

Влияние фрактальной фотостимуляции на электроретинограмму у больных с сухой формой возрастной макулярной дегенерации

Н.В. Нероева¹, М.В. Зуева¹✉, В.И. Котелин¹, И.В. Цапенко¹, Л.А. Катаргина¹, Ю.С. Тимофеев²

¹ ФГБУ «НМИЦ глазных болезней им. Гельмгольца» Минздрава России, ул. Садовая-Черногрозская, д. 14/19, Москва, 105062, Россия

² ФГБУ «НМИЦ терапии и профилактической медицины» Минздрава России, Петроверигский пер., д. 10, Москва, 101990, Россия

Технология фрактальной фотостимуляции (ФФ), основанная на активации нейропластичности, — перспективный метод зрительной реабилитации. Ранее на животных с моделью атрофии ретинального пигментного эпителия было продемонстрировано положительное воздействие курсов ФФ на функцию и структуру сетчатки. Известны также преимущества технологий виртуальной реальности (VR) для зрительных тренировок в игровом формате, повышающем комплаентность пациента. Цель работы — оценка влияния курса ФФ в VR на объективные показатели электроретинографии у больных с сухой формой возрастной макулярной дегенерации. Материал и методы. У 20 пациентов с возрастной макулярной дегенерацией сухой формы промежуточной и поздней стадии записывали комплекс электроретинограмм (ЭРГ) по стандартам ISCEV до и в динамике после 2-недельного курса ФФ. Результаты. Показано положительное влияние ФФ на активность фоторецепторов, а также (чуть в меньшей степени) биполярных клеток скотопической и фотопической систем при большей реакции на фототерапию колбочковых нейронов. Активирующее влияние фототерапии на наружную сетчатку было наибольшим в ранние сроки после проведения курса зрительных тренировок. Положительное воздействие ФФ на активность ганглиозных клеток сетчатки нарастало после завершения курса стимуляции на протяжении по крайней мере 1 мес. Динамика мультифокальной ЭРГ говорит о генерализованном активирующем влиянии ФФ на макулярную область. Заключение. Результаты исследования обосновывают перспективность ФФ как метода зрительной реабилитации, улучшающей функциональность ретинальной нейронной сети. Она также может способствовать замедлению прогрессирования дегенеративного процесса в наружной и внутренней сетчатке.

Ключевые слова: возрастная макулярная дегенерация; зрительная реабилитация; фрактальная оптическая стимуляция; виртуальная реальность; нейропластичность; электроретинография

Конфликт интересов: отсутствует.

Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Для цитирования: Нероева Н.В., Зуева М.В., Котелин В.И., Цапенко И.В., Катаргина Л.А., Тимофеев Ю.С. Влияние фрактальной фотостимуляции на электроретинограмму у больных с сухой формой возрастной макулярной дегенерации. Российский офтальмологический журнал. 2025; 18 (2): 80-9. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2025-18-2-80-89>

Influence of fractal photostimulation on electroretinogram in patients with dry age-related macular degeneration

Natalia V. Neroeva¹, Marina V. Zueva¹✉, Vladislav I. Kotelin¹, Irina V. Tsapenko¹, Ludmila A. Katargina¹, Yury S. Timofeev²

¹ Helmholtz National Medical Research Center of Eye Diseases, 14/19, Sadovaya-Chernogryazskaya St., Moscow, 105062, Russia

² National Medical Research Center of Therapy and Preventive Medicine, 10, Petroverigsky Lane St., 101990, Moscow, Russia
visionlab@yandex.ru

In visual rehabilitation, the search for methods based on the activation of neuroplasticity is relevant, which includes the technology of fractal photostimulation (FP). Previously, a positive effect of FP courses on the function and structure of the retina was demonstrated on animals with a model of retinal pigment epithelium atrophy. On the other hand, the advantages of virtual reality (VR) technologies for visual training in a game format that increases patient compliance are known. The purpose of this work was to evaluate the effect of a FP course in VR on objective electroretinography parameters in patients with dry age-related macular degeneration (AMD). Material and methods. In 20 patients with dry AMD, intermediate and late stages, an ERG complex was recorded according to ISCEV standards before and in dynamics after a 2-week FP course. Results. A positive effect of FP on the activity of photoreceptors, as well as (to a slightly lesser extent) bipolar cells of the scotopic and photopic systems with a greater response to phototherapy of cone-related neurons were shown. The activating effect of FP on the outer retina was greatest in the early stages after the course of visual training. The positive effect of FP on the activity of retinal ganglion cells increased after the completion of the course for at least 1 month. The dynamics of multifocal ERG indicates a generalized activating effect of FP on the macula. Conclusion. The results of the study substantiate the prospects of fractal phototherapy as a method of visual rehabilitation that improves the functionality of the retinal neural network. It can also serve as a factor slowing down the progression of the degenerative process in the outer and inner retina.

Keywords: age-related macular degeneration; visual rehabilitation; fractal optical stimulation; virtual reality; neuroplasticity; electroretinography

Conflict of interests: there is no conflict of interests.

Financial disclosure: none of the authors has a financial interest in the materials or methods presented.

For citation: Neroeva N.V., Zueva M.V., Kotelin V.I., Tsapenko I.V., Katargina L.A., Timofeev Yu.S. Influence of fractal photostimulation on electroretinogram in patients with dry age-related macular degeneration. Russian ophthalmological journal. 2025; 18 (2): 80-9 (In Russ.). <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2025-18-2-80-89>

Возрастная макулярная дегенерация (ВМД) является одной из ведущих причин слабовидения. Отсутствие эффективной лекарственной терапии ВМД и других возрастных заболеваний сетчатки требует поиска новых подходов к лечению и зрительной реабилитации. Известно, что при ВМД признаки синаптической и дендритной пластичности проявляются и в наружном, и во внутреннем синаптических слоях и отражаются на функции нейронов I, II и III порядка, включая ганглиозные клетки сетчатки (ГКС) [1–3]. Тот факт, что сохраненные нейроны в различных ретинальных слоях при сухой ВМД способны образовывать новые синапсы и модифицируют свои отростки [1], может быть критично важным для обоснования новых методов восстановления поврежденной сетчатки, основанных на нейропластичности. Однако при старении и заболеваниях потенциал нейропластичности снижается, и без его активации невозможно улучшить клинический результат. Поэтому методы и стратегии, основанные на активации нейропластичности, вызывают значительный интерес.

В области нейрореабилитации большое внимание привлекают технологии виртуальной реальности (VR), использование которых при повторяющихся зрительных тренировках может стимулировать нейроны и запускать механизмы нейропластичности. Хорошо документирована

но, что зрительные перцептивные тренировки в игровом формате с помощью VR вызывают реорганизацию коры и могут улучшать зрительные функции у детей и взрослых, страдающих амблиопией, а также помогают пациентам с ВМД максимально использовать свое остаточное зрение (см. обзор [4]).

Однако на сегодняшний день технологии VR в зрительной реабилитации в большей степени сосредоточены на стратегиях компенсации (обучение максимально использовать остаточное зрение) и субституции (замещения). Поэтому актуальна разработка новых методов, относящихся к реституции (восстановлению нарушенных нейронных связей), и усовершенствование существующих реституционных программ зрительных тренировок, направленных на активацию нейропластичности. К таким стратегиям относятся различные виды стимулирующей терапии прерывистыми электрическими и оптическими сигналами.

С другой стороны, кроме снижения потенциала нейропластичности объективной причиной, ограничивающей эффективность зрительной реабилитации при возраст-ассоциированных заболеваниях, является нарушение у пациентов фрактальной динамики физиологических ритмов [5–7]. Типичным признаком здоровых физиологических процессов, включая спонтанную и вызванную

активность головного мозга и сетчатки, является их фрактальная (самоподобная, детерминированно-хаотическая) динамика, спектр мощности которой соответствует степенной функции $1/f^1$. При патологии фрактальная динамика теряется и заменяется на упорядоченные или стохастические флуктуации параметров биоритмов.

Фрактальная оптическая стимуляция синхронизирует нарушенные биоритмы и активирует пластичность зрительной системы, позволяя преодолеть обе объективные причины недостаточной эффективности существующих методов реабилитации. Фототерапия, которая использует физиологически адекватные стимулы, может способствовать ремоделированию поврежденных нейронных сетей. В исследованиях на кроликах ранее мы изучали влияние фрактальной фотостимуляции (ФФ) на электроретинограмму (ЭРГ) и механизмы ее терапевтического воздействия на продукцию нейротрофических факторов и катехоламинов [8, 9]. Получены доказательства безопасности фрактального оптического сигнала и активирующего влияния ФФ на нейроны сетчатки. На животных с моделью атрофии ретинального пигментного эпителия (РПЭ) недавно доказан положительный эффект тренировок зрения с помощью ФФ на ретинальную функцию и структуру [10]. Эти данные легли в основу алгоритма процедуры ФФ и объективной оценки ее эффективности у больных ВМД. Для применения в клинике нами была разработана новая реституционная технология для зрительной реабилитации пациентов, слабовидящих вследствие дегенеративных заболеваний сетчатки, основанная на ФФ с использованием стереоскопического дисплея [11].

ЦЕЛЬЮ данного пилотного исследования была оценка влияния курса ФФ в VR на объективные показатели электроретинографии у больных ВМД сухой формы.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Ограниченные клинические исследования эффектов ФФ у больных с сухой формой ВМД были проведены по решению локального этического комитета ФГБУ «НМИЦ глазных болезней им. Гельмгольца» и после получения письменного информированного согласия пациентов.

Критерием включения являлась промежуточная и поздняя стадия ВМД (категория 3 и 4 AREDS) на одном или обоих глазах с компенсированным внутриглазным давлением. Допустимая сопутствующая офтальмопатология — миопия слабой степени, начальная катаракта. Допустимая сопутствующая общесоматическая патология могла иметь возрастной характер и включать ишемическую болезнь сердца, атеросклероз, гипертоническую болезнь I—II стадий, остеохондроз, сахарный диабет II типа.

Критерии не включения: абсолютные противопоказания к применению ФФ (пигментная ксеродерма, красная волчанка) и противопоказания с потенциальным риском — установленный диагноз «эпилепсия» и светочувствительные пациенты, имеющие зрительно вызванные судороги в анамнезе, эпилептогенную чувствительность к мелькающему свету по данным электроэнцефалограммы.

В исследовании приняли участие 20 человек в возрасте от 60 до 78 лет с диагнозом ВМД промежуточной и поздней стадии сухой формы с географической атрофией (ГА) — 39 глаз, средний возраст — $71,3 \pm 10,2$ года, 5 мужчин и 15 женщин. Максимальная корригированная острота зрения (МКОЗ) составляла от 0,02 до 0,80. Анализ результатов исследования проводился по всей группе пациентов и в трех подгруппах в зависимости от исходной МКОЗ: 1) менее 0,1 (5 человек, 7 глаз); 2) от 0,1 до 0,3 (10 человек, 12 глаз); 3) 0,3 и выше (14 человек, 20 глаз).

Участникам исследования по протоколам международных стандартов ISCEV регистрировали скотопические и фотопические виды ганцфельд-ЭРГ [12], фотопический негативный ответ (ФНО) [13] и мультифокальную ЭРГ (мФЭРГ) [14]. Исследования проводили до зрительных тренировок, в течение двух-трех дней после завершения курса и через 1 (8 пациентам) и 3 (2 пациентам) мес после фотостимуляции. В отдаленные сроки были зарегистрированы не все биопотенциалы сетчатки.

Всем пациентам ФФ выполняли на фоне основного лечения. Курс зрительных тренировок в VR включал 10 сеансов по 20 мин. Сеансы проводили в утреннее время (с 9 до 11 ч), ежедневно, кроме выходных. В работе использовали технологию зрительных тренировок в VR с помощью объемной комбинированной ФФ с использованием стереоскопического дисплея (RU 2773684C1). В VR-очках предъявлялось выбранное из библиотеки контента сцена 3D-изображение — природный ландшафт. Задний фон виртуального пространства заполнялся фрактальной мелькающей средой в виде стимулирующего полотна, элементы которого изменяли свою яркость согласно нелинейной фрактальной функции Вейерштрасса.

Предъявляемый сложноструктурированный оптический сигнал в стереоскопическом дисплее самоподобен (инвариантен) во времени, т. е. по мере изменения масштаба профиль фрактальной функции повторяет сам себя. Частота флуктуаций сигнала на первом уровне самоподобия случайно флуктуировала в диапазоне 9,5–11,0 Гц. Данный диапазон был выбран с учетом известного факта, что фотостимуляция мельканиями 9–11 Гц улучшает эпизодическую память [15, 16]. На каждом следующем уровне самоподобия (с изменением временного масштаба) паттерн случайных флуктуаций сигнала повторялся с увеличением частоты в 2,5 раза.

В данной работе фрактальная размерность Хаусдорфа — Безиковича, отражающая сложность сигнала, составляла 1,4. Это значение характеризует средний диапазон фрактальных размерностей естественных и искусственных фракталов, которые имеют максимальную эстетическую привлекательность для человека [17–22]. Учитывая результаты экспериментальных исследований и положительный опыт предыдущего ограниченного клинического испытания на светодиодном фотостимуляторе без VR [23], курс светостимуляции составили из 10 сеансов, проводимых в утреннее время (с 9 до 11 ч), ежедневно, кроме выходных. Длительность одного сеанса ФФ составляла 20 мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице 1 представлено изменение МКОЗ после завершения курса ФФ для всей группы и в подгруппах с различной исходной МКОЗ.

У 15 больных (19 глаз) отмечалось повышение МКОЗ на 0,01–0,20. У 5 человек (10 глаз) МКОЗ не изменилась. У пациентов с низкими зрительными функциями (I подгруппа) значения МКОЗ нарастали после курса ФФ (на 37,5%) и оставались стабильными до 3 мес. Во II подгруппе МКОЗ также увеличивалась после зрительных тренировок (на 21,2%), достигая максимума через 1 мес (до 25,7% от исходных значений). К концу 3-го месяца наблюдалась тенденция возвращения показателей МКОЗ к исходным значениям ($0,27 \pm 0,06$). В III подгруппе с наиболее высокими показателями МКОЗ (0,3 и выше) острота зрения была выше исходных значений в течение всего срока наблюдения. Максимальный прирост МКОЗ (на 12%) зафиксирован в течение 1 нед после курса ФФ.

Таблица 1. Динамика МКОЗ в среднем по группе и в подгруппах с различной исходной МКОЗ после курса ФФ

Table 1. Dynamics of BCVA on average for the total group and in subgroups with different initial BCVA after course of fractal photostimulation (FP)

Подгруппы Subgroups	До ФФ Before FP	После ФФ After FP	Через 1 мес In 1 month	Через 3 мес In 3 months
Все пациенты All patients	0,31 ± 0,24	0,37 ± 0,25	0,36 ± 0,23	0,37 ± 0,23
I	0,05 ± 0,04	0,08 ± 0,06	0,08 ± 0,07	0,1
II	0,26 ± 0,05	0,33 ± 0,11	0,35 ± 0,1	0,27 ± 0,06
III	0,51 ± 0,16	0,58 ± 0,15	0,53 ± 0,12	0,53 ± 0,21

Примечание. I — МКОЗ < 0,1; II — 0,3 > МКОЗ ≥ 0,1; III — МКОЗ ≥ 0,3.

Note. I — BCVA < 0,1; II — 0,3 > BCVA ≥ 0,1; III — BCVA ≥ 0,3.

В таблицах 2–14 представлены наиболее значимые результаты электрофизиологических исследований (ЭФИ), полученные в различные сроки после проведения курса ФФ. Общий анализ изменений электрогенеза сетчатки по всей группе пациентов (табл. 2) показал статистически значимое возрастание амплитуды а- и b-волн колбочковой ЭРГ и стандартной фотопической ритмической ЭРГ (РЭРГ) на 30 Гц (на 7–15%) сразу после курса зрительных тренировок в VR. При этом

Таблица 2. Динамика амплитуды волн ганцфельд-ЭРГ после курса фрактальной фототерапии (ФФ)

Table 2. Dynamics of the amplitude of full-field ERGs' waves after a course of fractal phototherapy (FP)

Биопотенциалы Biopotentials	До ФФ Before FP n = 33			После ФФ After FP n = 33			Через 1 мес In 1 month n = 12			Через 3 мес In 3 months n = 2
	M	SD	Me	M	SD	Me	M	SD	Me	M
Палочковая ЭРГ, b-волна Rod ERG, b-wave	48,2	24,9	50,9	53,0	24,0	51,4	51,3	6,4		—
Колбочковая ЭРГ, a-волна Cone ERG, a-wave	15,4	4,2	16,2	16,9	4,2	18,4	17,9#	4,7	17,6	17,9
Колбочковая ЭРГ, b-волна Cone ERG, b-wave	60,8	19,3	59,2	65,5	18,8	65,5	71,2	20,6	75,2	74,8
РЭРГ 30 Гц Flicker 30 Hz-ERG	47,8	14,0	46,8	53,7#	12,0	53,2	56,4*	12,2	56,4	55,1

Примечание. Здесь и в таблицах 2–14: n — количество глаз; M — среднее геометрическое значение; SD — среднее квадратическое отклонение; Me — медиана; * p < 0,05, различие с данными до лечения статистически значимо; # p < 0,1 — статистически подтвержденная тенденция.

Note. Here and in the tables 2–14: n — number of eyes, M — geometric mean value; SD — the average square deviation; Me — the median; * — p < 0.05, the difference with the data before treatment is statistically significant; # p < 0.1 — statistically confirmed trend.

Таблица 3. Динамика амплитуды ФНО (от изолинии) после курса фрактальной фототерапии (ФФ)

Table 3. Dynamics of PhNR amplitude (from the baseline) after a course of fractal phototherapy (FP)

Сила вспышки, кд/м² Flash power, cd s/m²	До ФФ Before FP n = 30			После ФФ After FP n = 27			Через 1 мес In 1 month n = 9			Через 3 мес In 3 months n = 3
	M	SD	Me	M	SD	Me	M	SD	Me	M
0,375	12,5	6,8	12,0	12,0	8,8	12,1	13,9#	3,2	13,7	22,2
0,75	13,7	4,58	12,8	14,0	8,8	13,5	18,7*	9,3	18,8	22,2
1,5	16,46	7,19	15,3	15,9	10,4	15,6	15,8	5,4	15,0	13,1
3,0	16,7	4,9	16,3	16,2	7,1	16,0	21,0*	5,0	21,35	14,0

Таблица 4. Динамика плотности пика P1 мфЭРГ (нВ/град²), усредненной по кольцам (R), после курса фрактальной фототерапии (ФФ)

Table 4. Dynamics of mfERG P1 peak density (nV/deg²), averaged over rings (R), after a course of fractal phototherapy (FP)

Кольца Rings	До ФФ Before FP n = 33			После ФФ After FP n = 33			Через 1 мес In 1 month n = 8			Через 3 мес In 3 months n = 3
	M	SD	Me	M	SD	Me	M	SD	Me	M
R1	55,9	27,2	46,87	64,2	23,2	63,0	74,24#	35,0	78,9	63,8
R2	28,7	14,5	27,8	29,2	13,4	27,1	29,23	15,9	25,5	33,8
R3	19,3	8,3	18,46	18,9	7,6	20,9	19,3	7,4	23,36	17,8
R4	15,5	4,3	—	14,9	3,6	—	15,4	2,8	—	16,2
R5	13,2	3,2	—	12,6	3,2	—	14,6	2,4	—	12,8

Таблица 5. Динамика амплитуды фотопической низкочастотной РЭРГ после курса фрактальной фототерапии (ФФ)
Table 5. Dynamics of the amplitude of photopic low-frequency flicker ERG after a course of fractal phototherapy (FP)

Частота мельканий, Гц Flicker frequency, Hz	До ФФ Before FP n = 10			После ФФ After FP n = 10			Через 1 мес In 1 month n = 8		
	М	SD	Me	М	SD	Me	М	SD	Me
8,3	66,4	19,5	64,25	76,8	31,6	65,0	67,1	8,1	67,0
10	66,8	22,58	67,35	79,13	27,5	64,7	65,2	10,3	64,0
12	67,45	22,66	64,45	76,06	28,0	62,0	60,9	16,2	62,0
24	56,0	22,5	51,0	31,0	14,2	52,7	50,4	11,7	49,0

Таблица 6. Динамика амплитуды ганцфелд-ЭРГ, МКОЗ < 0,1 (0,02–0,04)
Table 6. Dynamics of full-field ERG amplitude, BCVA < 0.1 (0.02–0.04)

Биопотенциалы Biopotentials	До ФФ Before FP n = 7			После ФФ After FP n = 7			Через 1 мес In 1 month n = 4		Через 3 мес In 3 month n = 1
	М	SD	Me	М	SD	Me	М	Me	М
Палочковая ЭРГ, b-волна Rod ERG, b-wave	58,4	17,6	57,05	64,5	20,5	61,4	56,7	—	—
Скотопическая максимальная ЭРГ, a-волна Scotopic maximal ERG, a-wave	80,4	38,6	71,9	89,9#	33,3	93,55	76,7	—	—
Колбочковая ЭРГ, a-волна Cone ERG, a-wave	13,7	2,6	16,2	15,6#	3,0	18,5	16,5	19,5	10,9
Колбочковая ЭРГ, b-волна Cone ERG, b-wave	49,0	9,3	52,1	60,5*	13,1	62,1	66,5#	73,5	55,2
РЭРГ 30 Гц Flicker 30 Hz-ERG	38,9	6,8	38,4	50,9*	6,1	50,9	57,1*	—	43,2

эффект даже немного возростал через 1 мес после фототерапии. Различие с исходными данными было статистически достоверно для РЭРГ 30 Гц ($p < 0,05$) и являлось статистически подтвержденной тенденцией ($p < 0,1$) для a-волны колбочковой ЭРГ. У двоих пациентов отдельные ЭРГ-исследования были выполнены также через 3 мес после курса ФФ, и результаты показали сохранение достигнутого положительного эффекта.

Амплитуда b-волны палочковой ЭРГ на слабый стимул также возростала в среднем на 10% сразу после курса ФФ, однако она практически не отличалась от исходных значений через 1 мес после завершения фотостимуляции. Для темноадаптированной ЭРГ на стандартный стимул отмечено небольшое возрастание амплитуды a-волны (при отсутствии реакции со стороны b-волны), которое при анализе данных для всей группы было статистически незначимым. Обнаружен умеренный рост амплитуды ФНО, который был наиболее выраженным и статистически значимым через 1 мес после ФФ (табл. 3).

В среднем для всей группы пациентов было характерным повышение плотности компонента P1 мфЭРГ, причем не только в первом гексагоне (R1), но и в кольце R2, а через месяц после курса стимулирующих тренировок — в кольцах R1–R4 (табл. 4). Положительное воздействие ФФ на мфЭРГ нарастало в отдаленные сроки после фотостимуляции.

Таблица 7. Динамика амплитуды РЭРГ, МКОЗ < 0,1 (0,02–0,04)
Table 7. Dynamics of flicker ERG amplitude, BCVA < 0.1 (0.02–0.04)

Частота мельканий, Гц Flicker frequency, Hz	До ФФ Before FP n = 2	После ФФ After FP n = 2	Через 1 мес In 1 month n = 2	Через 3 мес In 3 months n = 1
	М	М	М	М
8,3	52,1	65,3	61,5	60
10	42,5	66,8	65,3	54
12	43,3	55,9	56,6	52
24	35,4	50,3	50,5	55

Таблица 8. Динамика плотности P1 мфЭРГ (нВ/град²), МКОЗ < 0,1 (0,02–0,04)
Table 8. Dynamics of the P1 mfERG density (nV/deg²), BCVA < 0.1 (0.02–0.04)

Кольца Rings	До ФФ Before FP n = 10			После ФФ After FP n = 10			Через 1 мес In 1 month n = 3	Через 3 мес In 3 month n = 1
	М	SD	Me	М	SD	Me	М	М
R1	44,5	15,2	42,6	53,0	16,8	53,73	40,9	40,5
R2	17,0	10,3	20,65	21,6	12,0	27,76	16,6	23,1
R3	12,0	8,8	16,34	16,9	7,9	20,4	14,6	20,4
R4	11,9	4,4	11,9	13,7	1,6	14,3	13,6	11,4
R5	12,8	2,3	—	10,3	2,7	—	12,9	10,1

Несмотря на неоднородность группы и значительный разброс данных, возрастание плотности P1 в первом кольце через 1 мес после курса зрительных тренировок являлось статистически подтвержденной тенденцией ($p = 0,082952$). Амплитуда фотопической низкочастотной РЭРГ на мелькания частотой 8,3–12,0 Гц, зависящей от активности фоторецепторов, также возростала (табл. 5), причем эффект был наибольшим непосредственно после завершения кур-

Таблица 9. Динамика ганцфельд-ЭРГ, $0,3 > \text{МКОЗ} \geq 0,1$
Table 9. Dynamics of ganzfeld ERG, $0,3 > \text{BCVA} \geq 0,1$

Биопотенциалы Biopotentials	До ФФ Before FP n = 14			После ФФ After FP n = 10			Через 1 мес In 1 month n = 4			Через 3 мес In 3 months n = 1
	М	SD	Me	М	SD	Me	М	SD	Me	М
Палочковая ЭРГ, b-волна Rod ERG, b-wave	32,2	15,5	24,4	43,6#	17,7	41,1	46,7	—	—	
Скотопическая максимальная ЭРГ, а-волна Scotopic maximal ERG, a-wave	78,5	18,4	83,2	91,8#	20,2	101	76,7	—	—	
Колбочковая ЭРГ, а-волна Cone ERG, a-wave	13,2	3,7	12,1	16,3	4,0	12,6	17,8	7,5	—	19,0
Колбочковая ЭРГ, b-волна Cone ERG, b-wave	53,4	20,2	49,3	51,4	11,4	44,7	56,4	16,3	62,2	87,2
РЭРГ 30 Гц Flicker 30 Hz-ERG	43,8	13,9	44,3	46,9	9,4	48,8	49,7	12,0	52,0	56,9

са ФФ и снижался через 1 мес после лечения. Однако эффект ФФ отсутствовал для РЭРГ на мелькания 24 Гц, генерируемой биполярными клетками сетчатки.

Данные ЭФИ говорят о положительном воздействии ФФ на активность фоторецепторов, а также (чуть в меньшей степени) биполярных клеток скотопической и фотопической систем при большей реакции колбочковых нейронов. Активирующее влияние ФФ на наружную сетчатку было наибольшим в ранние сроки после курса зрительных тренировок. Напротив, положительное воздействие ФФ на активность ГКС, по данным ФНО, нарастало после завершения курса на протяжении по крайней мере 1 мес.

С другой стороны, динамика мфЭРГ говорит о генерализованном активирующем влиянии ФФ на макулярную область сетчатки, которое не ограничивается центральным гексагоном — областью фовеа, функциональная активность в которой обычно коррелирует с остротой зрения. То есть субъективная оценка динамики остроты зрения после терапии может не отражать истинное (более значительное, чем оценивается по МКОЗ) улучшение функционального состояния сетчатки.

Результаты исследования обосновывают перспективность ФФ как метода зрительной реабилитации, улучшающего функциональность ретикулярной нейронной сети. Она также может служить фактором, замедляющим прогрессирование дегенеративного процесса в наружной и внутренней сетчатке и улучшающим качество жизни пациентов.

Для определения зависимости эффекта ФФ от исходной остроты зрения пациентов (и тяжести заболевания) был проведен дополнительно анализ данных ЭФИ в подгруппах глаз с различной исходной МКОЗ: $< 0,1$ (1),

Таблица 10. Динамика плотности P1 мфЭРГ (нВ/град^2), $0,3 > \text{МКОЗ} \geq 0,1$
Table 10. Dynamics of P1 mfERG density (nV/deg^2), $0,3 > \text{BCVA} \geq 0,1$

Кольца Rings	До ФФ Before FP n = 17		После ФФ After FP n = 17		Через 1 мес In 1 month n = 4		Через 3 мес In 3 months n = 2
	М	SD	М	SD	М	SD	М
R1	51,1	21,3	63,8	21,8	67,1	30,7	49,3
R2	26,5	14,8	27,2	12,9	26,0	14,3	24,1
R3	15,9	8,9	17,0	8,3	17,8	9,7	15,5
R4	16,4	4,2	14,8	4,0	16,5	2,0	15,8
R5	12,8	3,4	12,7	3,4	15,2	2,5	11,8

Таблица 11. Динамика амплитуды ганцфельд-ЭРГ, $\text{МКОЗ} = 0,3-0,8$
Table 11. Dynamics of ganzfeld ERG amplitude, $\text{BCVA} = 0,3-0,8$

Биопотенциалы Biopotentials	До ФФ Before FP n = 14		После ФФ After FP n = 14		Через 1 мес In 1 month n = 4		Через 3 мес In 3 months n = 2	
	М	SD	М	SD	М	SD	М	SD
Палочковая ЭРГ, b-волна Rod ERG, b-wave	60,6	22,5	56,6	30,3	—	—	—	—
Колбочковая ЭРГ, а-волна Cone ERG, a-wave	16,4	5,1	17,0	5,0	18,2	4,8	20,9	—
Колбочковая ЭРГ, b-волна Cone ERG, b-wave	74,7	17,2	74,6	19,8	86,5	18,3	78,4	—
РЭРГ 30 Гц Flicker 30 Hz-ERG	54,2	11,2	57,6	13,0	61,0	9,8	60,2	—

Таблица 12. Динамика амплитуды ФНО от изолинии, $\text{МКОЗ} = 0,3-0,8$
Table 12. Dynamics of TNF amplitude from the baseline, $\text{BCVA} = 0,3-0,8$

Сила вспышки, кд с/м^2 Flash power, cd s/m^2	До ФФ Before FP n = 12			После ФФ After FP n = 12			Через 1 мес In 1 month n = 2	Через 3 мес In 3 months n = 2
	М	SD	Me	М	SD	Me	М	М
0,375	16,8	7,0	17,1	19,5	11,7	14,8	15,8	24,2
0,75	15,2	4,2	13,75	17,1	7,8	16,0	25,3	15,4
1,5	18,4	10,0	13,7	17,9	8,6	16,1	19,8	19,0
3,0	17,1	3,7	17,15	17,8	5,4	19,8	12,8	25,7

$0,1 \leq \text{МКОЗ} < 0,3$ (2) и $\text{МКОЗ} \geq 0,3$ (3). Наши результаты представлены в таблицах 6—14.

В I подгруппе с малой исходной остротой зрения, несмотря на небольшой прирост МКОЗ, в процентном

отношении наблюдался самый большой положительный эффект ФФ для ганцфельд-ЭРГ и РЭРГ. Более значительно повышалась амплитуда волн ганцфельд-ЭРГ: b-волны палочковой и колбочковой ЭРГ и a-волны колбочковой и смешанной палочко-колбочковой ЭРГ (табл. 6). Более значительно, чем в среднем по всей группе, возрастала также амплитуда РЭРГ на 30 Гц и низкочастотных РЭРГ, причем зависящих как от функции фоторецепторов (РЭРГ на 8,3–12,0 Гц), так и колбочковых биполярных клеток (РЭРГ на 24 Гц) (табл. 6, 7). Средние показатели низкочастотной РЭРГ на 8,3–24,0 Гц в I подгруппе возрастали во всех трех контрольных точках от 20 до 57%. Следует отметить, однако, малочисленность исследований РЭРГ для глаз с низкой МКОЗ.

С другой стороны, у пациентов с самой низкой исходной МКОЗ не обнаружено положительных эффектов ФФ для ФНО.

Плотность P1-компонента в мфЭРГ возрастала в гексагонах R1–R4 после курсов фотостимуляции. В подгруппе с низкой остротой зрения изменения были несколько меньшими по сравнению с общей тенденцией для всей группы и отсутствовали через 1 мес после фототерапии (табл. 8).

Однако необходимо подчеркнуть, что появление четкого пика в первом гексагоне и улучшение активности не только в первом, но и 2–3 кольцах мфЭРГ, зонах пери- и парафовеа (рисунок) могут иметь существенное значение для пациента, повышая субъективное качество его зрения и качество жизни, связанное со зрением.

Во II подгруппе с исходными значениями МКОЗ от 0,1 до < 0,3 также отсутствовала значимая динамика ФНО, но положительные тенденции изменений ганцфельд-ЭРГ и мфЭРГ были аналогичными средним тенденциям, описанным для всей группы (табл. 9).

В подгруппах II и III повышение амплитуды РЭРГ было значительно меньшим, чем в первой подгруппе с низкой исходной остротой зрения.

В III подгруппе для глаз с лучшим МКОЗ влияние ФФ на амплитуду a- и b-волн скотопических и фотопических ганцфельд-ЭРГ было наименьшим среди всех подгрупп, за исключением стандартной РЭРГ на 30 Гц (табл. 11).

У всех пациентов наблюдалось возрастание амплитуды ФНО сразу после курса ФФ, и у некоторых участников, обследованных в отдаленные сроки, показано сохранение положительного эффекта через 1 и 3 мес после завершения курса.

Динамика мфЭРГ у пациентов с наилучшей исходной МКОЗ повторяла тенденции, выявленные в общем для всей группы (табл. 10). Отмечалось возрастание амплитуды мфЭРГ в 1–4 кольцах и сохранение эффекта через 1 мес после ФФ.

Амплитуда низкочастотной ЭРГ существенно возрастала для всех частот стимуляции (табл. 14), хотя достоверность различий отсутствовала в связи с неоднородностью группы.

Анализ показал, что амплитуда ФНО повышалась в большей степени у больных ВМД с сопутствующим диагнозом «частичная атрофия зрительного нерва» или «первичная открытоугольная глаукома (ПОУГ)». Это может свидетель-

Таблица 13. Динамика плотности P1 мфЭРГ (нВ/град²), МКОЗ = 0,3–0,8
Table 13. Dynamics of P1 mFERG density (nV/deg²), BCVA = 0.3–0.8

Кольца Rings	До ФФ Before FP n = 16		После ФФ After FP n = 16		Через 1 мес In 1 month n = 3		Через 3 мес In 3 months n = 1
	M	SD	M	SD	M	SD	M
R1	67,7	31,9	70,9	25,7	82,4	31,1	61,2
R2	34,0	16,6	34,4	15,3	32,5	19,0	26,8
R3	20,7	8,0	21,4	7,1	21,9	6,5	18,3
R4	16,0	4,3	14,8	2,8	16,8	3,5	16,4
R5	13,4	2,9	13,45	3,0	13,8	2,6	12,2

Таблица 14. Динамика амплитуды низкочастотной РЭРГ, МКОЗ = 0,3–0,8
Table 14. Dynamics of low-frequency flicker ERG amplitude, BCVA = 0.3–0.8

Сила вспышки, кд с/м ² Flash power, cd s/m ²	До ФФ Before FP n = 6			После ФФ After FP n = 6			Через 1 мес In 1 month n = 4	
	M	SD	Me	M	SD	Me	M	SD
0,375	75,1	14,3	76,1	93,8	19,0	93,15	69,6	16,3
0,75	75,6	22,3	77,85	92,0	19,0	94,0	72,1	12,2
1,5	76,2	20,7	77,35	88,8	30,2	94,1	67,9	17,6
3,0	53,3	25,9	52,5	88,3	28,4	91,95	52,7	4,3

ствовать о перспективности назначения ФФ для зрительной реабилитации не только больных ВМД, но и при ПОУГ и другой патологии зрительного нерва.

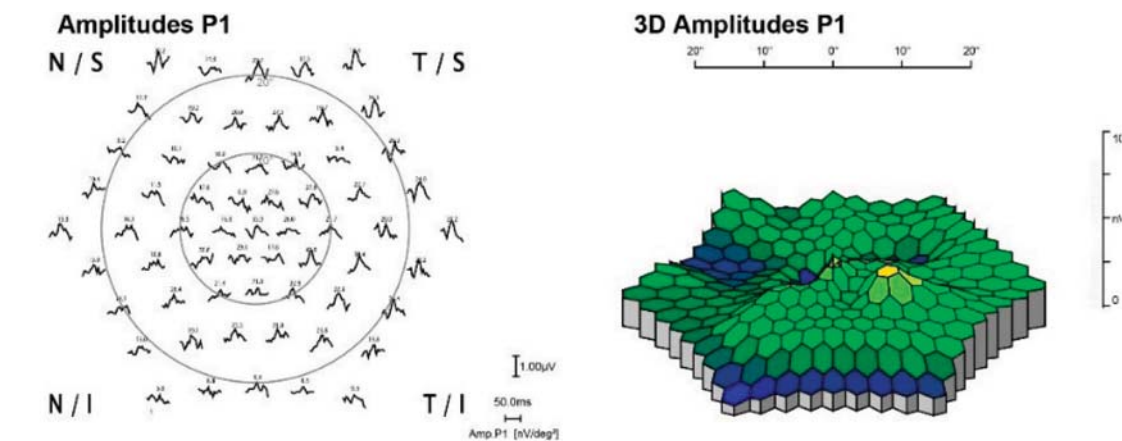
Отметим, что положительный эффект не определялся однозначно для всех пациентов и всех волн ЭРГ. Во многих случаях он был не очевиден для скотопической смешанной («максимальной» палочко-колбочковой) ЭРГ, особенно b-волны, что требует детального анализа в будущих исследованиях. Результаты, полученные в данном исследовании, говорят о сохранении положительного эффекта для многих биопотенциалов в течение 1–3 мес после фототерапии.

Вероятные механизмы эффектов ФФ, как обсуждается в недавнем обзоре, включают увеличение продукции нейротрофических факторов (BDNF и PEDF), что может приводить к формированию новых синаптических контактов, увеличению сложности дендритного ветвления, образованию новых нейронных путей, минуя поврежденные, увеличению чувствительности нейронов сетчатки через настройку ее фоновой активности (шума) и усилению хориоретинального кровообращения в результате влияния прерывистой фотостимуляции на просвет сосудов [6, 24].

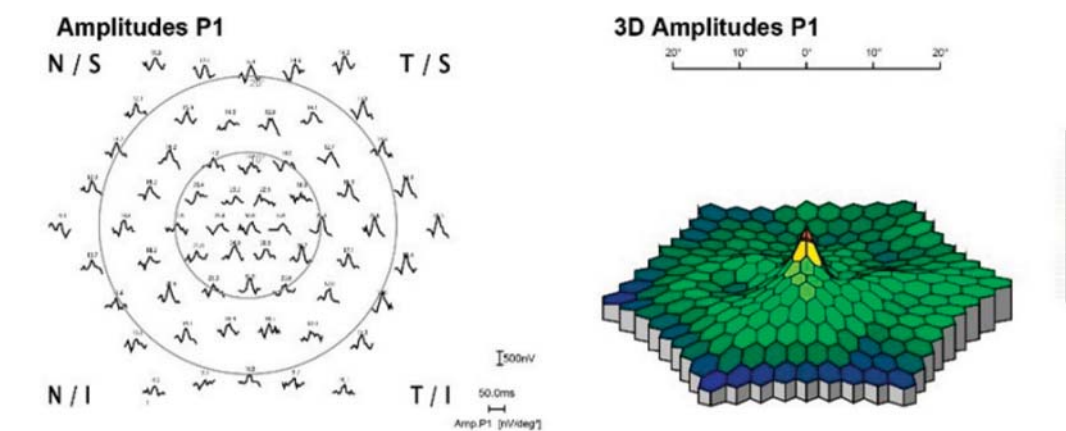
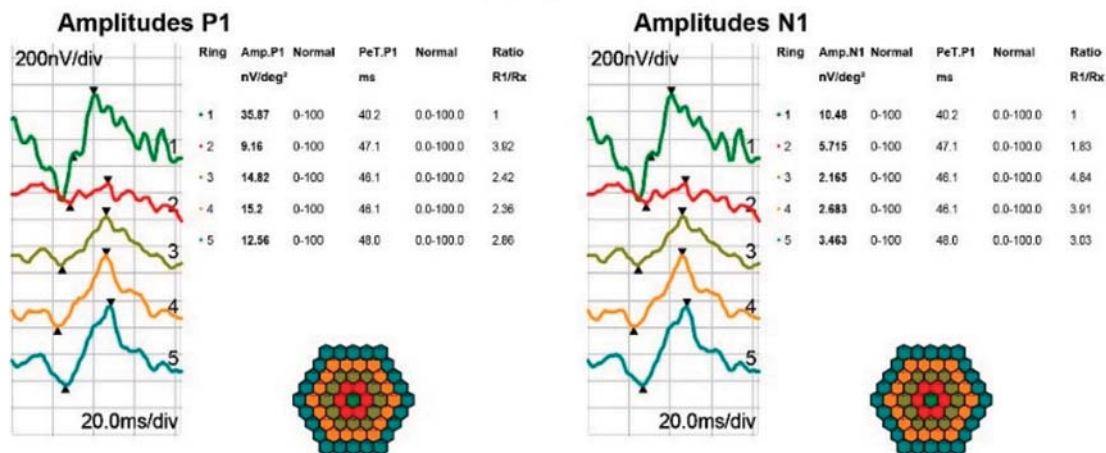
Эффективность воздействия сенсорной стимуляции на пластичность зрительной системы и достижение оптимального лечебного результата в значительной степени зависит от комплаентности пациента, его активного интереса к процедуре фотостимуляции и концентрации внимания на сеансе проводимой терапии. Повышение мотивации пациента к проведению зрительных тренировок и возможность адаптировать их режимы для конкретных пациентов являются одними из основных преимуществ так называемых «серьезных игр» в VR, применяемых в нейрореабилитации [4, 25].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пилотные клинические исследования эффектов ФФ показали, что у пациентов с сухой формой ВМД после курсов фотостимуляции фрактальным оптическим сигналом в стереоскопических очках увеличивается острота зрения и отмечается активация электрогенеза сетчатки, что проявляется повышением активности фоторецепторов и (в меньшей степени) биполярных клеток, а также улучшением актив-



Vis = 0,04



Vis = 0,05

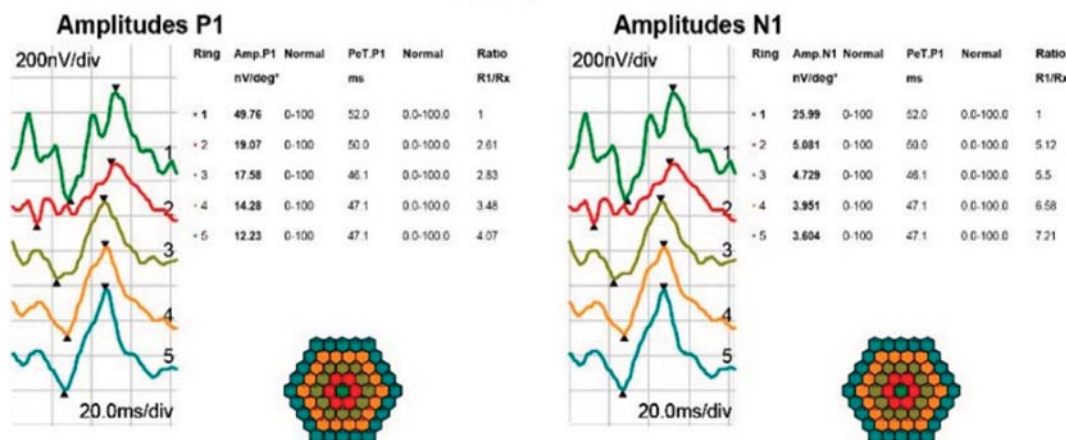


Рисунок. МфЭРГ до (вверху) и после (внизу) курса фрактальной фототерапии: левый глаз пациента с ВМД сухой формы, поздняя стадия с ГА
Figure. MfERG before (top) and after (bottom) a course of fractal phototherapy: left eye of a patient with dry AMD, late stage with GA

ности ГКС. Мы полагаем, что методика ФФ в VR имеет перспективы в клинической практике ввиду ее неинвазивности, возможности персональной адаптации режимов зрительных тренировок и повышения комплаентности, мотивации пациентов к повторению игрового процесса.

LITERATURE/References

- Sullivan RKP, Woldemussie E, Pow DV. Dendritic and synaptic plasticity of neurons in the human age-related macular degeneration retina. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2007 Jun; 48 (6): 2782–91. doi: 10.1167/iov.06-1283
- Нероева Н.В., Зуева М.В., Нероев В.В. и др. Электрофизиологические признаки ремоделирования колбочковой системы сетчатки при географической атрофии пигментного эпителия у больных с неэкссудативной возрастной макулярной дегенерацией. *Российский офтальмологический журнал*. 2021; 14 (3): 32–9. [Neroeva N.V., Zueva M.V., Neroev V.V., et al. Electrophysiological signs of retinal cone remodeling in geographic atrophy of the pigment epithelium in patients with non-exudative age-related macular degeneration. *Russian Ophthalmological Journal*. 2021; 14 (3): 32–9 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2021-14-3-32-39>
- Нероев В.В., Зуева М.В., Нероева Н.В. и др. Клинико-функциональные характеристики вторичной географической атрофии на фоне экссудативной возрастной макулярной дегенерации. *Вестник РАМН*. 2021; 76 (4): 383–94. [Neroev V.V., Zueva M.V., Neroeva N.V., et al. Clinical and functional characteristics of secondary geographic atrophy against the background of exudative age-related macular degeneration. *Annals of the Russian Academy of Medical Sciences*. 2021; 76 (4): 384–93 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.15690/vramn1557>
- Зуева М.В., Котелин В.И., Нероева Н.В., Журавлева А.Н., Цапенко И.В. Виртуальная реальность в зрительной реабилитации. *Российский офтальмологический журнал*. 2024; 17 (3): 113–8. [Zueva M.V., Kotelin V.I., Neroeva N.V., Zhuravleva A.N., Tsapenko I.V. Virtual reality in visual rehabilitation. *Russian ophthalmological journal*. 2024; 17 (3): 113–8 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2024-17-3-113-118>
- Zueva M.V. Fractality of sensations and the brain health: the theory linking neurodegenerative disorder with distortion of spatial and temporal scale-invariance and fractal complexity of the visible world. *Front. Aging Neurosci*. 2015; 7: 135. doi: 10.3389/fnagi.2015.00135
- Зуева М.В., Котелин В.И., Нероева Н.В., Фадеев В.В., Манько О.М. Проблемы и перспективы новых методов световой стимуляции в зрительной реабилитации. *Сенсорные системы*. 2023; 37 (2): 93–118. [Zueva M.V., Kotelin V.I., Neroeva N.V., Fadeev V.V., Manko O.M. Problems and prospects of new methods of light stimulation in visual rehabilitation. *Sensory Systems*. 2023; 37 (2): 93–118 (In Russ.)]. doi: 10.31857/S0235009223020075
- Zueva M.V., Neroeva N.V., Zhuravleva A.N., et al. Fractal phototherapy in maximizing retina and brain plasticity. In: Di Ieva A. (eds.) *The fractal geometry of the brain*. Advances in neurobiology. 2024; 36: 585–637. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-47606-8_31
- Нероев В.В., Зуева М.В., Нероева Н.В. и др. Воздействие фрактальной зрительной стимуляции на здоровую сетчатку кролика: функциональные, морфометрические и биохимические исследования. *Российский офтальмологический журнал*. 2022; 15 (3): 99–111. [Neroev V.V., Zueva M.V., Neroeva N.V., et al. Effect of fractal visual stimulation on healthy rabbit retina: functional, morphometric and biochemical studies. *Russian ophthalmological journal*. 2022; 15 (3): 99–111 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2022-15-3-99-111>
- Балацкая Н.В., Фадеев В.В., Зуева М.В., Нероева Н.В. Локальная продукция нейротрофических факторов при воздействии фрактальной стимуляционной фототерапии на сетчатку кроликов. *Молекулярная медицина*. 2023; 21 (3): 52–8. [Balatskaya N.V., Fadeev V.V., Zueva M.V., Neroeva N.V. Local production of neurotrophic factors under the influence of fractal stimulation phototherapy on the retina of rabbits. *Molecular medicine*. 2023; 21 (3): 52–8 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.29296/24999490-2023-05-08-52-58>
- Фадеев Д.В., Нероева Н.В., Зуева М.В. и др. Фрактальная фототерапия: влияние на структуру и функцию сетчатки кролика с моделью атрофии ретинального пигментного эпителия. *Российский офтальмологический журнал*. 2024; 17 (2): 74–81. [Fadeev D.V., Neroeva N.V., Zueva M.V., et al. Fractal phototherapy: impact on the structure and function of the retina of rabbits with modelled retinal pigment epithelium atrophy. *Russian Ophthalmological Journal*. 2024; 17 (2): 74–81 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2024-17-2-74-81>
- Нероев В.В., Зуева М.В., Манахов П.А. и др. Способ улучшения функциональной активности зрительной системы с помощью фрактальной фототерапии с использованием стереоскопического дисплея. Патент РФ № 2773684. 2022. [Neroev V.V., Zueva M.V., Manakhov P.A., et al. A method for improving the functional activity of the visual system using fractal phototherapy using a stereoscopic display. Patent RF No. 2773684. 2022 (In Russ.)].
- Robson AG, Frishman LJ, Grigg J, et al. ISCEV Standard for full-field clinical electroretinography (2022 update). *Doc Ophthalmol*. 2022 Jun; 144 (3): 165–77. doi: 10.1007/s10633-022-09872-0
- Frishman L, Sustar M, Kremers J, et al. ISCEV extended protocol for the photopic negative response (PhNR) of the full-field electroretinogram. *Doc Ophthalmol*. 2018 Jun; 136 (3): 207–11. doi: 10.1007/s10633-018-9638-x
- Hoffmann MB, Bach M, Kondo M, et al. ISCEV standard for clinical multifocal electroretinography (mfERG) (2021 update). *Doc Ophthalmol*. 2021 Feb; 142 (1): 5–16. doi: 10.1007/s10633-020-09812-w
- Williams J, Ramaswamy D, Oulhaj A. 10 Hz flicker improves recognition memory in older people. *BMC Neurosci*. 2006; 7 (5): 21. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-7-21>
- Williams JH. Frequency-specific effects of flicker on recognition memory. *Neuroscience*. 2001; 104: 283–6. [https://doi.org/10.1016/s0306-4522\(00\)00579-0](https://doi.org/10.1016/s0306-4522(00)00579-0)
- Aks D, Sprott J. Quantifying aesthetic preference for chaotic patterns. *Empir Stud Arts*. Jan 1996; 14 (1): 1–16. doi: 10.2190/6V31-7M9R-T9L5-CDG9
- Taylor RP, Spehar B, Wise JA, et al. Perceptual and physiological responses to the visual complexity of fractal patterns. *Nonlinear Dynamics Psychol Life Sci*. 2005 Jan; 9 (1): 89–114. PMID: 15629069.
- Taylor RP, Sprott JC. Biophilic fractals and the visual journey of organic Screen-savers. *J Non-Linear Dyn Psychol Life Sci*. 2008; 12: 117–29. <https://sprott.physics.wisc.edu/pubs/paper311.pdf>
- Taylor RP, Spehar B, Donkelaar PV, Hagerhall CM. Perceptual and physiological responses to Jackson Pollock's fractals. *Front Hum Neurosci*. 2011; 5: 60. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00060>
- Пьянкова С.Д. Фрактальноаналитические исследования в психологии: особенности восприятия самоподобных объектов. *Психологические исследования*. 2016; 9 (46): 12. [Pyankova S.D. Fractal-analytical research in psychology: features of perception of self-similar objects. *Psychological research*. 2016; 9 (46): 12 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.54359/ps.v9i46.484>
- Пьянкова С.Д. Субъективные оценки визуальной сложности и эстетической привлекательности фрактальных изображений: индивидуальные различия и генетические влияния. *Психологические исследования*. 2019; 12 (63). [Pyankova S.D. Subjective assessments of the visual complexity and aesthetic appeal of fractal images: individual differences and genetic influences. *Psikhologicheskiye issledovaniya*. 2019; 12 (63) (In Russ.)]. <https://doi.org/10.54359/ps.v12i63.238>
- Зуева М.В., Ковалевская М.А., Донкарева О.В., и др. Фрактальная фототерапия в нейропротекции глаукомы. *Офтальмология*. 2019; (3): 317–28. [Zueva M.V., Kovalevskaya M.A., Donkareva O.V., et al. Fractal phototherapy in the neuroprotection of glaucoma. *Ophthalmology in Russia*. 2019; 16 (3): 317–28 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2019-3-317-328>
- Зуева М.В., ред. Нелинейный глаз: новые технологии зрительной реабилитации. С.-Петербург: Издательство ВММ; 2024. [Zueva M.V., ed. *Nonlinear eye: New technologies of visual rehabilitation*. St. Petersburg: BMM Publishing House; 2024 (In Russ.)].
- Coco-Martin MB, Cuadrado-Asensio R, López-Miguel A. Design and evaluation of a customized reading rehabilitation program for patients with age-related macular degeneration. *Ophthalmology*. 2013; 120 (1): 151–9. doi: 10.1016/j.ophtha.2012.07.035

Вклад авторов в работу: Н.В. Нероева — сбор и анализ данных, редактирование; М.В. Зуева — концепция, анализ результатов и литературы, написание статьи; В.И. Котелин — сбор и анализ данных, написание статьи; И.В. Цапенко — сбор и анализ данных; Л.А. Катаргина — дизайн исследований, редактирование статьи; Ю.С. Тимофеев — статистический анализ данных.

Authors' contribution: N.V. Neroeva — data collection, editing of the article; M.V. Zueva — concept, analysis of the results and literature, writing of the article; V.I. Kotelin — data collection and analysis, writing of the article; I.V. Tsapenko — data collection and analysis; L.A. Katargina — research design, scientific editing of the article; Yu.S. Timofeev — statistical data processing.

Поступила: 28.08.2024. Переработана: 10.09.2024. Принята к печати: 11.09.2024

Originally received: 28.08.2024. Final revision: 10.09.2024. Accepted: 11.09.2024

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

ФГБУ «НМИЦ глазных болезней им. Гельмгольца» Минздрава России, ул. Садовая-Черногрозская, д. 14/19, Москва, 105062, Россия

Наталья Владимировна Нероева — канд. мед. наук, начальник отдела патологии сетчатки и зрительного нерва, ORCID 0000-0002-8480-0894

Марина Владимировна Зуева — д-р биол. наук, профессор, начальник отдела клинической физиологии зрения им. С.В. Кравкова, ORCID 0000-0002-0161-5010

Владислав Игоревич Котелин — канд. мед. наук, старший научный сотрудник отдела клинической физиологии зрения им. С.В. Кравкова, ORCID 0000-0003-4675-9648

Ирина Владимировна Цапенко — канд. биол. наук, главный специалист отдела клинической физиологии зрения им. С.В. Кравкова, ORCID 0000-0002-0148-8517

Людмила Анатольевна Катаргина — д-р мед. наук, профессор, начальник отдела патологии глаз у детей, заместитель директора по научной работе, ORCID 0000-0002-4857-0374

ФГБУ «НМИЦ терапии и профилактической медицины» Минздрава России, Петроверигский пер., д. 10, Москва, 101990, Россия

Юрий Сергеевич Тимофеев — руководитель лаборатории изучения биохимических маркеров риска хронических неинфекционных заболеваний отдела фундаментальных и прикладных аспектов ожирения, ORCID 0000-0001-9305-6713

Для контактов: Марина Владимировна Зуева,
visionlab@yandex.ru

Helmholtz National Medical Research Center of Eye Diseases, 14/19, Sadovaya-Chernogryazskaya St., Moscow, 105062, Russia

Natalia V. Neroeva — Cand. of Med. Sci., head of the department of pathology of the retina and optic nerve, ORCID 0000-0002-8480-0894

Marina V. Zueva — Dr. of Biol. Sci., professor, head of the department of clinical physiology of vision named after S.V. Kravkov, ORCID 0000-0002-0161-5010

Vladislav I. Kotelin — Cand. of Med. Sci., senior researcher, department of clinical physiology of vision named after S.V. Kravkov, ORCID 0000-0003-4675-9648

Irina V. Tsapenko — Cand. of Biol. Sci., chief specialist of the department of clinical physiology of vision named after S.V. Kravkov, ORCID 0000-0002-0148-8517

Ludmila A. Katargina — Dr. of Med. Sci., professor, head of the department of eye pathology in children, deputy director for science, ORCID 0000-0002-4857-0374

National Medical Research Center of Therapy and Preventive Medicine, 10, Petroverigsky Lane St., 101990, Moscow, Russia

Yury S. Timofeev — head of the laboratory for the study of biochemical risk markers of chronic non-communicable disease, department of fundamental and applied aspects of obesity, ORCID 0000-0001-9305-6713

For contacts: Marina V. Zueva,
visionlab@yandex.ru