

Динамика электрической чувствительности сетчатки и электрической лабильности зрительного нерва в 12-месячном международном эксперименте SIRIUS-23

Б.В. Нероев¹М.В. Зуева^{1,2}В.И. Котелин¹, О.М. Манько², И.В. Егорова¹, А.М. Алекснеров², Д.В. Фадеев¹, Д.Ю. Колесников²

¹ ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр глазных болезней им. Гельмгольца»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
ул. Садовая-Черногрязская, 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. 2025;22(4):828-835

Целью 12-месячного международного эксперимента SIRIUS-23 было проанализировать у участников влияние условий длительной изоляции и воздействия стрессорных факторов на электрическую чувствительность (ЭЧ) сетчатки и электрическую лабильность (ЭЛ) зрительного нерва (ЗН) в teste ЭЧиЛ. На борту искусственной станции проводили ежемесячное тестирование ЭЧ сетчатки и ЭЛ ЗН. Результаты, полученные в данном 12-месячном эксперименте, подтверждают закономерности изменений ЭЧ сетчатки и ЭЛ ЗН, установленные ранее в 8-месячном эксперименте SIRIUS-21. Показано, что при кратковременной или умеренной по силе физической и психоэмоциональной нагрузке ЭЧ сетчатки может возрастать. Снижение порога ЭЧ может также говорить об индивидуальной физической и психической выносливости членов экипажа. Динамическое исследование подтвердило, что ЭЛ ЗН более устойчива к физическим и психоэмоциональным нагрузкам, чем пороги ЭЧ сетчатки. Учитывая относительную стабильность показателей ЭЛ и динамику порогов ЭЧ, проведение теста ЭЧиЛ может быть полезным методом для оценки индивидуальной выносливости членов экипажа, функционального состояния папилломакулярного пучка волокон ЗН у космонавтов на орбитальных космических станциях и выявления риска развития SANS в длительных межпланетных перелетах.

Ключевые слова: электрическая чувствительность сетчатки, фосфен, лабильность зрительного нерва, диагностика, дисфункция сетчатки и зрительного нерва, нейроокулярный синдром, связанный с космическим полетом, SIRIUS

Для цитирования: Нероев В.В., Зуева М.В., Котелин В.И., Манько О.М., Егорова И.В., Алекснеров А.М., Фадеев Д.В., Колесников Д.Ю. Динамика электрической чувствительности сетчатки и электрической лабильности зрительного нерва в 12-месячном международном эксперименте SIRIUS-23. *Офтальмология*. 2025;22(4):828-835. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2025-4-828-835>.

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.



Б.В. Нероев, М.В. Зуева, В.И. Котелин, О.М. Манько, И.В. Егорова, А.М. Алекснеров...

Контактная информация: Зуева Марина Владимировна visionlab@ya.ru

Динамика электрической чувствительности сетчатки и электрической лабильности...

Dynamics of Electrical Sensitivity of the Retina and Electrical Lability of the Optic Nerve in the 12-month International Experiment SIRIUS-23

V.V. Neroev¹, M.V. Zueva^{1,2}, V.I. Hotelin¹, O.M. Man'ko², I.V. Egorova¹, I.V. Aleskerov², D.V. Fadeev¹, D.Yu. Kolesnikov²

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. 2025;22(4):828-835

The aim of the 12-month international experiment SIRIUS 23/24 was to evaluate the effects of long-term isolation conditions and exposure to stress factors on electrical sensitivity (ES) of the retina and electrical lability (EL) of the optic nerve (ON) in the ES&EL test in participants. On board the artificial station, monthly testing of the retinal ES and EL of the ON was carried out. The results obtained in this 12-month experiment confirm the patterns of changes in the retinal ES and the ON EL established earlier in the 8-month SIRIUS-21 experiment. It was shown that with short-term or moderate physical and psycho-emotional stress, the retinal ES can increase. A decrease in the threshold of the ES may also indicate individual physical and mental endurance of the crew members. It has been confirmed that the EL of the ON is more resistant to physical and psycho-emotional stress than the thresholds of the ES of the retina. Considering the relative stability of EL indices and the dynamics of EC thresholds, the EC&L test may be a useful method for assessing the individual endurance of crew members, the functional state of the papillomacular bundle of fibers of the ON in astronauts on orbital space stations, and identifying the risk of developing SANS during long-term interplanetary flights.

Keywords: retinal electrical sensitivity, phosphene, optic nerve lability, diagnostics of retinal and optic nerve dysfunction, Space-flight Associated Neuro-ocular Syndrome (SANS), SIRIUS

For citation: Neroev V.V., Zueva M.V., Hotelin V.I., Man'ko O.M., Egorova I.V., Aleskerov A.M., Fadeev D.V., Kolesnikov D.Yu. Dynamics of Electrical Sensitivity of the Retina and Electrical Lability of the Optic Nerve in the 12-month International Experiment SIRIUS-23. *Ophthalmology in Russia*. 2025;22(4):828-835. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2025-4-828-835>

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

В предыдущем исследовании нами была изучена динамика показателей электрической чувствительности (ЭЧ) сетчатки и электрической лабильности (ЭЛ) зрительного нерва (ЗН) (тест ЭЧиЛ) в условиях международного эксперимента с 8-месячной изоляцией SIRIUS-21 [1]. Результаты разнообразных экспериментов с длительной изоляцией участников испытаний в искусственных гермообъектах, полярных станциях и т. п. дают уникальную возможность расширить понимание психологической и физической выносливости человека в экстремальных ситуациях, устойчивости функционирования в этих условиях зрительной и других сенсорных систем, и разработки надежных критериев их оценки [2-7]. Наше более раннее исследование [1] позволило сделать вывод о перспективности применения в подобных экспериментах простого в исполнении теста ЭЧиЛ, который позволяет контролировать устойчивость человека к воздействию стрессорных факторов среды и может быть полезным в оценке дисфункции ЗН и зрительных функций. Целью данной работы было проанализировать у участников международного эксперимента SIRIUS-23, имитирующего межпланетный

перелет, динамику ЭЧ сетчатки и ЭЛ ЗН на протяжении 12 месяцев изоляции в гермообъекте.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось в условиях мезопрототипного освещения с помощью прибора «ЭСОМ» (электростимулятор офтальмологический микропроцессорный) медицинского научно-производственного предприятия «Нейрон» (Уфа, Россия). Данный электростимулятор электробезопасен, не требует заземления. Для проведения измерений на указательном пальце левой руки закрепляли пассивный электрод, обернутый 4-слойной марлевой салфеткой, смоченной физиологическим раствором. Активный электрод, обернутый 4-слойной марлевой салфеткой, смоченной физиологическим раствором, помещали в правую руку испытателя и прислоняли к наружному краю орбиты.

Исследование каждого члена экипажа проводилось в течение 10–15 минут 1 раз в месяц. В день измерений тест ЭЧиЛ выполняли 2 раза с интервалом не менее 8 часов: утром и вечером. Исследования на борту гермообъекта по цикло-расписанию выполняли на 28, 58, 88, 118, 148, 178, 208, 238, 268, 298, 328, 358-е сутки (± 4 суток) изоляции. Тестирование осуществляли в условиях

V.V. Neroev, M.V. Zueva, V.I. Hotelin, O.M. Man'ko, I.V. Egorova, I.V. Aleskerov, D.V. Fadeev...

Contact information: Zueva Marina V. visionlab@ya.ru

Dynamics of Electrical Sensitivity of the Retina and Electrical Lability of the Optic Nerve...

мезопического освещения, в режиме непрерывных импульсов, длительность импульса 10 миллисекунд, частота следования импульсов 5 Гц, начальная сила тока 20 мкА.

При плавном изменении амплитуды тока возникает зрительное ощущение — фосфен. Фосфеном называют субъективное видение человеком света (вспышки, мелькания) без воздействия света на глаз. Порог ЭЧ сетчатки определяют как минимальное значение тока (в мкА), вызывающего появление фосфена. Для определения ЭЛ ЗН пороговую амплитуду тока увеличивали в полтора раза, после чего плавно повышали частоту электрических импульсов, вызывающих возрастание частоты мельканий фосфена. Момент субъективно-

го ощущения исчезновения мельканий фиксировался как ЭЛ ЗН (в Гц).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В таблицах 1–5 и на рисунках 1–2 приведены результаты статистической обработки показателей теста ЭЧИЛ по всей группе испытателей.

Наборы данных, полученных при ежемесячном тестировании в течение 12 месяцев изоляции, во всех таблицах и графиках обозначены, соответственно, цифрами от 1 до 12. Набор данных «0» (точка «0») содержит исходные фоновые значения до изоляции, и точка «13» — заключительные фоновые значения, полученные после выхода экипажа из изоляции.

Таблица 1. Порог электрической чувствительности сетчатки (утро), мкА

Table 1. Threshold of electrical sensitivity of the retina (morning), μ A

Набор данных Data set	0 исход	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Min	80	70	60	60	60	60	60	60	50	50	50	40	40	50
Q25	90	70	70	60	70	72,5	62,5	60	50	60	52,5	50	46,25	60
Ме	100	90	90	95	90	90	75	65	65	70	70	70	70	70
Q75	107,5	155	140	117,5	90	120	87,5	107,5	90	105	107,5	102,5	108,8	87,5
Max	110	220	160	230	150	200	110	190	190	115	120	150	160	90
Размах Distance	30	150	100	170	90	140	50	130	140	65	70	110	120	40
<i>M</i>	98,33	111,7	100	100,8	89,17	104,2	77,5	89,17	79,17	76,25	78,33	76,67	79,17	71,67
SD	9,374	48,96	35,16	49,81	24,66	42,52	16,03	42,52	40,1	23,85	25,52	33,93	37,89	14,03
SE	2,706	14,13	10,15	14,38	7,12	12,28	4,626	12,28	11,58	6,884	7,368	9,796	10,94	4,051
Среднее геометрическое Geometric mean	97,91	103,2	94,82	92,09	86,48	97,59	76,07	81,98	72,57	73,08	74,64	70,67	71,49	70,4
GSD	1,103	1,5	1,399	1,532	1,285	1,439	1,22	1,501	1,504	1,351	1,383	1,511		
<i>P</i> -значение, критерий Фридмана <i>P</i> -value, Friedman test		>0,9999	>0,9999	>0,9999	>0,9999	>0,9999	0,3887	0,8282	0,0323*	0,1262	0,4133	0,1262	0,1667	0,6257

Примечание здесь и далее: *M* — среднее; SD — стандартное отклонение; SE — стандартная ошибка среднего; Min — минимум; Max — максимум; Q25 — нижний quartиль; Me — медиана; Q75 — верхний quartиль; GSD — (geometric standard less deviation) геометрическое стандартное отклонение; * красный маркер — статистически значимо ($p < 0,05$) по сравнению с исходными фоновыми данными; # синий маркер — тенденция.

Note here and below: *M* — mean; SD — standard deviation; SE — standard error; Min — minimum; Max — maximum; Q25 — lower quartile; Me — median; Q75 — upper quartile; GSD — geometric standard less deviation; * red marker — statistically significant ($p < 0,05$) compared to the original background data; # blue marker — trend.

Таблица 2. Порог электрической чувствительности сетчатки (вечер), мкА

Table 2. Threshold of electrical sensitivity of the retina (evening), μ A

Набор данных Data set	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Min	80	80	70	60	60	60	60	60	60	50	50	50	40	40
Q25	90	90	70	70	60	70	72,5	62,5	60	50	60	52,5	50	46,25
Ме	100	100	90	90	95	90	90	75	65	65	70	70	70	70
Q75	107,5	107,5	155	140	117,5	90	120	87,5	107,5	90	105	107,5	102,5	108,8
Max	110	110	220	160	230	150	200	110	190	190	115	120	150	160
Размах Distance	30	30	150	100	170	90	140	50	130	140	65	70	110	120
<i>M</i>	98,33	98,33	111,7	100	100,8	89,17	104,2	77,5	89,17	79,17	76,25	78,33	76,67	79,17
SD	9,374	9,374	48,96	35,16	49,81	24,66	42,52	16,03	42,52	40,1	23,85	25,52	33,93	37,89
SE	2,706	2,706	14,13	10,15	14,38	7,12	12,28	4,626	12,28	11,58	6,884	7,368	9,796	10,94
Среднее геометрическое Geometric mean	97,91	97,91	103,2	94,82	92,09	86,48	97,59	76,07	81,98	72,57	73,08	74,64	70,67	71,49
GSD	1,103	1,103	1,5	1,399	1,532	1,285	1,439	1,22	1,501	1,504	1,351	1,383	1,511	
<i>P</i> -значение, критерий Фридмана <i>P</i> -value, Friedman test		>0,9999	>0,9999	>0,9999	>0,9999	>0,9999	>0,9999	>0,9999	>0,9999	0,5255	0,1667	0,1911	>0,9999	>0,9999

В.В. Нероев, М.В. Зуева, В.И. Котелин, О.М. Манько, И.В. Егорова, А.М. Алекскеров...

Таблица 3. Электрическая лабильность зрительного нерва (утро), Гц**Table 3.** Electrical lability of the optic nerve (morning), Hz

Набор данных Data set	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Min	29	24	24	25	26	25	26	27	27	25	27	27	27	33
Q25	30,25	27	26,25	26,5	26,25	27	27	27,25	28	27	28	28	28	33,25
Me	31	29,5	31	32	27,5	29	27,5	29	29	28,5	30,5	30,5	29	37
Q75	32	37,75	31	40	32	38	29,75	33,5	32,5	31,5	31	32,5	31	46
Max	34	51	46	45	41	50	37	41	49	35	34	42	48	48
<i>M</i>	31,25	33	31,33	33	29,5	32,42	28,67	31,08	31,92	29,17	30	31	31,83	39,67
SD	1,357	8,676	6,651	7,148	4,523	8,554	2,934	4,926	7,103	3,099	2,256	4,369	6,991	6,329
SE	0,3917	2,505	1,92	2,063	1,306	2,469	0,8469	1,422	2,05	0,8947	0,6513	1,261	2,018	1,827
Среднее геометрическое Geometric mean	31,22	32,07	30,77	32,33	29,22	31,53	28,54	30,76	31,32	29,02	29,92	30,75	31,26	39,21
GSD	1,044	1,275	1,214	1,233	1,151	1,269	1,099	1,16	1,214	1,109	1,078			
<i>P</i> -значение, критерий Фридмана <i>P</i> -value, Friedman test		>0,9999	>0,9999	>0,9999	0,2492	>0,9999	0,0444*	>0,9999	>0,9999	0,6257	>0,9999	>0,9999	>0,9999	>0,9999

Таблица 4. Электрическая лабильность зрительного нерва (вечер), Гц**Table 4.** Electrical lability of the optic nerve (evening), Hz

Набор данных Data set	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Min	29	26	26	25	25	27	26	27	27	27	27	20	26	33
Q25	30,25	28,25	26,25	26	26	29	27	27,5	28	29	27,25	27	27	33,25
Me	31	31	27	28,5	28,5	33	29	30	30	29	28,5	29,5	29	36
Q75	32	32,75	30	29	35,25	37	32,75	32,5	31	30,75	31	31,75	30,75	46
Max	34	45	47	43	46	47	40	38	33	33	34	41	43	48
<i>M</i>	31,25	32,42	30,5	29,33	30,75	33,58	30,5	30,75	29,83	29,58	29,42	29,58	29,75	37,67
SD	1,357	6,215	7,379	5,211	6,703	5,485	4,602	3,646	2,082	1,676	2,539	5,035	4,475	6,329
SE	0,3917	1,794	2,13	1,504	1,935	1,583	1,329	1,053	0,6009	0,484	0,733	1,454	1,292	1,827
Среднее геометрическое Geometric mean	31,22	31,94	29,84	28,97	30,16	33,21	30,21	30,56	29,77	29,54	29,32	29,19	29,49	37,21
GSD	1,044	1,19	1,231	1,172	1,22	1,167	1,154	1,121	1,072	1,057	1,087			
<i>P</i> -значение, критерий Фридмана <i>P</i> -value, Friedman test		>0,9999	0,4666	0,0619#	>0,9999	>0,9999	>0,9999	>0,9999	>0,9999	>0,9999	0,8282	0,9738	0,5573	0,4666

Таблица 5. Средние арифметические порога ЭЧ сетчатки в мкА и ЭЛ ЗН в Гц (утро + вечер)**Table 5.** Arithmetic means of the retinal electrical sensitivity threshold in μ A and optic nerve electrical lability in Hz (morning + evening)

Набор данных Data sets	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Порог ЭЧ сетчатки Retinal electrical sensitivity threshold	98,3	104,4	97,5	103,8	89,6	102,1	82,5	90,0	80,4	78,5	77,9	78,3	81,9	71,7
ЭЛ ЗН Optic nerve electrical lability	31,3	32,8	31,0	31,3	30,1	33,1	29,7	31,0	30,9	29,5	29,8	30,3	31,0	37,7

Нормальные значения ЭЧ сетчатки и лабильности зрительного нерва для молодых взрослых (от 17 до 50 лет), разработанные ранее для этого прибора, составляли: для порога ЭЧ 100–120 мкА (как верхняя граница нормы) и для лабильности 30 Гц (нижняя граница нормы). Гендерные различия и различия между показателями, полученными для правого и левого глаза, были незначительными, и статистическая обработка данных выполнялась в дальнейшем для обоих глаз. Анализ средних по группе значений показателей ЭЧиЛ в первые полгода пребывания в гермообъекте выявил различия между утренними и ве-

черними измерениями, которые отражают циркадианные изменения порогов ЭЧ сетчатки. Наибольшими эти различия были на 3, 4 и 5-м месяцах изоляции и практически исчезали во второй половине эксперимента, в период между 7-м и 12-м месяцами наблюдения.

При сравнении двух фоновых значений, полученных вне гермообъекта до начала изоляции (точка «0») и после завершения эксперимента (точка «13»), установлено снижение порогов ЭЧ (в среднем на 26,4 мкА), которое было менее значительным для утренних измерений ($\Delta = 19$ мкА), чем для вечерних ($\Delta = 30$ мкА). Однако

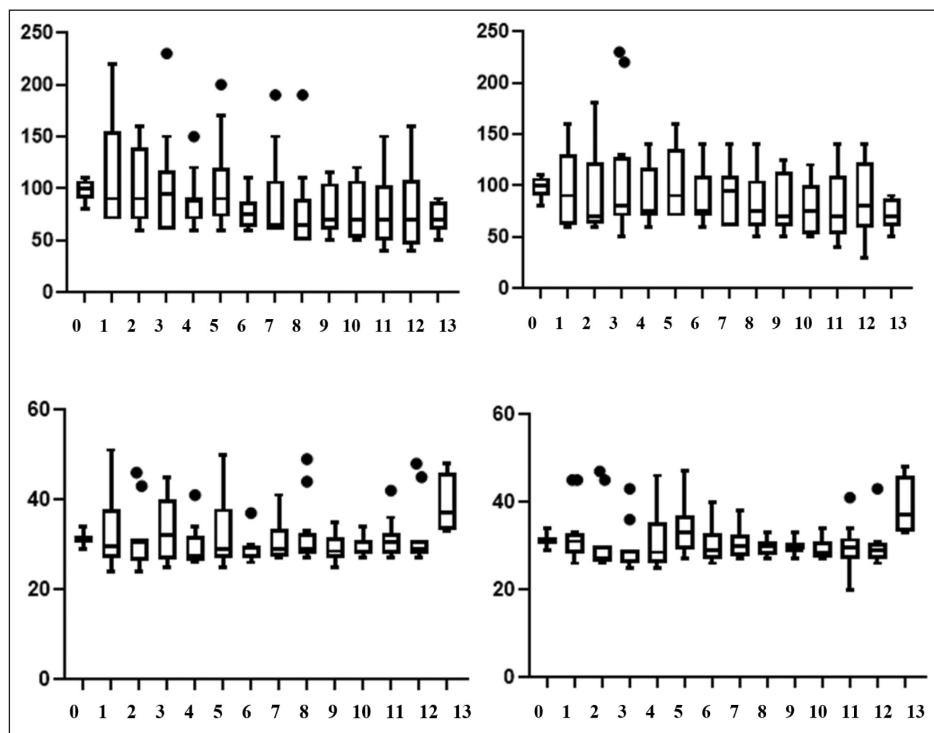


Рис. 1. Порог электрической чувствительности сетчатки в мкА (сверху) и электрическая лабильность зрительного нерва в Гц (снизу). Слева — утренние измерения, справа — вечерние измерения; цифры по оси ординат — наборы данных, полученных при ежемесячном тестировании в течении года изоляции («точки» исследований) с 1 по 12; 0 — исходные фоновые значения до изоляции; 13 — заключительные фоновые значения после выхода из изоляции

Fig. 1. Retinal electrical sensitivity threshold in μA (top) and optic nerve electrical lability in Hz (bottom). Left — morning measurements, right — evening measurements; numbers on the ordinate axis — data sets obtained during monthly testing during the year of isolation (research "points" from 1 to 12); 0 — initial background values before isolation; 13 — final background values after leaving isolation

разница порогов ЭЧ сетчатки до и после завершения изоляции в гермообъекте была статистически недостоверной из-за большого разброса индивидуальных данных. Снижение порогов говорит о возрастании ЭЧ сетчатки к концу эксперимента. Исследование динамики порогов ЭЧ показало, что для утренних измерений стабильное снижение порогов ЭЧ сетчатки происходило

порогов ЭЧ наибольшие изменения (особенно для утренних измерений) установлены у одного испытателя, чей индивидуальный график изменения ЭЧ сетчатки представлен на рисунке 2 (слева). Наименьшая вариабельность выявлена у троих членов экипажа из шести.

На рисунке 2 (справа) представлен пример индивидуального графика умеренных изменений порогов ЭЧ



Рис. 2. Индивидуальные графики изменения порога ЭЧ сетчатки в течение 12-месячной изоляции: слева — пример значительных колебаний ЭЧ сетчатки; справа — пример умеренных изменений ЭЧ сетчатки

Fig. 2. Individual graphs of changes in the retinal ES threshold during 12 months of isolation: left — an example of significant fluctuations in the retinal ES; right — an example of moderate changes in the retinal ES

на сроке 6 месяцев, а для вечерних измерений — через 7–8 месяцев эксперимента.

На это же указывают стабильные значения электрической лабильности зрительного нерва в течение всего периода изоляции в гермообъекте с 1-го по 12-й месяц измерений, независимо от испытаний, колеблясь вокруг значений 30–31 Гц. Таким образом, в данном 12-месячном эксперименте подтверждены закономерности изменения ЭЧИЛ, выявленные на предыдущем этапе SIRIUS-21. Лабильность зрительного нерва показала большую устойчивость к физическим и психоэмоциональным нагрузкам, чем пороги ЭЧ сетчатки.

В период адаптации экипажа к гермообъекту в начале эксперимента (1, 2 и 3-й месяцы изоляции) значительные колебания порогов ЭЧ сетчатки отмечены у 4-х испытателей. Два человека показали высокие колебания ЭЧ сетчатки на 5-м месяце эксперимента, и у двоих членов экипажа всплески порогов ЭЧ обнаружены на 7-м месяце изоляции.

По амплитуде колебаний

порогов ЭЧ наибольшие изменения (особенно для утренних измерений) установлены у одного испытателя, чей индивидуальный график изменения ЭЧ сетчатки представлен на рисунке 2 (слева). Наименьшая вариабельность выявлена у троих членов экипажа из шести.

На рисунке 2 (справа) представлен пример индивидуального графика умеренных изменений порогов ЭЧ

сетчатки у одного из этих членов экипажа, обладавших более высокой устойчивостью ЦНС к стрессовым ситуациям и меньшей динамикой чувствительности сетчатки к электрическому раздражению.

Для ЭЛ ЗН все изменения были выражены гораздо слабее, чем для порогов ЭЧ сетчатки. Однако мы отмечали наибольшие колебания ЭЛ ЗН у того же испытуемого, у которого были обнаружены наибольшие колебания порогов ЭЧ сетчатки.

ОБСУЖДЕНИЕ

При тестировании электрической чувствительности сетчатки и лабильности зрительного нерва порог возникновения фосфена определяет порог ЭЧ сетчатки. Момент субъективного ощущения исчезновения мельканий при увеличении частоты электрического раздражения определяет ЭЛ ЗН и прежде всего его папилломакулярного пучка, как это показали работы школы профессора А.И. Богословского [1, 8–10].

Гендерные различия были незначительными. Различия между показателями ЭФИ, полученными от правого и левого глаза, практически отсутствовали.

Как и в 8-месячном эксперименте, так же в первые полгода 12-месячного изоляционного эксперимента наблюдалась различия между утренними и вечерними измерениями ЭЧ, объясняемые циркадианными колебаниями ЭЧ, которые, как известно, имеют максимум ЭЧ сетчатки к 13 часу и минимум в ночное время [11]. Наибольшими эти различия были на 3, 4 и 5-м месяцах изоляции и практически полностью исчезали во второй половине эксперимента, в период между 7-м и 12-м месяцами наблюдения. В предыдущем эксперименте SIRIUS-21 циркадианные влияния нарушались в период с 5-го до 7-го месяца эксперимента, что мы расценивали как реакцию или на высокую психоэмоциональную или физическую нагрузку (эксперименты по депривации сна, физическая нагрузка и условная «высадка» на Луну), или как проявление индивидуальной адаптации членов экипажа к различным факторам длительной изоляции [1].

Сравнение фоновых значений, полученных до начала изоляции (исходные данные) и после его завершения, показало снижение порогов ЭЧ (в среднем на 26,4 мкА), причем уменьшение порогов возникновения ощущений фосфена было менее значительным для утренних, чем вечерних измерений. Несмотря на то что разница фоновых порогов ЭЧ была статистически недостоверной из-за большой вариабельности данных, уменьшение средних значений и медиан порогов указывало на возрастание чувствительности сетчатки к электрическому раздражению к концу эксперимента. При этом для утренних измерений стабильное понижение порогов ЭЧ (возрастание чувствительности) сетчатки в среднем по группе началось на сроке 6 месяцев, а для вечерних измерений — на 7–8-м месяце эксперимента.

Известно, что ЭЧ сетчатки может изменяться под действием различных гетерогенных раздражите-

лей. Слабые и/или сравнительно кратковременные раздражители повышают ЭЧ (понижают порог), раздражители средней силы заметного влияния не оказывают, а сильные и длительные снижают ее [11]. Утомление вследствие динамического труда, физического утомления и длительная мыслительная деятельность повышают пороги ЭЧ сетчатки, в то время как статическая работа не оказывает на нее значимого влияния. С другой стороны, обнаружено, что адреналин повышает ЭЧ. Это может обосновывать снижение порогов возникновения фосфена (повышения ЭЧ) в экстренных ситуациях, требующих высокой когнитивной и физической активности для выполнения сложной задачи или в условиях воздействия умеренных стрессорных раздражителей [11]. А.И. Богословским также была установлена возможность изменения ЭЧ по принципу условного рефлекса, что подтверждает роль коры головного мозга в центральной регуляции ЭЧ сетчатки.

Закономерности изменения показателей теста ЭЧиЛ, установленные в ранее проведенном 8-месячном изоляционном эксперименте SIRIUS-21, позволили нам предположить, что в экстремальных ситуациях, требующих быстрого принятия решения, креативного подхода к решению задач и физической нагрузки, временное повышение или понижение порогов ЭЧ сетчатки будет зависеть от важности задания, его длительности, степени ответственности и наличия стрессорных факторов в период тестирования [1]. Результаты, полученные в данном 12-месячном эксперименте SIRIUS-23, подтвердили эти закономерности, свидетельствуя в пользу того, что при кратковременной или умеренной по силе физической и психоэмоциональной нагрузке ЭЧ сетчатки как минимум не снижается, а может даже возрастать. С другой стороны, уменьшение порога ЭЧ сетчатки, то есть повышение ее чувствительности к электрическому раздражению, может говорить о высокой индивидуальной устойчивости участника испытаний к стрессу и характеризовать концентрацию его внимания и физических усилий для выполнения сложной задачи. В соответствии с этим изменения среднемесячных порогов ЭЧ сетчатки в данном эксперименте, по-видимому, характеризуют динамику врабатываемости членов экипажа в условия эксперимента и их физическую и психическую выносливость.

Действительно, индивидуальный анализ динамики порогов ЭЧ показал разную реакцию испытуемых к условиям эксперимента в различные периоды изоляции. Анализ цикло-расписания показал, что факторами, наиболее значительно влияющими на пороги ЭЧ испытуемых, могли являться внекорабельная деятельность (ВКД) и обеспечение ВКД и информационной связи «десант — Земля» на борту станции, эксперименты «Морфей», «CosmoAR», активные физические тесты-тренировки, задания по сборке-наладке 3D-принтера, а в первые месяцы адаптации к условиям изоляционного

эксперимента — условные «стыковки» с грузовым кораблем. По амплитуде изменений порогов ЭЧ наибольшие изменения электрической чувствительности сетчатки наблюдались у одного испытателя, а наибольшая устойчивость к вызовам эксперимента — у трех других членов экипажа.

При анализе динамики ЭЛ ЗН были зафиксированы аномально высокие значения лабильности, измеренные после выхода из изоляции, которые были на 7,5 Гц выше фоновых исходных значений. Возрастание ЭЛ ЗН само по себе должно рассматриваться как положительный признак. Однако для физически здоровых участников эксперимента, особенно учитывая значительную внутригрупповую вариабельность этого показателя, мы связываем это резкое возрастание скорее с инструментальной погрешностью, изменением условий тестирования на базе после условного «приземления». На это же указывает стабильность значений ЭЛ ЗН в течение всего периода изоляции в гермообъекте с 1-го по 12-й месяц измерений, которые, независимо от испытаний, слабо колебались около нормальных значений 30–31 Гц. Однако нами были отмечены некоторые индивидуальные особенности в динамике ЭЛ.

Таким образом, в 12-месячном эксперименте SIRIUS-23 подтверждены общие закономерности изменений ЭЧиЛ, выявленные на предыдущем этапе экспериментов SIRIUS. Лабильность ЗН показала большую устойчивость к физическим и психоэмоциональным нагрузкам, чем пороги ЭЧ сетчатки. Учитывая это, исследование ЭЛ ЗН в комплексном тесте ЭЧиЛ может быть полезным тестом на борту МКС для оценки функционального состояния папилломакулярного пучка волокон ЗН и определения риска развития нейроокулярного синдрома, связанного с космическим полетом (Spaceflight Associated Neuro-ocular Syndrome — SANS) у космонавтов при длительных миссиях.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Нероев В.В., Зуева М.В., Котелин В.И., Манько О.М., Егорова И.В., Цапенко И.В., Алексеров А.М., Подьянов Д.А. Изменения порогов электрически вызванного фосфена и электрической лабильности зрительного нерва у экипажа наземной станции в международном эксперименте SIRIUS 20/21. Офтальмология. 2023;20(2):266–275. doi: 10.18008/1816-5095-2023-2-266-275.
2. Neroev VV, Zueva MV, Kotelin VI, Man'ko OM, Egorova IV, Tsapenko IV, Aleskerov AM, Podyanov DA. Changes in Thresholds of Electrically Evoked Phosphenes and Electrical Lability of the Optic Nerve in the Ground Station Crew in the International Experiment SIRIUS 20/21. Ophthalmology in Russia. 2023;20(2):266–275 (In Russ.). doi: 10.18008/1816-5095-2023-2-266-275.
3. Mogilever NB, Zuccarelli L, Burles F, Iaria G, Strapazzon G, Bessone L, Coffey EBJ. Expedition Cognition: A review and prospective of subterranean neuroscience with spaceflight applications. Front Hum Neurosci. 2018;12:407. doi: 10.3389/fnhum.2018.00407.
4. Abeln V, MacDonald-Nethercott E, Piacentini MF, Meeusen R, Kleinert J, Strueder HK, Schneider S. Exercise in isolation—a countermeasure for electrocortical, mental and cognitive impairments. PLoS One. 2015;10(5):e0126356. doi: 10.1371/journal.pone.0126356.
5. Sandal G, Leon G, Palinkas L. Human challenges in polar and space environments. Rev Environ Sci Biotechnol. 2006;5:281–296. doi: 10.1007/s11157-006-9000-8.
6. Palinkas LA. The psychology of isolated and confined environments. Understanding human behavior in Antarctica. Am Psychol. 2003;58(5):353–363.
7. Palinkas LA, Suedfeld P. Psychological effects of polar expeditions. Lancet. 2008;371(9607):153–163. doi: 10.1016/S0140-6736(07)61056-3.
8. Robinson S. Isolation has profound effects on the human body and brain. Here's what happens. The Conversation. 3 Feb 2019, available at <https://theconversation.com/what-are-the-effects-of-total-isolation-an-expert-explains-109091>
9. Богословский АИ, Семеновская ЕН. Электрофизиологические исследования в офтальмологии. М.: Медгиз; 1963:279.
10. Богословский АИ, Семеновская ЕН. Electrophysiological research in ophthalmology. Moscow: Medgiz; 1963:279 (In Russ.).
11. Богословский АИ, Семеновская ЕН. Методические указания о применении комплексного метода исследований функций органа зрения электрическими и адекватными световыми стимулами в практике офтальмологических учреждений. М.: Наука; 1971:33.
12. Богословский АИ, Семеновская ЕН. Guidelines on the application of a comprehensive method for studying the functions of the organ of vision with electrical and adequate light stimuli in the practice of ophthalmological institutions. Moscow: Nauka; 1971:33 (In Russ.).
13. Богословский АИ, Ковалчук НА. Электрический фосфен в офтальмологии. В кн.: Офтальмологическая электродиагностика. М., 1980:62–69.
14. Богословский АИ, Ковалчук НА. Electric phosphene in ophthalmology. In: Ophthalmic electrodiagnostics. Moscow; 1980:62–69 (In Russ.).
15. Богословский АИ. Проблема электрической чувствительности глаза. Проблемы физиологической оптики (ПФО). 1944;2:136–172.
16. Богословский АИ. The problem of the electrical sensitivity of the eye. Problems of physiological optics. 1944; 2:136–172 (In Russ.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 12-месячном международном эксперименте SIRIUS-23 подтверждены закономерности изменений показателей ЭЧиЛ, установленные нами ранее в 8-месячном эксперименте SIRIUS-21, которые доказывают, что в экстремальных ситуациях, требующих быстрого принятия решения, нестандартных подходов к решению задач, перенесения значительных физических нагрузок, временное повышение или понижение порогов ЭЧ сетчатки будет зависеть от важности задания, его длительности, степени ответственности и наличия стрессорных факторов в teste-тируемый период эксперимента. При кратковременной или умеренной по силе физической и психоэмоциональной нагрузке ЭЧ сетчатки не снижается и может даже возрастать. Снижение порога ЭЧ сетчатки может также говорить о высокой индивидуальной устойчивости членов экипажа к стрессу, их физической и психической выносливости. Подтверждено, что электрическая лабильность зрительного нерва более устойчива к физическим и психоэмоциональным нагрузкам, чем пороги ЭЧ сетчатки. Учитывая относительную стабильность показателей ЭЛ ЗН и динамику порогов ЭЧ, можно ожидать, что проведение теста ЭЧиЛ окажется полезным методом для оценки индивидуальной выносливости членов экипажа, функционального состояния папилломакулярного пучка волокон ЗН у космонавтов на орбитальных космических станциях и выявления риска развития SANS в длительных межпланетных перелетах.

УЧАСТИЕ АВТОРОВ:

Нероев В.В. — концепция, координация исследований;
Зуева М.В. — концепция, анализ литературы и полученных данных, написание текста;
Котелин В.И. — сбор материала и анализ данных, написание текста;
Манько О.М. — организация эксперимента на борту и обсуждение данных;
Егорова И.В. — обучение методике членов экипажа, анализ данных;
Алексеров А.М. — статистический анализ данных, обсуждение материала;
Фадеев Д.В. — обработка результатов исследования
Колесников Д.Ю. — статистический анализ, иллюстрация результатов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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>

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

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

Егорова Ирина Викторовна
кандидат медицинских наук, заведующая отделением электрофизиологической и психофизической диагностики зрительной системы
<https://orcid.org/0000-0002-0636-1734>

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>

ABOUT THE AUTHORS

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

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>

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>

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

Egorova Irina V.
PhD, head of the Department of Electrophysiological and Psychophysical Diagnostics of the Visual System
<https://orcid.org/0000-0002-0636-1734>

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>