с нарушенным распорядком режима труда и отдыха, зависела от индивидуально-типологических свойств ЭЭГ-паттернов, при этом наибольший вклад в динамику относительного значения мощности ЭЭГ-спектра вносят количественные параметры ЭЭГ специалистов с организованным во времени и пространстве ЭЭГ-паттерном с хорошо выраженным альфа-ритмом, в отличие от добровольцев с десинхронным ЭЭГ-паттерном.

2. Сопоставление динамики относительных значений мощности ЭЭГ-спектра у добровольцев с организованным во времени и пространстве ЭЭГ-паттерном с хорошо выраженным альфа-ритмом при действии возрастающего по силе фактора (перегрузки на ЦКР в направлении «голова-таз» (+Gz) – 2,1 G, 2,41 G и 2,92 G) позволила выявить стадию максимального влияния действующего фактора.

3. В группе испытуемых с разнородной структурой индивидуально-типологических ЭЭГ-паттернов однонаправленные значимые изменения количественных показателей ЭЭГ-спектра выявляются при сочетании действий факторов гипоксических газовых сред и уровня искусственной гипербарии в условиях краткосрочной изоляции в гермообъекте.

### **Степень достоверности результатов и апробация проведённых исследований**

Диссертационная работа основана на статистически значимых результатах, полученных при использовании адекватных методов оценки функционального состояния ЦНС при моделировании реальных условий профессиональной деятельности специалистов авиационно-космического и морского профиля. Статистическая значимость результатов экспериментов обусловлена достаточным количеством наблюдений и использованием современных аналитических методов исследования.

Основные результаты и положения диссертации были представлены и обсуждены на научных мероприятиях: XIII Конференция молодых ученых, специалистов и студентов, посвященная 50-летию полета первого в мире врача-космонавта Б.Б.Егорова (Россия, Москва, 23 апреля 2014 года), 40 Научная Ассамблея COSPAR (Россия, Москва, 2-10 августа 2014 года), XIV Конференция молодых ученых, специалистов и студентов, посвященная 65-летию со дня рождения врача-космонавта Б.В.Морукова (Россия, Москва, 14 апреля 2015 года), XVI Конференция по космической биологии и авиакосмической медицине с международным участием (Россия, Москва, 5-8 декабря 2016 года), XLI Академические чтения по космонавтике. Королевские чтения (Россия, Москва, 24-27 января 2017 года), XXIII Съезд физиологического общества им. И.П. Павлова (Россия, Воронеж, 18-22 сентября 2017 года), XVI Конференция молодых учёных, специалистов и студентов, посвящённая 60-летию со дня запуска первого искусственного спутника Земли, (Россия, Москва, 10 октября 2017), XVII Конференция молодых ученых, специалистов и студентов, посвященная 100-летию со дня рождения академика О.Г.Газенко (Россия, Москва, 17 апреля 2018 года), XLII Академические чтения по космонавтике. Королевские чтения, (Россия, Москва, 23-26 января 2018 года), 39-я Ежегодный международный симпозиум по гравитационной физиологии (Нидерланды, Нордвейк, 18-22 июня 2018 года), XLIII Академические чтения по космонавтике. Королевские чтения, (Россия, Москва, с 29 января по 1 февраля 2019 года), XLIV Академические чтения по космонавтике. Королевские чтения, (Россия, Москва, 28-31 января 2020 года), XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти С.П. Королева («Королевские чтения»), (Россия, Москва, 30 марта- 2 апреля 2021 года), XLVII Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти С.П. Королева («Королевские чтения»), (Россия, Москва, 24-27 января 2023 года), 11-th International IEEE EMBS Conference on neural Engineering (США, Балтимор, 25-27 апреля 2023 года), XXIV съезд физиологического общества им. И.П. Павлова, (Россия, Санкт-Петербург, 11-15 сентября 2023 год).

Апробация диссертации проведена на заседании секции «Экстремальная физиология и медицина» Ученого совета ГНЦ РФ–ИМПБ РАН (протокол № 1 от 06 февраля 2024 года).

### **Публикации по теме диссертации**

По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ, в том числе 6 статей в журналах из перечня ВАК РФ и баз данных Scopus/Web of Science и 14 тезисов докладов.

## Связь работы с научными программами

Работа выполнена в рамках Программы Фундаментальных научных исследований РАН FMFR-2024-0034 (ранее 63.2).

## Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 138 страницах и состоит из введения, 4 основных глав, заключения, выводов, списка сокращений и условных обозначений, словаря терминов и списка литературы. Работа иллюстрирована 50 рисунками и 12 таблицами. Список цитируемой литературы включает 230 источника, из них 160 на русском и 70 на иностранном языке.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И УСЛОВИЯ ПОСТАНОВКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В исследовании принимали участие 56 добровольцев-мужчин, которые подписали информированное согласие согласно международным требованиям, принятым Хельсинской декларацией Всемирной медицинской ассоциации (1964 г. в редакции пересмотра 2013 г.). Исследования, проведенные на базе ГНЦ РФ – ИМБП РАН, были одобрены Комиссией по биомедицинской этике, а исследования, проведенные в ФГУП НИИ ПММ - Комитетом по вопросам этики. Общий дизайн исследования представлен в таблице 1.

Таблица 1- Общий дизайн исследований

Факторы профессиональной среды	Кол-во добров	Возраст	Длит. эксп. серии	Кол-во ЭЭГ записей/чел.	Суммарная длит. ЭЭГ записей/чел.	Место проведения
<b>I блок экспериментальных исследований</b>						
Нарушения циркадианных ритмов труда и отдыха в изоляции	15	от 24 до 51 года (36,4±2)	21 сутки	3	6 мин	НИС (ФГУП НИИ ПММ)
	15	от 27 до 45 лет (34,4±1,5)	21 сутки	6	6 мин	НИС (ФГУП НИИ ПММ)
<b>II блок экспериментальных исследований</b>						
Искусственная гравитация	9	от 21 до 34 лет (27,75±3,35)	44-59 мин (+6 мин фон)	4	36 мин	ГНЦ РФ-ИМБП РАН
<b>III блок экспериментальных исследований</b>						
Изоляция с измененной гипербарической гипоксической газовой средой обитания	6	от 24 до 42 лет (31,8±2,3)	10 суток	4	6 мин	ГВК-250 (ГНЦРФ-ИМБПРАН)
	6	от 24 до 42 лет (31,8±2,3)	7 суток	3	6 мин	ГВК-250 (ГНЦРФ-ИМБПРАН)
	6	от 24 до 42 лет (31,8±2,3)	10 суток	4	6 мин	ГВК-250 (ГНЦРФ-ИМБПРАН)
ВСЕГО	56	-	-	237	1 557 мин (25 час 57 мин)	-

Примечания – возраст от min до max лет (M±m), где M – среднее, m - ошибка среднего, НИС – научно-исследовательском стенд; ГВК-250 – глубоководный водолазный комплекс, позволяющий проводить эксперименты до глубины 250 метров водяного столба

## Методика регистрации и анализа данных

### Регистрация и анализ электроэнцефалограммы

В работе использовался компьютеризированный комплекс для полиграфических исследований – электроэнцефалограф-анализатор «ЭНЦЕФАЛАН-ЭЭГА-19/26» (МТД, Медиком, Таганрог), позволявший проводить запись ЭЭГ в частотном диапазоне от 0,5 до 70 Гц, с разрядностью квантования 16 бит и частотой дискретизации 1000 выборок в секунду на канал, с полосой пропускания 0,003-80 Гц. Значение подэлектродных сопротивлений и напряжений

поддерживалось ниже 20 кОм. ЭЭГ регистрировали от 19 стандартных отведений по международной системе 10-20% [Jasper Н.Н., 1958] от фронтальных (F), центральных (C), темпоральных (T), париетальных (P) и окципитальных (O) областей обеих гемисфер неокортекса относительно ушных референтных электродов, а также ЭОГ, ЭКГ, ЭМГ. Тип ЭЭГ-паттерна определялся в состоянии покоя, глаза закрыты в фоне с помощью ПО Энцефалан согласно классификации Жирмунской [Жирмунская Е.А., Лосев В.С., 1984]. На рисунке 1 представлены примеры типов ЭЭГ-паттерна здорового человека по данным собственных исследований.

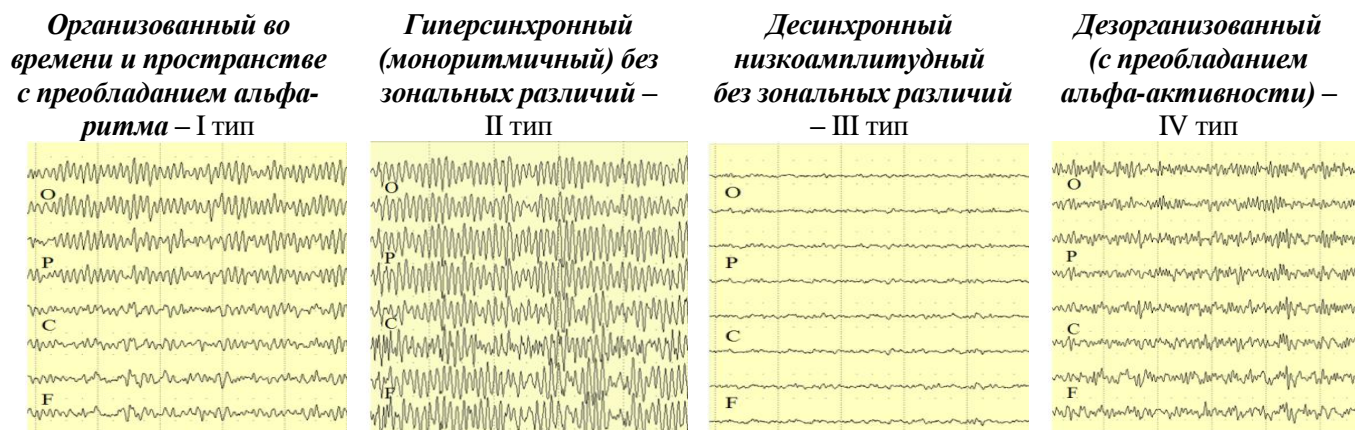


Рисунок 1 – Примеры типов ЭЭГ-паттерна здорового добровольца в состоянии покоя, глаза закрыты согласно классификации Жирмунской

Количественная обработка ЭЭГ осуществлялась ПО Энцефалан методом спектрально-корреляционного анализа (на основе быстрого преобразования Фурье). Для расчетов использовали показатель относительного значения мощности (ОЗМ), [%] – процентное отношение спектральной мощности отдельного частотного диапазона к площади всего спектра, принятой за 100%. Этот показатель позволяет минимизировать большой разброс индивидуальных различий амплитудных характеристик ЭЭГ. ОЗМ рассчитывали для в дельта-2- (2-4 Гц), тета- (4-8 Гц), альфа- (8-13 Гц) и бета- (13-24 Гц) диапазонах ЭЭГ суммарно для всех отведений.

### **Организация исследования специалистов подводных систем при нарушении циркадианных ритмов труда и отдыха в изоляции**

Экспериментальное исследование по моделированию профессиональной деятельности вахтовым методом в гермообъекте состояло из двух частей, длительностью 21 сутки каждая при нормальных условиях среды обитания человека, с соблюдением и поддержанием постоянного газового состава, температуры и влажности. Работа проводилась на базе ФГУП НИИ ПММ в специализированном научно-исследовательском стенд (НИС «ДО-11») [Научно-исследовательском стенд НИС «ДО-11», 2018]. В эксперименте принимали участие специалисты подводных систем глубоководного погружения, которых отбирали случайным образом. Вахтовый режим труда и отдыха был организован следующим образом: 4 часа – рабочая деятельность, 4 часа – бодрствование, 4 часа – сон (циклично на протяжении всего времени изоляции).

Во всех сериях добровольцы в течение 4 часовой рабочей фазы цикла выполняли профессиональную деятельность, которая по характеру являлась сложной, когнитивной, операторской и эмоциональной и пр. [Кальманов А.С., Булавин В.В., Ханкевич Ю.Р. и др., 2016]. Регистрация ЭЭГ производилась до- (фон), во время- (после выполнения специалистами их профессиональной деятельности (на 3, 11 и 20 сутки)) и сразу после эксперимента.

Программа и методика эксперимента была утверждена на заседании Комитета по вопросам этики ФГУП НИИ ПММ (протокол № 1 от 14.10.2014 г.).

### **Организация эксперимента при вращении на центрифуге короткого радиуса**

С использованием ЦКР на базе ГНЦ РФ-ИМБП РАН исследовалось влияние искусственной гравитации на организм человека. Действующим фактором являлись перегрузки



в направлении «голова-таз» (+Gz). В эксперименте принимали участие 9 добровольцев – мужчин в возрасте от 21 до 34 лет ( $27,75 \pm 3,35$ ). Для каждого обследуемого использовалось 3 режима вращения с возрастанием максимума разгона ЦКР, каждый из которых проводили в течение одного рабочего дня. Перерыв между первым и вторым режимами вращения составлял 2 дня, между вторым и третьем – 3 дня для всех добровольцев.

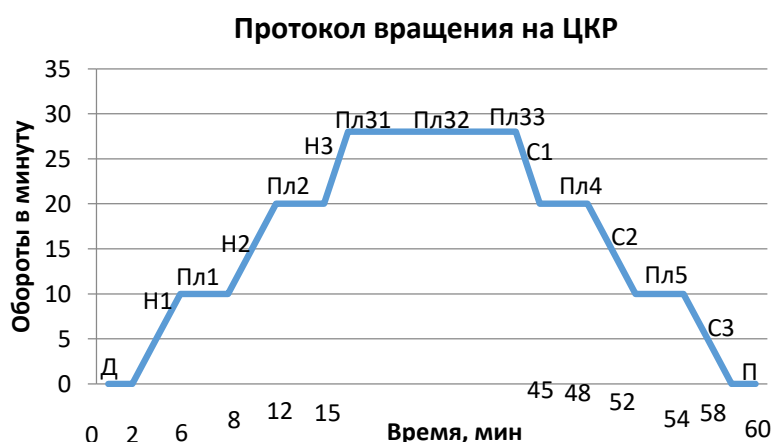


Рисунок 2 – Алгоритм протокола регистрации ЭЭГ во время режимов вращения на центрифуге короткого радиуса

Гравитационный градиент ( $\Delta G \%$ ) = 85 % (голова испытуемого находится на расстоянии ~60 см от оси вращения).

Максимальная перегрузка в направлении «голова-таз» на ЦКР в первом вращении составляла 2,1 ед., во втором вращении – 2,41 ед., в третьем вращении – 2,92 ед. Общее время 1-го и 2-го вращений составляло 59 минут, а третьего – 44 минуты, так как пребывание на максимальной перегрузке ЦКР 3 режима вращения могло оказаться крайне неблагоприятным, для непрофессионалов в этой области. Алгоритм протокола регистрации ЭЭГ во время режимов вращения на ЦКР приведен на рисунке 2, а сокращение обозначений в таблице 2.

Таблица 2 – Расшифровка сокращений обозначения в алгоритме протокола регистрации ЭЭГ во время режимов вращения на центрифуге короткого радиуса

Обозначение	Расшифровка	Время, мин
Д	Фон за 3 минуты непосредственно до запуска ЦКР	3
Н1	Разгон центрифуги короткого радиуса до перегрузки 0,263 ед	1
Пл1	Равномерное вращение («площадка») на перегрузке 0,263 ед	2
Н2	Разгон ЦКР до перегрузки 1,05 ед	1
Пл2	Равномерное вращение («площадка») на перегрузке 1,05 ед	2
Н3	Разгон ЦКР до перегрузки: 2,1 ед (1 вращение), 2,41 ед (2 вращение), 2,92 ед (3 вращение)	по 1,5
Пл31	Через две мин после «выхода» ЦКР на равномерное вращение («площадка») на перегрузке: 2,1 ед (1 вращение), 2,41 ед (2 вращение) 2,92 ед (3 вращение)	по 3
Пл32	Средний период пребывания на равномерном вращении («площадка») на перегрузке: 2,1 ед (1 вращение), 2,41 ед (2 вращение), 2,92 ед (3 вращение)	по 3
Пл33	Максимальное пребывание (5 мин до начала уменьшения оборотов) на равномерном вращении («площадка») на перегрузке: 2,1 ед (1 вращение), 2,41 ед (2 вращение), 2,92 ед (3 вращение)	по 3
С1	Уменьшение оборотов («спуск») ЦКР до перегрузки 1,05 ед	1,5
Пл4	Равномерное вращение («площадка») на перегрузке 1,05 ед	2
С2	Уменьшение оборотов («спуск») ЦКР до перегрузки 0,263 ед	1
Пл5	Равномерное вращение («площадка») на перегрузке 0,263 ед	2
С3	Уменьшение оборотов («спуск») ЦКР до полной остановки	1
П	Последствие (3 мин непосредственно после остановки ЦКР)	3

Программа эксперимента была утверждена на секции ученого совета и одобрена Комиссией по биомедицинской этике при ГНЦ РФ – ИМБП РАН (протокол № 477 от 03.07.2018 г.).

### Организация исследования при измененной гипербарической гипоксической газовой среде обитания

В эксперименте на базе ГНЦ РФ-ИМБП РАН в Глубоководном водолазном комплексе (ГВК-250) принимали участие 6 практически здоровых добровольцев – мужчин в возрасте от 24

до 42 лет ( $31,8 \pm 2,3$ ), трижды с перерывом в 30 суток между экспериментальными сессиями. До начала исследования все прошли отбор, медицинское освидетельствование и получили допуск Врачебно-водолазной комиссии к исследованиям с использованием глубоководного водолазного комплекса.

В первой и второй сериях добровольцы находились в течение 10 суток при давлении в 0,02 МПа. В первой серии в первые пять суток атмосфера состояла из 87,0-86,5 % N<sub>2</sub>, 13,5-13,0 % O<sub>2</sub> (парциальное давление 120,0-115,5 мм рт. ст.), а во вторые - из 88,3-87,5 % N<sub>2</sub>, 12,5-11,7 % O<sub>2</sub> (111,1-104,0 мм рт. ст.), во второй серии соответственно из 41,7-54,4 % N<sub>2</sub>, 32,8-42,8 % Ar, 12,4-13,3 % O<sub>2</sub> (110,2-118,2 мм рт. ст.) и 39,0-52,0 % N<sub>2</sub>, 35,0-45,0 % Ar, 11,7-12,4 % O<sub>2</sub> (104,0-110,2 мм рт. ст.). Длительность третьей серии составляла 7 суток: в течение первых суток проводилось ступенчатое повышение давления до 0,2 МПа (что соответствует имитационному погружению на глубину до 20 метров); далее 4 суток добровольцы находились в атмосфере 48,5-50,9 % N<sub>2</sub>, 42,8-47,0 % Ar, 4,7-5,3 % O<sub>2</sub> (104,0-117,3 мм рт. ст.); по завершении серии проводили 2 суточную декомпрессию в нормоксии (150,0-165,0 мм рт. ст.). Во всех трех сериях добровольцы в течение дня были задействованы в различных экспериментальных исследованиях психолого-медицинской направленности. Кроме того, каждые пять дней проводили 15-20-минутные велоэргометрические (велоэргометр Ergoline GmbH, Германия) тесты при субмаксимальном (75-80% от максимума) уровне нагрузки, для достижения которого, каждые 2 минуты ее увеличивали на 30 Вт. Максимальная нагрузка работы на велоэргометре подбиралась до начала эксперимента индивидуально [Тавровская Т.В., 2007].

В первой и второй серии эксперимента регистрировали ЭЭГ в фоне (фон), затем дважды в ГВК-250 (1 часть и 2 часть), а также сразу после выхода (после) из гермообъема. В третьей серии выделялось только 3 этапа регистрации ЭЭГ в связи со специфическими условиями эксперимента: фон, эксперимент (на 4 сутки пребывания в гипербарической гипоксии с аргоном непосредственно перед декомпрессией), сразу после выхода (выход) из гермообъема.

Программа эксперимента была утверждена на секции ученого совета и одобрена Комиссией по биомедицинской этике при ГНЦ РФ – ИМБП РАН (протокол № 332 от 28.08.2013 г.).

### **Статистическая обработка**

Все данные обрабатывались при помощи программы STATISTICA 10. Применяли тест Шапиро-Уилка, вследствие малой выборки данных, проверяли гипотезу  $H_0$  о нормальном распределении в соответствии с ГОСТ Р ИСО 5479-2002 [ГОСТ Р ИСО 5479-2002; Shapiro S.S., Wilk M.B., 1965; Shapiro S.S., Francia R.S., 1972]. Статистическая значимость полученных данных определялась с использованием непараметрического парного критерия Т-Вилкоксона. Для контроля над ожидаемой долей ложных отклонений при сравнении нескольких зависимых выборок (этапы регистрации ЭЭГ добровольцев в каждом экспериментальном блоке) применяли процедуру множественных сравнений по методу Бенъямини-Йекутили [Benjamini Y., Yekutieli D., 2001]. Обоснованность выбора автора по представлению полученных результатов [Унгурияну Т.Н., Грижобовский А.М., 2011]. В случае аппроксимации применяли сглаживание полиномиального типа 6 степени, так как данная степень отражает максимальную достоверность сглаживания результатов [Данилов А.М., Гарькина И.А., 2014].

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Выявленные общие и частные закономерности динамики показателей ЭЭГ добровольцев в экспериментах, моделирующих характерные для профессиональной среды специалистов авиакосмического и морского профиля экстремальные факторы, позволили решить поставленные задачи и достичь цели, заявленной в работе. Общие закономерности проявлялись в интегративных функциях головного мозга – во взаимоотношениях подкорковых структур и коры больших полушарий, что отражалось в вариантах индивидуально-типологических ЭЭГ-паттернах добровольцев при действии факторов различной природы и интенсивности. Установленная взаимосвязь согласуется с теорией функциональных систем, с позиций которой в организации психической деятельности обеспечивается объединение взаимодействующих

нейронов головного мозга в организованную констелляцию. Лимбическая система, таламус, ретикулярная формация ствола мозга, а также лобные отделы больших полушарий, активируясь восходящими путями гипоталамических ядер, обеспечивают выстраивание биологической мотивации [Судаков К.В., 2010].

Частные закономерности заключались в зависимости динамики ЭЭГ-показателей добровольцев от параметров (интенсивности и времени) действующих факторов в каждом конкретном блоке исследований.

### Исследование биопотенциалов головного мозга специалистов подводных систем при нарушении циркадианных ритмов труда и отдыха в изоляции

Результатом нарушения режима распорядка труда и отдыха в течение 21-суточной изоляции в гермообъекте явилось увеличение медленноволновой части спектра ЭЭГ при одновременном уменьшении ОЗМ Альфа-диапазона. Для групп добровольцев изменения ОЗМ Дельта-диапазона не были тождественными в последствии относительно фона: в 1 экспериментальной серии выявили увеличение этого показателя на 12,4%, а во 2 серии изменений не наблюдали; при этом в остром периоде (1 часть) 2 экспериментальной серии обнаружили возрастание этого параметра на 21,6 %. Динамика ОЗМ Тета- и ОЗМ Альфа-диапазона сразу после выхода из изоляции в 1 и 2 экспериментальной серии была сходной. ОЗМ Тета-диапазона для группы добровольцев по окончании 1 серии относительно фона возросло на 19%, а 2 серии на 24 %, причем в острый период в этой серии показатель увеличивался на 40 %. ОЗМ Альфа-диапазона снижался на 4,6% по окончании изоляции в 1 серии и на 7,4% во 2, а в острый период на 16,8 % (рисунок 3).

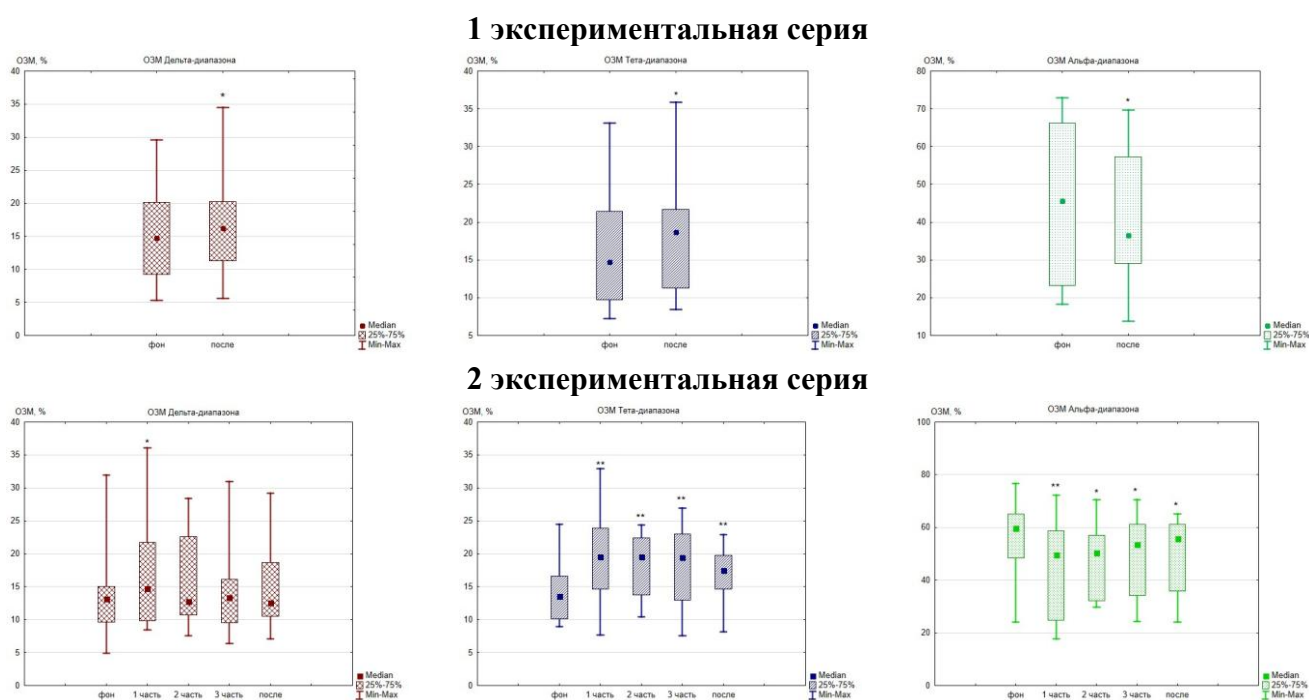


Рисунок 3 – ОЗМ Дельта-, Тета- и Альфа-диапазоновна в двух экспериментальных сериях. Результаты представлены в виде медианы, интерквартильных разбросов, минимума и максимума;

\*\* –  $p \leq 0,01$ , \* –  $p \leq 0,05$

Известно, что у здоровых лиц при закрытых глазах в состоянии дремоты усиливается лобная перемежающаяся ритмическая дельта-активность (frontal intermittent rhythmic delta activity – FIRDA), причем периодическое замедление (вспышки 1,5-2,5 Гц) может быть нормальным

физиологическим вариантом ЭЭГ. Возможно, подобная ритмическая активность, присутствовала в 1 серии у отдельных добровольцев, работавших в ночных сменах, что внесло вклад в различие динамики ОЗМ Дельта-диапазона у добровольцев в двух экспериментальных сериях, что совпадает с данными других авторов. Было показано, что недосыпание увеличивает гиперсинхронную дельта-активность [Kim K.T., Roh Y.N., Cho N.H., Jeon J.C., 2021; Accolla E.A, Kaplan P.W., Maeder-Ingvar M. et al., 2011; Yasuda Y., Iinuma Y., Nobukawa S., Nishimura H., 2022].

Поскольку в двух экспериментальных сериях принимали участие добровольцы с организованным во времени и пространстве ЭЭГ-паттерном с хорошо выраженным альфа-ритмом и лица с десинхронным типом ЭЭГ-паттерна с резким уменьшением количества альфа-ритма и с отсутствием зональных различий, было выдвинуто предположение, что вклад в динамику амплитудно-частотных характеристик биопотенциалов головного мозга добровольцев этих двух ЭЭГ-паттернов различен. Следует учесть, что методически разница в постановке эксперимента заключались в том, что во 2 серии регистрация ЭЭГ проводилась не только до и после, но и в период изоляции, а все остальные условия проведения двух серий совпадали по показателям среды обитания, режиму труда и отдыха, по уровню профессиональной деятельности и возрастному составу участников. Для проверки этого предположения всех добровольцев разделили на 2 группы по типу паттерна (рисунок 1): 19 специалистов подводных систем с организованным ЭЭГ-паттерном (1 объединенная группа) и – 11 человек с десинхронным типом ЭЭГ-паттерна (2 объединенная группа). Анализ данных ЭЭГ показал, что в 1 объединенной группе наблюдали статистически значимое увеличение ОЗМ Дельта- на 14,5 %; ОЗМ Тета-диапазона на 22,8 % и уменьшение ОЗМ Альфа-диапазона на 8,5% (рисунки 4) после изоляции относительно фона. Во 2 объединенной группе статистически значимые изменения ОЗМ основных ЭЭГ-диапазонов после выхода из изоляции относительно фона отсутствовали в связи с разнонаправленностью сдвигов показателей ЭЭГ у добровольцев этой группы.

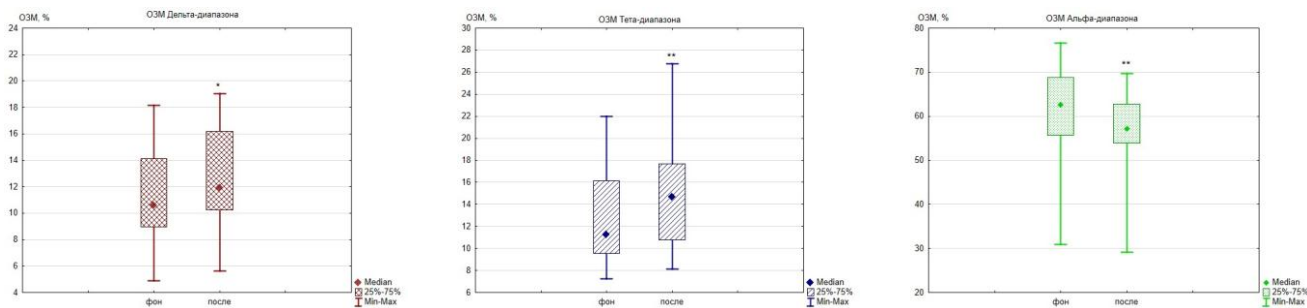


Рисунок 4 – ОЗМ Дельта-, Тета- и Альфа-диапазонов на всех срезах эксперимента 1 объединенной группы. Результаты представлены в виде медианы, интерквартильных разбросов, минимума и максимума; \*\* –  $p \leq 0,01$ , \* –  $p \leq 0,05$

Таким образом, совокупность изменений ЭЭГ-спектра добровольцев 1 объединенной группы (рисунок 4), обладающих организованным во времени и пространстве ЭЭГ-паттерном, наиболее отчетливо отражает результат воздействия среды на работу головного мозга и позволяет определить перечень факторов, приводящих к таким сдвигам. Реципроктность изменений ОЗМ (увеличение) Дельта, Тета- и (уменьшение) Альфа-диапазонов свидетельствует о тормозном влиянии ретикулярной формации ствола и таламических структур, создающих «ЭЭГ-образ формирующегося утомления» [Зенков Л.Р., 2013] у добровольцев. Однако множественность установленных поведенческих коррелятов тета-активности указывает на отличающиеся от утомления причины увеличения ОЗМ Тета-диапазона. Например, формирование различных ФС ЦНС, начиная от тормозных церебральных процессов (монотония, утомление, сон) и заканчивая процессами значительного возбуждения

(аффективные эмоции) [Ekstrom A.D., Caplan J.B., Ho E. et al., 2005; Xu S., Akioma M., Yuan Z., 2021; Rizzuto D.S., Madsen J.R., Bromfield E.B. et al., 2006; Vertes R.P., Hoover W.B., Di Prisco G.V., 2004]. Поскольку добровольцы были заняты в течение 3 недель профессиональным операторским трудом в условиях изоляции в гермообъекте; то изменения ОЗМ Тета-диапазона, с одной стороны, связаны со сложной когнитивной и эмоциональной нагрузкой, направленным вниманием и пр.; с другой стороны, с состоянием сонливости, вызванным вахтовым режимом деятельности (циклично на протяжении всего времени изоляции). Наименьшее изменение (уменьшение) ОЗМ Альфа-диапазона у добровольцев 1 объединенной группы с организованным ЭЭГ-паттерном (рисунок 4) объясняется тем, что специалисты с таким типом паттерна обладают значительной устойчивостью к экстремальным воздействиям [Сороко С.И., Бекшаев С.С., Сидоров Ю.А., 1990; Сороко С.И., 1984; Сороко С.И., Сидоренко Г.В., 1993; Джунусова Г.С., Сатаева Н.У., Садыкова Г.С., 2018; Hirschfeld R.M., 1996; Бойко И.М., Мосягин И.Г., 2012; Горнов С.В., 2020] и большим запасом регуляторной стабильности при функциональных нагрузках [Куряев И.А., 2012], что в этом случае соответствует устойчивости волновых компонентов альфа-активности [Святогор И.А., Моховикова И.А., 2010; Неробкова Л.Н., Авакян Г.Г., Воронина Т.А., Авакян Г.Н., 2018; Джунусова Г.С., Сатаева Н.У., Садыкова Г.С., 2018].

Обобщение полученных сдвигов ЭЭГ активности при нарушении распорядка труда и отдыха в изоляции, показало, что основные изменения у большинства добровольцев наблюдались для тета-активности, что свидетельствовало о зависимости изменений этого показателя от операторской нагрузки и утомления, формировавшегося в результате постоянного недосыпания при нарушении условий сна-бодрствования. Минимальные изменения альфа-активности являлись следствием устойчивости этого ЭЭГ компонента, которая обеспечивалась подкорковыми структурами, находившимися в индифферентном (спокойном) состоянии. Фактором, усиливающим устойчивость добровольцев к изменению чередования труда и отдыха в эксперименте, было следование ими подобному распорядку на протяжении 10–25 лет во время осуществления профессиональной деятельности. Можно утверждать, что у них формировалась, так называемая, долговременная адаптация (ДА). В процессе формирования ДА происходит систематическая мобилизация функциональных ресурсов организма на основе длительного, постоянного или многократно повторяющегося действия на организм факторов среды; формируется новый уровень функционирования системы при тесной взаимосвязи регуляторных и исполнительных механизмов с возникновением новых связей между церебральными структурами [Панкова Н.Б., 2020; Карпов А.А., 2021; Джунусова Г.С., Сатаева Н.У., Садыкова Г.С., 2018].

Однако все это не объясняет, почему наблюдались статистически значимые изменения всех изучаемых показателей ЭЭГ в 1-ой объединенной группе, тогда как во 2-ой эти изменения полностью отсутствовали. Вопрос заключается в том, почему у людей с высокой устойчивостью к экстремальным факторам проявились реакции на эти воздействия. Объяснение этого обосновывается реактивностью, т.е. свойством организма давать тонкий дифференцированный ответ на действие раздражителей, который определяет количественные и качественные особенности ответной реакции. Реактивность может проявляться на уровне отдельных систем организма, в том числе и нервной системы, в: нормальной; повышенной с преобладанием процессов возбуждения; пониженной с преобладанием процессов торможения и извращенной форме [под ред. В.В. Новицкого, Е.Д. Гольдберга, О.И. Уразовой, 2013]. В ЭЭГ соотношение процессов возбуждения и торможения определяется термином «реактивность» [Поворинский А.Г., Заболотных В.А., 1987; Галимова П.М., Рабаданова А.И., Гасанова Х.Н., 2016], при этом типы ЭЭГ-паттерна соотносятся с формами реактивности. Для нормальной формы реактивности нервной системы свойственно оптимальное соотношение процессов торможения и возбуждения,

что характерно для организованного во времени и пространстве ЭЭГ-паттерна. Таким образом, ЭЭГ-реакции добровольцев, обладающих таким ЭЭГ паттерном, можно считать адекватными и наиболее отчетливо отражающими результат воздействий различных факторов на ЦНС.

### **Исследование влияния перегрузок при вращении центрифуги короткого радиуса (+G) на биопотенциалы головного мозга человека**

Все участвовавшие в данном экспериментальном блоке добровольцы обладали организованным во времени и пространстве ЭЭГ-паттерном (рисунок 1), т.е. отличались хорошей адаптивностью и оптимальной реактивностью при воздействии экстремальных факторов. Поскольку по техническим причинам записи 3 испытуемых исключили из дальнейшей обработки, то анализу подвергались ЭЭГ 6 добровольцев из 9.

Исследование динамики биопотенциалов головного мозга показало, что на различных этапах трех вращений ЦКР происходят статистически значимые изменения относительно фона в изучаемых диапазонах ЭЭГ, кроме ОЗМ Бета-диапазона на 3 вращении. На 1 вращении на ЦКР явных закономерностей в изменении изучаемых диапазонов ОЗМ ЭЭГ не обнаружено. Во время 2 вращений было выявлено, что изменения всех исследуемых ЭЭГ диапазонов имели колебательный характер различной амплитуды. На 3 вращении в динамике исследуемых показателей был выявлен ряд закономерностей сходных с полученными на 2 вращении.

Поскольку большинство (5 из 6) добровольцев впервые подвергалось действию искусственной гравитации на центрифуге, то их ЭЭГ-показатели на 1 вращении могли отражать ориентировочную реакцию. Известно, что при появлении нового стимула(-ов), а так же при изменении интенсивности и соотношении силы/длительности воздействия возникает, так называемая «ориентировочная реакция», при этом новизну стимула организм оценивает в виде биологической значимости. Высоко значимый стимул, имея небольшую физическую интенсивность, может вызывать мощную ориентировочную реакцию. В данном экспериментальном блоке для добровольцев стимул был и значимым, и интенсивным (сильным). Угнетения альфа-ритма и появление высокочастотной активности на ЭЭГ расценивается исследователями, как начало ориентировочной реакции, что соответствует генерализованной активации коры больших полушарий мозга. Кроме того, при ориентировочной реакции происходит нарастание и тета-ритма [под ред. Е.Н. Соколова, 1964; Соколов Е.Н., 2003; Аракелов Г.Г., 2010]. Следовательно, ориентировочная реакция изменяет весь ЭЭГ-спектр, и, таким образом, маскирует эффект действующего фактора. Подобные сдвиги в ритмических компонентах ЭЭГ отмечались в настоящем исследовании на 1 вращении ЦКР, а отсутствие, при этом явных закономерностей в изменении изучаемых диапазонов ОЗМ ЭЭГ может являться свидетельством наличия ориентировочной реакции в группе добровольцев.

Поскольку парное сравнение начального функционального состояния (Д) добровольцев продемонстрировало наличие определенных различий по показателям ОЗМ всех исследуемых диапазонов, было выдвинуто предположение, что это является причиной отсутствия однозначных различий между ЭЭГ-реакциями на нарастание и уменьшение перегрузок при 2 и 3 вращении ЦКР. Известно, что в реакции организма на действие какого-либо фактора важным считается его исходный фоновый уровень (т.е. состояние вне деятельности, предшествующее деятельности), а эффект воздействия зависит не только от характеристик фактора, но и от исходного функционального состояния (фона) организма человека. Отказ от упрощенного подхода к прямой связи между стимулом и реакцией и появление дополнительного звена в цепи сигнал - ответ функциональных систем организма [Ильин Е.П., 2005; Фролов М.В., 1987; edited by G. R. J. Hockey, A. W. K. Gaillard, O. Burov, 2003] является теоретической основой проблемы

«функционального фона». Для нивелирования различий начального функционального состояния ЦНС добровольцев рассчитывался относительный показатель динамики (ОПД) – нормировка ОЗМ основных ЭЭГ диапазонов к зарегистрированным параметрам (Д) непосредственно перед каждым вращением ЦКР.

Анализ динамики ОПД ОЗМ всех исследуемых диапазонов (рисунок 5, таблица 3) показал, что основные различия между 3-им и 2-ым вращением наблюдались для Бета-диапазона практически сразу после начала подъёма (в 11 из 13 экспериментальных срезов).

Таблица 3 – Разница выраженных в процентах значений ОПД ОЗМ всех исследуемых диапазонов для группы добровольцев в каждом срезе измерений 3-его вращения ЦКР относительно 2-го вращения

Диапазоны	Срезы эксперимента												
	Н1	Пл1	Н2	Пл2	Н3	Пл31	Пл32	Пл33	С1	Пл4	С2	Пл5	С3
Дельта	90,99	182,59	-46,31	141,46	<b>228,14</b>	137,41	-80,68	-164,96	74,74	<b>65,63</b>	148,74	<b>-81,86</b>	<b>-72,34</b>
Тета	32,35	<b>1170,38</b>	-61,65	<b>209,23</b>	-32,81	<b>-52,66</b>	23,39	-3,3	138,32	473,41	-30,88	<b>-91,42</b>	-66,4
Альфа	<b>81,59</b>	-13,55	<b>155,91</b>	-55,56	<b>-93,76</b>	-171,25	-105,1	-57,7	<b>-6,04</b>	-46,18	-83,66	<b>119,26</b>	<b>102,45</b>
Бета	-57,94	<b>-106,85</b>	<b>-83,3</b>	-388,39	<b>278,67</b>	<b>320,08</b>	<b>237,82</b>	<b>182,29</b>	<b>372,06</b>	<b>244,18</b>	<b>226,89</b>	<b>138,8</b>	<b>226,98</b>

Примечание – полужирным шрифтом процентное отношения статистически значимых ЭЭГ показателей в срезах при парном сравнении

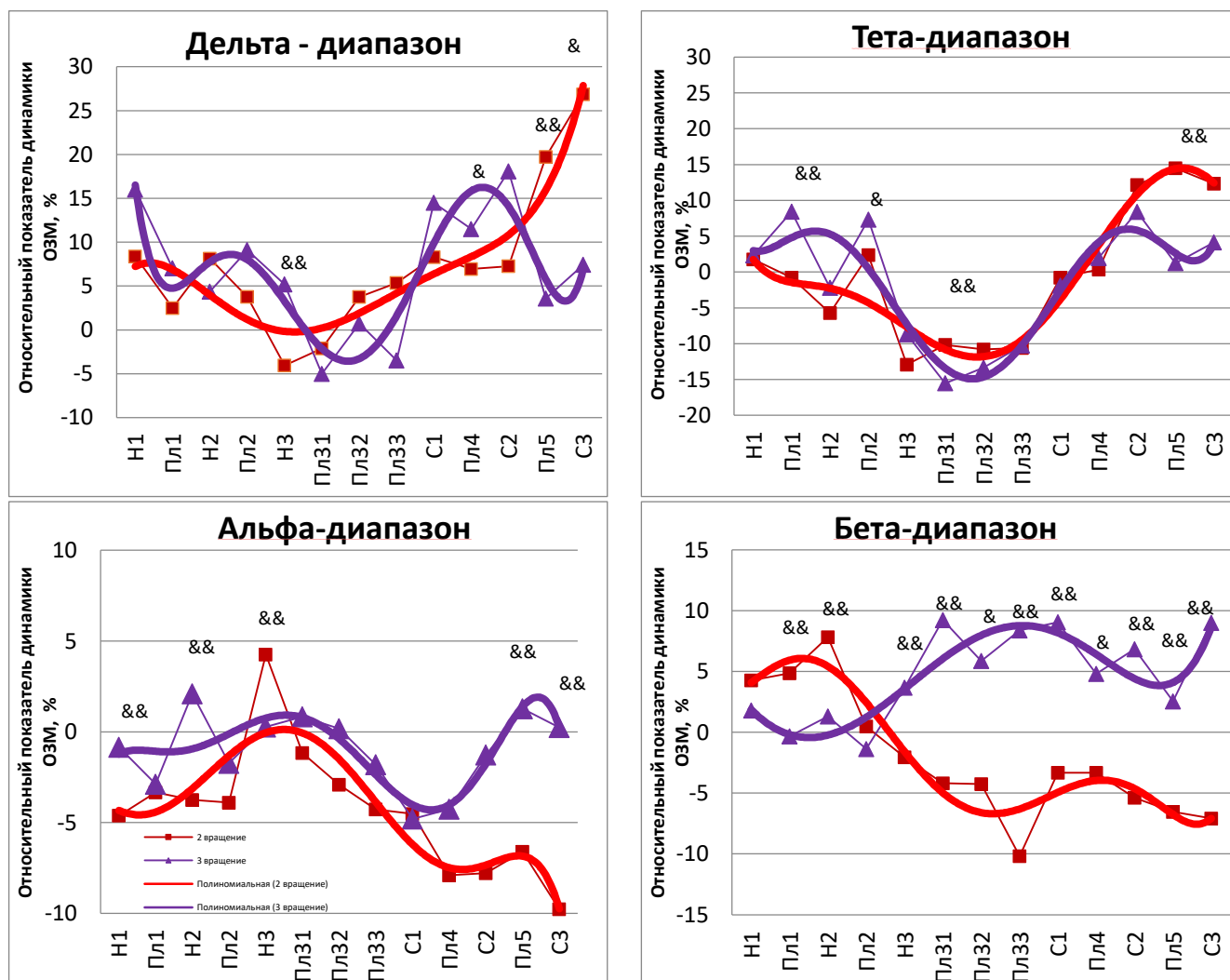


Рисунок 5 – Относительный показатель динамики ОЗМ Дельта-, Тета-, Альфа- и Бета-диапазона для 2-го и 3-его вращений ЦКР. Результаты представлены в виде медиан для группы добровольцев в целом и линий трендов полиномиального сглаживания по эти параметрам; & –  $p \leq 0,05$  3 вращение относительно 2, && –  $p \leq 0,01$  3 вращение относительно 2

Возможной причиной больших значений ОПД ОЗМ Бета-диапазона 3-его вращения ЦКР по сравнению со 2 могло быть эмоциональное возбуждение, но при этом, по литературным данным [Uusberg A., Thiruchselvam R., Gross J.J., 2014; Angelopoulou A., Garcia-Rodriguez J. et al., 2019; Hou Y., Chen S., 2019; Tendler A., Wagner S., 2015; Maeda S., Yoshimura H., 2019], должно быть и увеличение мощности Тета-диапазона, чего не наблюдалось в нашем исследовании (рисунок 5). Кроме эмоциональных реакций также описано множество других поведенческих коррелятов бета-колебаний, но при этом не установлено, как лежащая в их основе нейронная активность, определяет поведение [Engeland A.K., Fries P., 2010; Khanna P., Carmena J.M., 2017; Shin H., Law R., Tsutsui Sh. et al., 2017]. Кроме этого, классические наблюдения связывают бета-ритм с двигательными функциями, а недавние открытия показали, что колебания бета-диапазона возникают во время изометрического сокращения мышц [Baker S.N., Pinches E.M., Lemon R.N., 2003], а также коррелируют с сенсомоторной интеграцией, когда двигательная система перестраивается после предшествующего движения к последующему [Baker S.N., 2007]. Также выявлено, что мышечное напряжение может более точно отражать повышенное возбуждение центральной нервной системы, чем другие периферические физиологические показатели [Hoehn-Saric R, Hazlett R.L., Pourmotabbed T., McLeod D.R., 1997]. Сравнение активности прямой мышцы и наружных косых мышц живота во время упражнений, выполняемых при вращении на ЦКР с нагрузкой в 1 г на индивидуальный центр масс, с аналогичными упражнениями в вертикальном положении тела показало, что активность прямых мышц живота была выше на ЦКР [Frett T., Lecheler L., Speer M. et al., 2022]. Ряд авторов показал, что активность икроножной мышцы, связана с бета-диапазоном мощности ЭЭГ и, следовательно, отражает возбуждение ЦНС [Hoehn-Saric R., Hazlett R.L., Pourmotabbed T., McLeod D.R., 1997]. Таким образом, полученные в настоящей работе результаты совпадают с данными исследований [Baker S.N., Pinches E.M., Lemon R.N., 2003; Baker S.N., 2007; Hoehn-Saric R., Hazlett R.L., Pourmotabbed T., McLeod D.R., 1997; Frett T., Lecheler L., Speer M. et al., 2022] функциональной роли бета-активности. Можно полагать, что значительное нарастание ОПД ОЗМ Бета-диапазона обусловлено наибольшим напряжением скелетной мускулатуры при максимальной нагрузке на 3 вращении ЦКР относительно 2. Результаты обследования добровольцев с наиболее оптимальной адаптивностью к экстремальным факторам позволили определить временной интервал, в течение которого наблюдались изменения в биоэлектрической активности головного мозга по показателям ОПД ОЗМ под воздействием искусственной гравитации переменной силы.

### **Исследование влияния гипербарической гипоксической искусственной газовой среды на биопотенциалы головного мозга добровольцев**

В данном исследовании из четырех типов паттернов, описанных в норме у человека, у трех пар добровольцев наблюдали три типа I, III и IV (рисунок 1) [Жирмунская Е.А., 1996], которым соответствовали три формы реактивности - нормальная, повышенная с преобладанием процессов возбуждения и извращенная [под ред. В.В. Новицкого, Е.Д. Гольдберга, О.И. Уразовой., 2013]. Такой состав добровольцев не позволил для группы в целом однозначно определить ЭЭГ-реакции на изменения гипербарической гипоксической газовой среды. Анализ ЭЭГ добровольцев, находившихся в гипоксической кислородно-азотно-аргоной атмосфере при имитации погружения на 2 м относительно уровня моря, не выявил ни в одном из срезов эксперимента статистически значимых сдвигов исследуемых параметров. Пребывание тех же добровольцев в гипоксической кислородно-азотной среде с имитацией погружения на такую же глубину привело к возрастанию на 22 % ( $p \leq 0,1$ ) ОЗМ Альфа-диапазона в 1-ой части



эксперимента относительно фоновых значений. Усиление Альфа-активности свидетельствовало об оптимизации ФС ЦНС [Жирмунская Е.А., 1996; Жирмунская Е.А., 1969; Поворинский А.Г., Заболотных В.А., 1987; Зенков Л.Р., 2013; Егорова И.С., 1973], что согласовывалось с полученными в эксперименте с длительным пребыванием человека в гипоксической кислородно-азотно-аргоной среде данными об отсутствии отчетливого влияния аргона на психофизиологические показатели и работоспособность человека [Павлов Н.Б., 2006]. С другой стороны, определенное улучшение ФС ЦНС возможно объясняется гипотезой, состоящей в том, что аргон усиливает скорость окислительных реакций и, воздействуя на водную основу биологических систем, усиливает диссоциацию воды, а при увеличении в биожидкостях растворенного аргона в несколько раз увеличивается и доля кислорода. Эта гипотеза объясняет 2 эффекта аргона: увеличение потребления кислорода при дыхании человека в умеренно гипоксических смесях и увеличение выживаемости при острой гипоксии [Дьяченко А.И., Шулагин Ю.А., Павлов Б.Н., 2000; Селиванский Д.А., Дьяченко А.И., Воейков В. Л. и др., 2006].

Усиление комплекса действующих факторов за счет возрастания силы одного из них (имитация погружения на 20-метров относительно уровня моря) при нахождении в гипоксической кислородно-азотно-аргоной среде в гермообъекте привело к однонаправленным количественным сдвигам показателей ЭЭГ добровольцев: увеличению относительно фона ОЗМ Дельта-диапазона на 40,5 % в эксперименте и на 55,6 % в последствии; а также уменьшению ОЗМ Альфа-диапазона на 8 % и 29,7 % соответственно (рисунок 6), что свидетельствовало о тормозном влиянии ствола на кору головного мозга, приводившем к сдвигу ФС ЦНС добровольцев в сторону торможения [Солдатов П.Э., Дадашева О.А., Гурьева Т.С. и др., 2015].

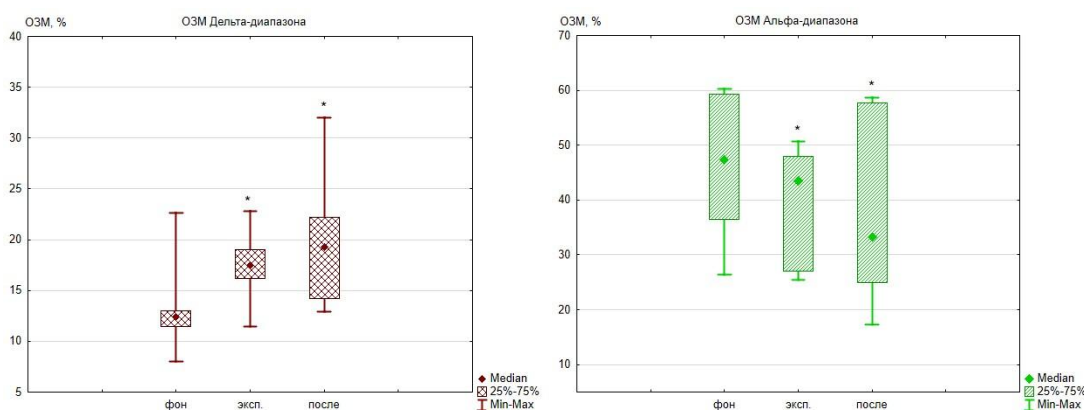


Рисунок 6 – ОЗМ Дельта- и Альфа-диапазона у добровольцев в 3-й серии эксперимента при искусственной гипоксической газовой среде при имитационном погружении на глубину до 20 метров;

\* –  $p \leq 0,05$  относительно фона

Принимая во внимание зависимость эффекта действия комплекса факторов от исходного ФС провели анализ исследуемых параметров ЭЭГ перед каждой серией данного экспериментального блока. Было обнаружено, что перед началом 2-ой серии у испытуемого 1304 была выявлена смена типа паттерна с IV на III, во всех остальных срезах данной серии эксперимента наблюдался IV тип. Кроме того, исходное ФС ЦНС испытуемых перед каждой экспериментальной сессией различалось между собой по количественным параметрам ОЗМ исследованных диапазонов ЭЭГ-спектра (рисунок 7).

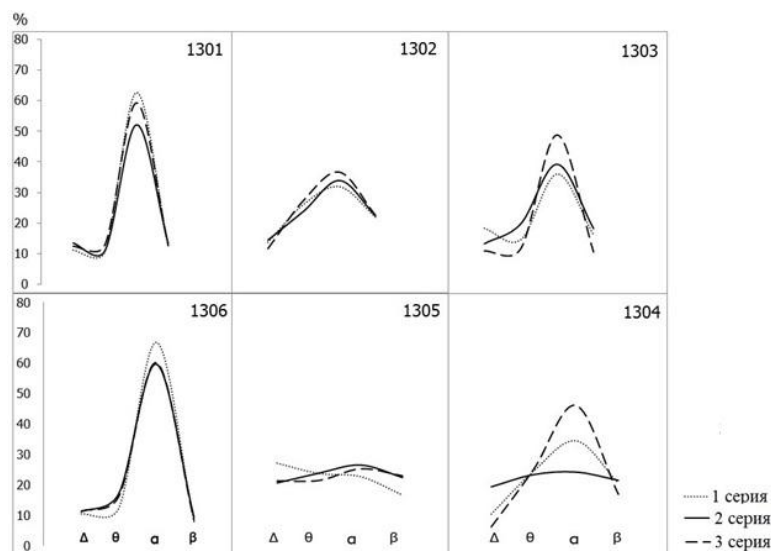


Рисунок 7 – Исходное функциональное состояния испытуемых перед каждой экспериментальной серией влияния гипербарической гипоксической искусственной газовой среды

Для корректности сравнения динамики параметров ЭЭГ в 3-х сериях данного эксперимента провели нивелирование различий начального ФС ЦНС добровольцев с расчетом ОПД ОЗМ основных ЭЭГ диапазонов. После завершения серий эксперимента с имитацией погружения на 20 метров в гипоксической кислородно-азотно-аргоной атмосфере показано, что ОПД ОЗМ Дельта-диапазона больше аналогичного показателя в серии с гипоксической кислородно-азотной средой (гипоксия) на 40,6 %, ОПД ОЗМ Тета-диапазона на 24,1 %; ОПД ОЗМ Альфа-диапазона меньше на 18,1 %, и на 7,3 % относительно аналогичного параметра в гипоксической кислородно-азотно-аргоной среде (гипоксия с аргоном) для группы добровольцев (рисунок 8).

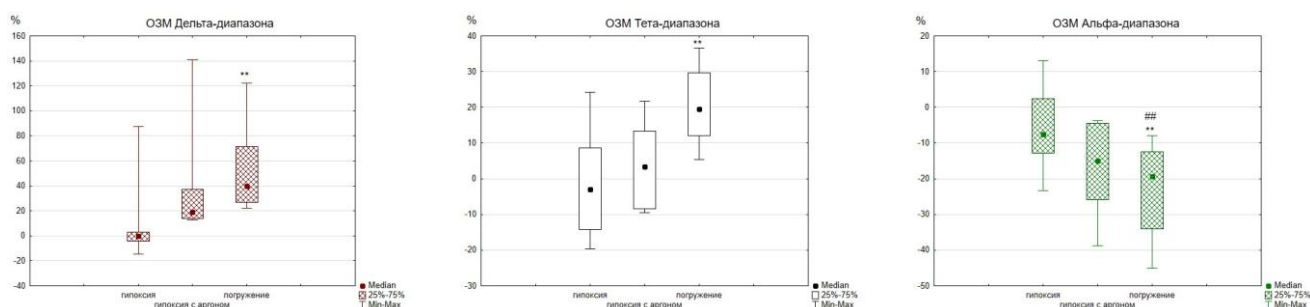


Рисунок 8 – Относительный показатель динамики ОЗМ Дельта-, Тета- и Альфа-диапазона в после в 3-х сериях эксперимента (гипоксической кислородно-азотной среда (гипоксия), гипоксической кислородно-азотно-аргоной среда (гипоксия с аргоном) и при искусственной газовой гипоксической среде при имитационном погружении на глубину до 20 метров (погружение);

\*\* –  $p \leq 0,01$  3-я серия относительно 1-ой серии; ## - 3-я серия относительно 2-ой серии

Известно, что гипоксия приводит к увеличению дельта-активности [Gurvitch A.M., Ginsburg D.A., 1977; Борукаева И.Х., Абазова З.Х., Кумыков В.К., 2014], а увеличение ОЗМ Дельта- и Тета-диапазонов при уменьшении Альфа-диапазона свидетельствует о тормозном влиянии ретикулярной формации ствола и таламических структур на кору головного мозга [Зенков Л.Р., 2013], что согласуется с полученными показателями ОПД ОЗМ 3-ей серии относительно 1-ой. Значительные отличия ОЗМ Альфа-диапазона в 3 серии от таковых в 1 и 2 демонстрирует, что у здоровых людей с неустойчивым альфа-ритмом, при равной степени выраженности всех остальных ритмов (дезорганизованная ЭЭГ - 2 добровольца), а также при

уплощенной ЭЭГ (десинхронной - 2 добровольца), адаптивные возможности снижены; и ОЗМ Альфа-диапазона 2 добровольцев с организованной ЭЭГ не компенсирует этих различий, что соответствует данным полученным в исследованиях Курясева [Курясев И.А., 2012].

ЭЭГ-реакции первых двух серий данного экспериментального блока были разнонаправленными, поскольку состав малой группы был разнородным по типу ЭЭГ-паттерна и по форме реактивности ЦНС добровольцев. Однако в 3-ей серии увеличение силы одного из действующих факторов (имитация погружения на глубину до 20 м) усилило действие гипоксической кислородно-азотно-аргоной среды и привело к выраженным однонаправленным сдвигам ЭЭГ-параметров испытуемых.

### **Закономерности ЭЭГ-реакций на негативные воздействия профессиональной среды специалистов авиакосмического и морского профиля**

В каждом блоке исследований в ответ на влияние факторов различной природы, интенсивности и длительности наблюдалась специфичная динамика исследуемых ЭЭГ-диапазонов у добровольцев малой группы: в первом экспериментальном блоке полученные данные показали наличие статистически значимых изменений в комплексе ЭЭГ-параметров у специалистов подводных систем с организованным во времени и пространстве ЭЭГ-паттерном и отсутствие таковых у добровольцев с десинхронным типом при действии негативного фактора профессиональной среды (нарушении распорядка труда и отдыха в 21-суточной изоляции в гермообъекте); во втором экспериментальном блоке с участием добровольцев с организованным во времени и пространстве ЭЭГ-паттерном полученные статистически значимые изменения в комплексе ЭЭГ-параметров позволили установить величину силы фактора (искусственной гравитации), при котором происходят значимые изменения в работе головного мозга; в третьем экспериментальном блоке, в котором участвовали добровольцы с разнородными типами ЭЭГ-паттернов, выраженные статистически значимые однонаправленные изменения ЭЭГ-параметров были получены при усилении эффекта гипоксической кислородно-азотно-аргоной среды фактором имитации погружения на 20-метровую глубину в гермообъекте.

На основании частных закономерностей были определены общие принципы взаимодействия иерархически системно организованных корково-подкорковых структур головного мозга, в котором отражались типы ЭЭГ-паттернов и формы реактивности ЦНС добровольцев. Сбалансированные корково-подкорковые взаимоотношения ЭЭГ соответствовали организованному во времени и пространстве паттерну, а уравновешенные при этом процессы торможения и возбуждения были тождественны нормальной форме реактивности нервной системы, что выражалось в оптимальной реакции ЦНС добровольцев с таким типом ЭЭГ-паттерна на действия экстремальных факторов в моделируемых условиях среды.

Рассматриваемые в данной работе типы ЭЭГ-паттернов, отражающие интеграцию корково-подкорковых структур головного мозга и, соответственно, влияющие на ЭЭГ-реакции при действии экстремальных факторов, согласуются с теорией функциональных систем П.К. Анохина в развитии К.В. Судакова, где акцептор результата действия (АРД), рассматривается как мозаичная архитектоника, широко разветвленная по различным структурам коры и подкорковых образований головного мозга [Судаков К.В., 2009].

На основе этого была предложена структура формирования функциональной системы церебрального ответа на действие моделируемых экстремальных факторов профессиональной среды с учетом индивидуально-типологических нейрофизиологических особенностей добровольцев (рисунок 9).



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование направлено на изучение роли индивидуально-типологических ЭЭГ-паттернов в вариативности динамики показателей биопотенциалов головного мозга человека в экспериментах с моделированием действия экстремальных факторов профессиональной среды специалистов авиационного, космического и морского профиля.

Актуальность работы обусловлена зависимостью успешности профессиональной деятельности от присущих ей особенностей: специфической обстановки, условий труда, наличия необходимых профессиональных знаний и практического опыта специалиста, а также от его психофизиологического состояния [Маркова Т.Л., 2016]. Профессиональная деятельность специалистов осуществляется при постоянном действии негативных факторов среды, при этом ее успешность существенно зависит от личностных качеств специалистов, а также свойств их нервной системы [Душков Б.А., Королев А.В., Смирнов Б.А., 2005; Одинцова М.А., Самаль Е.В., 2017]. Необходимые для поддержания жизнедеятельности организма в этих условиях функции нервной системы, такие как, обработка сенсорной информации, принятие решений, двигательная активность, поведение и др., осуществляются головным мозгом – главным органом ЦНС человека. Оценка функций головного мозга непосредственно во время деятельности осуществляется методом электроэнцефалографии, основанным на регистрации биоэлектрических потенциалов.

Для выявления степени влияния индивидуально-типологических ЭЭГ-паттернов на динамику показателей биопотенциалов головного мозга человека были проведены 3 экспериментальных блока, направленных на изучение динамики амплитудно-частотных ЭЭГ-показателей: при нарушении циркадианных ритмов труда и отдыха в 21-суточной изоляции; при искусственной микрогравитации (действие перегрузок центрифуги короткого радиуса в направлении «голова-таз» (+Gz)); в краткосрочной изоляции с измененной гипербарической газовой средой обитания. В процессе исследований было зарегистрировано 237 ЭЭГ записей (общей продолжительностью 25 часов 57 минут) у 56 добровольцев-мужчин.

Зависимость динамики ЭЭГ-показателей добровольцев от параметров (интенсивности и времени) действующих факторов позволила обнаружить частные закономерности в каждом конкретном блоке исследований. В первом экспериментальном блоке (при нарушении распорядка труда и отдыха в 21-суточной изоляции в гермообъекте), показано, что статистически значимые изменения комплекса ЭЭГ-параметров определяются индивидуально-типологическими свойствами организованного во времени и пространстве ЭЭГ-паттерна с хорошо выраженным альфа-ритмом. Участие добровольцев с организованным во времени и пространстве ЭЭГ-паттерном во втором экспериментальном блоке позволило установить величину силы фактора (искусственной гравитации), при котором происходят значимые изменения в работе головного мозга. В третьем экспериментальном блоке, в котором участвовали добровольцы с разнородными типами ЭЭГ-паттернов, выраженные статистически значимые однонаправленные изменения ЭЭГ-параметров были получены при усилении эффекта гипоксической кислородно-азотно-аргоной среды фактором имитации погружения на 20-метровую глубину в гермообъекте.

Частные закономерности, выявленные в трех экспериментальных блоках, позволили определить общие принципы взаимодействия иерархически системно организованных корково-подкорковых структур головного мозга, в котором отражались типы ЭЭГ-паттернов и формы реактивности ЦНС добровольцев. Сбалансированные корково-подкорковые взаимоотношения ЭЭГ соответствовали организованному во времени и пространстве паттерну, а уравновешенные при этом процессы торможения и возбуждения были тождественны нормальной форме реактивности нервной системы, что выражалось в оптимальной реакции ЦНС добровольцев с таким типом ЭЭГ-паттерна на действия экстремальных факторов в моделируемых условиях среды.

На основании полученных результатов была предложена структура формирования функциональной системы церебрального ответа (согласно теории П.К. Анохина в развитии К.В. Судакова) на действие моделируемых экстремальных факторов профессиональной среды с

учетом индивидуально-типологических нейрофизиологических особенностей добровольцев. В модельных экспериментах рассматривались такие компоненты афферентного синтеза, как обстановочная и пусковая афферентация, где обстановочная включала не только стационарную обстановку (НИС ДО-11, ЦКР, ГВК-250), но и ряд афферентных воздействий (обстановочная монотония изоляции, операторский труд, гиподинамия и пр.), а пусковая афферентация возникала при воздействии конкретных раздражителей (вахтовый режим труда и отдыха, перегрузка, искусственная гипербарическая гипоксическая газовая среда). Система иерархического объединения структур головного мозга, возникавшая при реализации принятия решений, построения программы действий и формирования афферентных импульсов, обеспечивавших периферийное действие, в значительной мере определялось сформированным влиянием подкорковых структур на кору головного мозга. Совпадение/несовпадение результата действия с образцом акцептора результата действия (завершение действие и запуск цикла до получения ожидаемых по программе результатов) в данном исследовании определяли динамикой, регистрируемых методом ЭЭГ, показателей биопотенциалов головного мозга.

Практическая значимость работы заключалась в определении индивидуально-типологических различий ЭЭГ-паттернов для адекватного обнаружения тех свойств воздействовавшего фактора и/или комплекса факторов на работу головного мозга, которая оценивалась с помощью количественных параметров ЭЭГ. Полученные в данном исследовании результаты позволят проводить отбор и комплектование участников малых экспериментальных групп, поскольку для понимания эффектов и механизмов действия факторов различной природы, интенсивности и продолжительности, наиболее предпочтительной является выборка добровольцев с организованным во времени и пространстве ЭЭГ-паттерном с хорошо выраженным альфа-ритмом. На основании литературных и собственных данных по исследованию роли индивидуально-типологических ЭЭГ-паттернов в динамике показателей биопотенциалов головного мозга человека при действии экстремальных факторов предложен алгоритм оценки перехода из оптимального функционального состояния, как в сторону активации и гиперактивации коры головного мозга с гипермобилизацией и постепенным расходом функциональных резервов, так и в сторону торможения со снижением уровня функциональных резервов специалистов, с учетом типа их ЭЭГ-паттерна. Данный алгоритм применяется в испытаниях и экспериментах в наземных условиях.

## ВЫВОДЫ

1. В модельных условиях нарушения распорядка режима труда и отдыха во время краткосрочной изоляции в гермообъекте динамика ЭЭГ-показателей добровольцев зависит от индивидуально-типологических свойств их ЭЭГ-паттерна, при этом наибольший вклад в эти изменения вносят ЭЭГ-паттерны с хорошо выраженным альфа-ритмом согласно увеличению ОЗМ Дельта-диапазона на 14,5 %, ОЗМ Тета- на 22,8 %; и уменьшению ОЗМ Альфа-диапазона на 8,5 % относительно фона.

2. В группе добровольцев с организованным во времени и пространстве ЭЭГ-паттерном воздействие максимальной перегрузки 2,92 G на ЦКР в направлении «голова-таз» (+Gz) вызывает наибольшие изменения параметров биопотенциалов головного мозга по показателю ОПД ОЗМ Бета-диапазона до 320% (на 3 площадке 3 вращения).

3. В группе добровольцев с различными индивидуально-типологическими особенностями ЭЭГ-паттерна однонаправленная динамика количественных показателей биопотенциалов головного мозга выявлена при введении фактора имитации погружения на глубину 20 метров в гипоксической кислородно-азотно-аргоной атмосфере на основании увеличения ОПД ОЗМ Дельта- на 40,6 %; ОПД ОЗМ Тета- на 24,1 % и уменьшения ОПД ОЗМ Альфа-диапазона на 18,1 % по сравнению с аналогичными показателями в гипоксической кислородно-азотной среде, а также при снижении ОПД ОЗМ Альфа-диапазона на 7,3 % по сравнению с подобными параметром в гипоксической кислородно-азотно-аргоной среде.

4. Степень влияния индивидуально-типологических ЭЭГ-паттернов на динамику показателей биопотенциалов головного мозга человека, особенно в малых выборках, проявляется в зависимости от природы действующего фактора и его количественных характеристик, например, интенсивности и длительности.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи:

1. *Счастливцева Д.В.*, Котровская Т.И., Бубеев Ю.А. Особенности ЭЭГ-реакции человека в условиях гипербарической искусственной газовой среды // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 1. С. 48-55.
2. *Schastlivtseva D.V.*, Kotrovskaya T. I., Bubeev Yu. A. Characteristics of the Human EEG Reaction to Artificial Hyperbaric Gaseous Environment // Human Physiology. 2019. V. 45. № 7. P. 48-54.
3. Кальманов А.С., *Счастливцева Д.В.*, Котровская Т.И., Бубеев Ю.А. ЭЭГ-реакции операторов на измененный распорядок сна – бодрствования и 21-суточное пребывание в условиях изоляции // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2020. Т. 54. № 3. С. 42-48.
4. *Счастливцева Д.В.*, Кальманов А.С., Котровская Т.И., Бубеев Ю.А. Индивидуально-типологические особенности ЭЭГ-реакций операторов на измененный распорядок сна – бодрствования // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2021. Т. 55. № 3. С. 45-50.
5. *Счастливцева Д.В.*, Котровская Т.И., Колотева М.И., Глебова Т.М. Динамика биопотенциалов головного мозга у добровольцев при моделировании перегрузок на центрифуге короткого радиуса в направлении «голова-таз» (+GZ) // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2022. Т. 56. № 4. С. 53-58.
6. *Schastlivtseva D.V.*, Kotrovskaya T.I., Koloteva M.I., Glebova T.M. Dynamics of Brain Potentials in Volunteers for Modeled Head-to-Pelvis G-Loads (+Gz) on a Short-Arm Human Centrifuge // Human Physiology. 2023. V. 49. № 2. P. 53-58.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АРД – акцептор результата действия	Р – решение
ГВК-250 – глубоководный водолазный комплекс, позволяющий проводить эксперименты до глубины 250 метров водяного столба	РД – результат действия
ГНЦ РФ – ИМБП РАН – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Государственный научный центр российской федерации Институт медико-биологических проблем РАН	ФГУП НИИ ПММ – Федеральное государственное унитарное предприятие Научно-Исследовательский Институт промышленной и морской медицины Федерального медико-биологического агентства
Д – действие	ФС – функциональное состояние
ДА – долговременная адаптация	ЦКР – центрифуга короткого радиуса
НИС – научно-исследовательский стенд	ЦНС – центральная нервная система
ОЗМ – относительное значение мощности	ЭКГ – электрокардиография
ОПД – относительный показатель динамики	ЭМГ – электромиография
ПД – программа действия	ЭОГ – электроокулография
ПО – программное обеспечение	ЭЭГ – электроэнцефалограмма
	G – гравитационная постоянная

## СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Экстремальный фактор – (лимитирующий) природный или техногенный фактор, сила воздействия которого на человека превышает его физиологические возможности или адаптационные резервы организма

ЭЭГ-паттерн (тип, характер) – это целостная картина биоэлектрической активности по всем исследуемым областям мозга, отражающая особенности распределения различных компонентов ЭЭГ