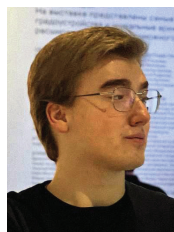


Изменения электроретинограммы у экипажа 12-месячного изоляционного эксперимента SIRIUS-23

V.V. Neroev¹V.I. Kotelin¹M.V. Zueva^{1,2}O.M. Manko²T.N. Kiseleva¹A.M. Aleskerov²D.V. Fadeev¹D.Yu. Kolesnikov²N.A. Ramazanova¹

¹ ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр глазных болезней им. Гельмгольца»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
ул. Садовая-Черногрозская, 14/19, Москва, 105062, Российская Федерация

² ФГБУН «Государственный научный центр РФ Институт медико-биологических проблем Российской академии наук»
Хорошевское шоссе, 76а, Москва, 123007, Российская Федерация

РЕЗЮМЕ

Офтальмология. 2026;23(1):91–100

В международном эксперименте SIRIUS-23 изучалось влияние длительной изоляции в замкнутом пространстве (гермообъект — искусственная станция), имитирующем межпланетный перелет с сопутствующими стрессорными факторами, на биоэлектрическую активность сетчатки. **Целью** исследования было определить у участников 12-месячного эксперимента изменения разных типов электроретинограммы (ЭРГ) и зрительных вызванных корковых потенциалов (ЗВП). Оценивали также изменения глазного кровотока с помощью доплеровских методов исследования. Все диагностические исследования проводили до и в течение одной недели после выхода экипажа из изоляции (условное «приземление»). Результаты свидетельствуют об общей стабильности большинства исследуемых показателей после завершения изоляции. Выявлено небольшое снижение амплитуды ритмической ЭРГ (РЭРГ) на мелькание 30 и 12 Гц и компонентов P50 и N95 транзистентной паттерн-ЭРГ (ПЭРГ) с характерными изменениями пиковой латентности, что говорит о легкой дисфункции ганглиозных клеток сетчатки и их аксонов без органического поражения зрительных проводящих путей. Обнаружена положительная тенденция к возрастанию амплитуды фотопического негативного ответа (ФНО) на стимул средней силы и амплитуды P100 компонента ЗВП на паттерн-реверсивный шахматный стимул после выхода экипажа из изоляции. Зарегистрировано статистически достоверное увеличение индекса периферического сопротивления и пульсационного индекса в глазной артерии, центральной артерии сетчатки и латеральных задних коротких цилиарных артериях, что может свидетельствовать об изменении сосудистого тонуса в системе ретиальной и хориоидальной циркуляции глаза после 12-месячного эксперимента.

Ключевые слова: длительная изоляция, наземная станция, электроретинография, сетчатка, фоторецепторы, биполярные клетки сетчатки, ганглиозные клетки сетчатки, глазной кровоток, ультразвуковая доплерография, SIRIUS

Для цитирования: Neroev V.V., Kotelin V.I., Zueva M.V., Manko O.M., Kiseleva T.N., Aleskerov A.M., Fadeev D.V., Kolesnikov D.Yu., Ramazanova N.A. Изменения электроретинограммы у экипажа 12-месячного изоляционного эксперимента SIRIUS-23. *Офтальмология*. 2026;23(1):91–100. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2026-1-91-100>

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

Конфликт интересов отсутствует.

Работа выполнена в рамках НИР РАН: FMFR-2024-0034.



Electroretinogram Changes in the Crew of the 12-month Isolation Experiment SIRIUS-23

V.V. Neroev¹, V.I. Kotelin¹, M.V. Zueva^{1,2}, O.M. Manko², T.N. Hiseleva¹, A.M. Aleskerov²,
D.V. Fadeev¹, D.Yu. Holesnikov², H.A. Ramazanova¹

¹ Helmholtz National Medical Research Center of Eye Diseases
Sadovaya-Chernogryazskaya str., 14/19, Moscow, 105062, Russian Federation

² Institute for Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences
Khoroshevskoe highway, 76a, Moscow, 123007, Russian Federation

ABSTRACT

Ophthalmology in Russia. 2026;23(1):91–100

The international experiment SIRIUS-23 studied the effect of long-term isolation in a closed space (hermetic object — artificial station), simulating an interplanetary flight with accompanying stress factors, on the bioelectrical activity of the retina. The aim of the study was to evaluate changes in the different types of electroretinogram (ERG), and in visual evoked cortical potentials (VEP) in the participants of the 12-month experiment. Changes in ocular blood flow were also assessed using Doppler research methods. All diagnostic examinations were conducted before and during the week after the crew exited isolation (conditional "landing"). The results indicate the general stability of the most studied parameters after the end of isolation. A slight decrease in the amplitude of flicker ERG (F-ERG) to 30 and 12 Hz flickers and P50 and N95 components of transient pattern ERG (PERG) with characteristic changes in peak latency was revealed, which indicate a mild dysfunction of retinal ganglion cells and their axons without organic damage to the visual pathways. A positive trend towards an increase in the amplitude of the photopic negative response (PhNR) to a medium-strength stimulus and the amplitude of the P100 component of VEP to a pattern-reversal to a pattern-reversal chessboard stimuli after the crew exited isolation was found. A statistically significant increase in the peripheral resistance index and pulsatility index in the ophthalmic artery, central retinal artery and lateral posterior short ciliary arteries was recorded, which may indicate a change in vascular tone in the retinal and choroidal circulation system of the eye after a 12-month experiment.

Keywords: long-term isolation, ground station, electroretinography, retina, photoreceptors, retinal bipolar cells, retinal ganglion cells, ocular blood flow, ultrasound dopplerography, SIRIUS

For citation: Neroev V.V., Zueva M.V., Kotelin V.I., Man'ko O.M., Hiseleva T.A., Aleskerov A.M., Fadeev D.V., Holesnikov D.Yu., Ramazanova H.A. Electroretinogram Changes in the Crew of the 12-month Isolation Experiment SIRIUS-23. *Ophthalmology in Russia*. 2026;23(1):91–100. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2026-1-91-100>

Financial Disclosure: no author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

There is no conflict of interests.

The work was carried out within the framework of the RAS research project: FMFR-2024-0034.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что длительное нахождение в замкнутом пространстве и сопутствующие факторы искусственной среды снижают функциональный резерв центральной нервной системы (ЦНС) человека и могут влиять на правильность принятия решений членами экипажей орбитальных станций и участниками длительных межпланетных перелетов, особенно в критических ситуациях [1–4]. Важной задачей является изучение динамики объективных показателей функциональной активности сетчатки в изоляционных экспериментах различного типа, имитирующих подобные ситуации.

Ранее нами были выполнены электрофизиологические исследования (ЭФИ) у участников 4-месячного (SIRIUS-19) и 8-месячного (SIRIUS-21) международных экспериментов с имитацией полетов на Луну.

Результаты функциональных исследований, проведенных до и после изоляционных экспериментов возрастающей длительности с различными критическими ситуациями, могут предоставить объективные критерии стрессоустойчивости сенсорных систем к экстремальным факторам среды, ее реакции на длительные физиче-

ские и психоэмоциональные нагрузки, которым подвергаются участники таких экспериментов, а также выявить биомаркеры для прогнозирования ухудшения функционирования зрительной системы.

Целью данного исследования было определить изменения электроретинограммы (ЭРГ) и зрительных вызванных корковых потенциалов (ЗВП) на паттерн-реверсивный шахматный стимул у шести участников 12-месячного эксперимента SIRIUS-23. Оценивали также изменения глазного кровотока с помощью доплеровских методов исследования. Все тестирования проводили до начала эксперимента и в течение недели после выхода экипажа из изоляции.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

ЭФИ выполняли в экранированной от электромагнитных наводок кабине с помощью диагностической системы RETIport/scan21 (Roland Consult, Германия). Условия регистрации потенциалов соответствовали требованиям, предусмотренным стандартами ISCEV (Международное общество клинической электрофизиологии зрения). Регистрировали электроретинограмму (ЭРГ) на диффузные ганцфельд-вспышки [5], фотопический

негативный ответ (ФНО) [6], фотопические ритмические ЭРГ (РЭРГ) в спектре частот от 8 до 30 Гц [7], ЭРГ на реверсирующие паттерны (паттерн-ЭРГ) [8–10], а также зрительные вызванные корковые потенциалы (ЗВП) на паттерн-реверсирующие стимулы [11]. Анализировали амплитудные и временные параметры отдельных биопотенциалов.

При регистрации биопотенциалов сетчатки активным электродом являлся конъюнктивальный петельный электрод НК-Loop. Референтным электродом служил хлорсеребряный (Ag/AgCl) чашечный электрод, размещаемый у наружного края орбиты исследуемого глаза. Запись ЗВП выполняли с помощью чашечных Ag/AgCl электродов. Активный электрод размещали на коже волосистой части головы в точке Oz и референтный электрод — на лбу в точке Fz. Общий заземляющий электрод для всех записей располагали на мочке уха. ЗВП регистрировали на реверсирующие черно-белые шахматные паттерны с угловым размером ячеек 1° и $0,3^\circ$ с частотой реверса 4 рев/с, контрастом 97 %.

Для оценки состояния глазного кровотока применяли комплексное ультразвуковое исследование ретробульбарного пространства в режимах цветного доплеровского картирования (ЦДК) и импульсной доплерографии при помощи многофункционального ультразвукового диагностического прибора Voluson E8 (GE Healthcare, США) с использованием линейного датчика с частотой от 10 до 16 МГц. В соответствии с международными рекомендациями во время исследований снижали параметры акустической мощности согласно следующим нормативам: термический индекс (TIS) — не более 1,0; механический индекс (MI) — не более 0,23; интенсивность ультразвукового потока — не более 50 мВ/см². Метод ЦДК позволил визуализировать цветовой паттерн кровотока в глазной артерии (ГА), центральной артерии сетчатки (ЦАС), параневральных медиальных и латеральных задних коротких цилиарных артериях (ЗКЦА), а также в центральной вене сетчатки (ЦВС) и верхней глазной вене (ВГВ). Метод импульсной доплерографии применяли для регистрации спектра кровотока в сосудах и определения основных параметров гемодинамики: максимальной систолической скорости (V_{syst}), конечной диастолической скорости (V_{diast}), индекса резистентности (RI) и пульсационного индекса (PI) в исследуемых сосудах. Ввиду наличия минимально пульсирующего кровотока в венозных сосудах в ЦВС и ВГВ определяли один показатель — V_{syst} .

Статистическая обработка данных, полученных в ЭФИ, выполнена в программном обеспечении Prism 8 (GraphPad Software, США) с применением параметрических и непараметрических методов анализа. Определяли среднее арифметическое (M) и среднее геометрическое, стандартную ошибку среднего арифметического, стандартное отклонение, минимальные и максимальные значения, геометрическое стандартное отклонение, а также

медиану (Me), 1-й и 3-й квартили (Q1 и Q3). Оценку достоверности различий (p) определяли с использованием t -критерия Стьюдента или критерия Вилкоксона в зависимости от нормальности распределения выборок. Степень достоверности различий оценивали при критических пороговых значениях $p < 0,05$. При анализе показателей электрической чувствительности сетчатки и лабильности зрительного нерва был использован критерий Фридмана с поправкой на множественные сравнения Данна для сравнения значений, полученных в нескольких контрольных точках, с исходными данными.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение показателей ЭФИ до и после 12-месячного эксперимента проводилось с целью выявления возможных маркеров ухудшения зрительных функций у членов экипажа с перспективой разработки в дальнейшем методики оценки ослабления функционального резерва зрительной системы. Данные ЭФИ, полученные в различных изоляционных экспериментах, предполагается использовать для оптимизации условий пребывания космонавтов на борту международной космической станции с целью исключения негативного влияния различных стрессорных факторов на функциональную активность нейронов зрительной системы. Результат статистической обработки материала представлен в таблицах 1–9 и проиллюстрирован на рисунках 1–4.

Несущественные гендерные различия были зафиксированы лишь в единичных измерениях, что не могло повлиять на оценку динамики показателей ЭФИ в группе. Различия между показателями ЭФИ, полученными от правого и левого глаза, также практически отсутствовали, за исключением не влияющих на достоверность расчетов отдельных показателей.

Колбочковая (фотопическая) ЭРГ. Результаты статистического анализа параметров колбочковой ЭРГ, записанной в фотопических условиях по международным стандартам ISCEV, представлены в таблице 1. Как показано в таблице, все временные и амплитудные параметры колбочковой ганцфельд-ЭРГ после завершения эксперимента практически не отличались от исходных фоновых значений. Различия данных до и после изоляционного эксперимента статистически незначимы.

Ритмическая ЭРГ (РЭРГ). Результаты исследования амплитуды РЭРГ на мелькания стимулов стандартной силы (3 кдхс/м²), записанных в фотопических условиях, приведены в таблице 2. Амплитуда ритмических ответов сетчатки достоверно снизилась для РЭРГ на 30 Гц ($p = 0,0394$) и 12 Гц ($p = 0,0243$) (табл. 5 и 8). Различие составило около 3 мкВ.

Паттерн-ЭРГ (ПЭРГ) в оценке активности ганглиозных клеток сетчатки. В таблице 3 представлены результаты статистической обработки базы данных ЭФИ по временным и амплитудным параметрам ПЭРГ на реверс черно-белых шахматных паттернов с угловым размером ячеек 16° , $0,8^\circ$ и $0,3^\circ$.

Таблица 1. Латентность (Т, мс) и амплитуда (А, мкВ) а- и b-волн колбочковой ЭРГ**Table 1.** Latency (T, ms) and amplitude (A, μV) of a- and b-waves of cone ERG

	Та		Тб		Аа		Аб	
	до before	после after	до before	после after	до before	после after	до before	после after
Min	12,6	12,0	27,6	28,1	15,0	24,2	67,5	71,4
Q1	14,1	14,4	29,3	29,3	23,85	25,05	90,5	89,1
Me	15,1	15,05	30,2	29,9	28,35	27,05	120,5	97,2
Q3	15,5	15,73	31,1	30,2	31,93	29,6	126,9	127,5
Max	16,7	15,8	31,6	31,3	41,4	34,4	132,3	150,1
M	14,88	14,86	30,00	29,81	27,78	27,81	110,00	105,80
SD	1,089	1,049	1,345	0,9634	7,026	3,010	22,400	25,200
SE	0,3143	0,3029	0,3883	0,2781	2,0280	0,8690	6,4670	7,2750
GEOMEAN	14,84	14,82	29,97	29,79	26,88	27,66	107,60	103,10
GSD	1,078	1,078	1,047	1,033	1,318	1,111	1,256	1,268
P (критерий Вилкоксона) P (Wilcoxon test)		0,5352		0,2405		0,9864		0,3126

Обозначения здесь и далее: М — среднее; SD — стандартное отклонение; SE — стандартная ошибка среднего; Min — минимум; Max — максимум; Q25 — нижний квартиль; Me — медиана; Q75 — верхний квартиль; GEOMEAN — среднее геометрическое; GSD — геометрическое стандартное отклонение; * $p < 0,05$ — статистически значимо ($p < 0,05$) по сравнению с исходными фоновыми данными; # — тенденция. Designations here and below: M — mean; SD — standard deviation; SE — standard error; Min — minimum; Max — maximum; Q25 — lower quartile; Me — median; Q75 — upper quartile; GEOMEAN — geometric mean; GSD — geometric standard less deviation; * $p < 0,05$ — statistically significant ($p < 0,05$) compared to the original background data; # — trend.

Отслеживание динамики ПЭРГ на низкую (до 4 реВ/с) и высокую (16 реВ/с) частоту реверсии ячеек паттерна, называемых соответственно транзистентной и стационарной ПЭРГ, позволяет оценивать изменение функциональной активности ганглиозных клеток сетчатки (ГКС) и их аксонов во внутренней сетчатке.

Как указано в таблице 3, после выхода из изоляции у испытуемых наблюдалось небольшое (на 2 мс) сокращение пиковой латентности волны P50 (тенденция, $p = 0,0605$) и удлинение среднего значения латентности N95 транзистентной ПЭРГ на крупный паттерн (16° , $p > 0,05$). Эти изменения времени кульминации сопровождались легким (на 2–4 мкВ) угнетением амплитуды волн ПЭРГ. Изменения N95 превышали угнетение P50, что привело к небольшому возрастанию индекса N95/P50 по сравнению с исходным значением.

Таким образом, изменения транзистентной ПЭРГ на крупный паттерн, которая отражает функциональное состояние крупноклеточных ГКС и их аксонов, принадлежащих магноцеллюлярной системе, свидетельствуют о легкой дисфункции клеток магно-каналов зрительной системы. Статистический анализ данных показал, что изменения временных и амплитудных параметров волн P50 и N95 транзистентной ПЭРГ на стимул $0,8^\circ$ (ГКС парвоцеллюлярной системы) показывают такую же закономерность, как и для крупных паттернов, а именно: имеются разнонаправленные изменения пиковой латентности позитивного и негативного компонентов транзистентной ПЭРГ и снижение их амплитуд, более выраженные для компонента N95 (табл. 4).

Однако время кульминации волн ПЭРГ на самый мелкий паттерн ($0,3^\circ$), в отличие от ответа на реверсию ячеек паттерна с размерами 16° и $0,8^\circ$, практически не изменялось, а амплитуда компонентов P50 и N95 даже несколько возросла (табл. 5).

Таблица 2. Амплитуда (мкВ) стандартной 30Гц-ПЭРГ и фотопической низкочастотной ПЭРГ**Table 2.** Amplitude (μV) of standard 30Hz F-ERG and photopic low-frequency flicker ERG

Частота Frequency	30Гц стандарт 30Hz standard		8.3		10		12		24	
	до before	после after	до before	после after	до before	после after	до before	после after	до before	после after
Min	57,7	47,0	94,5	90,9	90,9	72,9	94,5	88,7	58,2	92,9
Q1	89,55	87,73	106,8	104,3	108	106,8	113,8	110,5	111,5	108,6
Me	101,9	91,9	128,7	117,9	112,4	118,4	128,1	122,8	126,9	123,4
Q3	108,8	100,0	151,1	150,4	157,0	151,5	162,6	154,7	152,1	153,2
Max	137,6	117,4	172,6	160,8	169,9	164,0	172,8	166,5	187,5	184,4
M	98,18	89,15	128,9	124	125,8	122,1	133,6	127,9	126,9	132,7
SD	20,79	20,14	23,82	24,48	27,40	29,63	27,71	25,13	33,92	31,59
SE	6,001	5,813	6,876	7,066	7,909	8,553	7,998	7,255	9,793	9,119
GEOMEAN	95,99	86,57	126,9	121,8	123,3	118,6	131,0	125,6	122,0	129,4
GSD	1,257	1,308	1,202	1,220	1,231	1,296	1,233	1,220	1,360	1,265
P (критерий Вилкоксона) P (Wilcoxon test)		0,0394*		0,1177		0,5562		0,0243*		0,2036

Таблица 3. Пиковая латентность (Т, мс) и амплитуда (А, мкВ) компонентов P50 и N95 транзистентной ПЭРГ от пика P50 и от изолинии, стимул 16°**Table 3.** Amplitude (A, μV) of the P50 and N95 components of transient PERG from the P50 peak and from the baseline, stimulus 16°

Стимул 16° Stimulus 16°	T, P50		T, N95		A, P50		A, P50-N95		A, N95 from baseline	
	до before	после after	до before	после after	до before	после after	до before	после after	до before	после after
Min	44,4	46,1	93,3	94,1	7,9	4,7	14,1	11,0	4,7	5,3
Q1	51,40	47,90	95,68	97,68	9,425	12,13	15,10	18,78	8,075	7,275
Me	52,3	49,5	98,1	98,8	15,3	13,65	23,45	22,25	9,25	8,5
Q3	54,03	54,20	101,90	103,30	18,68	14,58	30,38	25,45	15,03	13,20
Max	55,7	54,6	104,6	119,8	24,9	16,5	37,9	27,5	18,7	13,7
M	51,98	50,54	98,73	101,00	14,97	12,76	23,52	21,41	10,75	9,633
SD	2,988	3,173	3,429	6,742	5,224	3,398	8,195	5,178	4,632	3,027
SE	0,8625	0,9161	0,9899	1,9460	1,5080	0,9809	2,3660	1,4950	1,3370	0,8737
GEOMEAN	51,90	50,45	98,68	100,80	14,11	12,16	22,22	20,71	9,828	9,201
GSD	1,062	1,065	1,035	1,065	1,442	1,432	1,425	1,330	1,572	1,375
P (критерий Вилкоксона) P (Wilcoxon test)		0,1551		0,5078		0,0605#		0,2851		0,458

Таблица 4. Пиковая латентность (Т, мс) и амплитуда (А, мкВ) компонентов P50 и N95 транзистентной ПЭРГ от пика P50 и от изолинии, стимул 0,8°**Table 4.** Amplitude (A, μV) of the P50 and N95 components of transient PERG from the P50 peak and from the baseline, stimulus 0.8°

Стимул 0,8° Stimulus 0.8°	T, P50		T, N95		A, P50		A, P50-N95		A, N95 от изолинии / from baseline	
	до before	после after	до before	после after	до before	после after	до before	после after	до before	после after
Min	54,6	53,9	90,2	95,5	3,2	3,8	7,2	8,8	2,2	2,0
Q1	55,70	55,78	94,75	97,15	7,45	8,75	10,08	11,15	2,75	2,825
Me	58,45	56,40	98,65	100,40	16,05	12,55	16,50	16,95	3,85	4,50
Q3	59,73	57,85	100,30	105,10	20,65	15,95	20,18	20,33	6,65	8,00
Max	62,3	59,5	109,2	119,8	25,8	20,8	22,0	25,4	7,6	9,3
M	58,01	56,63	98,31	102,20	14,75	12,64	15,26	16,35	4,40	5,30
SD	2,647	1,573	4,705	6,736	7,611	4,901	5,339	5,117	1,972	2,658
SE	0,7642	0,454	1,358	1,945	2,197	1,415	1,541	1,477	0,5692	0,7672
GEOMEAN	57,95	56,61	98,21	102,00	12,37	11,62	14,29	15,56	4,015	4,657
GSD	1,047	1,028	1,048	1,065	1,986	1,588	1,484	1,405	1,563	1,729
P (критерий Вилкоксона) P (Wilcoxon test)		0,0414		0,1049		0,1186		0,4054		0,3208

Таблица 5. Пиковая латентность (Т, мс) и амплитуда (А, мкВ) компонентов P50 и N95 транзистентной ПЭРГ от пика P50 и от изолинии, стимул 0,3°**Table 5.** Amplitude (A, μV) of the P50 and N95 components of transient PERG from the P50 peak and from the baseline, stimulus 0.3°

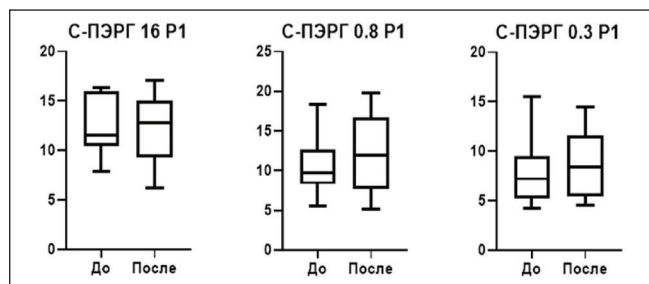
Стимул 0,3° Stimulus 0.3°	T, P50		T, N95		A, P50		A, P50-N95		A, N95 от изолинии / from baseline	
	до before	после after	до before	после after	до before	после after	до before	после after	до before	после after
Min	54,6	53,9	90,2	95,5	3,2	3,8	7,2	8,8	2,2	2,0
Q1	55,70	55,78	94,75	97,15	7,45	8,75	10,08	11,15	2,75	2,825
Me	58,45	56,40	98,65	100,40	16,05	12,55	16,50	16,95	3,85	4,50
Q3	59,73	57,85	100,30	105,10	20,65	15,95	20,18	20,33	6,65	8,00
Max	62,3	59,5	109,2	119,8	25,8	20,8	22,0	25,4	7,6	9,3
M	58,01	56,63	98,31	102,20	14,75	12,64	15,26	16,35	4,40	5,30
SD	2,647	1,573	4,705	6,736	7,611	4,901	5,339	5,117	1,972	2,658
SE	0,7642	0,454	1,358	1,945	2,197	1,415	1,541	1,477	0,5692	0,7672
GEOMEAN	57,95	56,61	98,21	102,00	12,37	11,62	14,29	15,56	4,015	4,657
GSD	1,047	1,028	1,048	1,065	1,986	1,588	1,484	1,405	1,563	1,729
P (критерий Вилкоксона) P (Wilcoxon test)		0,0414		0,1049		0,1186		0,4054		0,3208

Таблица 6. Амплитуда (А, мкВ) стационарной ПЭРГ (С-ПЭРГ), стимулы 16°, 0,8° и 0,3°**Table 6.** Amplitude (A, μV) of the steady-state PERG (SS-PERG), stimuli 16°, 0.8° and 0.3°

Угловой размер стимула Stimulus angle size	16°		0,8°		0,3°	
	до before	после after	до before	после after	до before	после after
Min	7,9	6,2	5,5	5,2	4,2	4,5
Q1	10,45	9,325	8,30	7,675	5,20	5,40
Me	11,55	12,75	9,70	11,9	7,2	8,45
Q3	15,95	15,08	12,65	16,73	9,45	11,55
Max	16,4	17,1	18,4	19,8	15,5	14,5
M	12,63	12,03	10,59	12,22	7,942	8,875
SD	3,029	3,524	3,411	4,836	3,690	3,665
SE	0,8745	1,017	0,9845	1,396	1,065	1,058
GEOMEAN	12,28	11,49	10,12	11,29	7,302	8,175
GSD	1,282	1,393	1,372	1,532	1,511	1,535
P (критерий Вилкоксона) P (Wilcoxon test)		0,5078		0,1591		0,5186

Таблица 7. Амплитуда ФНО, измеренная от пика b-волны ЭРГ, записанная на синем фоне в ответах на красные вспышки разной силы (0,375, 0,75, 1,5 и 3,0 кд·с/м²)**Table 7.** The amplitude of PhNR measured from the b-peak of the ERG recorded on a blue background in response to red flashes of different strengths (0.375, 0.75, 1.5 and 3.0 cd s/m²)

кд·с/м ² cd s/m ²	0,375		0,75		1,5		3,0	
	до before	после after	до before	после after	до before	после after	до before	после after
Min	8,0	7,5	13,2	22,8	16,4	22,1	29,8	40,4
Q1	16,83	14,65	19,55	33,98	29,75	33,00	36,63	43,13
Me	18,05	19,15	40,60	39,90	39,00	44,45	60,45	58,30
Q3	28,83	24,48	47,78	54,13	49,35	51,40	71,35	78,35
Max	77,8	37,5	59,7	64,7	71,2	65,5	94,1	89,9
M	25,03	19,66	36,85	43,12	40,36	43,52	57,28	60,90
SD	18,42	8,133	15,65	12,99	16,59	13,16	19,89	17,33
SE	5,317	2,348	4,519	3,748	4,790	3,799	5,741	5,001
GEOMEAN	21,15	18,04	33,03	41,30	37,15	41,57	53,98	58,68
GSD	1,759	1,569	1,693	1,365	1,551	1,383	1,445	1,330
P (критерий Вилкоксона) P (Wilcoxon test)		0,2783		0,0576#		0,276		0,4415

**Рис. 1.** Динамика стационарного паттерна ЭРГ (С-ПЭРГ) на реверс ячеек паттерна с угловыми размерами 16°, 0,8° и 0,3°**Fig. 1.** Dynamics of stationary pattern ERG (S-PERG) on the reverse of pattern cells with angular sizes of 16°, 0.8° and 0.3°

Анализ амплитуды *стационарной ПЭРГ (С-ПЭРГ)*, называемой также ПЭРГ устойчивого состояния (табл. 6 и рис. 1), показал небольшое возрастание медианы амплитуды С-ПЭРГ для ответов на стимулы всех размеров (разница статистически незначима). Наибольший положительный эффект отмечен для стимула с угловым размером 0,8° ($p = 0,1591$).

Фотопический негативный ответ (ФНО). Время кульминации ФНО во всех протоколах немного (на 2–4 мс) сокращалось по сравнению с исходной записью или не отличалось от фоновых значений (различия между измерениями до и после изоляции статистически недостоверны). В таблице 7 представлены амплитуды ФНО, измеренной от пика b-волны ЭРГ, записанной на синем фоне в ответах на красные вспышки разной силы (0,375, 0,75, 1,5 и 3,0 кд·с/м²), и амплитудное отношение (индекс) ФНО/b.

Результаты показали отсутствие статистически значимых изменений временных и амплитудных параметров компонентов ФНО в ЭРГ на вспышки различной яркости. Однако отмечено возрастание среднего значения амплитуды ФНО в ЭРГ на стимул средней силы 0,75 кд·с/м² (по *t*-критерию Стьюдента $p = 0,0576\#$; тенденция).

Зрительные вызванные корковые потенциалы (ЗВП). Динамика пиковой латентности и амплитуды ЗВП представлена в таблице 8. У членов экипажа, обследованных после выхода из 12-месячной изоляции, обнаружено небольшое возрастание амплитуды P100 на крупный паттерн и снижение в ЗВП на мелкий паттерн, а также небольшие изменения времени кульминации, которые были статистически незначимы.

Таблица 8. Пиковая латентность (Т, мс) и амплитуда (А, мВ) P100-компонента ЗВП на паттерн-реверсивные стимулы с угловыми размерами 1° и 0,3°**Table 8.** Peak latency (T, ms) and amplitude (A, μV) of the P100 component of the VEP to pattern-reversal stimuli with angular sizes of 1° and 0.3°

кд·с/м ² cd s/m ²	0,375		0,75		1,5		3,0	
	до before	после after	до before	после after	до before	после after	до before	после after
Min	68,7	95,1	5,7	8,4	101,0	95,1	1,4	2,9
Q1	99,80	101,00	8,75	11,70	106,40	98,68	6,625	6,50
Me	106,6	106,3	12,1	13,4	111,9	109,8	12,45	9,05
Q3	112,10	113,20	14,63	19,63	117,30	116,40	18,00	14,20
Max	115,7	117,4	28,0	23,7	125,0	124,5	20,6	24,6
M	103,70	106,90	13,14	15,15	111,70	109,60	11,80	10,92
SD	12,630	6,893	5,943	4,696	6,918	9,961	6,430	5,989
SE	3,645	1,990	1,716	1,356	1,997	2,876	1,856	1,729
GEOMEAN	102,8	106,6	12,1	14,51	111,5	109,2	9,524	9,481
GSD	1,150	1,067	1,520	1,360	1,064	1,096	2,207	1,773
P (критерий Вилкоксона) P (Wilcoxon test)		0,3897		0,2241		0,318		0,5128

Таблица 9. Средние показатели гемодинамики в сосудах глаза**Table 9.** Average hemodynamic parameters in the vessels of the eye

Сосуды Vessels	Параметры кровотока / Blood flow parameters								
	V_{syst} cm/c		V_{diast} cm/c		RI		PI		
	I	II	I	II	I	II	I	II	
Этап / Stage									
ГА / GA	39,89 ± 4,65	44,40 ± 6,25	10,28 ± 2,80	8,40 ± 2,25*	0,74 ± 0,06	0,80 ± 0,04*	1,58 ± 0,34	2,11 ± 0,59*	
ЦАС / CRA	12,25 ± 1,49	14,29 ± 2,10	4,14 ± 0,76	4,12 ± 1,23	0,65 ± 0,05	0,74 ± 0,04*	1,17 ± 0,17	1,53 ± 0,15*	
лат. ЗКЦА / lat. LSPCA	13,14 ± 1,94	15,97 ± 2,74	6,00 ± 1,30	5,93 ± 0,60	0,54 ± 0,06	0,64 ± 0,06*	0,81 ± 0,12	1,15 ± 0,24*	
мед. КЦА / med. MCCA	12,70 ± 1,08	14,04 ± 1,79	5,71 ± 0,30	5,71 ± 0,62	0,57 ± 0,01	0,59 ± 0,03	0,88 ± 0,09	0,94 ± 0,08	
ЦВС / CRV	6,91 ± 1,77	6,80 ± 0,73							
ВГВ / SOV	9,50 ± 1,10	10,38 ± 0,91							

Примечание: * $p < 0,01$ — достоверно относительно исходных данных; ГА — глазная артерия, ЦАС — центральная артерия сетчатки; лат. ЗКЦА — латеральная задняя короткая цилиарная артерия; мед. ЗКЦА — медиальная ЗКЦА; ЦВС — центральная вена сетчатки; ВГВ — верхняя глазная вена.

Note: * $p < 0,01$ — reliable relative to the baseline data; GA — ophthalmic artery, CRA — central retinal artery; lat. LSPCA — lateral posterior short ciliary artery; med. MCCA — medial MCCA; CRV — central retinal vein; SOV — superior ophthalmic vein.

Оценка состояния глазного кровотока. Анализ результатов исследования гемодинамики в ретробульбарных сосудах показал статистически недостоверное увеличение показателей V_{syst} в ГА, ЦАС и параневральных медиальных и латеральных ЗКЦА после проведения испытания (табл. 9, рис. 2–4). Следует отметить, что в этот период наблюдения изменений показателей скорости венозного кровотока в ЦВС и ВГВ не отмечалось. Однако регистрировалось статистически достоверное увеличение индекса периферического сопротивления и пульсационного индекса в ГА, ЦАС и лат. ЗКЦА ($p < 0,01$), что может свидетельствовать об изменении сосудистого тонуса (податливости сосудистой стенки) в системе ретикулярной и хориоидальной циркуляции глаза после проведения эксперимента.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ранее нами были выполнены ЭФИ у участников 4-месячного (SIRIUS-19) и 8-месячного (SIRIUS-21) международных экспериментов с имитацией полетов на Луну.

После окончания 4-месячного эксперимента, по данным ЭФИ, отсутствовали статистически значимые изменения функциональной активности сетчатки и зрительной коры по сравнению с исходными данными. Однако у трех испытуемых были отмечены изменения ЗВП на реверсию мелких паттернов, которые характеризуют функциональную активность волокон парвоцеллюлярного канала зрительной системы и были связаны, на наш взгляд, с их физической

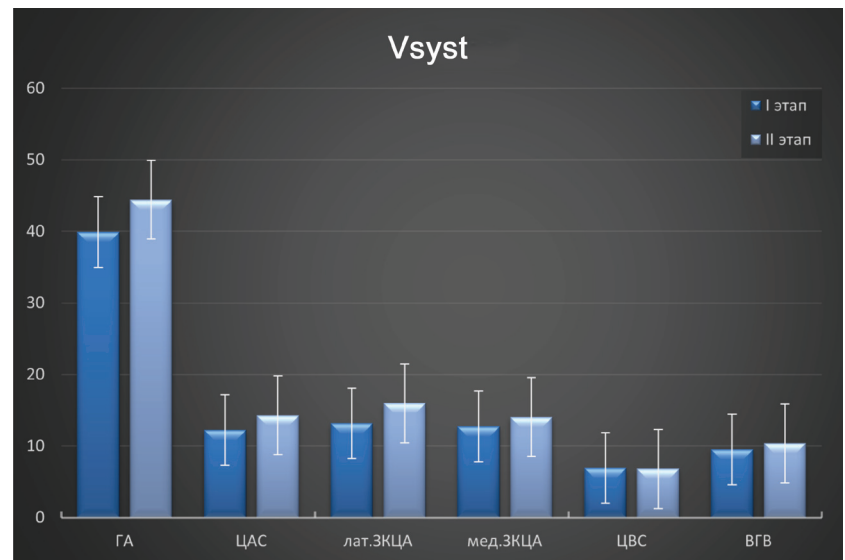


Рис. 2. Динамика показателей максимальной систолической скорости кровотока в сосудах глаза

Fig. 2. Dynamics of maximum systolic blood flow velocity in the vessels of the eye

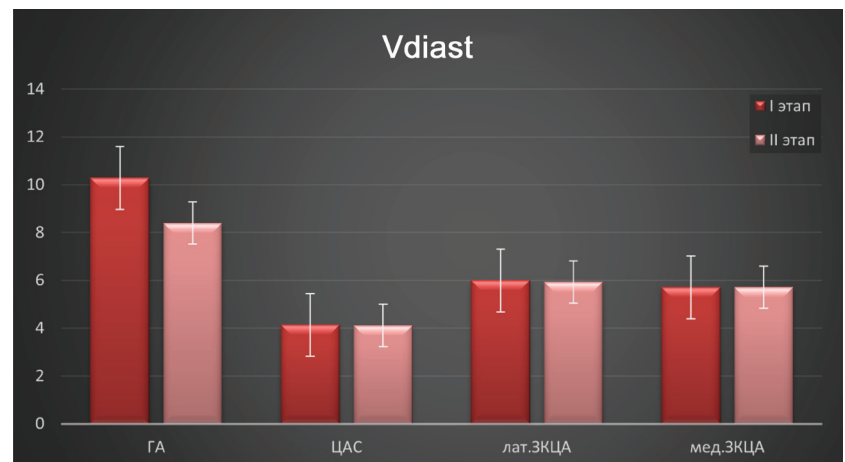


Рис. 3. Динамика показателей конечной диастолической скорости кровотока в сосудах глаза

Fig. 3. Dynamics of end-diastolic blood flow velocity in the vessels of the eye

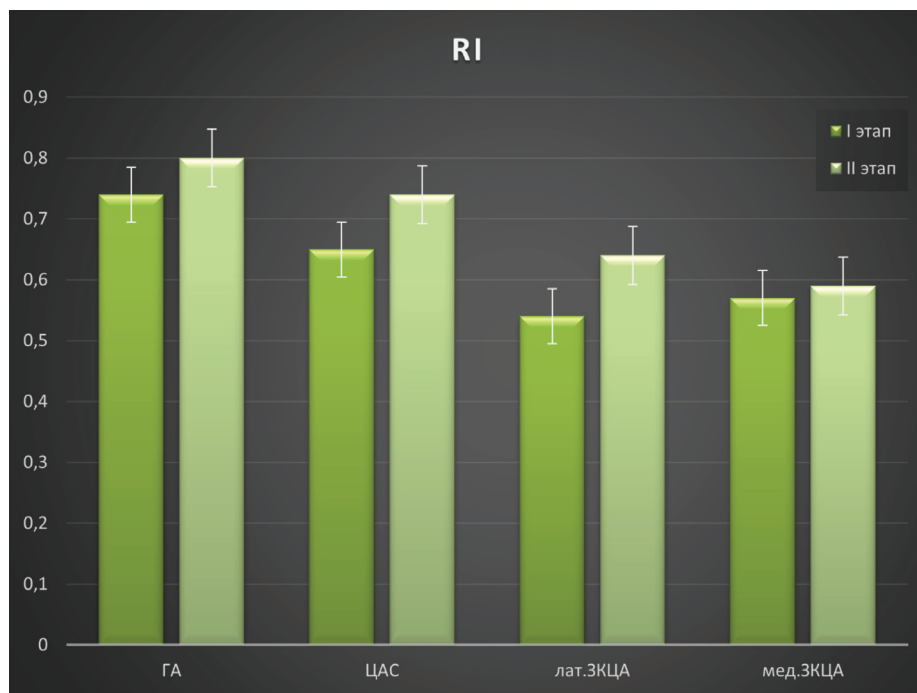


Рис. 4. Динамика индекса периферического сопротивления в сосудах глаза

Fig. 4. Dynamics of the peripheral resistance index in the vessels of the eye

активностью (бокс) и более высоким зрительно напряженным трудом (по протоколу испытаний), а также с индивидуальной реакцией на депривацию сна у испытуемых — командира и инженера команды, наделенных повышенной ответственностью [4].

ЭФИ, проведенное до и после 8-месячного изоляционного эксперимента SIRIUS-21, показало умеренное возрастание амплитуды компонентов ЭРГ, отражающих активность фоторецепторов и биполярных клеток, и небольшое снижение функции ГКС, которые могут быть связаны с реакцией зрительной сенсорной системы при адаптации испытуемых к физической и психоэмоциональной нагрузке в условиях эксперимента [12].

В 12-месячном эксперименте SIRIUS-23 гендерные различия так же, как и в более коротких испытаниях, были незначительными и не влияли на оценку динамики ЭРГ и ЗВП. Отсутствовали различия между показателями ЭФИ, полученными от правого и левого глаза. По результатам статистического анализа после завершения изоляционного эксперимента большинство временных и амплитудных параметров исследуемых биопотенциалов практически не отличалось от исходных фоновых значений. Однако для отдельных биопотенциалов установлены определенные тенденции изменений. Достоверно ($p < 0,05$) снизилась амплитуда РЭРГ на мелькания 30 и 12 Гц, хотя разница составила не более 3 мкВ.

Источником генерации стационарной ПЭРГ и N95 компонента транзистентной ПЭРГ является активность ГКС и их аксонов [10]. После завершения эксперимента у испытуемых зарегистрировано небольшое (на 2 мс)

сокращение пиковой латентности волны P50 и удлинение латентности N95 транзистентной ПЭРГ на паттерны 16° и 0,8°. Эти признаки специфически характерны для дисфункции ГКС. Кроме того, эти изменения временных параметров сопровождалось легким (на 2–4 мкВ) угнетением амплитуды волн P50 и N95 ПЭРГ. Изменения N95, отражающие активность аксонов ГКС, превышали угнетение P50, что привело к небольшому возрастанию индекса N95/P50. Таким образом, ПЭРГ указывает на легкую дисфункцию ГКС и их аксонов, принадлежащих как магноцеллюлярной, так и парвоцеллюлярной системам, но без органического поражения зрительных проводящих путей. Стационарная ПЭРГ показала небольшое возрастание медианы амплитуды ответов на стимулы всех размеров (разница статисти-

чески незначима). Наибольший положительный эффект отмечен для стимула с угловым размером 0,8° ($p = 0,1591$).

Исследование динамики параметров фотопического негативного ответа (ФНО) в ЭРГ на красный стимул различной силы, генерация которого зависит от импульсной активности не только ГКС, но и определенной субпопуляции импульсных амакриновых клеток, показало отсутствие статистически значимых изменений временных и амплитудных параметров биопотенциала, хотя документирована тенденция к возрастанию среднего значения амплитуды ФНО в ЭРГ на стимул средней силы 1,75 кд×с/м² ($p = 0,0576$).

После выхода из 12-месячной изоляции у всех членов экипажа обнаружено небольшое возрастание амплитуды P100 ЗВП на крупный паттерн и снижение P100 в ответе на мелкий паттерн, а также небольшие изменения времени кульминации, которые были статистически незначимы. Изменения ЗВП могут быть связаны с изменением социально-эмоционального восприятия при получении нового, сложного ситуационного опыта (см., например, [13]) во время длительной изоляции на гермообъекте.

Исследование гемодинамики в ретробульбарных сосудах показало статистически недостоверное увеличение показателей V_{syst} в ГА, ЦАС и параневральных медиальных и латеральных ЗКЦА после проведения испытания. Не отмечено изменений показателей скорости венозного кровотока в ЦВС и ВГВ. С другой стороны, выявлено статистически достоверное увеличение индекса периферического сопротивления и пульсационного

индекса в ГА, ЦАС и лат. ЗКЦА ($p < 0,01$). Это может свидетельствовать об изменении сосудистого тонуса (податливости сосудистой стенки) в системе ретиальной и хориоидальной циркуляции глаза после проведения испытания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После завершения годового эксперимента временные и амплитудные параметры большинства исследуемых биопотенциалов у членов экипажа не отличались от исходных фоновых значений. Однако обнаружено небольшое снижение амплитуды РЭРГ на мелькания 30 и 12 Гц ($p < 0,05$). Характерные сочетания изменений пиковой латентности и амплитуды волн P50 и N95 транзистентной ПЭРГ свидетельствуют о легкой дисфункции ГКС и их аксонов, принадлежащих магноцеллюлярной и парвоцеллюлярной системам, но без органического поражения зрительных проводящих путей. Кроме того, обнаружена положительная тенденция к возрастанию амплитуды ФНО на стимул средней силы и амплитуды P100 компонента паттерн-ЗВП у всех членов экипажа после выхода

из изоляции. Отмеченные изменения могут отражать адаптацию зрительной сенсорной системы испытуемых к условиям эксперимента на борту искусственной станции и их социально-эмоциональное восприятие при получении сложного ситуационного опыта. С другой стороны, статистически достоверное увеличение индекса периферического сопротивления и пульсационного индекса в ГА, ЦАС и лат. ЗКЦА, свидетельствующее об изменении сосудистого тонуса в системе ретиальной и хориоидальной циркуляции глаза после 12-месячного эксперимента, может также являться фактором, влияющим на функциональную активность сетчатки.

УЧАСТИЕ АВТОРОВ:

Нероев В.В. — концепция, координация исследований;
Котелин В.И. — электрофизиологические исследования, анализ данных, написание текста;
Зуева М.В. — анализ литературы и полученных данных, написание текста;
Манько О.М. — организация эксперимента на борту и обсуждение данных;
Киселева Т.Н. — проведение ультразвуковой доплерографии, описание результатов;
Алескеров А.М. — статистический анализ данных, обсуждение материала;
Фадеев Д.В. — обработка результатов исследований;
Колесников Д.Ю. — статистический анализ, иллюстрация результатов;
Рамазанова К.А. — проведение ультразвуковой доплерографии, анализ данных.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Palinkas LA, Suedfeld P. Psychological effects of polar expeditions. *Lancet*. 2008;371(9607):153–163. doi: 10.1016/S0140-6736(07)61056-3.
- Садовничий ВА, Амелюшкин АМ, Ангелопулос В. Космические эксперименты на борту спутника МГУ «Ломоносов». *Космические исследования*. 2018;51(6):427–433. Sadovnichiy VA, Amelyushkin AM, Angelopoulos V. Space experiments aboard the Lomonosov MSU satellite. *Cosmic Research*. 2018;51(6):427–433 (In Russ.).
- Mogilever NB, Zuccarelli L, Burles F. Expedition Cognition: A review and prospective of subterranean neuroscience with spaceflight applications. *Front Hum Neurosci*. 2018;12:407. doi: 10.3389/fnhum.2018.00407.
- Нероев ВВ, Зуева МВ, Цапенко ИВ, Бубеев ЮА, Манько ОМ, Смолевский АЕ, Алескеров АМ, Грачева МА. Функциональная активность сетчатки и зрительные вызванные корковые потенциалы при моделировании факторов космического полета в условиях четырехмесячной изоляции в гермообъекте с искусственной средой обитания. *Вестник Российской академии медицинских наук*. 2021;76(5):488–496. doi: 10.15690/vramn1323. Neroev VV, Zueva MV, Tsapenko IV, Bubeev YuA, Manko OM, Smoleevsky AE, Aleskerov AM, Gracheva MA. Functional Activity of the Retina and Visual Evoked Cortical Potentials in Simulation the Factors of Space Flight in Conditions of Four Month Isolation in a Hermetic Object with Artificial Habitat. *Annals of the Russian Academy of Medical Sciences*. 2021;76(5):488–496 (In Russ.). doi: 10.15690/vramn1323.
- Robson AG, Frishman LJ, Grigg J, Hamilton R, Jeffrey BG, Kondo M, Li S, McCulloch DL. ISCEV Standard for full-field clinical electroretinography (2022 update). *Doc Ophthalmol*. 2022;144(3):165–177. doi: 10.1007/s10633-022-09872-0.
- Frishman L, Sustar M, Kremers J, McAnany JJ, Sarossy M, Tzekov R, Viswanathan S. ISCEV extended protocol for the photopic negative response (PhNR) of the full-field electroretinogram. *Doc Ophthalmol*. 2018;136(3):207–211. doi: 10.1007/s10633-018-9638-x.
- Зуева МВ, Нероев ВВ, Цапенко ИВ, Сарыгина ОИ, Гринченко МИ, Зайцева СИ. Топографическая диагностика нарушений ретиальной функции при ретмагенной отслойке сетчатки методом ритмической ЭРГ широкого спектра частот. *Российский офтальмологический журнал*. 2009;1(2):18–23. Zueva MV, Neroev VV, Tsapenko IV, Sarygina OI, Grinchenko MI, Zaitseva SI. Topographic diagnostics of retinal function disorders in rhyematogenous retinal detachment by the method of rhythmic ERG of a wide range of frequencies. *Russian Ophthalmological Journal*. 2009;1(2):18–23 (In Russ.).
- Thompson DA, Bach M, McAnany JJ, Šuštar Habjan M, Viswanathan S, Robson AG. ISCEV standard for clinical pattern electroretinography (2024 update). *Doc Ophthalmol*. 2024;148(2):75–85. doi: 10.1007/s10633-024-09970-1.
- Bach M, Brigell MG, Hawlina M, Holder GE, Johnson MA, McCulloch DL, Meigen T, Viswanathan S. ISCEV standard for clinical pattern electroretinography (PERG): 2012 update. *Doc Ophthalmol*. 2013 Feb;126(1):1–7. doi: 10.1007/s10633-012-9353-y.
- Luo X, Frishman LJ. Retinal pathway origins of the pattern electroretinogram (PERG). *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2011 Nov 1;52(12):8571–8584. doi: 10.1167/iov.11-8376.
- Odom JV, Bach M, Brigell M, Holder GE, McCulloch DL, Mizota A, Tormene AP. International Society for Clinical Electrophysiology of Vision. ISCEV standard for clinical visual evoked potentials: (2016 update). *Doc Ophthalmol*. 2016 Aug;133(1):1–9. doi: 10.1007/s10633-016-9553-y.
- Нероев ВВ, Цапенко ИВ, Котелин В.И., Зуева МВ, Манько ОМ, Алескеров АМ, Подъянов Д.А. Электроретинографические исследования экипажа 8-месячного международного эксперимента SIRIUS 20/21. *Сенсорные системы*. 2023;37(2):152–161. doi: 10.31857/S0235009223020038. Neroev VV, Tsapenko IV, Kotelin VI, Zueva MV, Manko OM, Aleskerov AM, Podyanov DA. Electroretinographic studies of the crew of the 8-month international experiment SIRIUS 20/21. *Sensory systems*. 2023;37(2):152–161 (In Russ.). doi: 10.31857/S0235009223020038.
- Wieser MJ, Miskovic V, Keil A. Steady-state visual evoked potentials as a research tool in social affective neuroscience. *Psychophysiology*. 2016;53(12):1763–1775. doi: https://doi.org/10.1111/psyp.12768.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Нероев Владимир Владимирович
академик РАН, профессор, директор
<https://orcid.org/0000-0002-8480-0894>

Котелин Владислав Игоревич
кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник отдела
клинической физиологии зрения им. С.В. Кравкова
<https://orcid.org/0000-0003-4675-9648>

Зуева Марина Владимировна
доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, начальник
отдела клинической физиологии зрения им. С.В. Кравкова, ведущий научный
сотрудник лаборатории «Физиология и психофизиология зрительной системы»
<https://orcid.org/0000-0002-0161-5010>

ABOUT THE AUTHORS

Neroev Vladimir V.
MD, Professor, Academician, director
<https://orcid.org/0000-0002-8480-0894>

Kotelin Vladislav I.
PhD, senior research fellow of the S.V. Kravkov Department
of Clinical Physiology of Vision
<https://orcid.org/0000-0003-4675-9648>

Zueva Marina V.
MD (Biol.), Professor, head of S.V. Kravkov Department
of Clinical Physiology of Vision; leading researcher of the Laboratory
"Physiology and Psychophysiology of the Visual System"
<https://orcid.org/0000-0002-0161-5010>

Манько Ольга Михайловна
доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник, руководитель
лаборатории «Физиология и психофизиология зрительной системы»
<https://orcid.org/0000-0002-0048-0425>

Киселева Татьяна Николаевна
доктор медицинских наук, профессор, начальник отдела
ультразвуковых исследований
<https://orcid.org/0000-0002-9185-6407>

Алескеров Ахмед Магомедалиевич
младший научный сотрудник лаборатории «Физиология
и психофизиология зрительной системы»
<https://orcid.org/0000-0003-0807-7734>

Фадеев Денис Владимирович
научный сотрудник Научного экспериментального центра
<https://orcid.org/0000-0003-1858-2005>

Колесников Дмитрий Юрьевич
ведущий специалист научной лаборатории «Психологические
и психофизиологические исследования профессиональной деятельности»
<https://orcid.org/0009-0004-6130-9770>

Рамазанова Камилла Ахмедовна
врач-офтальмолог, кандидат медицинских наук,
заведующая отделением ультразвуковой диагностики
<https://orcid.org/0000-0002-2635-4291>

Manko Olga M.
MD, leading researcher, head of the Laboratory “Physiology
and Psychophysiology of the Visual System”
<https://orcid.org/0000-0002-0048-0425>

Kiseleva Tatyana N.
MD, Professor, head of the Department of Ultrasound Research
<https://orcid.org/0000-0002-9185-6407>

Aleskerov Ahmed M.
junior researcher, Laboratory “Physiology and Psychophysiology
of the Visual System”
<https://orcid.org/0000-0003-0807-7734>

Fadeev Denis V.
researcher at the Scientific Experimental Center
<https://orcid.org/0000-0003-1858-2005>

Kolesnikov Dmitry Yu.
leading specialist of the scientific laboratory “Psychological
and Psychophysiological Studies of Professional Activity”
<https://orcid.org/0009-0004-6130-9770>

Ramazanova Kamilla A.
ophthalmologist, PhD, head of the Ultrasound Diagnostics Department
<https://orcid.org/0000-0002-2635-4291>