УДК 37.013.77

ФРАКТАЛЬНЫЙ ИНДЕКС СПЕКТРА ФЛУКТУАЦИЙ КАРДИОИНТЕРВАЛОВ КАК МЕРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ УСПЕШНОСТИ СТАРШИХ ДОШКОЛЬНИКОВ

Каменская В.Г.[1], Томанов Л.В.[1]

ГОУ ВПО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина», Елец, e-mail: kamenskaya-v@mail.ru

Предметом исследований на взрослых является связь конкретных параметров нелинейной стохастической кардиоинтервалометрии (НСК) и результатов когнитивной и физической деятельности, а также состояния здоровья. Эти вопросы практически не поставлены на детских выборках, что определяет актуальность данной работы. Цель исследования – изучение соотношения результатов направленного ассоциативного эксперимента как контролируемого варианта интеллектуальной деятельности и основных параметров НСК старших дошкольников. Предполагается, что интеллектуальная нагрузка изменяют параметры НСК и определяет специфику корреляций этих параметров с эффективностью вербальной деятельности, осуществляемой в различных психоэмоциональных условиях по сравнению с той, которая была в фоновом состоянии. Дети (51 ребенок в возрасте 6-7 лет) принимали участие в психофизиологическом эксперименте, в рамках которого направленная вербальная деятельность выполнялась с одновременной регистрацией ЭКГ и ее обработкой методом быстрого Фурье-преобразования. Сопоставлялись параметры НСК и результаты интеллектуальной деятельности в трех условиях: в нейтральных безоценочных условиях, в ситуации положительного подкрепления успешных реакций и в условиях негативной оценки ошибок направленного ассоциативного эксперимента. Установлено, что независимо от условий эксперимента результаты ассоциативного эксперимента дошкольников тесто взаимосвязаны с фрактальным индексом сверхнизкочастотного диапазона спектра мощности флуктуаций кардиоинтервалов.

Ключевые слова: нелинейная стохастическая кардиоинтервалометрия (НСК), спектр мощности флуктуаций кардиоинтервалометрии, фрактальный индекс, направленный ассоциативный эксперимент, дошкольники.

FRACTAL INDEX OF THE FLUCTUATION SPECTRUM OF CARDIOINTERVALS AS A MEASURE OF INTELLECTUAL SUCCESS IN SENIOR PRESCHOOLERS

Kamenskaya V.G.[1], Tomanov L.V.[1]

Yelets Bunin State University, Yelets, e-mail: kamenskaya-v@mail.ru

The research subject in adult population is association between specific parameters of nonlinear stochastic cardiointervalometry (NSC) and results of cognitive and physical activity including health condition. There are practically no investigations in child samples. The relevance of a given research is therefore emphasized. The research objective is a correlation study of the directional associative experiment findings as a controlled form of intellectual activity and basic NSC parameters of senior preschoolers. Mental work load is suggested to change NSC parameters and determine their correlation specificity with the efficacy of verbal activity in various psychoemotional conditions as compared to that in a background state. Children aged 6-7 years (n=51) participated in a psychophysiological experiment where verbal task performance was accompanied by electrocardiogram record and its processing with a fast Fourier transformation method. NSC parameters and results of intellectual activity were compared in three conditions: in neutral non-evaluative ones; in situations with a positive reward of successful answers and in conditions of negative assessment of associative test mistakes. It is estimated that independent of experimental conditions, preschoolers' results in associative experiment are interrelated with a fractal index of the ultra-low-frequency range of the power spectrum of cardiointerval fluctuations.

Keywords: nonlinear stochastic cardiointervalometry (NSC), power spectrum of cardiointervalometry fluctuations, fractal index, directional associative experiment, preschoolers.

Хорошо известна различная интеллектуальная успешность, характеризующая как взрослых, так и подростков. Тестология разработала достаточное число способов дифференциальной оценки интеллектуальной эффективности [1]. Широкое признание получили такие стандартизированные тесты, как тест прогрессивных матриц Дж. Равена, многошкальный тест Д. Векслера, которые четко распределяют испытуемых по

определенным стратам в зависимости от успешности решения тестовых задач. Такие же дифференциальные различия показаны и на детских выборках, причем только у детей дошкольного и младшего школьного возраста при существенном снижении показателей выполнения тестов имеется психолого-педагогическая возможность компенсации интеллектуального снижения, что свидетельствует о высокой пластичности детской психики.

Существенно меньше известно о причинах дифференциальных различий в интеллектуальном развитии. По сей день не утихают споры относительно роли генетических и средовых факторов, определяющих разницу в уровне интеллектуальных ресурсов. Высказывается представление о том, что в детском возрасте под влиянием направленного средового воздействия может происходит экспрессия генов по механизму генотип-средового взаимодействия, ускоряющая интеллектуальное развитие и формирующая более выраженные интеллектуальные способности [7; 8].

Важнейшим в процессе развития интеллекта является уровень адаптационного ресурса, способность его мобилизации и восстановления. В системе адаптационного ресурса интеллекту принадлежит иерархически закрепленная роль [3]. Другими словами, интеллект способен управлять поведением, тем самым модулировать затраты и восстановление адаптационного ресурса. В настоящее время разработаны и апробированы методы оценки не только психометрического интеллекта, но и способы измерения адаптационного ресурса. Традиционно в большинстве экспериментальных работ для экспресс-оценки адаптационного ресурса используется метод анализа вариаций сердечного ритма по Р.М. Баевскому [1].

На рубеже 90-х годов был предложен инновационный способ анализа вариаций сердечного ритма на основе системы представлений и математического аппарата нелинейной стохастической динамики и теории фракталов [7]. Основной массив результатов внедрения этого подхода был собран на клинических выборках взрослых, который тем не менее позволил конкретизировать и обосновать модель нелинейной стохастической кардиоинтервалометрии (НСК). В исследованиях на детских выборках была установлена различная сенситивность основных параметров НСК к изменению состояния испытуемых в переходах от активного бодрствования (фон) к вербальной деятельности в разных по напряженности и знаку эмоциональных состояниях. Обнаружены факты, свидетельствующие о затратах адаптационных ресурсов и снижении их качества, ухудшении динамики регуляторных процессов в ситуации вербальной деятельности, типичных для детских групп. Вместе с тем была подтверждена и на детских выборках как высокая вариативность результатов выполнения тестовых заданий, так и параметров НСК [6]. Кроме этого, остается не ясной связь конкретных параметров НСК и результативности интеллектуальной деятельности, что определяет актуальность данной работы. Цель исследования – изучение

соотношения основных параметров НСК с результативностью интеллектуальной деятельности старших дошкольников. Предполагается, что интеллектуальная нагрузка влияет на параметры НСК и определяет специфику корреляций этих параметров с эффективностью вербальной деятельности, осуществляемой в различных психоэмоциональных условиях по сравнению с той, которая была в фоновом состоянии.

Методика

Дошкольники проходили тестирование как невербального и общего интеллекта с помощью теста цветных прогрессивных матриц Дж. Равена, так и вербально-понятийного мышления в модели направленного ассоциативного эксперимента, выполнение которого сопровождалось кардиорегистрацией. В последнем случае участники (51 ребенок в возрасте 6-7 лет) последовательно проходили тестирование в трех следующих друг за другом сериях направленного ассоциативного эксперимента (АЭ), разработанного Каменской В.Г. и Зверевой С.В., показавшего свою надежность и валидность на старших дошкольниках [4]. В процессе интеллектуальной деятельности серии АЭ различались по эмоциональному фону и его напряженности. В первой серии тестирование проводилось в условиях нейтрального эмоционального фона, ребенок играл в речевую игру (отвечал на стимульные слова противоположным по смыслу словом, т.е. антонимичным образом) без оценок со стороны экспериментатора (АЭ фон). Во второй серии (АЭ+) создавалась положительная мотивация успешной речевой игры, так как за каждые правильные 5 ответов ребенок получал награду в виде конфеты. Третья серия была максимально стрессогенна для ребенка, его штрафовали за пять ошибок, убирая одну конфету из тех, которые он получил во второй серии. Эта серия получила название отрицательного ассоциативного эксперимента (АЭ-). Каждая серия длилась одинаковое время, равное 5 минутам. Весь эксперимент занимал 20 минут, что, безусловно, представляло трудность для дошкольника из-за необходимости не только интеллектуально трудиться, но и сидеть неподвижно с электродами на запястьях рук.

Списки слов в трех сериях были разные, но сбалансированные по частям речи. Каждый список состоял из 54 слов, глаголы, существительные и прилагательные были представлены в равных долях (по 16 лексем), 6 слов – наречия. Все слова были взяты из частеречного словаря детской речи. Существовал дополнительный список из 20 слов, который использовался в тех случаях, когда ребенок выполнял тест быстро и менее чем за 5 минут.

Правильными словесными реакциями считались антонимы той же части речи, что и слово-стимул.

Регистрация ЭКГ проводилась в 1 стандартном отведении; при выделении кардиоинтервалов использовалась процедура аналогово-цифрового преобразования ЭКГ по методу быстрого преобразования Фурье с частотой квантования 500 Гц. Для компьютерного

расчета параметров НСК использовался пакет авторских программ (©Урицкий В.М., 2003). Результатом этих преобразований является спектр мощности флуктуации RR-интервалов, построенный в логарифмической шкале в широкой полосе частот (0,004–0,4 Гц). Исходные параметры НСК рассчитывались по 5-минутным записям ЭКГ, регистрация которых проводилась в состоянии покоя (без физических и когнитивных нагрузок - фоновая запись) и в процессе активной вербальной деятельности.

Стандартные параметры анализа флуктуации кардиоинтервалов, такие как среднеквадратичное отклонение (СО), парциальные значения спектральной мощности S-LF и S-HF, отражающие активность симпатоадреналового и парасимпатического звеньев вегетативной нервной системы (ВНС), рассчитывались по общепринятым методикам [9]. Измерение активности ЦНС (S-ULF) проводилось согласно рекомендациям WHO UN по применению метода НСК [10].

Фрактальный индекс β флуктуаций кардиоинтервалов вычислялся по методу, приведенному в работе [11], в ультранизкочастотном диапазоне 0.004–0.040. Его величина обладала также выраженной вариативностью. «Фрактальный индекс β флуктуаций кардиоинтервалов, отражающий согласованность и интеграцию функциональных связей гомеостаза» [6, с. 2], является важнейшим параметром экспертизы состояния гомеостаза и динамики адаптационного ресурса человека. В этой же работе определены его численные значения, свидетельствующие о нормативном процессе адаптации к тому или иному виду деятельности (диапазон от 1,0 до 0,6). Снижение значений индекса β за величину в 0,6 отражает нарастание хаотизации гомеостаза и адаптационных процессов. Превышение значений фрактального индекса более 1.0 – признак формирования сверхустойчивых и ригидных вариантов регуляции гомеостаза и адаптационных процессов. Статистическая обработка результатов проводилась с использованием пакета программ для Windows SPSS-20. При сопоставлении параметров НСК фона и при выполнении интеллектуальных заданий использовался метод парных сравнений.

Основные результаты

Выполнение направленного ассоциативного эксперимента старшими дошкольниками групп детского сада (ГДОУ № 94 Санкт-Петербурга), которые участвовали в программе интенсификации интеллектуального развития в контексте подготовки к школе, характеризуется значительно более высокими результатами по сравнению с городской нормой (74-78%), что показано на рисунке.

Показатели выполнения интеллектуальных задач детьми 6-7 лет

Гистограммы рисунка свидетельствуют о превышении 100%-ного уровня исполнения вербальных задач. Вместе с тем стоит отметить существенный разброс процентного выражения эффективности направленного ассоциативного эксперимента: от 67 до 140%, т.е. заметна высокая дифференциация по рече-понятийному мышлению. При этом степень развития общего невербального интеллекта находится в пределах возрастной нормы, по критериям Дж. Равена соответствует средне-высокому интеллекту при относительно невысокой вариативности показателей теста Дж. Равена (54% минимум и 89% - максимальная оценка). Эти результаты прямо свидетельствуют о решающем значении педагогической работы с дошкольниками по развитию речи и понятийного мышления.

Наблюдения за процессом выполнения ассоциативного эксперимента показали определенную корреляционную связь между результатами выполнения каждой из трех серий. Это наблюдение было проверено с помощью факторного анализа методом главных компонент. Коэффициент Кайзера-Мейера-Олкина (,6632) позволял, получив результаты, дать им удовлетворительную интерпретацию.

В табл. 1 приведено 2-факторное решение компонентного анализа с использованием Varymax вращения осей. У 1 ГФ факторная нагрузка равна 1,813, 2 ГФ имел факторную нагрузку, равную 1,713, что свидетельствует об удачном варианте факторного анализа. Суммарная (накопленная) дисперсия - 88,630%. Это позволяет рассматривать 2-факторное решение как адекватное для данного массива экспериментальных фактов.

Таблица 1

Rotated Component Matrix(a) - матрица результатов выполнения интеллектуальных заданий после вращения осей

	Component	
	1.1,813	2.1,732
Равен	,949	
АЭ-	,912	
АЭ+		,924
АЭ фон		,888

Интересна компоновка ГФ: в 1 ГФ с высокими факторными весами находятся показатели выполнения теста Дж. Равена и процентное выражение эффективности отрицательной серии ассоциативного эксперимента: чем выше процент выполнения теста Дж. Равена, тем лучше дошкольник выполняет наиболее трудную серию ассоциативного эксперимента. Результаты тестирования в фоновых условиях и в условиях позитивного подкрепления результатов направленного ассоциативного эксперимента также с высокими факторными весами находятся в одном и том же факторе (во 2 ГФ).

Факторный анализ с привлечением основных показателей ЭКГ покоя (RR покоя и β покоя) перед началом тестирования дал интересную для понимания причин дифференциальных способностей в структуре общего и невербального интеллекта матрицу (табл. 2). Удовлетворительное решение было выбрано в трехфакторной матрице, после Varimax вращения осей факторные веса ГФ соотносились как: 2,45:1,26:1,17. При этом процент накопленной дисперсии достигал 81%, что соответствует хорошему факторному решению.

Таблица 2

Structure Matrix компонентов интеллектуальной системы и основных фоновых показателей ЭКГ

	Component		
	1	2	3
АЭфон	,878		
АЭ-	,875		
АЭ+	,859		
RRфон		,937	
Равен			,753
бетафон			,735

Extraction Method: Principal Component Analysis.
Rotation Method: Promax with Kaiser Normalization.

В первый ГФ попали с высокими факторными весами процент выполнения всех трех форм ассоциативного эксперимента, еще раз подчеркивая их генетическую близость. Второй ГФ включает единственный параметр ЭКГ покоя – частоту пульса. Последний третий ГФ

сформирован результатами выполнения теста Дж. Равена и величины фрактального индекса β в этой же фоновой записи. Связь положительная, что означает прямое соотношение величины фрактального индекса спектра мощности флуктуаций RR-интервалов ЭКГ покоя и результативностью решения матриц Дж. Равена.

Были предприняты попытки обнаружения аналогичных соотношений фоновых значений ЭКГ и результативности выполнения ассоциативного эксперимента. Однако значения критерия Кайзера-Мейера-Олкина были меньше 0,3, что не позволяло выполнить факторный анализ с правдоподобными его трактовками. Однако факторный анализ методом главных компонент, который включал основные параметры ЭКГ, в том числе величину фрактального индекса β, которая регистрировалась во время выполнения каждой из серий направленного АЭ, дал однозначные и понятные результаты, показанные в табл. 3.

Таблица 3

Факторная структура основных параметров ЭКГ и результатов выполнения трех серий АС

АЭ фон	**1 ГФ**	**2 ГФ**	**АЭ+**	**1 ГФ**	**2 ГФ**	**АЭ-**	**1 ГФ**	**2ГФ**
RR	**,945**		**CO RR**	**,931**		**CO RR**	**,954**	
CO RR	**,934**		**RR**	**,928**		**RR**	**,908**	
β		**,898**	**β**		**,684**	**β**		**,854**
%АЭ	**-,454**	**641**	**%АЭ+**		**,795**	**%АЭ-**		**,679**

Примечание: желтый фон отражает серии направленного ассоциативного эксперимента и включенные в анализ параметры RR-интервалов. АЭ фон – серия АЭ, в которой ребенок выполняет тест на основе собственной мотивации; АЭ+ серия АЭ, в которой ребенка за каждые пять правильных ответов награждают; АЭ - последняя серия, в которой ребенка штрафуют (отбирают конфету) за каждые пять неправильных реакций.

Материалы получены в однотипных условиях выполнения факторного анализа: 2-факторное решение с Varimax – вращением осей с одними и теми же кардиопараметрами. Стоит отметить, что факторные нагрузки ГФ после вращения осей были близкими по значению: от 1,23 до 2,67. Соблюдение этих правил позволяет рассчитывать на корректную трактовку полученных результатов, приведенных в табл. 3.

Во всех сериях направленного ассоциативного эксперимента в 1 ГФ зафиксированы кардиоинтервалы (RR) и стандартное отклонение кардиоинтервалов (CO RR) с очень высокими и близкими по значению во всех сериях факторными весами. Второй ГФ содержит также одни и те же параметры эксперимента: результаты выполнения эксперимента и величину фрактального индекса β. Причем ни в одном из пробных вариантов факторного анализа фрактальный индекс β не сочетался ни с RR, ни с CO RR, что, вероятно, отражает иную его природу, связанную со спектральным выражением вариаций кардиоинтервалов, и разный функциональный смысл. Функциональная роль фрактального индекса β – отражение скоррелированности отдельных межударных интервалов сердца во времени на длинных отрезках времени. Автокорреляции в динамических системах приводят

к появлению масштабной инвариантности как во времени, так и в пространстве управляющей системы, которая в случае когнитивных действий включает высшие отделы мозга (кортикальные поля, ответственные за речевую деятельность).

Несмотря на то что средние групповые значения фрактального индекса в сериях с активной вербальной деятельностью снижаются у дошкольников и фиксируется нарастание низких значений фрактального индекса в эмоционально насыщенных сериях АЭ по сравнению с фоновой регистрацией ЭКГ, максимально высокие значения результатов направленного АЭ наблюдаются у дошкольников с высокими значениями β (от 0,6 до 1,35), что соответствует допустимым значениям стохастического гомеостаза [6].

Высокие величины фрактального индекса β в фоновой ЭКГ, как уже отмечалось выше, могут являться предиктором хорошего и высокого развития общего и невербального интеллекта. Относительно высокие значения фрактального индекса β были зафиксированы у интеллектуально одаренных подростков, осваивающих сложные программы физико-математического содержания [3].

Эти результаты еще раз подчеркивают место и значение стохастических динамических процессов ЦНС, ответственных как за когнитивные функции, так и за регуляцию вегетативных процессов, в том числе за регуляцию кардиодинамики в детско-подростковом возрасте.

Выводы:

1. Старшие дошкольники, включенные в дополнительные занятия по развитию речи, в том числе слитной, характеризуются высокой степенью формирования лексикона, легкостью ассоциативного процесса и освоением антонимов русского языка.
2. Результаты направленного ассоциативного эксперимента, выполняемого в разных эмоциональных ситуациях, тесно связаны друг с другом.
3. Результаты выполнения направленного ассоциативного эксперимента взаимосвязаны с фрактальным индексом β как мерой автокорреляции RR-интервалов в сверхнизкочастотной области спектра мощности флуктуации кардиоинтервалов, регистрируемой во время выполнения ассоциативного эксперимента.
4. Степень развития общего и невербального интеллекта, диагностируемого с помощью цветных матриц Дж. Равена, взаимосвязан также с фрактальным индексом β, но фоновой ЭГК покоя.

Список литературы

1. Анастази А. Психологическое тестирование. - 7-е междунар. изд. / Анастази А., Урбина С. - СПб. : Питер, 2007. - 688 с.

2. Баевский Р.М. Оценка адаптивных возможностей организма и риск развития заболеваний / Баевский Р.М., Берсеньева А.П. - М. : Медицина, 2001.

3. Зверева С.В. Развитие интеллекта как высшего уровня адаптационной системы в контексте гендерных различий : дис. … д-ра психол. наук. - СПб., 2006. – С. 672.

4. Каменская В.Г. Интеллектуальная деятельность: теоретические и экспериментальные исследования / Каменская В.Г., Томанов Л.В. – Елец : изд-во ЕГУ им. И. Бунина, 2007. – 287 с.

5. Каменская В.Г. Дифференциальные психофизиологические признаки различной интеллектуальной успешности детей дошкольного возраста / Каменская В.Г., Зверева С.В., Музалевская Н.И., Томанов Л.В. // Психологический журнал. – 2000. - Т. 22, № 1. - С. 78.

6. Музалевская Н.И. Оценка адаптационного ресурса и состояния здоровья старшеклассников методом нелинейной стохастической кардиоинтервалометрии / Музалевская Н.И., Каменская В.Г. // Физиология человека. – 2007. - Т. 33, № 1. - С. 1-9.

7. Урицкий В.М. Физические механизмы фрактальной организации живых систем / Урицкий В.М., Музалевская Н.И. // Биомедицинская информатика. - СПб., 1995. – С. 108.

8. Хохлова Л.А. Особенности внутри- и межполушарного распределения когерентных связей при восприятии иноязычной речи // Психологические исследования. – 2015. - Т. 8 (44). - С. 4-10.

9. Heart rate variability. Standart of measurements, physiological interpretation and clinical use // Circulation. – 1996. - V. 93, n. 5. - P. 1043.

10. Muzalevskaya N.I. Advanced methods of nonlinear dynamics and fractals analysis for diagnostic and correction of homeostatic regulation // WHO UN. Department circulation. Geneva. – 1996. - P. 18.

11. Peng C.K. Detrended fluctuation analysis (DFA). Web-link. – URL: http://reyweb.bidmc.harvard.edu/tutorial/DFA/mode 5.htm.