

Оптический журнал

Биомедицинская оптика

УДК 535-15, 612.08, 615.47, 616.1, 616-71, 617-7

Оптические и электрофизиологические методы оценки функционального состояния нейронных сетей зрительной системы

© 2021 г. С. В. Муравьева, канд. мед. наук, К. Е. Козуб, С. В. Пронин

Институт физиологии им. И.П. Павлова Российской академии наук, Санкт-Петербург

E-mail: muravsvetlana@mail.ru

Поступила в редакцию 20.09.2021

DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-12-42-49

Исследовали два основных канала зрительной системы, отличающихся как пространственно-частотными характеристиками, так и размерами клеточной структуры нейронных сетей. Применили сочетание оптических и электрофизиологических технологий измерения свойств этих каналов в норме и при когнитивных нарушениях. Для электрофизиологических измерений с помощью цифровой фильтрации были сформированы стимулы с пространственно-частотными характеристиками, дающими возможность избирательной активации каждого из каналов. С помощью оптической когерентной томографии и электрофизиологических измерений у испытуемых с когнитивными нарушениями была установлена взаимосвязь морфологических и функциональных изменений в канале зрительной системы, который образован преимущественно мелкоклеточной нейронной сетью и обеспечивает обработку высоких пространственных частот.

Ключевые слова: зрение, оптическая когерентная томография, вызванные потенциалы, сетчатка, когнитивные нарушения, пространственно-частотная фильтрация.

Коды OCIS: 330.033, 330.6110, 330.7329, 330.5380.

ВВЕДЕНИЕ

Объём зрительной информации, поступающей при восприятии естественных сцен непосредственно с рецепторов сетчатки глаза человека, очень велик. Для того чтобы сделать возможным обработку этой информации в реальном масштабе времени, в зрительной системе имеется ряд механизмов, позволяющих уменьшить этот объём. Аналогично в системах технического зрения, использующих камеры высокого разрешения, эта сложность преодолевается разбиением анализа изображения на два этапа. На первом этапе с помощью быстрых алгоритмов производится поиск участков изображения, которые могут содержать представляющие интерес фрагменты.

На втором этапе производится детальный анализ найденных фрагментов с высоким разрешением. Аналогичный механизм имеется и в зрительном анализаторе человека — это так называемые магно-каналы, образующие магноцеллюлярную систему, и парво-каналы, образующие парвоцеллюлярную систему. Магно-система соответствует первому этапу анализа в системах технического зрения [1]. Она чувствительна к низким пространственным частотам, низким контрастам и способна давать быстрый ответ на временные изменения изображения. Магно-система обеспечивает «пространственное» зрение (локализация объектов и ориентацию в пространстве). Парво-система чувствительна к высоким про-

пространственным частотам, высоким контрастам. Она даёт более медленный ответ по сравнению с магно-системой. Парво-система отвечает за «объектное зрение» (анализ цвета, текстуры и распознавание мелких деталей предметов и мелких объектов).

При ряде заболеваний наблюдаются нарушения нормальной работы этих систем. Методики, предназначенные для выявления этих нарушений, основаны на использовании зрительных стимулов с пространственно-частотными характеристиками, позволяющими избирательное воздействие на ту или иную систему. В качестве примера можно привести визоконтрастометрию, основанную на измерении зависимости пороговых контрастов от пространственных частот, или измерение зрительных вызванных потенциалов (ЗВП) с использованием изображений, подвергнутых цифровой фильтрации [2–4]. Но эти методы, помогая установить сам факт нарушения функционирования того или иного канала, не всегда позволяют локализовать его подсистему, ответственную за эти изменения в его работе. Для того, чтобы ответить на этот вопрос, желательно, в частности, иметь возможность исследовать морфологические изменения в нейронном субстрате этих подсистем.

Входным звеном обоих систем является сетчатка глаза. Для магно-системы входом является периферийная область сетчатки, для парво-системы — фовеа, расположенная в макулярной области [5]. Поэтому представляет интерес исследование связи морфологических изменений структуры сетчатки с характером изменений активности высокочастотных и низкочастотных каналов обработки зрительной информации.

Для контроля работы парво-системы в целом использовали методику ЗВП, где в качестве зрительных стимулов применяли изображения, подвергнутые цифровой фильтрации. Для прижизненного исследования структурных изменений сетчатки использовали оптическую когерентную томографию (ОКТ). Физические принципы и клиническое значение этого метода подробно рассмотрены в обзоре Серебрякова и соавторов [6]. Этот обзор даёт наиболее ясное представление о его физических возможностях и об ограничениях. Оптическая когерентная томография основана на обратном рассеянии низкогерентного

инфракрасного излучения биологическими тканями различной плотности. Это позволяет создавать изображение глазных тканей с разрешением по глубине до 1 мкм. В интерферометре пучок света от источника делится на два пучка, один из которых отражается от исследуемой ткани, а второй от эталонного зеркала. По характеру интерференции между двумя этими пучками при движении эталонного зеркала можно определить локализацию изменений в исследуемой ткани по глубине [7]. В настоящее время ОКТ широко применяется в офтальмологии [6, 8]. Этот быстрый и неинвазивный метод позволяет получать информацию о нейроструктуре сетчатки и зрительного нерва. Поэтому его целесообразно использовать для исследования пациентов с когнитивными нарушениями [9–12]. Данные группы пациентов с шизофренией, полученные с помощью ОКТ, были опубликованы ранее в [13].

Целью данной работы является исследование связи морфологических изменений в макулярной области сетчатки, являющейся входным звеном высокочастотных парво-целлюлярных каналов (парво-системы), с нарушениями функционирования последующих звеньев этих каналов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования глазного дна с помощью ОКТ выполняли на спектральном оптическом когерентном томографе Topcon 3D OCT 2000. Использовали режимы 3D Macula [6,0×6,0 mm — 512×128], Radial Macula [6,0 mm — 102×12] и 3D Disc. При интерпретации макулярных протоколов оценивали следующие параметры: средняя и центральная толщина сетчатки в мкм, макулярный объём в мм³, фовеальная толщина сетчатки и толщина сетчатки в пара- и перифовеальной области по секторам согласно зональному стандарту ETDRS (Early Treatment of Diabetic Retinopathy Study (исследование по раннему лечению диабетической ретинопатии)). Мануально рассчитывали диаметр фовеолы обоих глаз как среднее расстояние между краями внутреннего плексiformного слоя по результатам 6 измерений в режиме радиального сканирования (ориентация сканов 0, 30, 60, 90, 120, 150 градусов). В протоколе исследования диска зри-

тельного нерва анализировали следующие показатели: площадь диска зрительного нерва (ДЗН) в мм^2 , отношение площади экскавации к площади ДЗН, площадь нейроретинального пояска в мм^2 и общая толщина слоя нервных волокон сетчатки (СНВС) в $\mu\text{м}$. Статистическую обработку полученных данных выполняли в программах Microsoft Excel и IBM SPSS 26. При проведении статистической обработки использовали описательную статистику, непараметрический анализ сравнения независимых выборок с применением критерия Манна–Уитни. Значимыми считались различия при $p < 0,05$.

Функциональные нарушения зрительной системы у пациентов анализировали с помощью электрофизиологического исследования когнитивных ЗВП, описанного в ранних наших работах [2–4]. В качестве зрительных стимулов использовали изображения хорошо знакомых испытуемым объектов, подвергнутых цифровой пространственной фильтрации. Параметры фильтров были подобраны так, чтобы изображения вызывали избирательную активацию двух систем зрения: высокочастотную (парво-) систему и низкочастотную (магно-) систему (рис. 1). Цифровую пространственную фильтрацию осуществляли путём свёртки изображений с DoG-функцией (сокр. от Difference Of Gaussians), представляющей собой разность двух двумерных функций Гаусса с различной полушириной. Для выделения высоких пространственных частот использовали фильтр с максимальным значением пропускания на частоте 10 цикл/град.,

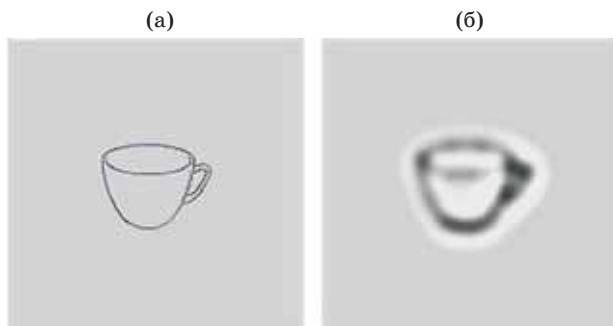


Рис. 1. Пример чёрно-белого изображения — объекта неживой природы, подвергнутого цифровой фильтрации путём свёртки с DoG-функцией в области высоких (а) и низких пространственных частот (б).

низких частот — 1 цикл/град. Был использован набор из 90 монохромных контурных изображений. Средняя яркость и контраст всех изображений были одинаковы. Изображения предъявляли в случайном порядке на 100 мс с интервалом в 1 с. В задачу наблюдателя входило различение объектов по семантическим признакам. Требовалось максимально быстро нажатие на левую клавишу «мыши», когда наблюдатель видит объект живой природы, и на правую клавишу, когда объект относится к неживой природе.

Зрительные вызванные потенциалы регистрировали с помощью энцефалографа “Мицар-ЭЭГ-202” (частота дискретизации 250 Гц, полоса пропускания усилителей — 0,32–35 Гц) и программы WinEEG. Регистрацию электроэнцефалограммы проводили с помощью электроэнцефалографической шапочки ElectroCap с 19-ю электродами, расположеными на поверхности головы в соответствии с международной системой 10-20 в отведениях Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, T3, C3, Cz, C4, T4, T5, P3, Pz, P4, T6, O1, O2. Референтные электроды располагали на мочках ушей, а заземляющий электрод — в лобной области.

При обработке данных сравнивали амплитуды компонентов вызванных потенциалов (ВП) при восприятии низкочастотных и высокочастотных изображений. Метод был описан ранее [14]. Эпоха анализа продолжительностью в 700 мс была разделена на четыре временных интервала, соответствующих номенклатуре компонентов: 90–160 мс — P100 (N100), 160–250 мс — N170 (P170), 250–350 мс — N250 (P250) и 350–500 мс — P300–P500. В каждом временном окне находили значения амплитуды, соответствующие пикам основных компонентов ВП (максимум для позитивных волн и минимум для негативных волн) для каждого отведения. После этого проводили статистическое сравнение значений амплитуды компонентов, полученных в ответ на предъявление отфильтрованных по высоким и низким пространственным частотам различных типов стимулов у здоровых испытуемых и пациентов, страдающих шизофренией. Порог статистической достоверности результатов регистрации ВП рассчитывался в программе STATISTICA 12 с помощью критерия Вилкоксона W и составил уровень значимости отличий 5%, $p < 0,05$.

Условия проведения исследований соответствовали этическим нормам Хельсинкской декларации всемирной медицинской ассоциации. Все пациенты и здоровые наблюдатели подписывали информированное согласие.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование проводили на 14 пациентах с параноидной формой шизофрении в возрасте от 21 до 40 лет со средней продолжительностью болезни $6,7 \pm 3,4$ года. Все испытуемые с шизофренией проходили обследование, находясь на лечении в психиатрическом стационаре в стадии обострения и находились на лекарственной антипсихотической терапии. Критерием исключения было наличие высокой миопии, любая макулярная патология или нейрооптикапатия. Контрольную группу составили 30 психически здоровых испытуемых без офтальмологической патологии в возрасте от 18 до 35 лет. Всем испытуемым были выполнены стандартный офтальмологический осмотр, оптическая когерентная томография сетчатки и электрофизиологическое исследование — измерение когнитивных ЗВП.

На рис. 2 показано ОКТ-изображение сетчатки пациента с параноидной формой шизофрении.

зофрении из группы обследуемых нами пациентов. При анализе макулярных протоколов ОКТ (рис. 3) и измерений диаметра фовеолы в группе шизофрении выявлена тенденция к увеличению средних значений всех индексов (таблица). Однако достоверно различными при сравнении группы шизофрении с группой контроля оказались только средние значения макулярного объёма ($p = 0,04$), средней толщины сетчатки ($p = 0,04$), толщины сетчатки во внутреннем верхнем ($p = 0,03$), в наружном верхнем ($p = 0,05$) и в наружном нижнем ($p = 0,05$) секторах макулярной зоны обоих глаз. Следует отметить, что наибольшие показатели макулярного объема в группе шизофрении зафиксированы у пациента в обострении с хроническим галлюцинациями и непрерывным течением болезни, практически не имеющим ремиссии на протяжении 12 лет (рис. 4). При анализе протоколов 3D Disc достоверных различий в морфометрических параметрах ДЗН и толщины слоя нервных волокон сетчатки (CHBC) в двух группах не выявлено.

При оценке данных ЗВП выявлено отличие в соотношении амплитуд компонентов по сравнению с данными контрольной группы. У контрольной группы амплитуда в ответ на предъявление изображений высоких пространственных частот достоверно выше

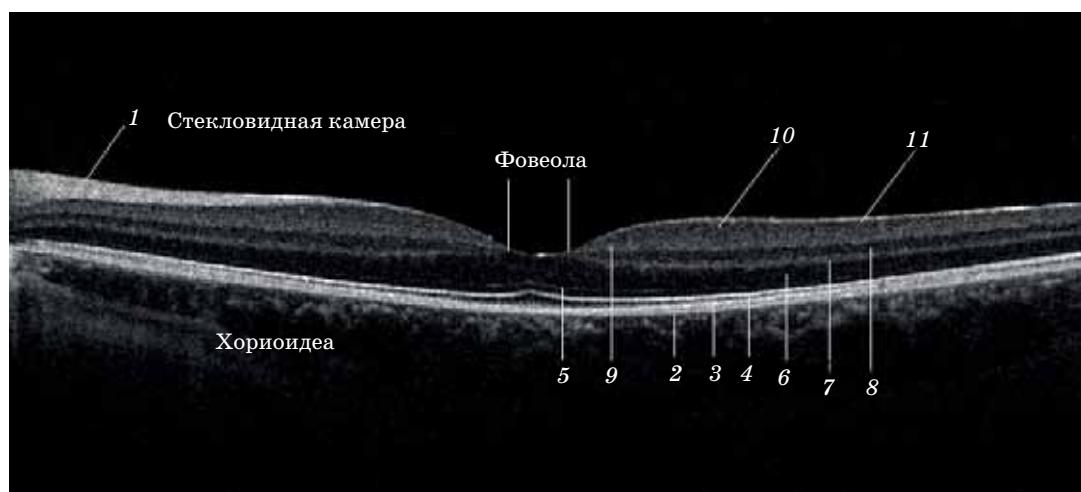


Рис. 2. ОКТ-изображение сетчатки пациента с параноидной формой шизофрении. 1 — слой нервных волокон сетчатки, 2 — комплекс ПЭС/мембрана Бруха, 3 — зона контакта апикальных отростков пигментного эпителия сетчатки с наружными сегментами колбочек, 4 — эллипсоидная зона фоторецепторов, 5 — наружная пограничная мембрана, 6 — наружный ядерный слой, 7 — наружный плексiformный слой, 8 — внутренний ядерный слой, 9 — внутренний плексiformный слой, 10 — слой ганглиозных клеток, 11 — внутренняя пограничная мембрана.

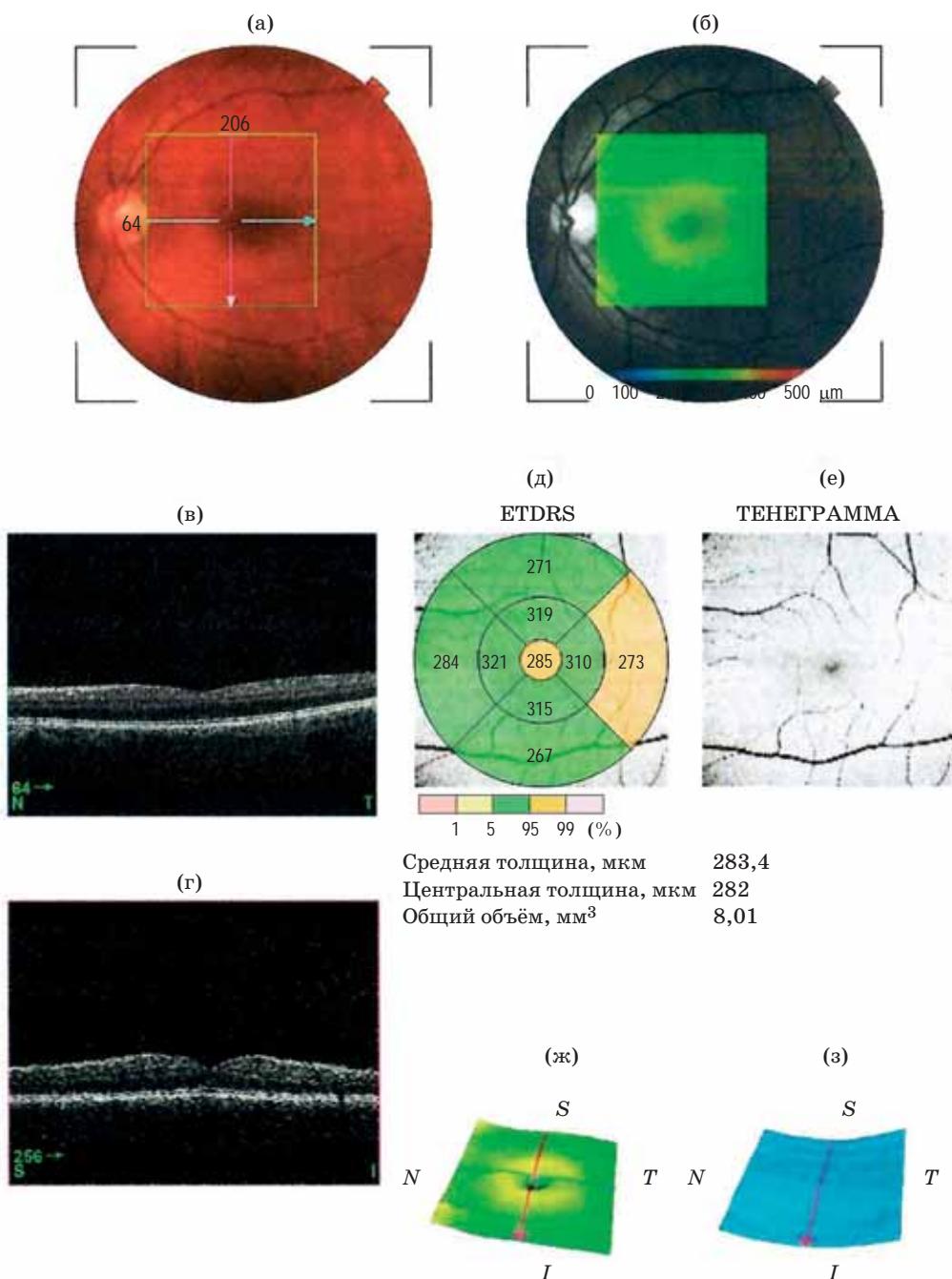


Рис. 3. Протокол исследования 3D Macula 6,0×6,0 мм пациента с параноидной формой шизофрении. (а) — фото глазного дна с обозначенной областью сканирования и общим количеством выполняемых сканов, (б) — фото глазного дна в бескрасном цвете с нанесённой цветной картой толщины сетчатки в пределах области сканирования от внутренней пограничной мембранны до пигментного эпителия сетчатки в мкм, (в) — вертикальный В-скан сетчатки с указанием направления и общего количества вертикально ориентированных сканов, (г) — горизонтальный В-скан сетчатки с указанием направления и общего количества горизонтально ориентированных сканов, (д) — карта толщины сетчатки по зонам ETDRS (Early Treatment of Diabetic Retinopathy Study — исследование по раннему лечению диабетической ретинопатии) с указанием отклонений согласно нормативной базы томографа и соответствующим цветовым обозначением, (е) — теневая диаграмма поверхности сетчатки, (ж) — карта рельефа внутренней поверхности сетчатки с разделением на зоны: *N* — носовая, *T* — височная, *S* — наружная, *I* — внутренняя, (з) — карта рельефа пигментного эпителия сетчатки с разделением на те же зоны.

Объём и толщина сетчатки в различных зонах у пациентов с шизофренией (группа 1) и у контрольных испытуемых (группа 2)

Испытуемые	Группа 1	Группа 2
Средняя толщина, мкм	$278,71 \pm 11,78^*$	$272,62 \pm 9,83^*$
Фoveальная толщина, мкм	$243,38 \pm 19,6$	$239,31 \pm 12,06$
Внутренняя верхняя толщина, мкм	$314,42 \pm 13,66^*$	$307,08 \pm 10,48^*$
Внутренняя носовая толщина, мкм	$312,88 \pm 14,06$	$308,19 \pm 11,18$
Внутренняя височная толщина, мкм	$297,04 \pm 13,71$	$292,54 \pm 8,43$
Внутренняя нижняя толщина, мкм	$305,92 \pm 13,15$	$302,23 \pm 11,41$
Наружная верхняя толщина, мкм	$270,50 \pm 11,47^*$	$264,23 \pm 11,15^*$
Наружная носовая толщина, мкм	$290,42 \pm 13,37$	$283,73 \pm 14,07$
Наружная височная толщина, мкм	$258,23 \pm 13,15^*$	$252,58 \pm 8,99^*$
Наружная нижняя толщина, мкм	$266,69 \pm 12,89$	$259,19 \pm 14,03$
Макулярный объём, мм ³	$7,88 \pm 0,33^*$	$7,7 \pm 0,28^*$
Длина фовеа, мкм	$418,96 \pm 66,61$	$416,00 \pm 73,18$

* — достоверно значимые различия.

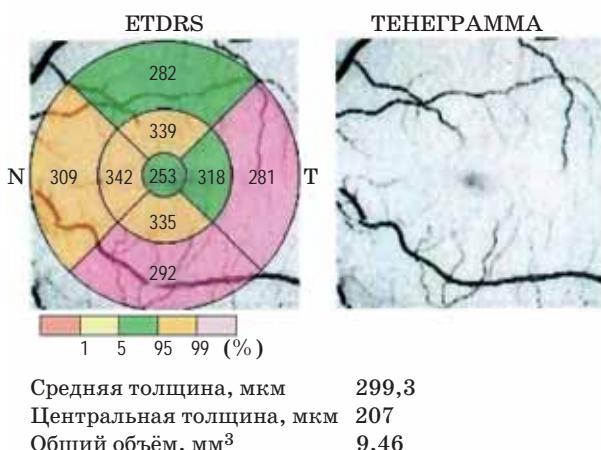


Рис. 4. Протокол исследования 3D Macula пациента с тяжелым течением шизофрении. Макулярный протокол исследования у пациента, включающий зональный стандарт ETDRS с указанием толщины сетчатки в каждом секторе, значения средней толщины сетчатки в мкм, центральной толщины сетчатки в мкм и макулярного объема в мм³ и теневую диаграмму поверхности сетчатки. Зеленым цветом обозначены результаты ОКТ, встречающиеся у 90% здоровых лиц. Оранжевым — умеренные изменения, соответствующие увеличению показателя, на долю которых в норме приходится по 4% случаев. Сиреневый цвет указывает на выраженное увеличение показателя, каждое из которых встречается в норме не более, чем в 1% случаев.

амплитуды в ответ на предъявление изображений низких пространственных частот. А у пациентов в большинстве отведений при предъявлении изображений высоких и низких пространственных частот не выявлено достоверных отличий между амплитудами P100 (N100) в теменных, центральных и лобных отведениях, N170 (P170) в затылочно-височных, теменных и лобных отведениях, N250 (P250) в теменных, центральных и лобных отведениях и P350–P500 в затылочно-височных, теменных, центральных и лобных отведениях. В отдельных отведениях наблюдается обратная картина по сравнению с данными контрольной группы. В центральных отведениях амплитуда P100 (N100) и N250 (P250) при предъявлении изображений низких пространственных частот достоверно выше, чем при предъявлении изображений высоких пространственных частот.

В результате статистического анализа электрофизиологических данных — когнитивных ЗВП, было показано, что у пациентов с шизофренией наблюдается нарушение обработки зрительной информации преимущественно высокочастотной парво-системой, отвечающей за «объектное зрение», то есть обработки изображений с высокой разрешающей способностью.

ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, у пациентов, страдающих шизофренией, мы выявили изменения центральной области сетчатки, связанной преимущественно с высокочастотными каналами. Эти данные подкреплены результатами полученных электрофизиологических исследований (когнитивных ЗВП), также свидетельствующих о преимущественном снижении активности этих каналов.

Результаты исследований этих пациентов, проведённых ранее с помощью ОКТ, демонстрируют изменение макулярного объёма, толщины сетчатки в макуле, а также толщины перипапиллярного слоя нервных волокон [13, 15]. Эти данные коррелируют с изменениями контрастной чувствительности в области высоких пространственных частот [13]. Следует отметить, что данные изменения зависят от продолжительности заболевания, что может быть связано с вторичной атрофией дофаминергических клеток сетчатки. В исследовании, где сравнивались подгруппы пациентов в обострении психоза и ремиссии, выявлено, что истончение в макуле характерно для пациентов, у которых не было психотического эпизода в течение последних 6 месяцев [15]. По результатам исследования лазерной допплеровской флуориметрии были получены данные, свидетельствующие об увеличении показателей перipherической микроциркуляции у пациентов в остром психотическом состоянии и до 3-х недель после данного состояния в 1,4–1,7 раз в сравнении с группой контроля [16]. В стадии обострения заболевания у пациентов на фоне фармакотерапии наблюдалось увеличение толщины сетчатки в макуле. Этот субклинический отёк является результатом нейровоспаления и микроциркуляторных нарушений [16].

Электрофизиологические результаты противоречивы. Часть исследователей наблюдали снижение активности преимущественно низкочастотных (магно) каналов [17–20], а другие высокочастотных (парво) каналов [2, 3, 21–24] или двух систем одновременно. Данные, полученные с помощью функциональной магнитно-резонансной томографии с использованием «низкочастотных» и «высокочастотных» зрительных стимулов у па-

циентов с шизофренией на ранних стадиях, свидетельствуют о снижении восприятия только высоких пространственных частот (парвосистема), а у хронических пациентов — о нарушение восприятия всего спектра частот [22].

По полученным нами результатам наблюдается отличие в соотношении амплитуд компонентов по сравнению с данными контрольной группы: P100 (N100), N170 (P170), N250 (P250) и P350–P500. У пациентов в большинстве отведений амплитуды достоверно не отличаются при предъявлении изображений высоких и низких пространственных частот. В отдельных отведениях амплитуды компонентов при предъявлении изображений низких пространственных частот достоверно выше, чем при предъявлении изображений высоких пространственных частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовали два канала обработки зрительной информации с отличающимися пространственно-частотными характеристиками и структурой клеток. Один из них организован крупноклеточной (магно-) сетью нейронов, а другой — мелкоклеточной (парво-) сетью нейронов. Для выявления изменений входного звена каналов на уровне сетчатки использовали метод оптической когерентной томографии. Для регистрации изменений в работе последующих звеньев этих каналов применили методику когнитивных зрительных вызванных потенциалов. Создали стимулы с пространственно-частотными характеристиками, дающими возможность избирательного воздействия на магно- и парво-системы. Установили взаимосвязь между морфологическими изменениями в макулярной области сетчатки и функциональными изменениями зрительных вызванных потенциалов, впервые свидетельствующими об изменениях в работе различных этапов обработки высокочастотной зрительной информации при когнитивных нарушениях.

Работа выполнена при поддержке Госпрограммы 47 ГП «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» (2019–2030), тема 0134-2019-0006 (раздел 63.3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Шелепин Ю.Е., Хараузов А.К., Жукова О.В., Пронин С.В., Куприянов М.С., Цветков О.В. Маскировка и обнаружение скрытых сигналов в динамических изображениях // Оптический журнал. 2020. Т. 87. № 10. С. 89–102.
2. Муравьева С.В., Пронина М.В., Моисеенко Г.А., Пневская А.Н. и др. Исследование зрительных когнитивных вызванных потенциалов при шизофрении на ранних стадиях заболевания и их коррекция при помощи интерактивных виртуальных сред // Физиология человека. 2017. Т. 43. № 6. С. 24–36.
3. Муравьева С.В., Моисеенко Г.А., Чомский А.Н., Шарыбин Е.А., Кропотов Ю.Д. Стимуляция работы зрительной системы с помощью когнитивной задачи в условиях виртуальной среды у пациентов с шизофренией и депрессией // Физиология человека. 2020. Т. 46. № 5. С. 27–36.
4. Муравьева С.В., Пронин С.В., Чомский А.Н. Использование систем виртуальной реальности для стимуляции работы зрительной системы пациентов, страдающих депрессией // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 11. С. 72–78.
5. Шелепин Ю.Е. Введение в нейроонкологию. Спб.: Изд-во Троицкий мост, 2017. С. 111.
6. Серебряков В.А., Бойко Э.В., Гацу М.В., Измайлова А.С., Калинцева Н.А., Мелихова М.В., Папаян Г.В. Оптическая когерентная томографическая ангиография в диагностике офтальмологических заболеваний: проблемы и перспективы (обзор) // Оптический журнал. 2020. Т. 87. № 2. С. 67–93.
7. Астахов Ю.С., Белехова С.Г. Оптическая когерентная томография: как все начиналось и современные диагностические возможности методики // Офтальмологические ведомости. 2014. Т. VII. № 2. С. 60–68.
8. Tuchin V.V. Handbook of optical biomedical diagnostics. Methods. V. 2. WA. USA. Bellingham: SPIE Press PM263, 2016. 688 p.
9. Ferrari L., Huang S.C., Magnani G., Ambrosi A., Comi G., Leocani L. Optical coherence tomography reveals retinal neuroaxonal thinning in frontotemporal dementia as in Alzheimer's disease // Journal of Alzheimer's Disease. 2017. V. 56. № 3. P. 1101–1107.
10. Акопян В.С., Бойко А.Н., Давыдовская М.В., Семенова Н.С., Филоненко И.В., Фомин А.В., Цысарь М.А. Нейроархитектоника сетчатки при рассеянном склерозе: диагностические возможности оптической когерентной томографии (предварительные результаты) // Офтальмология. 2011. Т. 8. № 1. С. 32–36.
11. Ong Y.T., Hilal S., Venkatasubramanian N., Niessen W.J., Vrooman H. Retinal neurodegeneration on optical coherence tomography and cerebral atrophy // Neuroscience Letters. 2015. V. 584. P. 12–16.
12. Lee J.Y., Ahn J., Kim T.W., Jeon B.S. Optical coherence tomography in Parkinson's disease: is the retina a biomarker // Journal of Parkinson's Disease. 2014. V. 4. № 2. P. 197–204.
13. Козуб К.Е., Шелепин Ю.Е., Чомский А.Н., Шарыбин Е.А., Иванова Е.А. Структурно-функциональные исследования сетчатки при шизофрении // Офтальмологический журнал. 2020. № 4. С. 38–43.
14. Моисеенко Г.А., Шелепин Ю.Е., Хараузов А.К. и др. Классификация и распознавание изображений живой и неживой природы // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 10. С. 53–64.
15. Ascaso F.J., Rodriguez-Jimenez R., Cabezon L., Lopez-Anton R., Santabarbara J., De La Camara C. Retinal nerve fiber layer and macular thickness in patients with schizophrenia: influence of recent illness episodes // Psychiatry Research. 2015. V. 229 (1–2). P. 230–236.
16. Сахаров А.В., Озорнин А.С., Голыгина С.Е., Виноградова А.О., Швец М.С. Состояние микроциркуляции у пациентов с параноидной формой шизофрении // Журнал неврологии и психиатрии имени С.С. Корсакова. 2018. Т. 118. № 2. С. 74–76.
17. Kim D., Park S. Visual perception deficits associated with the magnocellular pathway in schizophrenia // Korean. Schizophr. Research. 2011. V. 14. P. 61–75.
18. Lalor E.C., De Sanctis P., Krakowski M.I., Foxe J.J. Visual sensory processing deficits in schizophrenia: Is there anything to the magnocellular account? // Schizophr. 2012. V. 139 (1–3). P. 246–252.
19. Martinez A., Hillyard S.A., Bickel S. et al. Consequences of magnocellular dysfunction on processing attended information in schizophrenia // Cereb. Cortex. 2012. V. 22 (6). P. 1282–1293.
20. Skottun B.C., Skyles J.R. Visually evoked potentials, NMDA receptors and the magnocellular system in schizophrenia // Acta Neuropsychiatrica. 2012. V. 24(1). P. 50–55.
21. Doniger G.M., Foxe J.J., Murray M.M. et al. Impaired visual object recognition and dorsal/ventral stream interaction in schizophrenia // Arch. Gen. Psychiatry. 2002. V. 59 (11). P. 1011–1020.
22. Ardekani B.A., Nierenberg J., Hoptman M.J. et al. MRI study of white matter diffusion anisotropy in schizophrenia // Neuroreport. 2003. V. 14 (16). P. 2025–2029.
23. Oribe N., Hirano Y., Kanba S. et al. Early and late stages of visual processing in individuals in prodromal state and first episode schizophrenia: An ERP study // Schizophr. Research. 2013. V. 146. P. 95–102.
24. Plomp G., Roinishvili M., Chkonia E. et al. Electrophysiological evidence for ventral stream deficits in schizophrenia patients // Schizophr. Bull. 2013. V. 39 (3). P. 547–554.