

ПАТОГЕНЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГИПЕРКАПНИЧЕСКОЙ ГИПОКСИИ ПРИ НАРУШЕНИИ КОГНИТИВНОГО РАЗВИТИЯ ДЕТЕЙ

¹Коровяковская В. В. ORCID ID 0009-0002-5064-0017,

^{1,2}Шилов С. Н. ORCID ID 0000-0001-9132-6652,

¹Черенёва Е. А. ORCID ID 0000-0002-2845-013X

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Красноярский государственный педагогический университет им. В. П. Астафьева», Красноярск, Российская Федерация, e-mail: vkorovyakovskaya@mail.ru;

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова», Абакан, Российская Федерация

Количество детей с когнитивными нарушениями, по данным статистики, достигает 30%. Поиск методов коррекции, воздействующих на звенья патогенеза когнитивных расстройств у старших дошкольников, является актуальной проблемой медицины. Целью работы явилось изучение сочетанного воздействия гиперкапнической гипоксии на звенья патогенеза когнитивных нарушений детей старшего дошкольного возраста, определение эффективности применения данного метода в отношении формирования когнитивных функций. В исследовании участвовали дошкольники (средний возраст 6,5 лет) с дефицитностью когнитивных функций: речи, памяти, внимания. Дети прошли 4-недельный курс дыхательных тренировок на аппарате «Карбоник» (Патент № 2301081). С использованием нейроэнергоскопического метода проведена оценка эффективности влияния гиперкапнической гипоксии на энергометаболизм головного мозга и его адаптацию к когнитивным нагрузкам. Оценка уровней активационных влияний на кору головного мозга изучалась по величине омега-потенциалов с использованием «Омега-тестера» (Россия). Впервые изучено сочетанное воздействие перmissive гиперкапнии и нормобарической гипоксии на генез нарушений когнитивного развития у старших дошкольников. После курса гиперкапнически-гипоксических тренировок отмечена позитивная динамика: нормализация нейроэнергоскопического обмена у 100% детей с пониженным и у 50% – с повышенным нейроэнергоскопическим обменом, оптимизация уровня активации коры у 36% детей с асимметричным активационным уровнем и у 50% детей с гипоактивацией. Выявлен нейропротекторный эффект применения гиперкапнической гипоксии, заключающийся в предотвращении энергодефицита и нормализации адаптивного ответа на когнитивную нагрузку. Установлены данные, указывающие на процессы созревания и функциональной специализации фронтальной и сенсорной коры, что создает нейрофизиологическую основу для улучшения когнитивного контроля памяти внимания и речевых процессов у старших дошкольников. Применение гиперкапнической гипоксии может рассматриваться как эффективный метод нейрокоррекции, воздействующий на звенья патогенеза нарушений когнитивного развития старших дошкольников.

Ключевые слова: когнитивный дефицит, старшие дошкольники, нейроэнергоскопический обмен, гиперкапническая гипоксия, нейропротекторный эффект.

PATHOGENETIC JUSTIFICATION FOR THE USE OF HYPERCAPNIC HYPOXIA IN CHILDHOOD COGNITIVE DEVELOPMENT DISORDERS

¹ Korovyakovskaya V. V. ORCID ID 0009-0002-5064-0017,

^{1,2}Shilov S. N. ORCID ID 0000-0001-9132-6652,

¹Chereneva E. A. ORCID ID 0000-0002-2845-013X

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V. P. Astafyev", Krasnoyarsk, Russian Federation, e-mail: vkorovyakovskaya@mail.ru;

² Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Khakass State University named after N. F. Katanov", Abakan, Russian Federation

The number of children with cognitive impairments, according to statistics, reaches 30%. The search for correction methods that influence the links of the pathogenesis of cognitive disorders in older preschoolers is a pressing issue in medicine. The aim of this study was to investigate the combined effects of hypercapnic hypoxia on the links of the pathogenesis of cognitive impairments in older preschool children and to determine the effectiveness of this method in relation to the formation of cognitive functions. The study involved preschoolers (average age 6.5 years) with deficits in cognitive functions such as speech, memory, and attention. The children

underwent a 4-week course of breathing exercises using the "Carbonik" device (Patent No. 2301081). The effectiveness of hypercapnic hypoxia's influence on the energy metabolism of the brain and its adaptation to cognitive loads was assessed using a neuroenergetic cartographer. The levels of activation effects on the cerebral cortex were evaluated based on omega potentials using the "Omega Tester" (Russia). For the first time, the combined effects of permissive hypercapnia and normobaric hypoxia on the genesis of cognitive development disorders in older preschoolers were studied. After the course of hypercapnic-hypoxic training, positive dynamics were noted: normalization of neuroenergetic exchange in 100 % of children with decreased and in 50% of children with increased neuroenergetic metabolism, optimization of cortical activation levels in 36% of children with asymmetric activation levels and in 50% of children with hypoactivation. A neuroprotective effect of hypercapnic hypoxia was identified, which consists of preventing energy deficiency and normalizing the adaptive response to cognitive load. Data indicating processes of maturation and functional specialization of the frontal and sensory cortex were established, creating a neurophysiological basis for improving cognitive control over memory, attention, and speech processes in older preschoolers. The application of hypercapnic hypoxia can be considered an effective method of neurocorrection that influences the links of the pathogenesis of cognitive development disorders in older preschoolers.

Keywords: cognitive deficit, older preschoolers, neuroenergy metabolism, hypercapnic hypoxia, neuroprotective effects.

Введение

По данным исследований последних лет, количество детей с когнитивными расстройствами достигает 30%, что обуславливает актуальность поиска методов коррекции у детей расстройств когнитивного развития с учётом их патогенеза [1]. Современные методики зачастую не учитывают специфику патогенетических механизмов мозговых дисфункций, в частности нейроэнергетический профиль ребенка и возрастные особенности нейронной пластичности головного мозга [2]. Необходимы дифференцированные подходы нейрокоррекции, основанные на последних достижениях в области физиологии головного мозга и патогенеза когнитивных нарушений.

Одним из методов с нейропротекторным эффектом является дыхательная тренировка с гиперкапнической гипоксией (ГГТ) [3-5]. Такое воздействие улучшает микроциркуляцию и метаболизм головного мозга, усиливая синаптогенез и рост митохондриальной массы, уменьшая неврологические повреждения [3; 6]. Сочетание пермиссивной гиперкапнии и нормобарической гипоксии оказывает максимальный нейропротекторный эффект и может влиять на патогенетические звенья когнитивного дизонтогенеза [3; 4]. В клиническом применении прибора «Карбоник» (Куликов В. П., 2005, РФ) установлена эффективность ГГТ в лечении ишемического инсульта, невращения у взрослых, синдрома дефицита внимания и других расстройств нервно-психического развития у детей [7; 8]. Применение данного метода в коррекционной работе у детей с дефицитом когнитивных функций не исследовано. Поэтому важно понимание того, на какие звенья патогенеза когнитивных дефицитов у старших дошкольников такие тренировки смогут воздействовать.

Цель: изучение воздействия гиперкапнической гипоксии на звенья патогенеза когнитивных нарушений в развитии детей старшего дошкольного возраста, определение эффективности применения данного метода в отношении формирования когнитивных функций.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено на базе коррекционных образовательных учреждений Республики Хакасия и г. Красноярска, сопоставимых по условиям организации и содержанию коррекционных мероприятий. Этические нормы соблюдены, получено письменное информированное согласие родителей. Предварительно проведён анализ медицинских карт и осмотр педиатра. В исследовании приняли участие дети (средний возраст 6,5 лет) с нарушениями когнитивного развития, подтверждёнными заключением психолого-медико-педагогической комиссии (ПМПК). Перед исследованием было проведено нейропсихологическое обследование с использованием адаптированной экспресс-диагностики устной речи Т. А. Фотековой (2000) и методики «Диакор» Н. К. Корсаковой (2001) для старшего дошкольного возраста. Выборку составили 42 ребёнка без учёта половой принадлежности. Критерием включения являлось наличие у детей общего недоразвития речи II уровня (классификация Р. Е. Левиной), умеренного снижения памяти и внимания. Критерием исключения из выборки служило наличие документально подтверждённых нарушений сенсорного, психического и интеллектуального развития (умственная отсталость), выявленные противопоказания для проведения ГГТ. Методом случайной выборки дети были разделены на две группы: экспериментальную (21 человек) и контрольную (21 человек).

В ходе эксперимента для определения уровня нейроэнергометаболизма (НЭМ) в состоянии спокойного бодрствования до и после курса ГГТ дети были обследованы на программно-аппаратном комплексе «Нейроэнергокартограф-5» (НЭК). Регистрация сверхмедленных биопотенциалов осуществлялась хлорсеребряными неполяризуемыми чашечковыми электродами с контактными тампонами, смоченными в 30% гипертоническом растворе хлорида натрия. Активные электроды располагались на голове по схеме (10-20) вдоль сагиттальной линии фронтальной, теменной и затылочной областей, а также в правой и левой височных областях. Референтный электрод размещался на тыльной поверхности запястья левой руки исследуемого. В процессе исследования осуществлялся непрерывный контроль значений кожного сопротивления (<30 кОм). Оценка НЭМ проводилась путём регистрации уровня постоянных потенциалов (УПП) и сравнения полученных показателей с эталоном. Эталон – это показания нейроэнергообмена, заложенные в программное обеспечение нейроэнергокартографа, имеющие гендерные и возрастные корреляции и расценивающиеся как норма [9; 10]. При этом значение УПП должно находиться в пределах одного среднеквадратического отклонения (σ) от средней нормативной величины. Увеличение УПП указывает на повышенную интенсивность энергообменных процессов, что соответствует начальной стадии окислительного стресса, нарушению мозгового кровоснабжения. Депрессия УПП служит маркером снижения функциональной активности головного мозга (ГМ) [10].

Для оценки механизмов адаптации регистрировались УПП во время проведения проб с когнитивной нагрузкой. Дети выполняли задания, направленные на активацию речи, памяти, внимания [11]. Словесная проба проводилась с использованием метода «Называние предметов и действий» из пособия Л. С. Цветковой (2024). В мнестической пробе применялась методика с картинками «10 слов» А. Р. Лурии (2021). Проба на внимание выполнялась с помощью взаимодополняющих методик «Запомни и найди» А. А. Бернштейна (2019) и «Запомни рисунки» В. А. Немова (2025). УПП регистрировались через 2,5 минуты от начала каждой пробы и в построгогрузочном периоде между пробами в течение 5 минут. Оценивалась степень восстановления УПП до первоначальных показателей.

С целью выявления динамических изменений активации моделирующей системы в исследовании применялся метод омегаметрии в отведениях вертекс-тенар с использованием комплекса «Омега-тестер» и самоклеящихся хлорсеребряных электродов [3]. Постоянные потенциалы (ПП), регистрируемые с поверхности головы в проекциях дорсолатеральной префронтальной коры правого и левого полушарий (каналы K1 и K2), являются универсальными показателями уровней активационных влияний подкорковыми структурами. Известны четыре уровня активации (УА). I, II, III уровни характеризуются тем, что величина омега-потенциалов по каналам K1 и K2 варьируется в пределах 20 мВ. Для асимметричного IV УА характерна вариативность ПП в интервалах, превышающих 20 мВ.

В течение 4 недель дети обеих групп посещали логопедические занятия 3 раза в неделю, и в экспериментальной группе ежедневно проводились дыхательные ГГТ на тренажёре «Карбоник» [12] с концентрацией O_2 13,3%, CO_2 6,4%. Тренировки проходили в амбулаторном режиме (ежедневно, кроме выходных) под контролем медицинского работника и включали два подхода по 7 минут с 3-минутным перерывом. При увеличении артериального давления более чем на 20% ($>150/100$ мм рт. ст.) и ЧСС более 30% (>110 уд./мин.), при изменении цвета кожных покровов, появлении жалоб на головную боль, головокружение - время тренировки сокращалось. В первую неделю продолжительность тренировки начиналась с 1 минуты и увеличивалась с учётом индивидуальных особенностей детей. К концу первой недели все дети достигли необходимой продолжительности дыхания через аппарат.

Для первичной обработки и статистического анализа данных использованы программы Excel, Python и SPSS. Объём выборки позволил провести корреляционный анализ биофизиологических показателей активности ГМ со статистической значимостью $p < 0,01$. Для каждой корреляции вычисляли Z-преобразование Фишера. Критические значения для $p < 0,05$ $Z_{crit}=1,96$; для $p < 0,01$ $Z_{crit}=2,58$. Критерий Макнемара применяли для сравнения двух зависимых выборок до и после ГГТ, различия считались статистически значимыми при $\chi^2 > 3,84$ ($p < 0,05$).

Результаты исследования и их обсуждение

Известно, что оптимальное развитие и функционирование структур ГМ возможно лишь при сбалансированных процессах НЭМ [9; 10]. По результатам НЭК в группах обследованных детей выявлена вариативность уровней НЭМ (табл.).

Распределение старших дошкольников с дефицитом когнитивных функций по уровням усреднённого УПП (Хср) до и после курса ГГТ в состоянии спокойного бодрствования

Показатель	Экспериментальная группа (n=21), %		Контрольная группа (n=21), %	
	до ГГТ	после ГГТ	до ГГТ	без ГГТ
Уровень Хср (мВ)				
Пониженный (<4,52)	43	0*	38	38
нормальный (4,5-16,9)	29	**86*	33	29
повышенный (>16,9)	29	14	29	33

Примечание. Здесь и далее до ГГТ – уровень Хср до начала курса дыхательных ГГТ; после ГГТ – через 4 недели применения ГГТ; без ГГТ – через 4 недели от начала исследования без применения ГГТ. * χ^2 Макнемар=7,58; $p<0,01$. ** Критерий χ^2 Пирсона для независимых выборок ($\chi^2=19,74$; $df=2$; $p<0,0001$). Составлено авторами по результатам данного исследования.

До курса ГГТ доля детей с пониженным и повышенным усреднённым УПП (Хср) составляла более 70%. По окончании курса ГГТ доля детей экспериментальной группы с оптимальным уровнем НЭМ увеличилась на 57%. Максимальный нормализующий эффект на процессы НЭМ гиперкапническая гипоксия (ГГ) оказала на детей с депрессией НЭМ, вероятно, за счёт усиления синаптогенеза и роста митохондриальной массы, установленных в различных исследованиях [3; 6]. Изменения НЭМ через 4 недели в контрольной группе не продемонстрировали статистически значимых различий ($p>0,05$).

Корреляционный анализ показателей нейроэнергетического картирования (УПП) у детей старшего дошкольного возраста с нарушениями когнитивного развития, проведенный до и после курса ГГТ, выявил статистически значимые изменения в структуре межзональных взаимосвязей (рис. 1).

По мере взросления ребенка наблюдается ослабление связей между префронтальной и теменной корой, сопровождающееся усилением взаимодействий между теменной, затылочной и височной областями [13-15]. У обследованных детей до ГГТ выявлено значительное количество сильных корреляций между показателями УПП, включая жесткие связи ($r>0,9$), что указывало на ригидную пластичность структуры межзональных взаимодействий (рис. 1).

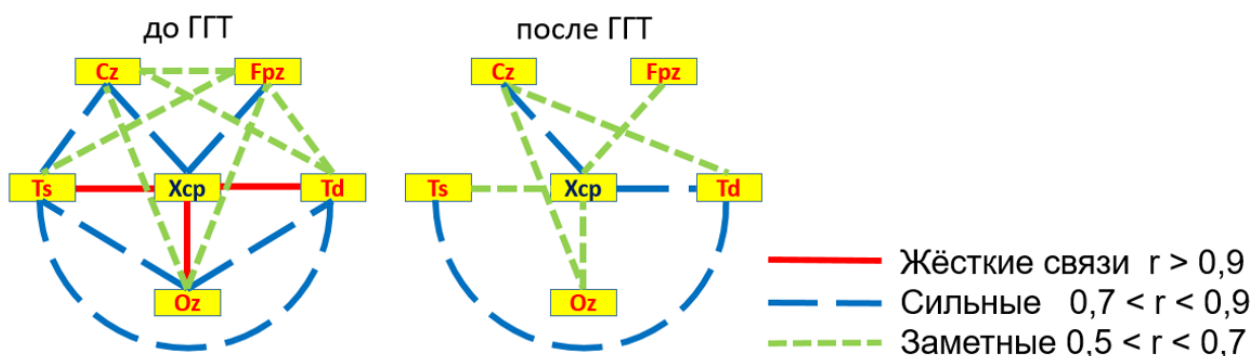


Рис. 1. Сравнительная схема распределения основных корреляционных связей по результатам нейроэнергокартирования детей старшего дошкольного возраста с когнитивными дисфункциями до и после курса ГГТ

Примечание: Fpz - лобное отведение, Cz - центральное, Oz - затылочное, Td - правое височное, Ts - левое височное отведение. Значимые коэффициенты $r \geq 0,501$ ($p < 0,001$). Составлено авторами по результатам данного исследования.

Значительное усиление связей левовисочных отделов с другими областями ГМ (рис. 1) могло быть маркером недостаточной их дифференциации [15; 16]. Значимые корреляционные связи фронтальной коры (Fpz) со всеми исследованными областями головного мозга свидетельствовали об избыточной интеграции лобных отделов в общий паттерн межзональных взаимодействий. Это могло отражать недостаточную автономность префронтальной коры, необходимую для реализации избирательного контроля когнитивных процессов. Корреляционные связи между Хср и теменно-затылочными областями (для пар Хср-Oz $r=0,914$ и Хср-Cz $r=0,814$) свидетельствовали о том, что изменения энергообмена головного мозга могли влиять на функциональную активность сенсомоторной коры, ответственной за обработку сенсорной информации и праксис, включая речевой. Выявление жёсткой прямой корреляционной связи между Хср и височными областями ($r=0,96$; $p < 0,001$) могло указывать на то, что снижение энергометаболизма головного мозга приводило к уменьшению нейронной активности полисенсорных таламо-темпоральных путей, участвующих в процессах вербальной памяти и речи.

После курса ГГТ у детей с нарушениями когнитивного развития наблюдалась трансформация корреляционной структуры УПП. Среднее значение коэффициента корреляции Спирмена снизилось с 0,91 до 0,68, количество сильных связей ($r > 0,7$) уменьшилось на 55%. Жёсткие коэффициенты корреляции не выявлены. Наиболее значительные изменения зафиксированы для пар Oz-Ts (r снизился с 0,88 до -0,31, $Z=5,01$; $p < 0,001$), Oz-Td (с 0,86 до -0,08, $Z=4,10$; $p < 0,001$) и Ts-Хср (с 0,96 до 0,61, $Z=3,27$; $p < 0,001$). Смена знака коэффициента корреляции указывала на появление функциональной антагонистичности между затылочной и височными зонами и снижение избыточной

интеграции височных отделов с общим паттерном. Связь УПП лобного отведения со средним значением НЭМ снизила статистическую значимость (p снизился с 0,88 до 0,55, $p=0,05$), что свидетельствовало о повышении автономности префронтальной коры. Авторы расценивали это как улучшение нисходящего контроля активации и переход от генерализованной к селективной работе префронтальной коры. Центральное отведение сохранило высокую корреляцию с $X_{ср}$ ($p=0,79$, $p=0,001$), выполняя роль стабильного интегратора нейроэнергетических процессов.

Сильные коэффициенты корреляции между $X_{ср}$ и T_d ($p \leq 0,72$) могли указывать на прямую зависимость уровня НЭМ от активности правовисочных структур, ответственных за адаптационные возможности ГМ [10; 13].

Известно, что адекватная реакция на функциональную нагрузку (когнитивную или эмоциональную) характеризуется временной экспрессией показателей УПП в 1,3–1,9 раза с их последующим восстановлением до исходного уровня [10]. В ходе данного исследования было установлено, что под воздействием когнитивной нагрузки значения УПП обследованных детей менялись по-разному. Поэтому старшие дошкольники были разделены на две подгруппы в зависимости от величины $X_{ср}$ (больше или меньше 10 мВ): группа «А» - с низким $X_{ср}$ и группа «В» - с высоким $X_{ср}$ [9; 10]. В контрольной группе детей не было достоверно значимых изменений $X_{ср}$. У детей экспериментальной группы между подгруппами были выявлены существенные различия. Результаты НЭЖ во время проведения проб с когнитивной нагрузкой и в период восстановления в исследуемых группах до и после ГГТ представлены на рисунке 2.

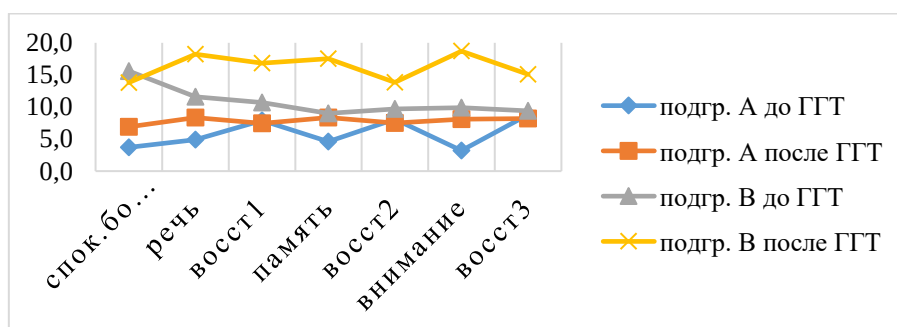


Рис. 2. Профиль уровня НЭМ во время проведения когнитивных проб и в периоды восстановления у старших дошкольников с дефицитом когнитивного развития экспериментальной группы до и после курса ГГТ (мВ).

Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

До ГГТ у детей подгруппы «А» во время проведения когнитивных проб наблюдалась экспрессия уровня НЭМ более чем в 2,4 раза, причём наибольшие пики интенсивности энергообмена приходились на период восстановления после нагрузки (рис. 2). Такое

распределение энергозатрат характерно для постнагрузочного энергодефицита [17]. У детей группы «В» наблюдалось постепенное снижение НЭМ (в 1,7 раза), это свойственно для состояния энергетического истощения [2; 17].

После курса ГГТ в обеих подгруппах наблюдалось изменение механизмов реагирования на нагрузку (рис. 2). В подгруппе «А» (исходная депрессия нейрометаболизма) установлено повышение среднего уровня НЭМ во время проб менее чем на 2 мВ и снижение - в постнагрузочный период до первоначальных значений. Данный паттерн соответствовал адекватному типу адаптационной реакции. Оптимальный уровень активного бодрствования и высокая устойчивость к утомлению, вероятно, стали следствием нейропротекторного эффекта ГГТ [9; 10; 17]. В подгруппе «В» (исходная экспрессия нейрометаболизма) на фоне нормализации уровня НЭМ отмечалось повышение УПП в ответ на когнитивную нагрузку более чем на 4,4 мВ с последующим снижением до исходных значений в период восстановления. Такой тип реагирования на функциональную нагрузку расценивался как гиперадаптивный и мог рассматриваться как этап в механизме восстановления адекватных адаптивных реакций.

Развитие сложных психических функций, таких как произвольное внимание, различные виды памяти, речевой праксис, а также программирование речевого высказывания, зависит не только от энергетического баланса мозговых систем, но и от адекватного уровня активации (УА) коры головного мозга подкорковыми структурами. Для нормального когнитивного развития оптимальным считается II уровень. С психофизиологической точки зрения дети с таким УА отличаются высокой устойчивостью к утомлению, легкостью переключения внимания, хорошей оперативной и долгосрочной памятью и сбалансированным межполушарным взаимодействием. До курса ГГТ II УА регистрировался не более чем у 10% детей в обеих группах, а доминировал IV дезорганизованный уровень (до 66%) (рис. 3).

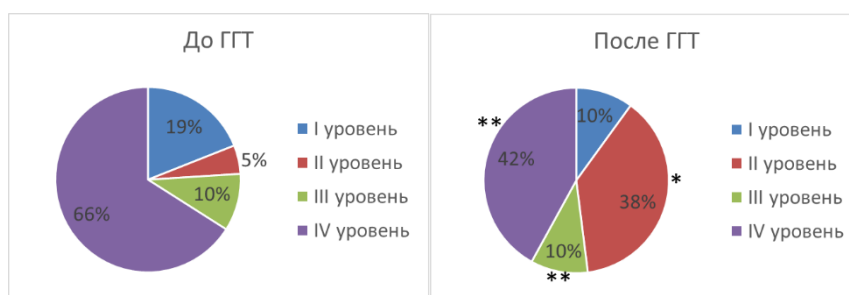


Рис. 3. Распределение старших дошкольников с нарушениями когнитивного развития экспериментальной группы по уровням активации (УА) до и после ГГТ (n=21)

Примечание: I уровень - значения K1 и K2 в пределах от 0 до 20 мВ; II уровень - от 21 до 40 мВ; III уровень - от 41 до 60 мВ; IV уровень – значения K1 и K2 на разных уровнях. * - ϕ эмп $\geq 0,3$ - сильная связь (по Cohen, 1988). ** - χ^2 - критерий Макнемара $> 3,84$, $p < 0,05$. Составлено авторами по результатам данного исследования.

Следует отметить, что у большинства детей с IV уровнем активации (УА) до начала курса ГГТ регистрировалось умеренное снижение биоэлектрической активности левого полушария ($K1$ менее 10 мВ), что коррелировало с наблюдаемыми у данной группы нарушениями вербальных процессов, снижением внимания и памяти.

После курса ГГТ при сравнении параметров ПП у детей экспериментальной группы, в отличие от детей контрольной группы, выявлены достоверные различия по распределению II уровня активации. Сила корреляционной связи оценивалась по коэффициенту ϕ , при этом значимой считалась связь при $\phi \geq 0,3$. Рост доли детей с II уровнем активации обусловлен воздействием ГГ (ϕ эмп. 0,30). Количество детей с гипоактивационным (I УА) и асимметричным уровнями уменьшилось до 10% и 42% соответственно. «Переход» детей из I и IV уровней во II имеет высокую статистическую значимость (рис. 3).

До и после коррекционного курса ГГТ была проведена оценка когнитивных функций детей. По данным χ^2 -анализа, за 4 недели ГГТ у детей экспериментальной группы достоверно улучшились когнитивные функции с уровня ниже среднего до среднего и высокого (в среднем на 28%): структурно-языковые показатели речи (на 38%), память (на 30,4%), внимание (на 18%) по сравнению с контрольной группой, где значимых изменений не выявлено ($p > 0,05$).

В результате проведённого исследования впервые было изучено воздействие ГГ на патогенетические звенья нарушений когнитивного развития у детей старшего дошкольного возраста. Так, была установлена нормализация нейроэнергообменных процессов и адаптационных механизмов ГМ. При этом максимальный эффект (100%) наблюдался у детей с первоначальной депрессией НЭМ. Авторы это связывали с нейропротекторным эффектом воздействия ГГ, заключающимся в росте митохондриальной массы и активации синаптогенеза [3; 6]. В то же время у детей с экспрессией НЭМ и проявлениями окислительного стресса в результате нарушения мозговой гемодинамики данный эффект проявился в меньшей степени (на 50%). Вероятно, продолжительность четырёхнедельного курса ГГТ была недостаточна для развития ангиогенеза и сопряжённого с ним увеличения плотности микрососудистого русла для обеспечения устойчивого улучшения мозгового кровообращения у данной группы детей.

Стимулирующее влияние гиперкапнической гипоксии на ГМ [4; 5] способствовало повышению функциональной активности корково-таламо-ретикулярной системы и адекватности её модулирующего влияния на активность коры, являющихся важными факторами патогенеза когнитивных нарушений. У 36% детей с асимметричным активационным уровнем и у 50% детей с гипоактивацией под воздействием ГГ уровень активации коры подкорковыми системами достиг оптимальных значений для нормального когнитивного развития.

Нейропластический эффект воздействия ГГ, рост синаптогенеза способствовали образованию новых корково-корковых и корково-подкорковых ассоциативных связей. Перестройка структуры корреляционных связей между областями мозга: ослабление дальних связей фронтальной коры с другими областями, появление антагонистических отношений между затылочными и височными зонами, ослабление взаимосвязи левовисочной коры с общемозговым уровнем НЭМ, может рассматриваться как нейрофизиологический коррелят функционального созревания фронтальной и сенсорной коры ГМ [13; 18]. Полученные изменения авторами интерпретировались как переход от патологически генерализованной к более дифференцированной организации корковых взаимодействий.

Заключение

Количественный анализ эффективности применения гиперкапнической гипоксии продемонстрировал положительное воздействие на ряд патогенетических механизмов нарушений когнитивного развития старших дошкольников. Нормализованы нейроэнергетические параметры и оптимизирован уровень активации коры головного мозга, что способствовало нормальному когнитивному развитию. Установлен максимальный позитивный эффект ГГ на механизмы адаптации к когнитивным нагрузкам у детей с депрессивным уровнем нейроэнергометаболизма и постнагрузочным энергодефицитом. У детей с изначально высоким экспрессивным уровнем нейроэнергометаболизма и энергетическим истощением положительная динамика была в два раза меньше. Выявлены данные, указывающие на процессы созревания и функциональной специализации фронтальной и сенсорной коры, что создало нейрофизиологическую основу для улучшения когнитивного контроля памяти, внимания и речевых процессов у старших дошкольников с когнитивными нарушениями. Полученные результаты подтверждают патогенетическую обоснованность применения гиперкапнической гипоксии как метода, воздействующего на механизмы когнитивных нарушений у старших дошкольников. Перспективным направлением дальнейших исследований является проведение лонгитюдных наблюдений для установления сохранности полученных эффектов.

Список литературы

1. Каркашадзе Г. А., Гогберашвили Т. Ю., Константиныди Т. А., Кайтукова Е. В., Вишнева Е. А., Солошенко М. А., Сергеева Н. С., Эфендиева К. Е., Устинова Н. В., Пашков А. В., Комарова Е. В., Драпкина О. М., Шепель Р. Н., Межидов К. С., Намазова-Баранова Л. С. Одномоментное популяционное исследование распространенности легких когнитивных нарушений у детей среднего школьного возраста // Вестник РАМН. 2023. № 4.

С. 329-347. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/odnomomentnoe-populyatsionnoe-issledovanie-rasprostranennosti-legkih-kognitivnyh-narusheniy-u-detey-srednego-shkolnogo-vozrasta> (дата обращения: 16.07.2026).

2. Krivoshchapova M. N., Ilyukhina V. A. Age-related specificity of the frontal and temporoparietal cortex activation levels in three-to seven-year-old children // *Human Physiology*. 2006. Т. 32. № 1. С. 47-58. DOI: 10.1134/S0362119706010075.

3. Куликов В. П., Трегуб П. П., Беспалов А. Г., Введенский А. Ю. Сравнительная эффективность гипоксии, гиперкапнии и гиперкапнической гипоксии в увеличении резистентности организма к острой гипоксии в эксперименте // *Патологическая физиология и экспериментальная терапия*. 2013. № 3. С. 59-61. URL: <https://pfiet.ru/article/view/5311> (дата обращения: 16.06.2026).

4. Li Y., Wang Y. Effects of long-term exposure to high altitude hypoxia on cognitive function and its mechanism: a narrative review // *Brain sciences*. 2022. Т. 12. № 6. С. 808. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3425/12/6/808> (дата обращения: 16.06.2026).

5. Li C. et al. The neuroprotective effects of normobaric oxygen therapy after stroke // *CNS Neuroscience & Therapeutics*. 2024. Т. 30. № 7. С. e14858. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/cns.14858> (дата обращения: 16.06.2026).

6. Tregub P. P. et al. Molecular mechanisms of neuroprotection after the intermittent exposures of hypercapnic hypoxia // *International journal of molecular sciences*. 2024. Т. 25. № 7. С. 3665. URL: <https://www.mdpi.com/1422-0067/25/7/3665> (дата обращения: 16.06.2026).

7. Старцев А. А., Кулишова Т. В., Шумахер Г. И. Возможности сочетанного влияния гиперкапнической гипоксии в комплексной терапии детей с синдромом дефицита внимания и гиперактивности по данным непосредственных и отдаленных результатов исследования // *Вестник физиотерапии и курортологии*. 2021. Т. 27. № 3. С. 60-66. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-sochetannogo-vliyaniya-giperkapnicheskoy-gipoksii-v-kompleksnoy-terapii-detey-s-sindromom-defitsita-vnimanija-i> (дата обращения: 10.06.2026).

8. Kulikov V., Tregub P., Parshin D., Smirnova Y., Smirnov K. Hypercapnic hypoxia improves cognitive and motor functions of children with cerebral palsy // *Neurological Research*. 2022. Т. 44. № 8. С. 738-747. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01616412.2022.2051130> (дата обращения: 16.06.2026).

9. Грибанов А. В., Аникина Н. Ю., Гудков А. Б. Церебральный энергообмен как маркер адаптивных реакций человека в природно-климатических условиях Арктической зоны Российской Федерации // *Экология человека*. 2018. Т. 25. № 8. С. 32-40. DOI: 10.33396/1728-0869-2018-8-32-40.

10. Фокин В. Ф., Пономарева Н. В., Коновалов Р. Н., Медведев Р. Б., Лагода О. В., Кротенкова М. В., Танащян М. М. Влияние связанной с изменением уровня постоянного потенциала нейросети на мнестические процессы больных хронической ишемией мозга // Асимметрия. 2023. Т. 17. № 2. С. 25-31. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_54025381_13670480.pdf (дата обращения: 16.06.2026).
11. Немкова С. А., Болдырев В. Г. Когнитивные нарушения у детей: современные подходы к диагностике и коррекции // Нервные болезни. 2025. № 1. С. 61-72. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kognitivnye-narusheniya-u-detey-sovremennyye-podhody-k-diaagnostike-i-korreksii> (дата обращения: 10.06.2026).
12. Куликов В. П., Якушев Н. Н. Устройство для создания гипоксической гиперкапнии // Патент № 2301081. Правообладатель: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-производственная компания "КАРБОНИК" (RU): Дата подачи заявки: 22.04.2005. Дата публикации патента: 20.06.2007.
13. Shine J. M. et al. The impact of the human thalamus on brain-wide information processing // Nature Reviews Neuroscience. 2023. Т. 24. № 7. С. 416-430. URL: <https://www.nature.com/articles/s41583-023-00701-0>(дата обращения: 06.06.2026).
14. Duma G. M. et al. Resting state network dynamic reconfiguration and neuropsychological functioning in temporal lobe epilepsy: An HD-EEG investigation // Cortex. 2022. Т. 157. С. 1-13. DOI: 10.1016/j.cortex.2022.08.010.
15. Park S. et al. A shifting role of thalamocortical connectivity in the emergence of cortical functional organization // Nature Neuroscience. 2024. Т. 27. № 8. С. 1609-1619. DOI: 10.1038/s41593-024-01679-3.
16. Lan Z. et al. Neurometabolic network (NMetNet) for functional neurological disorder in children and adolescents // Neuroimage: Clinical. 2025. Т. 46. С. 103767. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213158225000373> (дата обращения: 16.06.2026).
17. Герасимова А. А., Криволапчук И. А., Бондарева С. А. Анаэробная работоспособность и функциональное состояние детей 6-7 лет при напряженной когнитивной нагрузке // Наука без границ. 2018. № 9 (26). С. 38-43. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/anaerobnaya-rabotosposobnost-i-funktsionalnoe-sostoyanie-detey-6-7-let-pri-napryazhennoy-kognitivnoy-nagruzke> (дата обращения: 08.06.2026).
18. Chai X. J., Ofen N., Gabrieli J. D. E., Whitfield-Gabrieli S. Selective development of anticorrelated networks in the intrinsic functional organization of the human brain // Journal of cognitive neuroscience. 2014. № 26 (3). P. 501-513. DOI: 10.1162/jocn_a_00517.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.