

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЫ И СПОРТА

ЭЭГ-КОРРЕЛЯТЫ ПРОИЗВОЛЬНОГО БРАДИПНОЭ В ДЫХАТЕЛЬНЫХ УПРАЖНЕНИЯХ (систематический обзор)

С.А. ЕРМОЛАЕВА,
СПбИВМР, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Дыхание является одним из важных объектов изучения современной нейронауки. Регулярное выполнение дыхательных упражнений снижает стресс-реактивность, оказывает положительное влияние на когнитивные процессы и эмоциональное состояние. Наблюдаемые эффекты основаны преимущественно на произвольном замедлении частоты дыхания (брадипноэ). На сегодняшний день существует дефицит систематических обзоров, посвященных теме влияния брадипноэ на физиологические процессы, происходящие в головном мозге. Выполнен систематический поиск в базах данных PubMed/MEDLINE и eLIBRARY с использованием ключевых слов, связанных с частотной модуляцией дыхания и электроэнцефалографией. Из первично обнаруженных 462 аннотаций в обзор вошло 14 публикаций, соответствующих критериям включения. Исследования показали увеличение спектральной мощности в альфа-диапазоне и уменьшение в бета-диапазоне. Относительно низкочастотных диапазонов получены противоречивые данные. В единичном исследовании были обнаружены пароксизмальные гамма-волны. Полученные результаты подтверждают возможность модулировать электрическую активность головного мозга посредством произвольного брадипноэ. Однако, чтобы делать убедительные выводы, требуются дальнейшие исследования со стандартизацией дыхательных техник и протоколов исследования.

Ключевые слова: брадипноэ, контроль дыхания, пранаяма, ЭЭГ.

EEG-CORRELATES OF VOLUNTARY BRADYPNEA IN RESPIRATORY EXERCISES (systematic review)

S.A. ERMOLAEVA,
SPbIOMR, Saint Petersburg city, Russia

Abstract

Breathing is one of the important objects of study of modern neuroscience. Breathing exercises reduce stress-reactivity, makes a positive influence on cognitive processes and the emotional state. The observed effects are based primarily on a voluntary slowing of the respiratory rate (bradypnea). To date, there is a lack of systematic reviews on the effect of bradypnea on physiological processes in the brain. A systematic search was performed in the PubMed/MEDLINE and eLIBRARY databases using keywords related to respiratory frequency modulation and electroencephalography. From the initial 462 abstracts identified, 14 publications that met the inclusion criteria were included in the review. Electroencephalographic studies showed an increase in spectral power in the alpha-band and decrease in the beta-band. Regarding the low-frequency bands, conflicting data have been obtained. In a single study, paroxysmal gamma waves were found. The obtained results confirm the possibility of modulating the electrical activity of the brain through voluntary bradypnea. Further studies with standardization of breathing techniques and research protocols are required.

Keywords: bradypnea, breath-control, pranayama, EEG.



Введение

В современной контемплативной¹ нейронауке дыхание является одним из важных объектов изучения. Посредством целого ряда физиологических эффектов дыхательные упражнения способствуют нормализации вегетативных функций организма, снижают стресс-реактивность, способствуют уменьшению боли. Также в целом оказывают положительное влияние на когнитивные процессы и эмоциональное состояние как у здоровых практикующих, так и у лиц с хроническими заболеваниями и тревожными расстройствами [5, 10, 19]. Психофизиологические эффекты, наблюдаемые в большинстве медитативных и релаксационных практик, основаны на произвольном замедлении частоты дыхания [14].

Ранее было выявлено, что снижение частоты дыхания может приводить к снижению минутного объема дыхания и изменению газового состава крови [1]. Углекислый газ (СО₂) является одним из важнейших метаболических регуляторов сосудистого тонуса – увеличение его концент-

рации в крови (гиперкапния) вызывает вазодилатацию (расширение кровеносных сосудов вследствие расслабления мускульной стенки сосудов) как церебральных, так и периферических сосудов [7, 15, 23]. Дозированная гиперкапния обладает нейропротекторным и противосудорожным эффектом [2, 13, 27].

Представляется интересным более глубокое изучение влияния брадипноэ (патологическое снижение частоты дыхания) на процессы, происходящие в головном мозге. В настоящее время существует ряд опубликованных работ, посвященных влиянию произвольного изменения частоты дыхания на электрическую активность головного мозга. Тем не менее существует дефицит систематических обзоров, посвященных данному вопросу.

Цель исследования: изучение влияния произвольного брадипноэ на электрическую активность головного мозга, зарегистрированную методом электроэнцефалографии (ЭЭГ) у здоровых взрослых лиц, путем систематического обзора научной литературы.

Таблица 1

Критерии включения и исключения публикаций

| Признак | Критерии включения | Критерии исключения |
|---------------|--|---|
| Популяция | Здоровые взрослые (лица старше 18 лет) мужчины и женщины, любой расовой принадлежности, с любым опытом дыхательных практик | Дети (лица младше 18 лет), беременные женщины, курильщики, а также лица, имеющие острые или хронические неврологические заболевания, психические расстройства, заболевания органов дыхательной и сердечно-сосудистой систем |
| Вмешательство | Дыхательные техники с произвольным снижением частоты дыхания, а также техники, включающие в себя комбинацию спонтанного дыхания с кратковременными (до 30 секунд) задержками дыхания | Дыхательные практики, не приводящие к снижению частоты дыхания. Использование дыхательных смесей или дыхание в условиях барокамеры. Были использованы маски, мундштуки или иные устройства, существенно ограничивающие дыхание, а также дыхание выполнялось через одну ноздрю. Вмешательства, в которых замедление или спонтанная остановка дыхания могла произойти непреднамеренно, в результате выполнения медитации или релаксационных техник. Регистрация произвольного замедления дыхания происходила одновременно с воздействием дополнительных стимулов (визуализация образов, решение задач, температурное воздействие и пр.) |
| Сравнение | Спонтанное дыхание в покое | – |
| Исход | Изменение активности головного мозга, зарегистрированное с помощью ЭЭГ непосредственно в процессе или немедленно после выполнения произвольного брадипноэ | Изменение активности головного мозга зарегистрировано альтернативным методом (не ЭЭГ) Регистрация ЭЭГ выполнена спустя время после произвольного брадипноэ |

¹ Контемплативный (ая, ое) [contemplatif, -ive adj] – Созерцательный, умозрительный. *Исторический словарь галлицизмов русского языка.* – М.: Словарное издательство ЭТС.



Материалы и методы исследования

Систематический обзор написан в соответствии с рекомендациями “The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews” (Обновленное руководство по составлению отчетов в систематических обзорах) [26]. Поиск литературы проводился в электронных базах данных PubMed/MEDLINE (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>) и eLIBRARY (<https://www.elibrary.ru>). Дата последнего поиска – 15.03.2023 г.

В качестве запроса в PubMed/ MEDLINE была использована комбинация ключевых слов: *EEG, deep breathing, voluntary breathing, paced breathing, slow breathing, yoga breathing, pranayama*. Они были объединены булевыми операторами “(eeg) AND ((deep breathing) OR (voluntary breathing) OR (paced breathing) OR (slow breathing) OR (yoga breathing) OR (pranayama))”. Поиск проводили среди публикаций, представленных на английском языке. Также дополнительным фильтром ограничивали поиск исследований на животных.

В поисковом запросе в eLIBRARY использованы ключевые слова: *ЭЭГ; глубокое дыхание; произвольное дыхание; ритмичное дыхание; медленное дыхание; йога дыхание; пранаяма*. И поисковый запрос: «(ЭЭГ) AND

((глубокое дыхание) OR (произвольное дыхание) OR (ритмичное дыхание) OR (медленное дыхание) OR (йога дыхание) OR (пранаяма))». Поиск проводили среди публикаций, представленных на русском языке.

Критерии включения и исключения были сформулированы согласно стратегии PICO (*Population* – популяция, *Intervention* – вмешательство, *Comparison* – сравнение, *Outcome* – исходы) (табл. 1).

В обзор были включены оригинальные исследования, опубликованные в рецензируемых журналах, за исключением обзорных публикаций и экспериментов с выборкой менее 5 человек.

Результаты исследования

Поэтапный поиск научных публикаций представлен на диаграмме, выполненной по руководству PRISMA 2020 [26] (рис. 1).

На этапе идентификации был сформирован первичный набор из 462 аннотаций, полученных по результатам поиска в базах данных. После изучения заголовков и аннотаций 368 исследований были исключены по причине того, что заголовки не соответствовали теме систематического обзора. Оставшиеся 94 публикации

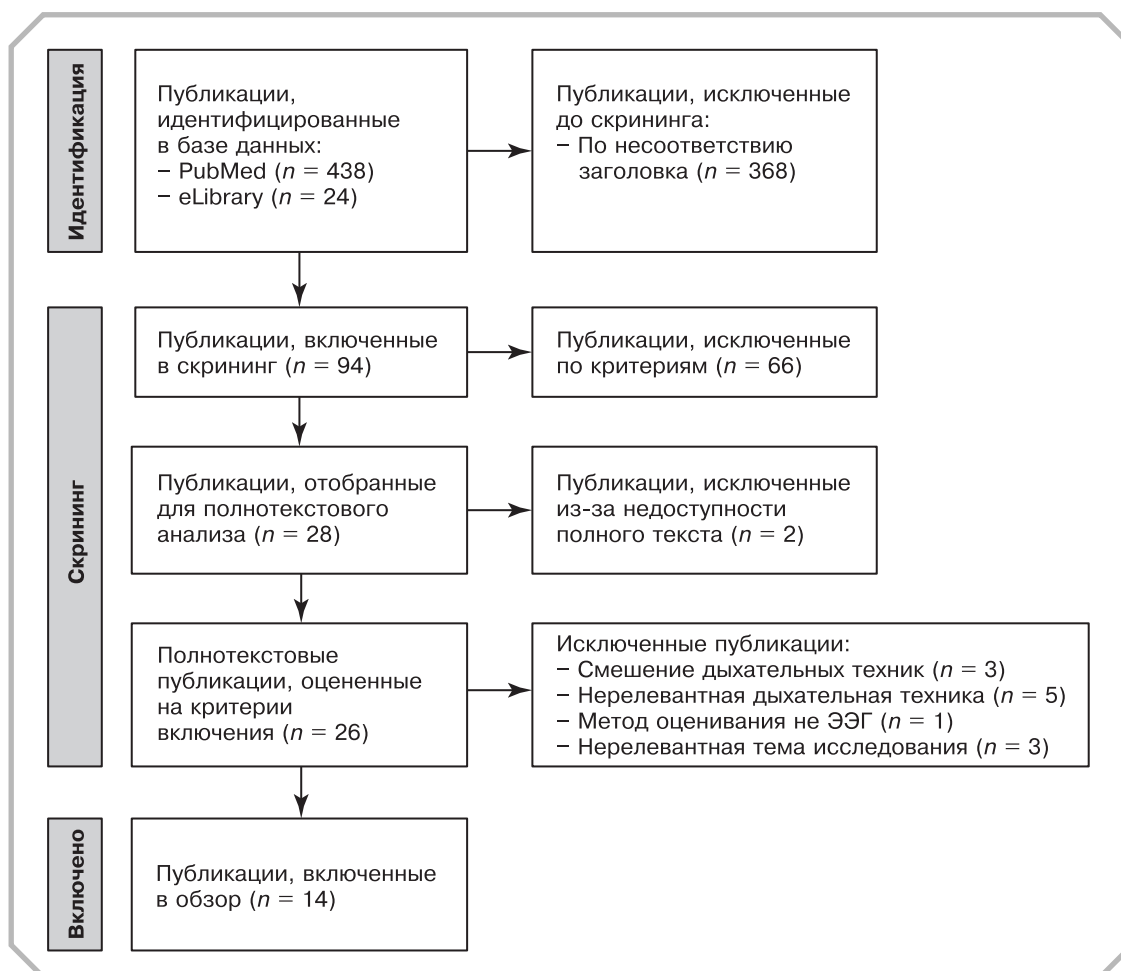


Рис. 1. Диаграмма систематического обзора



были проанализированы на соответствие критериям включения или исключения. 66 публикаций исключены по критериям исключения. Для полнотекстового поиска отобрано 28 публикаций, 2 из которых были удалены из-за недоступности полного текста. Всего про-

анализировано 26 полнотекстовых публикаций. 12 публикаций удалены из-за выявленных критериев исключения. В обзор включены 14 публикаций, краткие описания и основные результаты которых представлены в табл. 2.

Таблица 2

Список включенных публикаций

| № п/п | Автор, год | Размер выборки | Вмешательство | Детали вмешательства | Исходы по ЭЭГ |
|-------|----------------|--|---|---|---|
| 1 | Stancák, 1993 | 18 чел.: 8 жен. (22 ± 1,6 года); 10 муж. (23,1 ± 3,5 года) | ЧД: 0,25; 0,20; 0,14; 0,10; 0,06 Гц vs. спонтанное дыхание в покое | 20 мин – подготовка, 3 мин – дыхание в каждом из режимов, 2 мин – перерывы. Поза: сидя удобно, с закрытыми глазами | При частоте дыхания: 0,25; 0,20; 0,14 Гц наблюдалось повышение мощности в бета- диапазоне. Брадикардия (0,1 Гц и менее) привело к снижению суммарной изменчивости альфа-ритма в правой теменной и затылочной зонах |
| 2 | Fumoto, 2004 | 22 чел.: 6 жен. и 16 муж. (21–54 года) | Абдоминальное дыхание с ЭМГ- обратной связью, с ЧД 3–4 раз/мин. Вдох 6–8 с, выдох 9–12 с. vs. спонтанное дыхание в покое | 20 мин – свободное дыхание, 20 мин – брадикардия. Поза: сидя удобно, в вариантах с открытыми или закрытыми глазами | При закрытых глазах повышалась мощность в низкочастотном альфа- диапазоне, которая через 4–5 мин сменялась повышением мощности в высокочастотном альфа- диапазоне в теменной зоне |
| 3 | Busek, 2005 | 10 чел.: 3 жен. и 7 муж. (20–29 лет) | Брадикардия (ЧД: 0,1 Гц) vs. тахикардия ¹ (ЧД: 0,5 Гц) vs. эукардия ² (ЧД: 0,25 Гц) | Оценивалось 10 дыхательных циклов каждого участника | При эукардия и брадикардия наблюдалось увеличение мощности в дельта-диапазоне и суммарной мощности в передневисочной зоне. При эукардия снижалась мощность в дельта-диапазоне в теменной зоне и суммарная мощность в лобной зоне. При тахикардия снижалась мощность в бета-диапазоне в центральной зоне и тета- диапазоне в задневисочной и затылочной зонах |
| 4 | Vialatte, 2009 | 8 чел. (муж.) | Брамари ³ vs. псевдо-Брамари vs. спонтанное дыхание в покое | По 20 циклов псевдо- брамари и брамари, до и после – дыхание в покое. Поза: сидя, со скрещенными ногами, специальной постановкой пальцев рук на голову и лицо | Во время выполнения брамари наблюдались пароксизмальные гамма-волны в левой височно-теменной зоне, после выполнения – снижение мощности в тета- (значительно) и альфа- (незначительно) диапазонах |
| 5 | Park, 2012 | 58 чел. (22 жен. и 36 муж. 20–30 лет) | Брадикардия (ЧД = 10 с) vs. спонтанное дыхание в покое | 10 мин – покой, 15 мин – чередование брадикардия с дыханием в покое. Поза: сидя удобно, с закрытыми глазами | При брадикардия наблюдалось глобальное повышение мощности в низко- и высокочастотном альфа-диапазоне, а также – локальное снижение мощности в тета-диапазоне в левой лобной, затылочной, в правой височной зонах |



Продолжение табл. 2

| № п/п | Автор, год | Размер выборки | Вмешательство | Детали вмешательства | Исходы по ЭЭГ |
|-------|--------------------|--|--|--|--|
| 6 | Cheng, 2018* | 50 чел. (22% жен. 22,04 ± 1,65 года) | Спонтанное дыхание (12 чел.) vs. глубокое дыхание в вариантах: 5 мин (12 чел.), 7 мин (13 чел.), 9 мин (13 чел.). ЧД = 0,1 Гц | 15 мин – подготовка, 5 мин – спонтанное дыхание в покое, 5 или 7, или 9 мин – медленное дыхание по видео, 5 мин – спонтанное дыхание в покое. Поза: сидя, глаза смотрят на экран | Наблюдалось повышение мощности в тета-диапазоне во фронтальной зоне при глубоком дыхании 5 и 9 мин. Повышение мощности в тета-диапазоне в центральной зоне при глубоком дыхании 7 и 9 мин. У всех групп – снижение мощности в бета-диапазоне |
| 7 | Комогі, 2018 | 5 чел. (5 муж. 50–60+ лет) | Брадикапноэ (0,1 Гц) vs. спонтанное дыхание в покое | 10 мин – спонтанное дыхание в покое, 31 мин – брадикапноэ. Поза: сидя удобно, с закрытыми глазами | Регистрация только в лобной зоне: повышение мощности в тета- и высокочастотном альфа-диапазоне, снижение в бета-диапазоне (изменения после 15 мин брадикапноэ) |
| 8 | Hinterberger, 2019 | 37 чел. (20 жен. и 17 муж. 34,3 ± 15,9 года) | Брадикапноэ, дыхательный цикл: 6, 8, 10, 12, 14 и 6 с; пропорция вдоха к выдоху: 40%/60% vs. спонтанное дыхание в покое | 5 мин – покой, 6 режимов брадикапноэ по 7 мин, в промежутках – отдых 3 мин. Поза: сидя удобно, с открытыми глазами | При дыхательном цикле 10 с медленные корковые потенциалы в центральной зоне коррелировали с дыханием |
| 9 | Hsu, 2019 | 15 чел. (3 жен. и 12 муж. 26,27 ± 3,22 года) | Брадикапноэ: 0,125 Гц (цикл 8 с) vs. нормальное дыхание 0,25 Гц | 5 мин – покой, 1 мин – перерыв, 5 мин – брадикапноэ. Поза: сидя, глаза смотрят на экран | Брадикапноэ модулировало корковую активность в альфа-диапазоне в обширных областях мозга |
| 10 | Sinha, 2020 | 32 чел. (32 муж. 18–24 лет) | Брадикапноэ (ЧД: 6 раз/мин) vs. апноэ, vs. тахипноэ (ЧД – 30 раз/мин) | Апноэ – до предела, брадикапноэ – 3 мин, тахипноэ – 3 мин. Поза: лежа на спине, глаза закрыты | Описывался только тета-диапазон. Брадикапноэ не привело к изменениям, апноэ снижало, а тахипноэ увеличивало мощность в тета-диапазоне |
| 11 | Lee, 2021* | 26 чел. (12 жен. и 14 муж.) | Спонтанное дыхание в покое (13 чел.) vs. брадикапноэ с ЧД: 6 раз/мин, пропорция вдоха к выдоху 2:3 (13 чел.) | Предварительно: 5 мин – покой, 20 мин – физическая нагрузка, 5 мин – покой. Затем – 6 сессий, включающих: 5 мин – брадикапноэ/покой 2 мин – покой | Повышение значения соотношения ритмов в альфа- и высокочастотном бета-диапазонах |
| 12 | Morelli, 2021 | 11 чел. (11 муж. 30 ± 6 лет) | Комбинация свободного дыхания: 30 с с задержкой 30 с vs. спонтанное дыхание в покое | 6 мин лёжа с закрытыми глазами или 1 мин свободного дыхания, затем комбинация свободного дыхания 30 с с задержкой 30 с | Переход от апноэ к нормальной вентиляции сопровождалось увеличением мощности в дельта-диапазоне и снижением мощности в альфа-диапазоне |



| № п/п | Автор, год | Размер выборки | Вмешательство | Детали вмешательства | Исходы по ЭЭГ |
|-------|---------------|---|--|--|---|
| 13 | Park, 2021* | 30 чел. (15 жен. 27,7 ± 4,8 года и 15 муж. 28,5 ± 4,7 года) | Брадикапноэ: 0,1 Гц (10 чел.) vs. дыхание с нормальной частотой: 0,25 Гц (10 чел.) vs. спонтанное дыхание под счёт «су-соку» (10 чел.) | Каждое задание по 15 мин с перерывом 10 мин. Поза: сидя удобно, глаза – произвольно (кроме «су-соку», где глаза закрыты) | Между регулируемым дыханием с нормальной частотой, брадикапноэ и дыханием под счёт ЭЭГ не показала существенных различий. Однако нельзя утверждать, что вмешательства не эффективны по сравнению с исходным |
| 14 | Zaccaro, 2022 | 12 чел. (9 жен., 3 муж., 48 ± 2 года) | Брадикапноэ: ЧД = 2,5 раза/мин через нос vs. то же, через рот vs. спонтанное дыхание в покое | 15 мин – дыхание: 6 : 6 : 6 : 6 с через нос/рот, 5 мин – покой | Усиление мощности на низких частотах (особенно в тета- диапазоне) в медиальных префронтальных и задних областях. Повсеместное увеличение связности как в медленных (тета-), так и быстрых (высокочастотном бета-) диапазонах |

Пояснение к таблице:

ЧД – частота дыхания; vs. – «в сравнении с...». * Рандомизированное контролируемое исследование.

¹ Тахипноэ – учащенное неглубокое (поверхностное) дыхание. Возникает, когда человек в течение 1 минуты делает больше вдохов, чем выдохов.

² Эупноэ – нормальный ритм дыхания (у здорового взрослого человека: 14–18 дыхательных движений в минуту).

³ Брамари – дыхательные техники йоги.

Обобщение результатов

Брадикапноэ 0,1 Гц и менее, по сравнению с дыханием в покое, привело к снижению суммарной изменчивости альфа-ритма в правой теменной и затылочной зонах (Stancák, 1993) [11]. По данным Fumoto (2004), абдоминальное дыхание с частотой 3–4 раза в минуту привело к увеличению мощности в высокочастотном альфа-диапазоне в теменных областях [3]. О повышении мощности в альфа-диапазоне также сообщают исследователи Park (2012), Komori (2018) и Hsu (2019) [16, 21, 24]. По данным Lee (2021), при снижении частоты дыхания выявлено повышение соотношения альфа- и высокочастотных бета-ритмов, что отражает сбалансированность вегетативной нервной системы [17]. Исследователи Busek и др. (2005) обнаружили, что при брадикапноэ увеличивается мощность в дельта-диапазоне в передневисочной области, а также увеличивается суммарная мощность во всех зонах коры [6].

Cheng и др. (2018) в рандомизированном контролируемом исследовании изучали влияние медленного глубокого дыхания, выполняемого с помощью мобильного приложения, в тета- и бета-волновом диапазоне. Было обнаружено повышение мощности сигнала в тета-диапазоне при глубоком дыхании: в течение 5 и 9 мин – во фронтальной, 7 и 9 минут – в центральной зоне. У всех групп испытуемых выявлено снижение мощности сигнала в бета-диапазоне [8]. В исследовании Park (2012)

было выявлено снижение мощности в тета-диапазоне при брадикапноэ в течение 10 мин [21]. Исследователи Sinha и др. (2020), которые также оценивали влияние брадикапноэ на активность в тета-диапазоне в течение 3 мин, не обнаружили значимых изменений по сравнению с обычным дыханием [12]. Также значимых изменений при снижении частоты дыхания в течение 15 мин, по сравнению с обычным дыханием, не было у обнаружено в рандомизированном контролируемом исследовании у Park и др. (2021) [22]. При регистрации данных только в лобной зоне Komori и др. (2018) обнаружили повышение мощности в тета- и высокочастотном альфа-диапазоне и снижение сигнала в бета-диапазоне [16]. В исследовании брадикапноэ с частотой дыхания 2,5 раза в минуту Zaccaro и др. (2022) выявили усиление мощности в низких частотах (особенно в тета-диапазоне) в медиальных префронтальных и задних областях, повсеместное увеличение связности в тета- и бета-диапазонах, повышение связности в тета- и высокочастотном бета-диапазонах в медиальных префронтальных и задних областях [20].

Исследователи Morelli и др. (2021), которые изучали комбинацию обычного дыхания с кратковременным апноэ, сообщают, что переход от апноэ к нормальной вентиляции сопровождался увеличением дельта-мощности и снижением альфа-мощности [4]. Hinterberger и др.,



(2019) сообщают, что при длительности дыхательного цикла 10 с достигается максимальная корреляция дыхания с медленными корковыми потенциалами [25]. Во время удлиненного выдоха при выполнении техники «брамари» наблюдались пароксизмальные гамма-волны в левой височно-теменной зоне (Vialatte, 2009) [9].

Риски ошибок. При оценке включенных в обзор публикаций было выявлено, что качество исследований варьировалось от «удовлетворительного» до «хорошего». Проблемы были связаны с отсутствием обоснования размера выборки и отсутствием подробного описания протокола эксперимента. Методологические различия и гетерогенность выявленных результатов не позволили нам выполнить метаанализ.

Обсуждение результатов

Несмотря на скудность и разрозненность данных, прослеживаются некоторые общие тенденции. Брадипноэ, которое в большинстве исследований было умеренным (2,5–10 дыхательных циклов в минуту), по сравнению с дыханием в покое, приводило к повышению спектральной мощности в альфа-диапазоне, что в целом

характерно для состояния покоя с закрытыми глазами, при отсутствии внешних раздражителей. В бета-диапазоне, в котором характерно повышение активности при когнитивной нагрузке, при произвольном брадипноэ наблюдалось снижение мощности. Данные относительно низкочастотных диапазонов (тета- и дельта-), в которых активность характерна для состояния сна или при наркозе, оказались противоречивыми. Обнаруженные в единичном исследовании пароксизмальные гамма-волны, свойственные состоянию медитации, могут быть связаны с уникальной особенностью техники «брамари», в которой удлиненный выдох сопровождается звуком.

Заключение

Полученные результаты подтверждают возможность модулировать электрическую активность головного мозга посредством произвольного снижения частоты дыхания. Однако чтобы делать убедительные выводы, требуются дальнейшие исследования с единой методологией, стандартизацией дыхательных техник и протоколов исследования.

Литература / References

1. Frolov, A.V., Ermolaeva, S.A. and Manichev, I.A. (2021), Hypoventilation yoga exercises: Effects on respiratory metabolism, *Bulletin of Rehabilitation Medicine*, vol. 20, no. 5, pp. 73–80.
2. Zhan, L., Wang, T., Li, W., Xu, Z. C., Sun, W. and Xu, E. (2010), Activation of Akt/FoxO signaling pathway contributes to induction of neuroprotection against transient global cerebral ischemia by hypoxic pre-conditioning in adult rats, *Journal of neurochemistry*, vol. 114, no. 3, pp. 897–908.
3. Fumoto, M., Sato-Suzuki, I., Seki, Y., Mohri, Y. and Arita, H. (2004), Appearance of high-frequency alpha band with disappearance of low-frequency alpha band in EEG is produced during voluntary abdominal breathing in an eyes-closed condition, *Neuroscience research*, vol. 50, no. 3, pp. 307–317.
4. Morelli, M.S., Vanello, N., Callara, A.L., Hartwig, V., Maestri, M., Bonanni, E., Emdin, M., Passino, C. and Giannoni, A. (2021), Breath-hold task induces temporal heterogeneity in electroencephalographic regional field power in healthy subjects, *Journal of applied physiology*, vol. 130, no. 2, pp. 298–307.
5. Wang, H., Liu, X.L., Wang, T., Tan, J.B. and Huang, H. (2022), Breathing Exercises for Pain Management in Cancer Survivors: A Systematic Review, *Pain management nursing: official journal of the American Society of Pain Management Nurses*, vol. S1524-9042, no. 22, p. 00215-6. Advance online publication.
6. Busek, P. and Kemlink, D. (2005), The influence of the respiratory cycle on the EEG, *Physiological research*, vol. 54, no. 3, pp. 327–333.
7. Coverdale, N.S., Gati, J.S., Opalevych, O., Perrotta, A. and Shoemaker, J.K. (2014), Cerebral blood flow velocity underestimates cerebral blood flow during modest hypercapnia and hypocapnia, *Journal of applied physiology*, vol. 117, no. 10, pp. 1090–1096.
8. Cheng, K.S., Han, R.P.S. and Lee, P.F. (2018), Neurophysiological study on the effect of various short durations of deep breathing: A randomized controlled trial, *Respiratory physiology & neurobiology*, no. 249, pp. 23–31. doi:10.1016/j.resp.2017.12.008
9. Vialatte, F.B., Bakardjian, H., Prasad, R. and Cichocki, A. (2009), EEG paroxysmal gamma waves during Bhramari Pranayama: a yoga breathing technique, *Consciousness and cognition*, vol. 18, no. 4, pp. 977–988.
10. Hopper, S.I., Murray, S.L., Ferrara, L.R. and Singleton, J.K. (2019), Effectiveness of diaphragmatic breathing for reducing physiological and psychological stress in adults: a quantitative systematic review, *JBI database of systematic reviews and implementation reports*, vol. 17, no. 9, pp. 1855–1876.
11. Stancák, A., Jr, Pfeffer, D., Hrudová, L., Sovka, P. and Dostálek, C. (1993), Electroencephalographic correlates of paced breathing, *Neuroreport*, vol. 4, no. 6, pp. 723–726.
12. Sinha, M., Sinha, R., Ghate, J. and Sarnik, G. (2020), Impact of Altered Breathing Patterns on Interaction of EEG and Heart Rate Variability, *Annals of neurosciences*, vol. 27, no. 2, pp. 67–74.
13. Tolner, E.A., Hochman, D.W., Hassinen, P., Otáhal, J., Gaily, E., Haglund, M.M., Kubová, H., Schuchmann, S., Vanhatalo, S. and Kaila, K. (2011), Five percent CO₂ is a potent, fast-acting inhalation anticonvulsant, *Epilepsia*, vol. 52, no. 1, pp. 104–114.



14. Zaccaro, A., Piarulli, A., Laurino, M., Garbella, E., Menicucci, D., Neri, B. and Gemignani, A. (2018), How Breath-Control Can Change Your Life: A Systematic Review on Psycho-Physiological Correlates of Slow Breathing, *Frontiers in human neuroscience*, vol. 12, p. 353.
15. Kontos, H.A., Richardson, D.W. and Patterson, J.L. (1968), Vasodilator effect of hypercapnic acidosis on human forearm blood vessels, *The American journal of physiology*, vol. 215, no. 6, pp. 1403–1405, doi:10.1152/ajplegacy.1968.215.6.1403
16. Komori, T. (2018), Extreme prolongation of expiration breathing: Effects on electroencephalogram and autonomic nervous function, *Mental illness*, vol. 10, no. 2, p. 7881.
17. Lee, S.H., Lee, H.J. and Park, D.S. (2021), Effects of deep and slow breathing on stress stimulation caused by high-intensity exercise in healthy adults, *Psychology, health & medicine*, vol. 26, no. 9, pp. 1079–1090.
18. Lin, I.M. (2018), Effects of a cardiorespiratory synchronization training mobile application on heart rate variability and electroencephalography in healthy adults, *International journal of psychophysiology*, no. 134, pp. 168–177.
19. Kim, S.H., Schneider, S.M., Kravitz, L., Mermier, C. and Burge, M.R. (2013), Mind-body practices for post-traumatic stress disorder, *Journal of investigative medicine*, vol. 61, no. 5, pp. 827–834.
20. Zaccaro, A., Piarulli, A., Melosini, L., Menicucci, D. and Gemignani, A. (2022) Neural Correlates of Non-ordinary States of Consciousness in Pranayama Practitioners: The Role of Slow Nasal Breathing, *Frontiers in systems neuroscience*, vol. 16, pp. 803–904.
21. Park, Y.J. and Park, Y.B. (2012), Clinical utility of paced breathing as a concentration meditation practice, *Complementary therapies in medicine*, vol. 20, no. 6, pp. 393–399.
22. Park, Y.J. (2021), Association of autonomic function and brain activity with personality traits by paced breathing and su-soku practice: A three-way crossover study, *Complementary therapies in medicine*, vol. 63, pp. 102778.
23. Al-Khazraji, B.K., Shoemaker, L.N., Gati, J.S., Szekeres, T. and Shoemaker, J.K. (2019), Reactivity of larger intracranial arteries using 7 T MRI in young adults, *Journal of cerebral blood flow and metabolism*, vol. 39, no. 7, pp. 1204–1214.
24. Hsu, S.M., Tseng, C.H., Hsieh, C.H. and Hsieh, C.W. (2020), Slow-paced inspiration regularizes alpha phase dynamics in the human brain, *Journal of neurophysiology*, vol. 123, no. 1, pp. 289–299.
25. Hinterberger, T., Walter, N., Doliwa, C. and Loew, T. (2019), The brain's resonance with breathing-decelerated breathing synchronizes heart rate and slow cortical potentials, *Journal of breath research*, vol. 13, no. 4, p. 046003.
26. Page, M.J., McKenzie, J.E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C., Mulrow, C.D., et al. (2021), The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews, *BMJ*, vol. 372, no. 71.
27. Tao, T., Liu, Y., Zhang, J., Xu, Y., Li, W. and Zhao, M. (2013), Therapeutic hypercapnia improves functional recovery and attenuates injury via antiapoptotic mechanisms in a rat focal cerebral ischemia/reperfusion model, *Brain research*, no. 1533, pp. 52–62.

