

Научная статья

УДК 612.821:61.519.715(082)

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ В КЛИНИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИИЛ.Я. Доцоев¹, А.М. Усынин², А.Н. Рагозин³, В.Ф. Тележкин^{3,*}, А.Д. Плетенкова³

¹ Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет, Челябинск, Россия

² Южно-Уральский государственный медицинский университет, Челябинск, Россия

³ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

* E-mail: telezhkinvf@susu.ru

Аннотация. Системный подход, это направление методологии науки, в основе которого лежит исследование объектов как систем. Зачастую о системе говорят как о чем-то собранном вместе, упорядоченном, организованном, но не упоминают критерий, по которому произошло это объединение, например, систему кровообращения, пищеварения. Ясно, что здесь термин «система» употребляется в смысле принадлежности этого феномена к определенному типу анатомических образований, объединенных принципами нормальной физиологии. При системном подходе речь идет не об акценте на каком-либо анатомическом признаке участвующих компонентов, а о принципах активной организации многих компонентов как единое целое. Системный анализ имеет дело со сложными ситуациями, проблемами, объектами. Сложное – значит неизвестное, непонятное, непредсказуемое, обладает неопределенностью и требует приобретения знаний. Основная процедура системного анализа – построение модели. Модели строятся для управления, познания, представления и передачи знаний, имитации и преобразования реальности. В любом случае модель – это форма представления знаний о прошлом, настоящем и будущем.

Ключевые слова: системный анализ; медицина; модель; физиология; биоэлектрические свойства.

Для цитирования: Доцоев Л.Я., Усынин А.М., Рагозин А.Н., Тележкин В.Ф., Плетенкова А.Д. Системный анализ в клинической электрофизиологии // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2023. Т.9. №3. С. 71–83.

Original article

SYSTEM ANALYSIS IN CLINICAL ELECTROPHYSIOLOGYL.Ya. Dotsoyev¹, A.M. Usynin², A.N. Ragozin³, V.F. Telezhkin^{3,*}, A.D. Pletenkova³

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² South Ural State Humanitarian and Pedagogical University, Chelyabinsk, Russia

³ South Ural State Medical University, Chelyabinsk, Russia

* E-mail: telezhkinvf@susu.ru

Abstract. The system approach is a branch of the methodology of science, which is based on the study of objects as systems. Often the system is spoken of as something gathered together, ordered, organized, but they do not mention the criterion by which this unification took place, for example, the circulatory system, digestion. It is clear that here the term "system" is used in the sense that this phenomenon belongs to a certain type of anatomical formations united by the principles of

normal physiology. With a systematic approach, we are not talking about an emphasis on any anatomical feature of the components involved, but about the principles of the active organization of many components as a whole. System analysis deals with complex situations, problems, objects. Complex means unknown, incomprehensible, unpredictable, has uncertainty and requires the acquisition of knowledge. The main procedure of system analysis is the construction of a model. Models are built for management, cognition, representation and transfer of knowledge, imitation and transformation of reality. In any case, the model is a form of representation of knowledge about the past, present and future.

Key words: *system analysis, medicine, model, physiology, bioelectric properties.*

For citation: Dotsoyev L.Ya., Usynin A.M., Ragozin A.N., Telezhkin V.F., Pletenkova A.D. System analysis in clinical electrophysiology. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2023. V.9, No. 3, pp. 71–83.

Введение

Электрофизиология – раздел физиологии, изучающий биоэлектрические свойства таких органов, как сердца. В нейробиологии она включает в себя измерения электрической активности нейронов и, в частности, разность потенциалов, возникающих в тканях мозга. Эта разность потенциалов очень мала (не более 100 мкВ), поэтому их регистрация и измерение возможны только при помощи высокочувствительных аппаратов — электроэнцефалографов, усиливающих и записывающих биопотенциалы мозга. Электроэнцефалографические исследования, проводимые на современных многоканальных электроэнцефалографах, позволяют записывать одновременно биотоки, получаемые от многих отделов головного мозга. Выявленные нарушения электрической активности мозга носят различный характер при тех или других патологических состояниях и нередко помогают при диагностике эпилепсии, опухолевого, сосудистого, инфекционного и других патологических процессов в головном мозге. Применение электроэнцефалографии помогает определить локализацию патологического очага, а нередко и характер заболевания. ЭЭГ головного мозга ребенку назначает врач-невропатолог для диагностики и уточнения сосудистых, органических заболеваний головного мозга. Исследование абсолютно безопасно и может проводиться как новорожденным, младенцам, так и детям более старшего возраста. Электроэнцефалография показывает локализацию очагов эпилептиформной активности, степень и динамику заболевания, эффективность подобранной терапии. Поэтому область ее применения очень широка. Иногда врач направляет ребенка на ЭЭГ даже при отсутствии определенных соматических патологий. Показаниями к ее проведению являются отклонения в поведении, развитие, несоответствующее возрасту, слабая память и отсутствие концентрации, гиперактивность. Отдельное развитие электрофизиологических дисциплин – типичный пример расчленения природных явлений в соответствии с существующими научными дисциплинами. Возрастающая профессиональная дифференциация медиков является значительным препятствием к интегративной электрофизиологии. Однако необходимость в подробном изучении множества возникающих функциональных состояний целостного организма обусловила актуальность проблемы исследования сложных физиологических процессов в их целостности, взаимодействии, что требует системного подхода (СА) к их анализу. Кроме того, в силу уникальности системы, в которую включен в качестве элемента человек (медико-биологические объекты), характеризующиеся открытостью и саморазвитием. Эти системы требуют для своего изучения междисциплинарного подхода. В результате междисциплинарных исследований усиливаются процессы взаимодействия принципов и представлений, формирующихся в различных науках.

Постановка задачи

Были обследованы дети и подростки, а по результатам этих исследований построены концептуальные модели регуляции гемодинамики у них. Для изучения ритмики волновых процессов головного мозга в данной работе использованы программные модули спектрального анализа с расчетом простой и частной когерентности между гомологичными межполушарными и внутриволновыми смежными отведениями ЭЭГ. Целью исследования и использования СА является следующая задача: построить концептуальную модель отношений и взаимодействий различных системообразующих структур, составляющих биоэлектрическое поле головного мозга.

Задача СА в электрофизиологии решается двумя взаимно дополняющими путями, в целом представляющими междисциплинарный подход. Первый путь – экспериментальные и клинические наблюдения и анализ изменений индивидуально-типовых вариаций и колебаний устойчивости электрофизиологических процессов, их взаимовлияния. Второй путь – исследования системной электрофизиологии: формальный, то есть эмпирическое описание множественных возможных состояний системы с формальным определением границы предельных состояний, т.е. условий функционирования системы, за пределами которых нарушается целостность системы.

Материалы и методы

Обследованы практически здоровые дети возрастом 4-5 лет, всего 23 человека, которые были направлены врачами разных специальностей – неврологом, психиатром, психотерапевтом и психологом. Причины обращения к врачу были жалобы родителей на поведенческие нарушения своих детей, со слов их дети со своими сверстниками бывают слишком гиперактивны. Впрочем, привычная веселая игровая динамика здоровых детей 5–6 лет напоминает «броуновское движение». На общение с врачами разных специальностей все дети реагировали адекватно и были спокойны по возрасту во время обследований.

В данной работе использовался прибор «Нерософт» электроэнцефалограф 16-канальный, схема электродов монополярно по схеме 10–20. Энцефалограмма (ЭЭГ) регистрировалась в присутствии одного из родителей. Длительность регистрации фона определялась усидчивостью ребенка в состоянии спокойного расслабленного бодрствования с закрытыми глазами. Психологический комфорт пациента создавался медсестрой. Обследованные дети эмоционально подвижные, поэтому, детская возрастная дизритмия отражена в ритмике ЭЭГ здорового ребенка 4-5 лет. Провоцирующие тесты – гипервентиляция и фотостимуляция, проводились с учетом поведенческой реакции ребенка. По результатам визуального анализа ЭЭГ у всех обследованных детей уровень развития электрической активности коры и состояние регулирующих структур головного мозга соответствуют возрасту, патологические изменения не были выявлены.

В приложении компьютерного энцефалографа «Нерософт» для анализа был выбран интервал ЭЭГ и сохранён в виде формате текстового файла ASCII. Такой формат позволяет проводить анализ параметров исходного сигнала всех отведений ЭЭГ в другом приложении – исходный файл ASCII из «Нерософт» выгружался в Excel и трансформировался в формат rpn или txt. Спектральный анализ параметров ЭЭГ проводился в программном приложении ЮУрГУ. Для анализа волновой активности ЭЭГ на частотах бета-ритма 14-20Гц и 20-35Гц достаточно использовать временной интервал 17-20 секунд без артефактов.

Системные свойства головного мозга выступают на первый план в изучении формирования разных ритмов электрической активности: диапазоны частот дельта-, тета-, бета- и взаимовоздействия разных структур на энцефалограмме (ЭЭГ).

Монополярные отведения F3A1, C3A1, T3A1, F7A1, F4A2, C4A2, T4A2 и F8A4 определяют область корковых образований полушарий мозга, регионально вовлеченные в интегративную деятельность. Математические методы системного анализа ЭЭГ

представляют междисциплинарный подход к рассмотрению изменений колебаний электрофизиологических процессов и их взаимовлияния [1].

В настоящей работе применяются прикладные математические программы, которые ранее были использованы в исследованиях сердечно-сосудистой системы (ССС), когда проводилось непрерывное детектирование волновых колебаний величин электрофизиологических параметров гемодинамики "от удара к удару сердца" (beat-to-beat). Были использованы общепринятые диапазоны вариабельности сердечного ритма – очень медленные метаболические волны (VLF); медленные волны (LF) – активность симпатического отдела вегетативной нервной системы (ВНС), быстрые волны (HF) – активность парасимпатического отдела ВНС [2-10].

Системный подход к анализу параметров сердечно-сосудистой системы в электрофизиологии позволил описать механизмы сосудистой барорегуляции у подростков с пониженным, нормальным и повышенным артериальным давлением (АД). В результате была построена пространственная концептуальная волновая модель регуляции гемодинамики по результатам спектрального анализа параметров СССР с расчетом простой и частной когерентности. Сдвиг фазы между волн колебаний величин разных структур СССР на частоте барорегуляции (LF) позволил нам рассуждать о влиянии в регуляции АД резонанс между ритмом и сократимости сердца, жесткости и податливости магистральных артерий [11-14]. Таким образом, сердечно-сосудистая и нервная системы, интегративно составляющие организма, не обладают всеми свойствами системы в целом по П.К. Анохину [15].

Чтобы оптимально представить данные обследований использовался избирательный подход к анализу статистически синхронных связей с помощью амплитудно-фазовых частотных характеристик. Для этого обычно ограничиваются двумя схемами связи для расчета простой и частной когерентности между шестью электродами – F3A1, C3A1, F7A1, F4A2, C4A2, и F8A4, для оценки внутрислоушарных отношений между близлежащими (смежными) отведениями и межполушарные отношения между гомологичными отведениями в правом и левом полушарии. В данной работе будет построена концептуальная модель межполушарной связи по величинам статистической синхронизации между электродами F4A–F3A, C3A2–C4A4 интегративно с близлежащими структурами.

Результаты исследования

Величина функции простой когерентности используются как количественный показатель синхронности и этим оценивается уровень вовлечения различных корковых зон. Электрическая активность мозга тесно связана с его функциональной деятельностью, постольку когерентность, в определенной мере, указывает на вовлеченность разных зон коры в обеспечение выполнения функций мозга, то есть является количественным выражением уровня интегративной деятельности мозговых структур. Когерентный анализ ЭЭГ считается индикатором функциональных взаимосвязей между различными корковыми областями [16].

Из таблицы 1 следует оценка внутрислоушарных отношений между близлежащими отведениями – величина функции простой когерентности между смежных отведений указывает на высокую статистическую синхронность на частотах в диапазонах 10–20 Гц (β_1) и 20–35 Гц (β_2).

Это соответствует представлениям об устойчивой связи между смежными образованиями в передних отделах одного полушария. Известны изменения коэффициента когерентности во время взросления организма, когда изменяются частотно-амплитудные характеристики ЭЭГ, в том числе синхронность сигналов между корковыми зонами.

Например, второй период (от 4 до 6 лет) характеризуется усилением синхронности лобно-височной области левой гемисферы [17].

Максимальная величина функции когерентности между смежными отведениями справа и слева одинакова, а на частотах 14–20 Гц средняя величина γ^2 слева меньше, чем

справа. При этом сдвиг по фазе между волнами F4A2–F8A2 и F3A1–F7A1 слева больше, чем справа (таблица 1).

Таблица 1 – Величина функции простой когерентности между близлежащими отведениями у детей 4-5 лет ($M \pm \sigma$)

14-20Гц	C4A2–F4A2	C3A1–F3A1	F8A2 - T4A2	F7A1 - T3A1	F4A2–F8A2	F3A1–F7A1
γ^2	0.8±0.1	0.8±0.14	0.7±0.14	0.8±0.10~	0.8±0.1	0.8±0.1
средн γ^2	0.61±0.18	0.6±0.18	0.4±0.14	0.1±0.03*	0.62±0.17	0.15±0.03*
$\Delta\phi$	0.11±0.17	-0.03±0.33~	-0.24±0.72	0.08±0.48~	0.1±0.12	-0.2±0.15*
$\Delta\phi$ абс	0.16±0.13	0.22±0.24	0.42±0.64	0.27±0.4	0.13±0.09	0.21±0.13*
f (Гц)	17±2	18±2	17±2.01	17±1.80	18±2	17±2
20-35Гц	F4A2–C4A2	C3A1- F3A1	F8A2 - T4A2	F7A1 - T3A1	F4A2– F8A2	F3A1–F7A1
γ^2	0.9±0.1	0.9±0.11	0.8±0.11	0.8±0.11	0.9±0.1	0.9±0.1
средн γ^2	0.63±0.19	0.6±0.19	0.5±0.15	0.5±0.18	0.61±0.15	0.57±0.17
$\Delta\phi$	0.05±0.65	0.17±0.42	-0.29±0.86	0.09±0.69~	0.14±0.16	-0.44±0.15*
$\Delta\phi$ абс	0.30±0.57	0.21±0.40	0.37±0.83	0.37±0.59	0.18±0.11	0.44±0.15*
f (Гц)	30±5	26±5*	26±4	30±4~	28±5	27±5

Примечание * $P < 0,05$ ~ $P < 0,10$

Был проведен поиск характерных периодов процессов, которые были бы соизмеримы с периодами колебаний основных ритмов ЭЭГ (порядок – 0,1 с). При этом выявлено существование достаточно длинных цепей из последовательно включенных нейронов, синаптическая задержка каждого из которых составляет величину порядка 1 мс [18]. Связь между F4A2–F8A2 справа оказалась более жесткой, это можно объяснить меньшим количеством связей в синапсах между нейронами, где происходит задержка передачи сигналов. Это отражено величиной сдвига фазы слева.

Известно то, что внутрислошарная когерентность для корковых зон правого полушария выше, чем для левого [19]. Это можно объяснить наличием более высокого отношения белого вещества (длинные связи-меньше синапсов) к серому веществу (короткие связи-больше синапсов) в правом полушарии. Это обнаружилось при анатомических исследованиях полушарий головного мозга [20].

Возможно, высокую внутрислошарную когерентность правого полушария и меньшую фазу сдвига справедливо рассматривать как показатель более низкого уровня кортикальной дифференциации.

Простота информационной модели динамических систем определяется тем насколько удастся выделить наиболее существенные параметры, характеризующие состояние системы. Однако теоретически величина функции простой когерентности между парами, например, F4A2–F3A1, F3A2–F3A1, F3A2–F7A1, F4A2–F8A2, C3A2–C4A4 не всегда служит хорошей характеристикой межполушарной связи, например, между гомологичными межполушарными отведениями F4A–F3A или C3A2–C4A4. Поэтому для получения надежных результатов о связи между ними лучше использовать функцию условной частной когерентности.

Ранее было установлено, что при формировании функциональных систем (по Анохину) структуры, которые в них вовлекаются в процессе интегративной деятельности, имеют общие черты организации – частотные и фазовые характеристики [21, 22]. В настоящей работе биоэлектрическая активность, регистрируемая с поверхности смежных структур головного мозга, оказывается близкими по структуре, что следует из таблицы 1.

Следовательно, в определенной мере можно исключить из связи активность одного или одновременно двух смежных структур для того, чтобы повысить точность и, возможность, достоверность получаемых результатов когерентности. Это позволяет установить, в какой степени меняется сила связи на частоте после того, как из связи

исключено влияние, не зависящих от времени связей с другими составляющими структур, вовлеченные в процесс интегративной деятельности головного мозга.

Тогда возникает такой вопрос – какие причины могут усилить или ослабить межполушарную связь между гомологичными отведениями до и после исключения других составляющих смежных структур системы в правом и левом полушарии, возможно, скорее всего – это шум или доминирующая связь между другими близлежащих смежных структур.

Конкретный генез бета-ритма головного мозга до сих пор не ясен. Известно, что бета-ритмы с частотой от 13 до 30 Гц чаще всего встречаются в лобных или центральных областях, поэтому параметры ЭЭГ становятся доступными непосредственному экспериментальному измерению. Клиническая интерпретация результатов обследований практически здоровых 23 детей лежит вне границ обсуждения электрофизиологии головного мозга.

Из таблицы 2 и 3 следует оценка межполушарных отношений между лобными гомологичными отведениями в правом и левом полушарии F4A2 и F3A1.

Таблица 2 – Величина функции простой и частной когерентности между гомологичными межполушарными отведениями F4A2– F3A1 до и после исключения других составляющих смежных структур системы (M±σ)

14-20Гц (β1)	γ^2	средн γ^2	$\Delta\phi$	$\Delta\phi$ абс	f (Гц)
F4A2– F3A1	0.5±0.1	0.2±0.1	0.07±0.52	0.4±0.3	17±2
F4A2–F3A1, безF7A1	0.5±0.11	0.17±0.04*	0.18±0.76	0.55±0.54	17±2
F4A2–F3A1, безF8A2	0.5±0.11	0.18±0.05~	0.11±0.62	17±1.89	17±2
F4A2– F3A1, безF7A1, F8A2	0.55±0.11~	0.18±0.04*	0.11±0.97	0.68±0.68	17±2
20-35Гц (β2)	γ^2	средн γ^2	$\Delta\phi$	$\Delta\phi$ абс	f (Гц)
F4A2–F3A1	0.5±0.09	0.1±0.02	0.3±0.9	0.7±0.6	29±4
F4A2–F3A1, безF7A1	0.5±0.09	0.1±0.02	0.51±1.0	0.86±0.7	29±1
F4A2–F3A1 безF8A2	0.5±0.1	0.1±0.03	0.2±1.04	0.79±0.69	27±5
F4A2– F3A1 безF7A1, F8A2	0.6±0.08~	0.2±0.02*	0.2±1.33	1.02±0.85	28±5

Таблица 3 – Величина функции простой и частной когерентности между гомологичными межполушарными отведениями F4A2– F3A1 до и после исключения других составляющих смежных структур системы (M±σ)

β1 (14-20Гц)	γ^2	средн γ^2	$\Delta\phi$	$\Delta\phi$ абс	f
F4A2–F3A1	0.5±0.1	0.2±0.1	0.07±0.5	0.4±0.3	17±2
F4A2–F3A1 безC3A1	0.4±0.1*	0.15±0.03*	0.48±1*	0.8±0.7*	17±2
F4A2–F3A1 безC4A2	0.45±0.1~	0.15±0.04*	0.03±0.9	0.67±0.53*	17±2
F4A2–F3A1 безC3A1, C4A2	0.5±0.1	0.17±0.05*	0.4±1~	0.85±0.8*	17±2
β2 (20-35Гц)	γ^2	средн γ^2	$\Delta\phi$	$\Delta\phi$ абс	f (Гц)
F4A2–F3A1	0.5±0.09	0.1±0.02	0.3±0.9	0.7±0.6	29±1
F4A2–F3A1 безC3A1	0.5±0.08	0.1±0.02	0.65±1.34	1.2±0.9*	27±4*
F4A2–F3A1 безC4A2	0.5±0.08~	0.1±0.02~	0.22±1.37~	1.2±0.7*	28±4
F4A2–3A1 безC3A1, C4A2	0.6±0.08*	0.2±0.02*	0.02±1.35	1±0.9	30±3

Примечание * P <0.05, ~ P <0.1

Последовательно исключаются сигналы смежных структур, при этом значение частной когерентности может изменяться относительно величины исходной простой когерентности. Этим методом выявляются сигналы структур, которые в пространстве изменяют значение когерентности и фазовые сдвиги, где функционирует эта церебральная система. Результаты позволяют рассуждать, в каких случаях пространственная структура полученной системы может быть относительно стабильна.

Из таблицы 2 следует, что исключение из связи между F4A2–F3A1 последовательно и вместе гомологичных отведений F7A1, F8A2 привело к снижению средней величины когерентности в диапазоне частот 14–20 Гц (β_1) достоверно и увеличение на частотах 20–35 Гц (β_2), недостоверно, при этом частотные отношения не изменились.

Аналогично исключаются из связи между F4A2–F3A1 взятые из других сигналов гомологичных структур C3A1 и C4A2, последовательно и одновременно.

Из таблицы 3 следует, что на частотах β_1 после удаления смежных структур из связи между F4A2–F3A1 активность коры головного мозга (ГМ) приводит к снижению статистической синхронизации максимальной величины γ^2 без C3A1 до 0.4, а при исключении последовательно и одновременно C3A1, C4A2 средняя величина γ^2 тоже уменьшается достоверно. А в диапазоне частот β_2 абсолютная и средняя величина функции частной когерентности без C3A1, C4A2 возрастает, достоверно.

Степень статистической синхронизации, как сила связи между центральными структурами C4A2–C3A1 изменилась после того, как из связи было исключено последовательно и вместе гомологичные лобные структуры F3A1, F4A2. Это отражено в динамике величин γ^2 от простой когерентности к частной.

При этом, следует отметить, что фазовые сдвиги $\Delta\phi$ абс между волнами F4A2–F3A1 на всех частотах становится больше, достоверно (таблица 3).

Таблица 4 – Величина функции простой и частной когерентности между гомологичными межполушарными отведениями C4A2–C3A1 до и после исключения других составляющих смежных структур системы ($M \pm \sigma$)

β_1 (14-20Гц)	γ^2	средн γ^2	$\Delta\phi$	$\Delta\phi$ абс	f (Гц)
C4A2–C3A1	0.6±0.1	0.2±0.06	0.02±0.9	0.6±0.6	17±2
C4A2–C3A1 безF3A1	0.4±0.1*	0.15±0.04*	0.15±1.18	0.96±0.67	16±2
C4A2,-C3A1 безF4A2	0.4±0.1*	0.16±0.04*	0.19±1.14	0.88±0.73	17±2
C4A2–C3A1 безF3A1, F4A2	0.5±0.1	0.18±0.04	0.04±1.24	0.94±0.79	16±2*
β_1 (20-35Гц)	γ^2	средн γ^2	$\Delta\phi$	$\Delta\phi$ абс	f (Гц)
C4A2–C3A1	0.5±0.1	0.15±0.03	0.32±1.32	1.1±0.7	26±4
C4A2–C3A1 безF3A1	0.6±0.1*	0.15±0.02	-0.3±1.6	1.24±1.02	28±4~
C4A2–C3A1 безF4A2	0.5±0.1	0.14±0.02	0.11±1.53	1.24±0.86	28±4
C4A2–C3A1 безF3A1, F4A2	0.6±0.1*	0.17±0.02*	-0.35±1.62	1.31±0.98	29±4*

Примечание * $P < 0.05$, ~ $P < 0.1$

Из таблицы 4 следует, где в диапазоне частот β_1 максимальная величина γ^2 снижается и где увеличивается на частотах β_2 , достоверно, при этом фазовые сдвиги не наблюдаются.

Примечательно то, что когда исключили электрическую активность передне-височной области по одному и одновременно F7A1, F8A2, то степень статистической синхронизации по величине частной когерентности γ^2 между C4A2–C3A1 возрастает относительно исходной простой γ^2 , достоверно. При этом фазовые отношения не изменились (табл. 5).

Таблица 5 – Величина функции простой и частной когерентности между гомологичными межполушарными отведениями структурами С4А2–С3А1 до и после исключения других составляющих смежных структур системы ($M \pm \sigma$)

$\beta 1$ (14-20 Гц)	γ^2	средн γ^2	$\Delta\phi$	$\Delta\phi$ абс	f (Гц)
С4А2–С3А1	0.6±0.1	0.2±0.06	0.02±0.9	0.6±0.6	17±2
С4А2–С3А1 безF7А1	0.5±0.1	0.19±0.04	0.10±0.71	0.73±0.44	16±2
С4А2–С3А1 безF8А2	0.5±0.1~	0.18±0.03~	-0.20±0.70	0.68±0.52	17±2
С4А2–С3А1 безF7А1, F8А2	0.5±0.1	0.19±0.03	-0.13±0.75	0.74±0.5	17±1
$\beta 2$ (20-35 Гц)	γ^2	средн γ^2	$\Delta\phi$	$\Delta\phi$ абс	f (Гц)
С4А2–С3А1	0.5±0.1	0.15±0.03	0.32±1.32	1.1±0.7	26±4
С4А2–С3А1 безF7А1	0.6±0.1*	0.16±0.02	0.36±0.9	0.94±0.6	29±4*
С4А2–С3А1 безF8А2	0.6±0.1*	0.16±0.03	0.49±1.01	1.06±0.8	26±3
С4А2–С3А1 безF7А1, F8А2	0.6±0.1*	0.17±0.02*	0.24±1.12	1.16±0.7	27±4

Примечание * P < 0.05, ~ P < 0.1

Таблица 6 – Простая и частная когерентность на частотах $\beta 2$ (20-35Гц) ($M \pm \sigma$)

20-35Гц	$\gamma 2 \geq 0.6$	$\gamma 2 < 0.6$
С4А2–С3А1	n=3	n=20
$\gamma 2$	0.7±0.05	0.5±0.05*
С4А2–С3А1 безF7А1	n=12	n=11
$\gamma 2$	0.6±0.03	0.5±0.04*
С4А2–С3А1 безF8А2	n=15	n=8
$\gamma 2$	0.6±0.04	0.5±0.03*
С4А2–С3А1 безF7А1, F8А2	n=13	n=10
$\gamma 2$	0.7±0.03	0.5±0.04*
С4А2–С3А1 безF3А1	n=13	n=10
$\gamma 2$	0.6±0.06	0.5±0.06
С4А2–С3А1 безF4А2	n=5	n=18
$\gamma 2$	0.6±0.04	0.5±0.05*
С4А2–С3А1 безF3А1, F4А2	n=15	n=8
$\gamma 2$	0.6±0.06	0.5±0.05*

Примечание * P < 0,05

Как следует из таблицы 6, результаты сравнения детей с различным уровнем связи С4А2–С3А1 показали, при удалении из связи отведения F7А1, F8А2 и F3А1, F4А2 величина когерентности – возросла. Таких детей стало больше, достоверно (Хи-квадрат).

При оценке когерентности у здоровых пациентов, пик когерентных значений локализуется преимущественно в передних зонах неокортекса лобных и центральных отведениях, а по направлению к каудальным отделам значения когерентности уменьшаются. Это согласуется с представлением об интегративной функции лобных долей («первичного ассоциативного центра») по А.Р. Лурия [23, 24, 25].

Отсчеты кривых стандартной ЭЭГ были использованы для построения разных моделей связи между структур на ЭЭГ.

Возникает концептуальная модель, временно интегративно вовлеченных в функциональную систему С4А2–С3А1–F7А1–F8А2–F3А1–F4А2. Структуры лобно-передне-височной области оказывают заметное влияние на смежные структуры. В таком случае можно структуры лобно-передне-височной области рассматривать как ядерную часть в модели межцентральной связи между структур С4А2–С3А1, что следует из табл. 1–6.

Это согласуется с представлением об интегративной функции лобных долей, которые находятся в сильной взаимосвязи с другими отделами мозга через длинные кортико-

кортикальные ассоциативные волокна [24, 25]. Так же, известно, что период развития детей от 4 до 6 лет характеризуется усилением синхронности лобно-височных левой гемисферы, позже с 7 лет и справа [17].

Выводы

Системный анализ сам по себе уже является новым словом в науке, а лучшая его концепция в виде теории функциональной системы, созданная академиком Петром Кузьмичом Анохиным, без сомнения, имеет прорывное значение в поисках этиологии и патогенеза любого заболевания. Системный анализ должен сменить сегодняшний базовый метод изучения болезней — метод клинико-анатомических сопоставлений, потерявший свое лидирующее положение [26]. Схема системного подхода к исследованию и проектированию объектов содержит категории: проблемная ситуация, цель, функция, структура, ресурс, внешние условия [27]. Данная модель оказалась продуктивной для решения задачи, поставленной в настоящей работе.

Таким образом, по результатам применения системного анализа к исследованию простой и частной когерентности можно предполагать и верифицировать различные модели электрофизиологической связи процессов, а именно:

- влияние одного процесса на другой;
- влияние на них общего источника;
- искать высокосинхронные связи с целью дифференциации функциональных состояний, например, нормы и патологии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Компьютер и мозг. Новые технологии. Сборник статей / Отв. ред. Белоцерковский О.М. Москва: Наука, 2005. 322 с.
2. Усынин А.М., Астахов А.А. Механизмы variability при симпатикотонии и парасимпатикотонии у детей // Медицинская наука и образование Урала. 2008. №4. С. 114–115.
3. Астахов А.А., Усынин А.М., Доцоев Л.Я. Особенности сосудистой барорегуляции у детей при синдроме вегетативной дистонии // Последипломное медицинское образование и наука. 2008. №2. С. 11-12.
4. Колкин В.Л., Аксенов В.В., Усынин А.М., Рагозин А.Н., Вагнер Н.И. Оценка функционального состояния организма школьников в условиях стрессовой психоэмоциональной нагрузки // Санитарный врач. 2009. №4. С. 18–19.
5. Банникова Л.П., А.М. Усынин, Себирзянов М.Д. Влияние социальных факторов на течение процессов биологической адаптации у детей с задержкой психического развития психогенного происхождения // Уральский медицинский журнал. 2015. №10. С. 89–97.
6. Доцоев Л.Я., Усынин А.М., Вагнер Н.И. и др. Функциональное состояние учащихся 11–12 лет в условиях интенсивных учебных нагрузок по данным анализа variability сердечного ритма // Физиология человека. 2003. Т. 29. № 4. С. 62–64.
7. Доцоев Л.Я., Усынин А.М. Variability амплитуды пульсового кровенаполнения сосудов различных регионов у детей 13-15 лет в зависимости от систолического артериального давления // Российский национальный конгресс кардиологов. Приложение к журналу «Кардиоваскулярная терапия и профилактика». 2003. Т. 2. №3. С. 106.
8. Дулькин Л.А., Усынин А.М., Вагнер Н.И., Доцоев Л.Я. Комплексная оценка центральной и периферической гемодинамики у детей 13-15 лет с различным уровнем систолического артериального давления // Российский национальный конгресс кардиологов.

Приложение к журналу «Кардиоваскулярная терапия и профилактика». 2003, Т. 2. №3. С. 109.

9. Баевский Р.М. Прогнозирование состояний на грани нормы и патологии. Москва: Медицина, 2014. 295 с.

10. Kitney Ed.R.I., Rompelman O. The study of heart-rate variability. Oxford, England: Clarendon Press, 1980. 246 p.

11. Доцоев Л.Я., Астахов А.А., Усынин А.М. Ортостатические расстройства кровообращения у школьников // Физиология человека. 2009. Т. 35. № 3. С. 119-124.

12. Доцоев Л.Я., Астахов А.А., Усынин А.М. Барорецепторный рефлекс и артериальная жесткость у подростков // Физиология человека. 2011. Т. 37. № 3. С. 27-35.

13. Доцоев Л.Я., Рагозин А.Н., Усынин А.М., Астахов А.А., Тележкин В.Ф. Исследование интегративной деятельности сердца и сосудов с помощью амплитудно-фазовых частотных характеристик // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2017. Т. 3. № 3. С. 80-96.

14. Рагозин А.Н., Усынин А.М., Тележкин В.Ф., Доцоев Л.Я., Плетенкова А.Д., Астахов А.А. Применение спектрального и когерентного анализа физиологических сигналов при исследовании функциональных расстройств вегетативной нервной системы и нарушении сердечного ритма школьников // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2020. Т. 6. № 1. С. 69-80.

15. Анохин П.К. Теория функциональной системы // Успехи физиол. наук. 1970. Т. 1. № 1. С. 19-54.

16. Иванов Л.Б. Об информативности применения когерентного анализа в клинической электроэнцефалографии // Журнал высшей нервной деятельности. 2011. Т. 61. № 4, С. 499-512.

17. Фарбер Д.А., Семенова Л.К., Алферова В.В. и др. Структурно-функциональная организация развивающегося мозга. Ленинград: Наука, 1990. 197 с.

18. Eccles J.C. The neurophysiological basis of mind. Oxford. 1953. 314 p.

19. Thatcher R.W., McAlaster R., Lester M.L. et al. Hemispheric EEG asymmetries related to cognitive functioning in children // Cognitive processing in the right hemisphere / A. Perelman (Ed.). New York: Academic Press, 1983, pp. 125-146.

20. Gur R.C., Packer I.K., Hungerbuhler J.P. et al. Differences in the distribution of gray and white matter in human cerebral hemispheres // Science. 1980. Vol. 207, pp. 1226-1228.

21. Майоров О.Ю., Глухов А.Б. Системный подход к моделированию работы лимбической системы в условиях экспериментального эмоционального стресса: способы оценки адекватности модели // Материалы междунар. советско-американской Павловской конф. «Эмоции и поведение: системный подход». Москва, 1984. С. 185-187.

22. Майоров О.Ю., Глухов А.Б. Установление параметров и оценка ошибок при цифровом спектральном анализе ЭЭГ // Физиология человека. 1988. Т. 14, № 1. С. 81-86.

23. Лурия А.Р. Основы нейропсихологии. Москва: Академия, 2003. 384 с.

24. Лобные доли и регуляция психических процессов. Нейропсихологические исследования / Под ред. А.Р.Лурия и Е.Д.Хомской. Москва: МГУ. 1966. 740 с.

25. Функции лобных долей мозга. / Под ред. А.Р. Лурия, Е.Д. Хомская. Москва: Наука. 1982. 283 с.

26. Анохин П.К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем // Принципы системной организации функций. Москва: Наука, 1973. С. 5-61.

27. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Основы системного анализа: учебник. Томск: Изд-во НТЛ, 1997. 396 с.

REFERENCES

1. *Komp'iuter i mozg* [Computer and brain]. Novye tekhnologii. Sbornik statej / Otv. red. Belocerkovskij O.M. Moscow: Nauka, 2005. 322 p.
2. Usynin A.M., Astakhov A.A. *Mekhanizmy variabel'nosti pri simpatikotonii i parasimpatikotonii u detei* [Mechanisms of variability in sympatheticotonia and parasympathicotonia in children]. *Meditsinskaia nauka i obrazovanie Urala*. 2008. No 4, pp. 114–115.
3. Astakhov A.A., Usynin A.M., Dotsoev L.I.A. *Osobennosti sosudistoi baroregulatsii u detei pri sindrome vegetativnoi distonii* [Features of vascular baroregulation in children with vegetative dystonia syndrome]. *Poslediplomnoe meditsinskoe obrazovanie i nauka*. 2008. No 2, pp. 11-12.
4. Kolkin V.L., Aksenov V.V., Usynin A.M., Ragozin A.N., Vagner N.I. *Otsenka funktsional'nogo sostoianiia organizma shkol'nikov v usloviakh stressovoi psikhoemotsional'noi nagruzki* [Evaluation of the functional state of the body of schoolchildren under stressful psycho-emotional load]. *Sanitarnyi vrach*. 2009. No 4, pp. 18–19.
5. Bannikova L.P., A.M. Usynin, Sebirzianov M.D. *Vliianie sotsial'nykh faktorov na techenie protsessov biologicheskoi adaptatsii u detei s zaderzhkoi psikhicheskogo razvitiia psikhogennogo proiskhozhdeniia* [The influence of social factors on the course of biological adaptation processes in children with mental retardation of psychogenic origin]. *Ural'skii Meditsinskii Zhurnal*. 2015. No. 10, pp. 89–97.
6. Dotsoev L.I.A., Usynin A.M., Vagner N.I. i dr. *Funktsional'noe sostoianie uchaschikhsia 11–12 let v usloviakh intensivnykh uchebnykh nagruzok po dannym analiza variabel'nosti serdechnogo ritma* [The functional state of students aged 11–12 years under conditions of intensive training loads according to the analysis of heart rate variability]. *Fiziologiya cheloveka*. 2003. T. 29. No 4, pp. 62–64.
7. Dotsoev L.I.A., Usynin A.M. *Variabel'nost' amplitudy pul'sovogo krovenapolneniia sosudov razlichnykh regionov u detei 13-15 let v zavisimosti ot sistolicheskogo arterial'nogo davleniia* [Variability of the amplitude of pulse blood filling of vessels in different regions in children aged 13-15 years, depending on systolic blood pressure]. *Rossiiskii natsional'nyi kongress kardiologov. Prilozhenie k zhurnalu "Kardiovaskuliarnaia terapiia i profilaktika"* 2003. Vol. 2. No. 3, 106 p.
8. Dul'kin L.A., Usynin A.M., Vagner N.I., Dotsoev L.I.A. *Kompleksnaia otsenka tsentral'noi i perifericheskoi gemodinamiki u detei 13-15 let s razlichnym urovnem sistolicheskogo arterial'nogo davleniia* [Comprehensive assessment of central and peripheral hemodynamics in children aged 13-15 years with different levels of systolic blood pressure]. *Rossiiskii natsional'nyi kongress kardiologov. Prilozhenie k zhurnalu "Kardiovaskuliarnaia terapiia i profilaktika"*. 2003. Vol. 2. No. 3, 109 p.
9. Baevskii R.M. *Prognozirovanie sostoianii na grani normy i patologii* [Forecasting states on the verge of norm and pathology]. Moscow: Medicina, 2014. 295 p.
10. Kitney Ed.R.I., Rompelman O. *The study of heart-rate variability*. Oxford, England: Clarendon Press, 1980, 246 p.
11. Dotsoev L.I.A., Astakhov A.A., Usynin A.M. *Ortostaticheskie rasstroistva krovoobrashcheniia u shkol'nikov* [Orthostatic circulatory disorders in schoolchildren]. *Fiziologiya cheloveka*. 2009. Vol. 35. No 3, pp. 119-124.
12. Dotsoev L.I.A., Astakhov A.A., Usynin A.M. *Baroretseptorniye refleksi i arterial'naya zhestkost' u podrostkov* [Baroreceptor reflex and arterial stiffness in adolescents]. *Fiziologiya cheloveka*. 2011. Vol. 37. No 3, pp. 27-35.
13. Dotsoev L.I.A., Ragozin A.N., Usynin A.M., Astakhov A.A., Telezhkin V.F. *Issledovanie integrativnoi deiatel'nosti serdtsa i sosudov s pomoshch'iu amplitudno-fazovykh chastotnykh kharakteristik* [Study of the integrative activity of the heart and blood vessels using

amplitude-phase frequency characteristics]. *Vestnik nauki i obrazovaniia Severo-Zapada Rossii*. 2017. Vol. 3. No 3, pp. 80-96.

14. Ragozin A.N., Usynin A.M., Telezhkin V.F., Dotsoev L.IA., Pletenkova A.D., Astakhov A.A. *Primenenie spektral'nogo i kogerentnogo analiza fiziologicheskikh signalov pri issledovanii funktsional'nykh rasstroistv vegetativnoi nervnoi sistemy i narushenii serdechnogo ritma shkol'nikov* [The use of spectral and coherent analysis of physiological signals in the study of functional disorders of the autonomic nervous system and heart rhythm disorders in schoolchildren]. *Vestnik nauki i obrazovaniia Severo-Zapada Rossii*. 2020. Vol. 6. No 1, pp. 69-80.

15. Anokhin P.K. *Teoriia funktsional'noi sistemy* [Functional system theory]. *Uspekhi fiziol. nauk*. 1970. Vol. 1. No 1, pp. 19-54.

16. Ivanov L.B. *Ob informativnosti primeneniia kogerentnogo analiza v klinicheskoi elektroentsefalografii* [On the informativeness of the use of coherent analysis in clinical electroencephalography]. *Zhurnal vysshei nervnoi deiatel'nosti*. 2011. Vol. 61. No 4, pp. 499-512.

17. Farber D.A., Semenova L.K., Alferova V.V. et al. *Strukturno-funktsional'naia organizatsiia razvivaiushchegosia mozga*. [Structural and functional organization of the developing brain] Leningrad: Nauka, 1990. 197 p.

18. Eccles J.C. *The neurophysiological basis of mind*. Oxford. 1953, 314 p.

19. Thatcher R.W., McAlaster R., Lester M.L. et al. Hemispheric EEG asymmetries related to cognitive functioning in children. Cognitive processing in the right hemisphere. A. Perecman (Ed.). New York: Academic Press, 1983, pp. 125-146.

20. Gur R.C., Packer I.K., Hungerbuhler J.P. et al. Differences in the distribution of gray and white matter in human cerebral hemispheres. *Science*. 1980. Vol. 207, pp. 1226-1228.

21. Maiorov O.Iu., Glukhov A.B. *Sistemnyi podkhod k modelirovaniu raboty limbicheskoi sistemy v usloviakh eksperimental'nogo emotsional'nogo stressa: sposoby otsenki adekvatnosti modeli* [A systematic approach to modeling the work of the limbic system under conditions of experimental emotional stress: methods for assessing the adequacy of the model]. *Materialy mezhdunar. sovetsko-amerikanskoi Pavlovskoi konf. "Emotsii i povedenie: sistemnyi podkhod"*. Moscow, 1984, pp. 185-187.

22. Maiorov O.IU., Glukhov A.B. *Ustanovlenie parametrov i otsenka oshibok pri tsifrovom spektral'nom analize EEG* [Establishment of parameters and estimation of errors in digital spectral analysis of EEG]. *Fiziologiya cheloveka*. 1988'. Vol. 14, No 1, pp. 81-86.

23. Lurii A.R. *Osnovy neiropsikhologii*. [Fundamentals of Neuropsychology]. Moscow: Akademiya, 2003. 384 p.

24. *Lobnye doli i reguliatsiia psikhicheskikh protsessov. Neiropsikhologicheskie issledovaniia*. [Frontal lobes and regulation of mental processes. Neuropsychological research] / Pod redaktsiei A.R. Lurii i E.D.Khomskoi. Moscow: MGU. 1966. 740 p.

25. *Funktsii lobnykh dolei mozga*. [Functions of the frontal lobes of the brain] / Ed. A.R. Lurii, E.D. Khomskaia. Moscow: Nauka. 1982. 283 p.

26. Anokhin P.K. *Printsipial'nye voprosy obshchei teorii funktsional'nykh sistem / V sb. Printsipy sistemnoi organizatsii funktsii*. [Fundamental questions of the general theory of functional systems]. Moscow: Nauka, 1973, pp. 5-61.

27. Peregudov F.I., Tarasenko F.P. *Osnovy sistemnogo analiza*: [Fundamentals of system analysis]. Uchebnik. Tomsk: Izd-vo NTL, 1997. 396 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Доцоев Леонид Яковлевич – кандидат мед. наук, доцент, Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический уни-

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dotsoyev Leonid Yakovlevich – Ph.D. (Med.), Assoc. Prof., South Ural State Humanitarian and Pedagogical University, (454080, Russia,

верситет (454080, Россия, г. Челябинск, пр. Ленина, 69, e-mail: docoev@cspu.ru)

Усынин Анатолий Михайлович – врач высшей категории, Южно-Уральский государственный медицинский университет, (454092, Россия, г. Челябинск, ул. Воровского, 64, e-mail: Usynin@mail.ru)

Рагозин Андрей Николаевич – доцент, Южно-Уральский государственный университет (454080, Россия, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76, e-mail: ragozinan@susu.ru)

Тележкин Владимир Федорович – доктор технических наук, профессор, Южно-Уральский государственный университет (454080, Россия, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76, e-mail: telezhkinvf@susu.ru)

Плетенкова Анастасия Дмитриевна – аспирант, Южно-Уральский государственный университет (454080, Россия, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76, e-mail: nastya.pletenkova@mail.ru)

Chelyabinsk, Lenin Ave., 69, e-mail: docoev@cspu.ru)

Usynin Anatoly Mikhailovich – Doctor of the highest category, South Ural State Medical University, (454092, Russia, Chelyabinsk, st. Vоровского, 64, e-mail: Usynin@mail.ru)

Ragozin Andrey Nikolaevich – Assoc. Prof., South Ural State University (454080, Russia, Chelyabinsk, Lenin Ave., 76, e-mail: ragozinan@susu.ru)

Telezhkin Vladimir Fedorovich – Dr.Sci. (Eng), Prof., South Ural State University (454080, Russia, Chelyabinsk, Lenin Ave., 76, e-mail: telezhkinvf@susu.ru)

Pletenkova Anastasiya Dmitrievna – Graduate student, South Ural State University (454080, Russia, Chelyabinsk, Lenin Ave., 76, e-mail: nastya.pletenkova@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 08.06.2023; одобрена после рецензирования 21.08.2023, принята к публикации 16.09.2023.

The article was submitted 08.06.2023; approved after reviewing 21.08.2023; accepted for publication 16.09.2023.