

слабой нервной системы (рисунки 3, 4), что свидетельствует о возможной дифференциации организмов по силе-слабости нервной системы уже на уровне рецепторов.

Литература:

1. Hodgkin A. and Huxley A. (1952): A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *J. Physiol.* 117: 500-544.
2. Фокин С. И. Электрохимический механизм реагирования на воздействие живой клеткой и его математическая модель // Деп. в ФГБУ "РГБ" 06.02.2017, № 1178247. 50 с.
3. Фокин С. И. Исследование корреляции между силой ощущения, величиной стимула и физиологическими параметрами рецептора с помощью математического моделирования // Вестник психофизиологии. 2017. №1. С. 60-67.
4. Ратанова Т. А. Психофизическое шкалирование. Сила ощущений, сила нервной системы и чувствительность : монография. 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во Московского психолого-социального института; Воронеж: Изд-во НПО "МОДЕК", 2008. 320 с.
5. Чуприкова Н. И. Время реакций человека: Физиологические механизмы, вербально-смысловая регуляция, связь с интеллектом и свойствами нервной системы. М.: Издательский дом ЯСК, 2019. 432 с. (Разумное поведение и язык. Language and Reasoning).
6. Ильин Е. П. Психология индивидуальных различий. СПб.: Питер, 2004. 701 с. .
7. Шмидт-Ниельсен К. Размеры животных: почему они так важны? Пер.с англ. М.: Мир, 1987. 259 с.
8. Ительсон Л. Б. Лекции по общей психологии : учебное пособие. М.: ООО "Издательство АСТ", Мн.: Харвест, 2002. 896 с.
9. Фундаментальная и клиническая физиология : учебник для студ. высш. учеб. заведений / под ред. А. Г. Камкина и А. А. Каменского. М.: Издательский центр "Академия", 2004. 1072 с.

Статья поступила в редакцию 13.07.2019

Статья принята к публикации 16.09.2019

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СТАТЬИ

УДК 612.014.423

ДИНАМИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ СПЕКТРА МОЩНОСТИ ЭЭГ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОНЦЕПТА "ВЕЩЕСТВО"

*Волкова Е. В., Талантов Д. А.
Российская Федерация, Москва
Институт психологии РАН
volkovaev@mail.ru, dtalant@yandex.ru*

Решение одной из парадоксальных ситуаций современного образования - законодательное уменьшение обязательных дисциплин для снижения учебных перегрузок и катастрофический рост загруженности учащихся - напрямую связано с современными вариациями гипотезы нейроэффективности, в частности, соотношением информационных и энергетических характеристик психической деятельности. Цель исследования состояла в изучении динамики межуровневых изменений спектра мощности ЭЭГ при выполнении химических дифференцировок различной сложности. В эксперименте приняли участие 29 студентов-психологов в возрасте 18-23 лет. Для сопоставления показателей биоэлектрической активности мозга во время осуществления когнитивной деятельности компьютеризированный портативный электроэнцефалограф-регистратор "Энцефалан-ЭЭГР-19/26" в модификация "Мини" был синхронизирован с диагностическим программным комплексом "ChemicalDifferentiation". Регистрация показателей спектра мощности ЭЭГ проводилась до и после формирующего эксперимента. Результаты эксперимента показали, что увеличение сложности перерабатываемой информации проявляется в увеличении

значимых межуровневых различий показателей спектра мощности ЭЭГ и расширении его диапазона. Выявлено, что формирование концепта *Вещество* сопровождается уменьшением значимых межуровневых различий показателей спектра мощности и сужением частотного диапазона, на котором эти различия выявляются. Получены данные, свидетельствующие в пользу гипотезы нейроэффективности: формирование концептов, репрезентирующих предметную область деятельности, обуславливает не только высокую точность, скорость, но и легкость выполнения деятельности, что отражается в уменьшении энергозатрат в терминах показателей ЭЭГ. На основе сопоставления поведенческих характеристик респондентов на всех этапах исследования (утомление, интерес, легкость, тревожность), объективных психологических показателей формирования концепта *Вещество* (точность и время реакции сложного выбора) и объективных физиологических показателей (мощность спектра ЭЭГ) предположена психологическая интерпретация частотных диапазонов: *дельта-ритм* - индикатор затрачиваемых усилий для достижения результата; *тета-ритм* - индикатор концентрации/генерализации нервных процессов; *бета-ритм* - индикатор утомляемости, знакомости/субъективной легкости деятельности; *гамма-ритм* - индикатор высочайшей сложности когнитивной деятельности.

Ключевые слова: гипотеза нейроэффективности, концепт *Вещество*, уровень организации концепта, время реакции, изменение спектра мощности.

DYNAMICS OF EEG POWER SPECTRUM INDICATORS IN THE CONCEPT "SUBSTANCE" FORMATION

*Volkova E. V., Talantov D. A.
Russian Federation, Moscow
Institute of Psychology of RAS*

The solution of one of the paradoxical situations of modern education is the legislative reducing mandatory disciplines to reduce training overloads of students and at the same time a catastrophic increase in student overloads, directly related to modern variations of the neuroefficiency hypothesis, in particular, the ratio of information and energy characteristics of mental activity. The purpose of the study was to examine the dynamics of inter-level changes in the EEG power spectrum when performing varying complexity differentiations of chemical compounds. Twenty-nine psychology students aged 18-23 took part in the study. To compare the indicators of brain bioelectrical activity during cognitive activity, the Encephalan-EEGR-19/26 computerized portable electroencephalograph-recorder in the Mini version was synchronized with the ChemicalDifferentiation diagnostic software. The EEG power spectrum indices were recorded before and after the formative experiment. The results of the experiment showed that the increase in the complexity of the processed information is manifested in the increase in significant inter-level differences in the performance of the EEG power spectrum and the expansion of its range. It was found that the formation of the Substance concept is accompanied by a decrease in significant inter-level differences in the power spectrum indices and a narrowing of the frequency range in which these differences are revealed. The data obtained testify in favor of the hypothesis of neuroefficiency: the formation of concepts that represent the subject area of activity causes not only high accuracy, speed, but also ease of performing activities, which is manifested in the reduction of energy consumption in terms of EEG indicators. A psychological interpretation of the EEG spectrum frequency ranges was suggested based on a comparison of the behavioral characteristics of the respondents at all stages of the experiment (fatigue, interest, ease, anxiety), objective psychological indicators of the concept *Substance* formation (accuracy and choice reaction time) and objective physiological indicators (EEG power spectrum): Delta-rhythm is an indicator of effort to achieve a result; Theta-rhythm is an indicator of concentration / generalization of nerve

processes; Beta-rhythm is an indicator of fatigue, familiarity / subjective ease of activity; Gamma-rhythm is an indicator of highly complex cognitive activities.

Key words: hypothesis of neuroefficiency, concept Substance, the level of the concept organization, choice reaction time, change in the EEG power spectrum.

Введение. Проблема эффективности когнитивных процессов напрямую связана с вариациями гипотезы нейроэффективности, описывающими обратную связь когнитивной успешности с уровнем активации головного мозга [19; 15; 17; 16]. Во время решения мыслительных задач более успешные испытуемые демонстрируют меньшую активацию мозга, чем менее успешные [20; 19; 18]. В исследованиях отмечается нелинейный характер соотношения физиологических реакций организма и наблюдаемых результатов мыслительной деятельности. В этом отношении представляет интерес проблема связи психологических и физиологических "затрат" и успешности мышления, которую можно рассмотреть с позиций эффективности деятельности [1]. Термин "эффективность" позволяет описать процесс мыслительной деятельности в контексте уровня успешности и психофизиологической "цены" такой деятельности, а также уточнения психофизиологических механизмов, которые лежат в основе данного соотношения.

В исследованиях, выполненных в рамках дифференционно-интеграционного подхода к умственному развитию [8], показано, что формирование зрелых концептов, репрезентирующих предметную область деятельности, обуславливает не только высокую точность, скорость, но и легкость выполнения деятельности, снижение утомляемости в терминах уменьшения энергозатрат на ее выполнение. Однако эмпирических данных, подтверждающих снижение энергозатрат в терминах показателей ЭЭГ, не представлено.

Цель: изучить межуровневые изменения (глобальный vs базовый уровень; базовый vs детализированный уровень) спектра мощности ЭЭГ в процессе формирования концепта "вещество".

Задачи:

1. Изучить характер распределения спектральной мощности ЭЭГ на разных уровнях организации концепта.
2. Соотнести показатели динамики межуровневых изменений распределения спектральной мощности у респондентов с разной мерой сформированности концепта.
3. Уточнить психологическое содержание частотных диапазонов спектра мощности во время дифференцирования химических стимул-объектов.

Методы. С целью сопоставления показателей биоэлектрической активности мозга (БЭА) во время осуществления когнитивной деятельности компьютеризированный портативный электроэнцефалограф-регистратор "Энцефалан-ЭЭГР-19/26" в модификация "Мини" был синхронизирован с диагностическим программным комплексом "ChemicalDifferentiation". Регистрация проводилась в телеметрическом режиме - в память компьютера через интерфейс Bluetooth по следующим отведениям: ЭЭГ_C3_O1, ЭЭГ_C4_O2 с настройками чувствительности 70 мкВ/мм и скоростью развертки 30 мм/сек. Шаг по частоте составлял 0,25 Гц. Запись ЭЭГ была автоматически просканирована на наличие артефактов, которые устраняли с помощью регрессионной процедуры. Участки с амплитудой более 180 мкВ в пределах окна в 650 мс отмечались как плохой канал, участки с амплитудой более 140 мкВ рассматривались как двигательный артефакт, а более 60 мкВ - как зрительный и мышечный артефакт. Выбор данных ЭЭГ проводился по эпохам, соответствующим выполнению заданий. Для каждой эпохи вычисляли спектрограмму (квадрат модуля преобразования Фурье). Преобразование Фурье осуществляет разложение сигнала на ряд гармонических составляющих без какой-либо потери информации. Каждая гармоника включает в себя три параметра: амплитуду, начальную фазу и частоту.

Зависимость амплитуды и фазы гармоник от частоты называется спектром [10]. Зашумленные эпохи редуцировали.

В экспериментах приняли участие 29 студентов второго курса психологического факультета Государственного Академического Университета Гуманитарных Наук в возрасте от 18 до 23 лет (34% - мужчины; 66% - женщины). Значимых различий показателей формально-динамических свойств индивидуальности по результатам теста ОФДСИ [12] между юношами и девушками не обнаружено, что свидетельствует о возможности объединения респондентов в одну выборку. Все испытуемые были правшами.

На первом этапе собирались данные об особенностях ментальных ресурсов (Диагностический комплекс экспресс-оценки ментальных ресурсов индивидуальности, Русалов, Волкова) и организации концепта "вещество" (Chemical Differentiation, Волкова, Нилопец) у респондентов. Запись ЭЭГ проводилась во время когнитивной нагрузки, представляющей собой выполнение когнитивных заданий на трех уровнях сложности, - глобальном (рисунок 1) (различение простых и сложных соединений), базовом (рисунок 2) (различение оксидов, кислот, оснований и солей) и детализированном (рисунок 3) (более сложная дифференцировка внутри классов соединений). На экране в случайном порядке появлялись формулы химических соединений. Респондентам предлагалось три типа заданий, каждый из которых содержал 42 конкретные задачи.

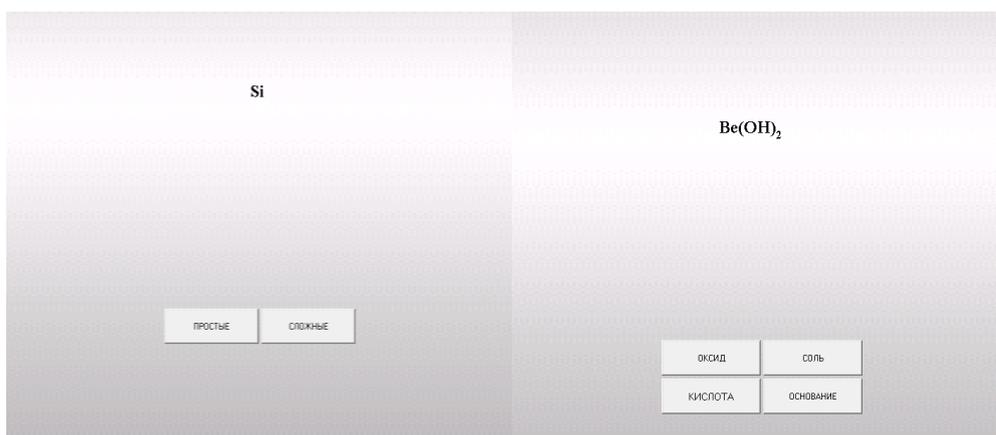


Рисунок 1 - Глобальный уровень

Рисунок 2 - Базовый уровень

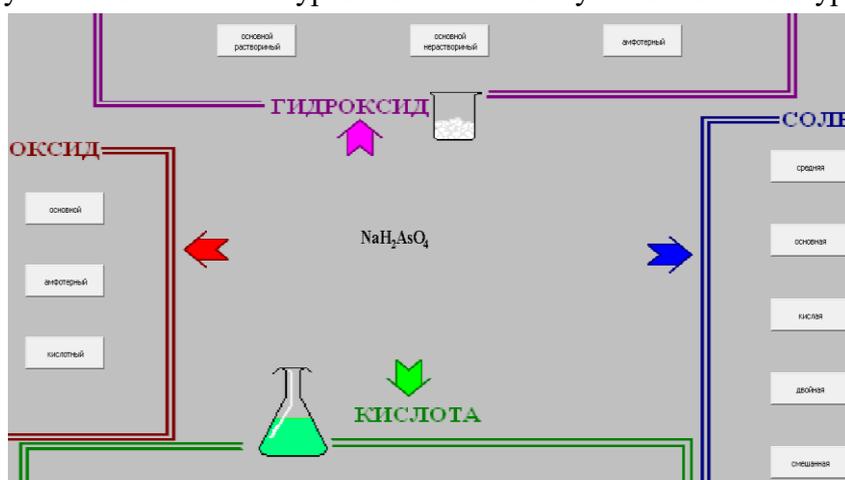


Рисунок 3 - Детализированный уровень

На втором этапе реализовывался обучающий эксперимент, направленный на формирование химического аспекта концепта "вещество" [5].

Респонденты имели возможность обучаться в соответствии с зоной своих ближайших возможностей в компьютерном программном комплексе "GreatChemist" как в малых группах, так и индивидуально. Стимульный материал подбирался таким образом, чтобы отношения по признакам принадлежности к определенной группе соединений входили в противоречие с известными испытуемыми правилами. Так, атом водорода (H) присутствовал в кислотах (HBr), кислых солях (KHCO_3), солях аммония (NH_4Br), основаниях (NaOH). Гидроксогруппу (OH) можно увидеть в органических кислотах ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$), основаниях (KOH), основных солях ($\text{Al(OH)}_2\text{NO}_3$). Более детальное описание особенностей мыслительных процессов, задействованных при выполнении химических дифференцировок представлено в работе Е. В. Волковой [4].

Исследователи создавали ситуацию соревновательности между респондентами, сообщая лучшие показатели на разных уровнях дифференцировок и такие критерии сформированности концепта, как точность (более 95%), нормативное время выполнения задания и устойчивость полученных результатов.

На третьем этапе при условии сформированности у респондентов концепта "вещество" проводилась повторная запись ЭЭГ во время выполнения теста "ChemicalDifferentiation". Критерием сформированности концепта являлись показатели адекватность (мера распознавания стимул-объектов с определенной степенью точности); зрелость (мера дифференцированности-интегрированности инвариантных признаков объекта, в частности, константа оперативного порога различения); форма упорядоченности структур (количество уровней обобщенности, особенности их интеграции); скорость и легкость формирования концепта, устойчивость и оперативность его актуализации [5].

Использованные методики и аппаратура:

1. Опросник формально-динамических свойств индивидуальности для диагностики свойств "предметно-деятельностного" (психомоторная и интеллектуальная сферы) и "коммуникативного" аспектов темперамента [12].

2. Электроэнцефалограф-регистратор, компьютеризированный портативный "Энцефалан-ЭЭГР-19/26" в модификации "Мини" (Европейский сертификат CE 538571 Британского института стандартов, BSI) для стационарного применения блока пациента АБП-10.

3. Диагностический программный комплекс "ChemicalDifferentiation" (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016661340).

Респонденту на экране в случайном порядке предъявлялись формулы химических соединений, которые необходимо как можно быстрее и безошибочно разделить на группы в соответствии с заданной инструкцией. Измерялось время реакции сложного выбора и количество правильных ответов. Во время выполнения заданий осуществлялась видеозапись для регистрации внешних поведенческих проявлений.

4. Компьютерный программный комплекс "GreatChemist" (Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2006614415).

Тест "GreatChemist" основан на тех же методологических принципах, что и "ChemicalDifferentiation", но включает более широкий диапазон основных концептуальных отношений, составляющих фундамент современной химии.

Статистическая обработка данных реализовывалась на базе стандартных программ IBM SPSS Statistics 22. Расчет параметров спектральной мощности производился по всему частотному диапазону ЭЭГ (0-40 Гц). Для выявления межуровневых различий спектра мощности ЭЭГ применялся непараметрический критерий Уилкоксона для зависимых выборок, поскольку средние показатели спектра мощности не соответствовали нормальному распределению (критерий Шапиро-Уилка).

Результаты. Приводятся результаты сравнения времени реакции сложного выбора, количества правильных ответов и изменения спектра мощности ЭЭГ на разных уровнях сложности когнитивной нагрузки. Рассматривается динамика межуровневых изменений показателей времени реакции сложного выбора и спектра мощности ЭЭГ до и после формирующего эксперимента.

Сравнение времени реакции сложного выбора, количества правильных ответов у респондентов до и после формирующего эксперимента

Таблица 1 - Сравнительный анализ показателей* дифференцировок химических объектов до и после формирующего эксперимента

		Средние значения показателей		Значение критерия Уилкоксона	Асим. значимость (2-сторонняя)
		До формирующего эксперимента	После формирующего эксперимента		
глобальный	T1. мс	66	29	-4.23	0.00
	N1	8	1	-4.20	0.00
базовый	T2. мс	84	42	-3.83	0.00
	N2	22	3	-4.29	0.00
детализированный	T3. мс	86	42	-3.63	0.00
	N3	35 (83.33%)	18 (42.85%)	-4.29	0.00

Примечание: *Т - время реакции сложного выбора; N - количество ошибок из 42 предъявлений заданий

Полученные в настоящем формирующем эксперимента данные в определенной мере согласуются с данными формирующего эксперимента Е. В. Волковой (см. таблицу 2) на способных к химии школьниках [5], а именно: 1) чем выше уровень сложности, тем больше время реакции сложного выбора; 2) в процессе формирующего эксперимента увеличивается точность и скорость выполнения деятельности.

Таблица 2 - Данные формирующего эксперимента

		Средние значения показателей	
		Результаты формирующего эксперимента (психологи)	Результаты формирующего эксперимента (способные к химии школьники)
глобальный	T1. мс	29	31
	N1	1	0.5
базовый	T2. мс	42	47
	N2	3	0.83
детализированный	T3. мс	42	147
	N3	18 (42.85%)	4 (9.5%)

Примечание: *Т - время реакции сложного выбора; N - количество ошибок из 42 предъявлений заданий

*Межуровневые изменения спектра мощности ЭЭГ у респондентов
до формирующего эксперимента*

Рассмотрим различия межуровневых изменений спектра мощности у респондентов до формирующего эксперимента. Согласно данным, представленным в таблице 3, средние показатели спектра мощности в дельта-диапазоне при выполнении более сложных дифференцировок выше, по сравнению со средними показателями более простых дифференцировок. Выявлены достоверные различия средних показателей спектра мощности в дельта-диапазоне на частотах: 1.71 Гц, 1.95 Гц, 3.91 Гц.

При увеличении сложности информации (базовый vs детализированный) средние показатели спектра мощности еще больше возрастают, и увеличивается количество значимых различий в дельта-диапазоне на частотах: 0.24 Гц, 0.49 Гц, 0.73 Гц, 0.98 Гц, 1.22 Гц, 1.46 Гц, 2.20 Гц, 2.69 Гц (таблица 4).

Таблица 3 - Дельта-диапазон спектра (глобальный vs базовый)

Частотный диапазон (Гц)	Дифференцировки		Значение критерия Уилкоксона	p
	глобальный уровень	базовый уровень		
	Средние показатели спектра мощности (мкВ ²)			
1.71	6.65	7.71	-3.17	0.00
1.95	5.90	6.60	-2.48	0.01
3.91	3.78	4.32	-2.44	0.02

Таблица 4 - Дельта-диапазон спектра (базовый vs детализированный)

Частотный диапазон (Гц)	Дифференцировки		Значение критерия Уилкоксона	p
	базовый уровень	детализированный уровень		
	Средние показатели спектра мощности (мкВ ²)			
0.24	8.60	10.34	-2.07	0.04
0.49	14.95	18.87	-2.76	0.01
0.73	16.20	20.32	-2.78	0.01
0.98	13.14	16.38	-3.21	0.00
1.22	10.39	12.48	-3.90	0.00
1.46	8.71	9.82	-2.22	0.03
2.20	5.97	6.37	-2.02	0.04
2.69	5.16	5.56	-2.51	0.01

Аналогичная закономерность обнаружена при сравнении средних показателей спектра мощности в тета-диапазоне, а именно, достоверные различия между глобальным и базовым уровнем сложности выявлены на частотах: 4.64 Гц, 4.88 Гц, 5.13 Гц, 5.37 Гц, 5.61 Гц, 5.86 Гц, 6.10 Гц, 6.35 Гц (таблица 5); между базовым и детализированным - 4.15 Гц, 4.39 Гц, 4.64 Гц, 4.88 Гц, 5.13 Гц, 5.61 Гц, 5.86 Гц, 6.10 Гц, 6.35 Гц, 6.59 Гц, 6.83 Гц, 7.08 Гц, 7.32 Гц, 7.57 Гц, 7.81 Гц, 8.06 Гц, 8.30 Гц (таблица 6). Средние показатели спектра мощности в тета-диапазоне при выполнении более сложных дифференцировок так же, как и в дельта-диапазоне выше, по сравнению более простыми дифференцировками. Однако количество достоверных различий больше: между глобальным и базовым уровнем в тета-диапазоне 8 достоверных различий, а в дельта-диапазоне - 3; между базовым и детализированным в тета-диапазоне 17 значимых различий, а в дельта-диапазоне - 8.

Таблица 5 - Тета-диапазон спектра (глобальный vs базовый)

Частотный диапазон (Гц)	Дифференцировки		Значение критерия Уилкоксона	p
	глобальный уровень	базовый уровень		
	Средние показатели спектра мощности (мкВ ²)			
4.64	3.30	3.71	-2.13	0.03
4.88	3.17	3.60	-2.77	0.01
5.13	3.09	3.58	-2.04	0.04
5.37	3.11	3.70	-3.08	0.00
5.61	3.04	3.55	-3.62	0.00
5.86	2.82	3.36	-3.24	0.00
6.10	2.44	3.12	-4.44	0.00
6.35	2.44	2.98	-3.34	0.00

Таблица 6 - Тета-диапазон спектра (базовый vs детализированный)

Частотный диапазон (Гц)	Дифференцировки		Значение критерия Уилкоксона	p
	базовый уровень	детализированный уровень		
	Средние показатели спектра мощности (мкВ ²)			
4.15	4.12	4.59	-2.07	0.04
4.39	3.93	4.20	-2.68	0.01
4.64	3.71	4.09	-2.27	0.02
4.88	3.60	4.18	-2.79	0.01
5.13	3.58	3.92	-2.64	0.01
5.61	3.55	4.07	-2.87	0.00
5.86	3.36	4.09	-3.75	0.00
6.10	3.12	3.47	-2.48	0.01
6.35	2.98	3.16	-2.37	0.02
6.59	2.85	3.23	-2.73	0.01
6.83	2.72	3.04	-2.61	0.01
7.08	2.71	2.95	-2.40	0.02
7.32	2.60	2.87	-2.35	0.02
7.57	2.46	2.66	-2.51	0.01
7.81	2.42	2.67	-2.74	0.01
8.06	2.41	2.77	-3.18	0.00
8.30	2.45	2.68	-2.97	0.00

Следует отметить, что при сравнении средних показателей спектра мощности в альфа-диапазоне достоверных различий между глобальным и базовым уровнем сложности не выявлено; между базовым и детализированным - только одно достоверное различие на частоте 11.96 Гц (таблица 7), что, по-видимому, является подтверждением того, что альфа-ритм неспецифичен для когнитивной нагрузки, так как отражает ритм холостого хода нейронов [9], которые воспроизводят импульсы от ретикулярного ядра таламуса.

Согласно данным, представленным в таблице 8, средние показатели спектра мощности в бета-диапазоне при выполнении более сложных дифференцировок выше, по сравнению со средними показателями более простых дифференцировок. Однако в высокочастотном диапазоне 25.63 Гц средние показатели спектра мощности снижаются. Выявлены достоверные различия средних показателей спектра мощности в бета-диапазоне на частотах: 16.11 Гц, 16.60 Гц, 25.63 Гц.

Таблица 7 - Альфа-диапазон спектра (базовый vs детализированный)

Частотный диапазон (Гц)	Дифференцировки		Значение критерия Уилкоксона	p
	базовый уровень	детализированный уровень		
	Средние показатели спектра мощности (мкВ ²)			
11.96	2.22	2.30	-2.27	0.02

При увеличении сложности информации (базовый vs детализированный) средние показатели спектра мощности ещё больше возрастают и увеличивается количество значимых различий в бета-диапазоне на частотах: 14.40 Гц, 14.89 Гц, 16.84 Гц, 17.82 Гц, 18.06 Гц, 18.31 Гц, 19.28 Гц, 20.02 Гц, 20.50 Гц, 21.72 Гц, 22.70 Гц, 23.43 Гц, 23.68 Гц, 24.41 Гц, 25.39 Гц, 25.63 Гц, 25.87 Гц, 26.36 Гц, 28.32 Гц, 28.80 Гц, 29.29 Гц, 30.02 Гц (таблица 9).

Таблица 8 - Бета-диапазон спектра (глобальный vs базовый)

Частотный диапазон (Гц)	Дифференцировки		Значение критерия Уилкоксона	p
	глобальный уровень	базовый уровень		
	Средние показатели спектра мощности (мкВ ²)			
16.11	1.32	1.60	-2.34	0.02
16.60	1.27	1.45	-2.58	0.01
25.63	1.28	1.10	-1.96	0.05

Таблица 9 - Бета-диапазон спектра (базовый vs детализированный)

Частотный диапазон (Гц)	Дифференцировки		Значение критерия Уилкоксона	p
	базовый уровень	детализированный уровень		
	Средние показатели спектра мощности (мкВ ²)			
14.40	1.53	1.70	-2.61	0.01
14.89	1.56	1.70	-2.60	0.01
16.84	1.43	1.62	-2.46	0.01
17.82	1.36	1.61	-3.07	0.00
18.06	1.35	1.64	-2.52	0.01
18.31	1.31	1.55	-3.01	0.00
19.28	1.37	1.56	-2.11	0.04
20.02	1.37	1.60	-2.00	0.05
20.50	1.36	1.64	-2.13	0.03
21.72	1.27	1.70	-2.24	0.03
22.70	1.27	1.71	-2.57	0.01
23.43	1.18	1.49	-2.52	0.01
23.68	1.23	1.46	-2.37	0.02
24.41	1.15	1.44	-3.24	0.00
25.39	1.11	1.44	-2.64	0.01
25.63	1.10	1.41	-2.77	0.01
25.87	1.19	1.42	-2.66	0.01
26.36	1.15	1.38	-2.08	0.04
28.32	1.21	1.44	-2.80	0.01
28.80	1.22	1.38	-2.21	0.03
29.29	1.26	1.38	-2.06	0.04
30.02	1.24	1.42	-2.31	0.02

Следует отметить, что при сравнении средних показателей спектра мощности в гамма-диапазоне достоверных различий между глобальным и базовым уровнем сложности не выявлено; между базовым и детализированным - 32.47 Гц, 32.95 Гц, 33.20 Гц, 33.44 Гц, 35.15 Гц.

Таблица 10 - Гамма-диапазон спектра (базовый vs детализированный)

Частотный диапазон (Гц)	Дифференцировки		Значение критерия Уилкоксона	p
	базовый уровень	детализированный уровень		
	Средние показатели спектра мощности (мкВ ²)			
32.47	1.23	1.45	-2.28	0.02
32.95	1.11	1.34	-2.08	0.04
33.20	1.14	1.35	-2.13	0.03
33.44	1.14	1.36	-2.51	0.01
35.15	1.02	1.25	-2.14	0.03

*Межуровневые изменения спектра мощности ЭЭГ у респондентов
после формирующего эксперимента*

После формирующего эксперимента при сравнении средних показателей спектра мощности глобального и базового уровня сложности достоверные различия были выявлены только в бета-диапазоне на частотах 23.19 Гц, 29.78 Гц (таблица 11). Также существенно уменьшилось количество достоверных различий в бета-диапазоне при сравнении базового и детализированного уровня (2 vs 22) (таблица 12). На частотах 23.19 Гц, 29.78 Гц, 18.06 Гц средние показатели спектра мощности снижались.

Таблица 11 - Бета-диапазон спектра (глобальный vs базовый)

Частотный диапазон (Гц)	Дифференцировки		Значение критерия Уилкоксона	p
	глобальный уровень	базовый уровень		
	Средние показатели спектра мощности (мкВ ²)			
23.19	1.44	1.24	-2.31	0.02
29.78	1.47	1.27	-2.63	0.01

Таблица 12 - Бета-диапазон спектра (базовый vs детализированный)

Частотный диапазон (Гц)	Дифференцировки		Значение критерия Уилкоксона	p
	базовый уровень	детализированный уровень		
	Средние показатели спектра мощности (мкВ ²)			
15.38	1.45	1.56	-1.98	0.05
18.06	1.52	1.34	-2.00	0.05

Наблюдается расширение дельта-диапазона спектра мощности на частотах 0.24 Гц, 0.49 Гц, 0.73 Гц, 0.98 Гц, 1.22 Гц, 1.46 Гц, 1.71 Гц, 2.93 Гц, 3.42 Гц, 3.66 Гц, 3.91 Гц (8 vs 11) (таблица 13), на котором обнаруживаются значимые различия в случае, когда детализированный уровень еще не сформирован в полной мере, но скорость и точность

выполнения дифференцировок химических стимул-объектов значимо возросла; особый интерес состоит в том, что данное расширение частотного диапазона спектра межуровневых различий (базовый vs детализированный) реализуется за счет включения частот межуровневых различий несформированных глобальный vs базовый и базовый vs детализированный уровней.

Таблица 13 - Дельта-диапазон спектра (базовый vs детализированный)

Частотный диапазон (Гц)	Дифференцировки		Значение критерия Уилкоксона	p
	базовый уровень	детализированный уровень		
	Средние показатели спектра мощности (мкВ ²)			
0.24	6.57	8.73	-3.45	0.00
0.49	13.24	17.98	-3.41	0.00
0.73	16.29	20.96	-2.89	0.00
0.98	12.85	16.95	-3.34	0.00
1.22	10.58	12.90	-3.23	0.00
1.46	8.26	10.25	-3.90	0.00
1.71	7.30	8.24	-2.56	0.01
2.93	4.81	5.27	-2.32	0.02
3.42	4.34	4.90	-2.10	0.04
3.66	3.80	4.55	-3.70	0.00
3.91	3.77	4.30	-2.40	0.02

Формирование концепта *Вещество* сопровождается сужением тета-диапазона спектра (глобальный vs базовый - 8 vs 0; базовый vs детализированный - 17 vs 9) (таблица 14), на котором сохраняются значимые различия показателей спектра мощности при выполнении заданий на разных уровнях сложности; следует особо подчеркнуть, что суженный частотный диапазон базовый vs детализированного уровня включает один и тот же инвариантный набор частот спектра (4.64 Гц, 4.88 Гц, 5.13 Гц, 5.61 Гц, 5.86 Гц, 6.10 Гц, 6.35 Гц), обнаруженный в случае несформированных уровней концепта *Вещество*. Снижение средних показателей спектра мощности отмечено только на частоте 8.79 Гц.

Таблица 14 - Тета-диапазон спектра (базовый vs детализированный)

Частотный диапазон (Гц)	Дифференцировки		Значение критерия Уилкоксона	p
	базовый уровень	детализированный уровень		
	Средние показатели спектра мощности (мкВ ²)			
4,64	3,51	4,02	-2,16	0,03
4,88	3,19	3,79	-2,55	0,01
5,13	3,03	3,95	-3,08	0,00
5,37	3,25	4,08	-3,06	0,00
5,61	2,99	3,85	-4,24	0,00
5,86	2,98	3,66	-3,19	0,00
6,10	2,87	3,51	-3,32	0,00
6,35	2,79	3,19	-3,07	0,00
8,79	2,88	2,55	-2,28	0,02

При сравнении базового и детализированного уровня сложности после формирующего эксперимента значимые различия средних показателей спектра мощности

выявлены в гамма-диапазоне на частотах: 35.15 Гц, 35.39 Гц, 40.52 Гц. Средние показатели спектра мощности снижались.

Таблица 15 - Гамма-диапазон спектра (базовый vs детализированный)

Частотный диапазон (Гц)	Дифференцировки		Значение критерия Уилкоксона	p
	базовый уровень	детализированный уровень		
	Средние показатели спектра мощности (мкВ ²)			
35,15	1,22	0,98	-2,02	0,04
35,39	1,29	0,93	-2,27	0,02
40,52	0,37	0,32	-2,09	0,04

Таблица 16 - Количество достоверных различий показателей спектра мощности на разных уровнях когнитивной сложности до и после формирующего эксперимента

Частотный диапазон (Гц)	До формирующего эксперимента		После формирующего эксперимента	
	Глобальный - базовый уровень	Базовый - детализированный уровень	Глобальный - базовый уровень	Базовый - детализированный уровень
дельта (0-3 Гц)	3	8	0	11
тета (4-8 Гц)	8	17	0	9
альфа (9-13 Гц)	0	1	0	0
бета (14-30 Гц)	3	22	2	2
гамма (31-40 Гц)	0	5	0	3

Обсуждение

Согласно данным Н. И. Чуприковой, время реакции дифференцирования, особенно время реакции тонких дифференцировок, как и число ошибок, может служить показателем мозга к дискриминации ансамблей возбуждений, вызываемых разными стимулами [13]. Чем более концентрированы, независимы и разграничены ансамбли нервных возбуждений, тем короче время дифференцировочных реакций и выше точность ответа [2; 14]. Развитая дискриминативная способность мозга нужна для организации сложных дифференцированных и многоуровневых когнитивных компонентов, отражающих интеллектуальную способность человека.

В исследованиях Е. В. Волковой показано, важнейшим *психологическим* условием развития общих и специальных способностей является формирование концептуальных структур, релевантных предметной области деятельности: чем выше мера соответствия данных структур объекту, тем продуктивнее деятельность субъекта. *Важнейшим физиологическим* условием формирования данных структур является дискриминативная способность мозга к концентрации и разграничению очагов и потоков нервных возбуждений в соответствующих нервных структурах. Концептуальные структуры имеют сложное иерархическое строение, каждый из уровней характеризуется определенным числом выделяемых и кодируемых признаков объекта, следовательно, и своими частотными характеристиками. Чем выше уровень обобщения, тем выше степень упорядочивания системы, мерой которого является изменение энтропии системы. Однако энтропия ведет к выравниванию вероятности и снятию различий между уровнями обобщения, необходимы определенные энергетические затраты [5]. Как отмечал Л. М. Веккер [3], для разделения уровней обобщенности признаков объекта и поддержания инвариантности между ними требуются определенные энергетические затраты, определенная работа, наиболее доступным

показателем которой является время различения стимул-объектов. Таким образом, чем выше уровень обобщения (уровень сложности) концептуальной структуры, тем больше должно требоваться энергии для поддержания различий между уровнями и, следовательно, должно быть больше время сложного выбора. Данные, представленные в таблице 1, подтверждают этот теоретический вывод: до формирующего эксперимента время реакции детализированного уровня сложности больше, чем время реакции базового уровня и глобального. Однако после формирующего эксперимента время выполнения сложной и сложнейших дифференцировок составило 42 мс. Как мы видим, в результате эксперимента, направленного на формирование концепта *Вещество*, достоверно увеличивается скорость выполнения задания, что отражается в уменьшении времени реакции сложного выбора, и возрастает точность его выполнения. Следует отметить, что, несмотря на высокую мотивацию участников исследования, детализированный уровень концепта *Вещество* у студентов психологов сформировать так и не удалось (число ошибок классификации стимул составляет 42,85%).

На основании данных об уменьшении времени реакции сложного выбора в результате сформированности концепта, постулируется возрастание нейроэффективности выполнения деятельности, однако эмпирических данных об изменении энергозатрат в терминах показателей спектра мощности ЭЭГ представлено не было. Поэтому следующая задача состояла в изучении динамики показателей спектра мощности ЭЭГ в процессе формирования разноуровневой организации концепта *Вещество*.

Об информационно-энергетических характеристиках когнитивной деятельности можно судить по спектру мощности амплитудно-временных показателей биоэлектрической активности, которые связаны с энергетикой в регистрируемых областях коры головного мозга, обусловленных, согласно Н. Н. Даниловой, системами неспецифической и специфической активации мозга [6].

Под межуровневыми различиями спектра мощности ЭЭГ понимаются различия показателей спектра мощности при выполнении респондентами дифференцировок химических стимул объектов на разных уровнях сложности: глобальный vs базовый и базовый vs детализированный.

Реальное психологическое и физиологическое содержание частотных диапазонов спектра мощности, его границ является одним из самых противоречивых вопросов.

Формирование концепта *Вещество* сопровождается изменением целого комплекса объективных психологических и физиологических показателей, поведенческих характеристик респондентов на всех этапах исследования, субъективных переживаний успеха/неуспеха решения задач.

Сопоставление показателей спектра мощности ЭЭГ при формировании концепта *Вещество* и динамики его формирования в терминах времени реакции сложного выбора, анализа видеозаписей эксперимента может позволить выдвинуть следующую психологическую интерпретацию частотных диапазонов:

Дельта (0-3 Гц)

а) исчезновение значимых межуровневых различий спектра мощности ЭЭГ (3 vs 0) в случае сформированности глобального и базового уровня концепта *Вещество*, т. е. высокой устойчивой скорости и устойчивой точности выполнения заданий различения простых/сложных соединений и различения классов неорганических соединений; что открывает путь перестройки образования и снижения школьных перегрузок.

б) расширение частотного диапазона спектра мощности (8 vs 11), на котором обнаруживаются значимые различия в случае, когда детализированный уровень еще не сформирован в полной мере, но скорость и точность выполнения дифференцировок химических стимул-объектов значимо возросла; особый интерес состоит в том, что данное расширение частотного диапазона спектра межуровневых различий (базовый vs

детализированный) реализуется за счет включения частот межуровневых различий несформированных глобальный vs базовый и базовый vs детализированный уровней. Это объясняет причину перегрузки - недоразвитость понятийных систем.

Тета (4-8 Гц)

а) исчезновение значимых межуровневых различий спектра мощности ЭЭГ (8 vs 0) в случае сформированности глобального и базового уровня концепта *Вещество*;

б) формирование концепта *Вещество* сопровождается сужением частотного диапазона, на котором сохраняются значимые различия показателей спектра мощности при выполнении заданий на разных уровнях сложности; следует особо подчеркнуть, что суженный частотный диапазон базовый vs детализированного уровня включает один и тот же инвариантный набор частот спектра, обнаруженный в случае несформированных уровней концепта *Вещество*.

Альфа (9-13 Гц)

а) в случае несформированного концепта выявлено единственное значимое межуровневое различие альфа-спектра мощности ЭЭГ в случае сложной и сложнейшей переработки информации (базовый vs детализированный уровень);

б) отсутствие каких-либо достоверных межуровневых различий как в случае сформированных глобальном и базовом уровнях, так и в случае несформированного детализированного уровня.

Бета (14-30 Гц)

а) чрезвычайно резкое увеличение количества значимых межуровневых различий спектра мощности ЭЭГ при возрастании сложности переработки информации (от сложной до сложней) в случае несформированного концепта *Вещество* (3 vs 22) и всего 2 достоверных межуровневых различия как в случае сформированных (глобальном и базовом), так и в случае несформированного (детализированного) уровней концепта. Анализ видеонаблюдений, бесед с респондентами и литературных источников [11] позволяет предположить, что подобные изменения спектра мощности могут выступать не только в качестве маркеров утомляемости, но и знакомости/субъективной легкости выполнения заданий.

Гамма (31-40)

а) отсутствие значимых различий при сравнении показателей мощности ЭЭГ спектра во время выполнения простых и сложных дифференцировок как в случае сформированных глобальном и базовом уровне концепта *Вещество*, так и в случае несформированных;

б) сужением частотного диапазона, на котором сохраняются значимые различия межуровневые различия показателей спектра мощности при выполнении заданий на высоком уровне сложности, когда детализированный уровень еще не сформирован в полной мере, но скорость и точность выполнения дифференцировок химических стимул-объектов значимо возросла. По-видимому, гамма-диапазон "чувствителен" только на сложнейшую информацию [7].

Заключение и выводы

1. В случае несформированного концепта *Вещество*, чем выше уровень сложности перерабатываемой информации, тем больше значимых межуровневых различий показателей спектра мощности ЭЭГ и шире частотный диапазон, на котором эти значимые различия проявляются; т. е. увеличение сложности перерабатываемой информации ведет к необходимости повышения активации мозговых структур, что проявляется в увеличении значимых межуровневых различий показателей спектра мощности ЭЭГ и расширении его диапазона.

2. Формирование концепта *Вещество* сопровождается уменьшением значимых межуровневых различий показателей спектра мощности и сужением частотного диапазона (искл. дельта, сложнейшая информация), на котором эти различия выявляются, что свидетельствует в пользу гипотезы нейроэффективности.

Сопоставляя поведенческие характеристики респондентов на всех этапах исследования (утомление, интерес, легкость, тревожность), объективные психологические показатели формирования концепта *Вещество* (точность и время реакции сложного выбора) и объективные физиологические показатели (мощность спектра ЭЭГ) можно предположить:

1) изменение частотного диапазона значимых межуровневых различий дельта-ритма может свидетельствовать об изменении затрачиваемых усилий для достижения необходимой точности задания и уменьшения времени на его выполнения;

2) изменение частотного диапазона тета-ритма может свидетельствовать о концентрации/генерализации нервных процессов, мере сформированности концепта *Вещество*;

3) изменение частотного диапазона значимых межуровневых различий бета-ритма может свидетельствовать об утомляемости, знакомости/субъективной легкости выполнения заданий;

4) изменение частотного диапазона значимых межуровневых различий гамма-ритма проявляется только при выполнении сложных и сложнейших заданий.

Литература:

1. Балин В. Д. О соотношении фоновых ЭЭГ индикаторов активации и некоторых показателей продуктивности психической деятельности. В кн.: Экспериментальная и прикладная психология. Л.: ЛГУ, 1971. С. 42-52.
2. Бойко Е. И. Механизмы умственной деятельности // Избр. психол. труды / под ред. А. В. Брушлинского и Т. Н. Ушаковой. М.: Воронеж, 2002.
3. Веккер Л. М. Психические процессы. Том 2. Мышление и интеллект. Л.: Изд-во ЛГУ, 1976. 339 с.
4. Волкова Е. В. Общий универсальный закон развития, развитие когнитивных структур химического знания и химические способности. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2008. 512 с.
5. Волкова Е. В. Психология специальных способностей: дифференционно-интеграционный подход. М.: Изд-во "Институт психологии РАН", 2011. 304 с.
6. Данилова Н. Н. Психофизиологическая диагностика функциональных состояний : учебное пособие для биол., психол. и мед. спец. вузов. М.: Изд-во МГУ, 1992. 191 с.
7. Данилова Н. Н., Быкова Н. Б., Анисимов Н. В., Пирогов Ю. А., Соколов Е. Н. Гамма-ритм электрической активности мозга человека в сенсорном кодировании // Биомедицинская радиоэлектроника. 2002. Т. 3. С. 34-42.
8. Дифференционно-интеграционная теория развития: Философское осмысление и применение в психологии, языкознании и педагогике. Тезисы докладов Второй научно-практической конференции. 4 марта 2013 г., Москва. М.: Изд-во "Институт психологии РАН", 2013. 45 с.
9. Кропотов Ю. Д. Современная диагностика и коррекция синдрома нарушения внимания. СПб.: Элби, 2005. 148 с.
10. Кулаичев А. П. Компьютерная электрофизиология и функциональная диагностика. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: ИНФРА-М, 2007. С.178-230.
11. Поликанова И. С., Леонов С. В. Психофизиологические и молекулярно-генетические корреляты утомления // Современная зарубежная психология. 2016. Т. 5. № 4. С. 24-35.
12. Русалов В. М. Темперамент в структуре индивидуальности человека: дифференциально-психофизиологические и психологические исследования. М.: ИП РАН, 2012. 528 с.
13. Чуприкова Н. И. Время реакции человека: Физиологические механизмы, вербально-смысловая регуляция, связь с интеллектом и свойствами нервной системы. М.: Издательский Дом ЯСК, 2019. 432 с.
14. Чуприкова Н. И. Психика - предмет психологии в свете достижений современной нейронауки // Вопросы психологии. 2004. № 2. С. 104-118.
15. Basten U., Stelzel C., Fiebach C. J. Intelligence is differentially related to neural effort in the task-positive and the task-negative brain network // Intelligence. 2013. 41. P. 517-528.
16. Causse M., Chua Z., Peysakhovich V., Del Campo N., Matton N. Mental workload and neural efficiency quantified in the prefrontal cortex using fNIRS // Scientific Reports. 2017. Vol. 7 (1). P. 5222
17. Costanzo M. E., Van Meter J. W., Janelle C. M., Braun A., Miller M. W., Oldham J., Russell B. A., Hatfield B. D. Neural Efficiency in Expert CognitiveMotor Performers During Affective Challenge // J. Mot Behav. 2016. 48(6) P. 573-588.
18. Dunst B., Benedek M., Jauk E., Bergner S., Koschutnig K., Sommer M. et al. Neural efficiency as a function of task demands // Intelligence. 2014. 42. P. 22- 30
19. Neubauer A. C., Fink A. Intelligence and neural efficiency: Measures of brain activation versus measures of functional connectivity in the brain // Intelligence 37(2). 2009. P. 223-229.

20. Рупма В., Berger J. S., Prabhakaran V., Bly B. M., Kimberg D. Y., Biswal B. B. et al. Neural correlates of cognitive efficiency // NeuroImage. 2006. 33. P. 969-979.

Статья поступила в редакцию 11.08.2019

Статья принята к публикации 12.09.2019

УДК 612.821

ВЕСТИБУЛЯРНЫЕ ДИСФУНКЦИИ У ДЕТЕЙ С СИМПТОМАМИ СДВГ

*Ефимова В. Л., Резник Е. Н., Николаев И. В.
Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Деская неврологическая клиника «ПРОГНОЗ»
nrpcpcn@gmail.com*

Аннотация. В статье приводятся результаты аппаратного исследования вестибулярной функции у детей 7-13 лет с импульсивностью, гиперактивностью, невнимательностью и трудностями в обучении. Показано, что у 89,8% из 103 обследованных детей выявлены вестибулярные дисфункции. Возможно, гипореактивность вестибулярной системы является причиной проблемного поведения и трудностей в обучении.

Ключевые слова: гиперактивность, импульсивность, невнимательность, СДВГ, дефицит внимания, вестибулярная система.

VESTIBULAR DYSFUNCTIONS IN CHILDREN WITH A SYMPTOM OF ATTENTION AND HYPERACTIVITY DEFICIENCY

*Efimova V.L., Reznik E.N., Nikolaev I.V.
Russian Federation, St. Petersburg,
The neurological clinic "PROGNOZ"
nrpcpcn@gmail.com*

The diagnosis of ADHD is one of the most controversial among developmental disorders in children. Although it is widely used in many countries, the brain mechanisms of this disorder are still poorly understood.

The diagnostic criteria for ADHD are presented in two international classifications: DSM-5 and ICD-11 (2018). Both classifications are based on the evaluation of extremely qualitative indicators: manifestations of inattention, hyperactivity and impulsivity, which first appear in the behavior of a child under 6 years, observed at least 6 months and are manifested in at least two different situations, for example, at home and at school.

The article presents the results of a hardware study of vestibular function in children aged 7-13 years with impulsivity, hyperactivity, inattention and learning difficulties. It was shown that 89,8% of 103 examined children had vestibular dysfunction. Perhaps the hyperactivity of the vestibular system is the cause of problem behavior and learning difficulties.

Key words: hyperactivity, impulsivity, inattention, ADHD, attention deficit, vestibular system.

Диагноз СДВГ является одним из самых спорных среди нарушений развития у детей. Хотя он широко используется во многих странах, мозговые механизмы этого нарушения по-прежнему остаются недостаточно изученными.

Диагностические критерии СДВГ представлены в двух международных классификациях: DSM-5 и МКБ-11 (2018). Обе классификации базируются на оценке исключительно качественных показателей: проявлений невнимательности, гиперактивности