

Оценка изменения функционального состояния человека с помощью методики критической частоты слияния мельканий: особенности светового воздействия и видов нагрузки

© С.Г. Терехин¹, О.Л. Власова¹, А.Е. Черняков², Я.А. Забродская^{1,3}, А.В. Аладов²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

² НТЦ микроэлектроники РАН, Санкт-Петербург, Россия

³ Научно-исследовательский институт гриппа им. А.А. Смородинцева Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: Stasok32@yandex.ru

Поступило в Редакцию 4 мая 2025 г.

В окончательной редакции 11 июня 2025 г.

Принято к публикации 11 июня 2025 г.

Экспресс-методика измерения критической частоты слияния мельканий, используемая для оценки функционального состояния человека, имеет большое практическое значение в биофизике и прикладной физиологии. Для реализации этой методики применено устройство экспресс-диагностики функционального состояния человека. Тестирование проводилось на различных ступенях интенсивности светового воздействия для трех длин волн. Исследовалось сравнение реакций после различной интеллектуальной нагрузки для испытуемых: тестовых заданий и компьютерной игры-головоломки. Результаты исследований продемонстрировали повышение чувствительности методики при добавлении синего света, а также различный характер частотных кривых испытуемых в зависимости от использованного вида нагрузки.

Ключевые слова: функциональное состояние, критическая частота слияния мельканий, экспресс-диагностика, биофизика, психофизиология.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.18.61080.8016

Базовым биофизическим системным показателем оценки утомляемости нервной системы является критическая частота слияния мельканий (КЧСМ, CFFF) [1], отражающая скорость последовательного предъявления световых стимулов, при которой данное воздействие воспринимается устойчивым и непрерывным. На этот показатель могут влиять различные факторы, например индивидуальные особенности циркадных ритмов и соответственно время проведения экспериментальных измерений, а также возраст и пол человека, что необходимо учитывать при подготовке к соответствующим исследованиям. Изучение особенностей утомляемости неразрывно связано с понятием функционального состояния (ФС) человека. В условиях выполнения конкретной деятельности организм всегда реагирует как единое целое, регулируя активность центральной и вегетативной нервной системы [2,3]. В связи с этим КЧСМ широко используется для диагностики ФС человека. Оценка ФС [4] базируется на типе реакции нервной системы, который зависит от ее текущего состояния и определяется двумя параметрами: возбудимостью и лабильностью, соотношения которых показывают изменение реакции живой системы для состояний покоя, возбуждения или торможения. При этом возбудимость является мерой чувствительности нервной системы, лабильность является ее скоростной характеристикой [5]. Судить о возбудимости в целом возможно по пороговому ответу на силу раздражения и косвенно по сравнению реакции на световые импульсы с различными параметрами [6].

В настоящей работе мы сосредоточились на исследовании влияния различных видов интеллектуальной нагрузки (тестовой и игры-головоломки) на ФС, опираясь на изменения показателя КЧСМ в ответ на цветное импульсное воздействие ступенчато нарастающей интенсивности.

Измерение КЧСМ проводилось при монотонной интеллектуальной нагрузке в формате специально сформированного блока тестовых заданий на основе IQ-тестов и игровой в формате игры-головоломки в сравнении с контрольными значениями без нагрузок [7]. Время одного эксперимента составляло 1.5 h, время полного исследования для двух видов нагрузки — 3 h. Выполнение заданий происходило на персональном компьютере. В работе приняли участие 11 здоровых испытуемых (9 женского пола и 2 мужского). Возраст участников составлял от 18 до 26 лет. Для регистрации значений КЧСМ использовался прибор экспресс-диагностики функциональных состояний, включающий в себя планшет или мобильный телефон с программным обеспечением для управления тестированием и устройство тестирования ФС, которое регистрирует ответ испытуемого. Данное устройство обладает широкой функциональностью и позволяет реализовать ряд методик для оценки ФС, более подробно оно описано в работе [8]. Исследовалась реакция на предъявление светового воздействия в традиционных для КЧСМ двух спектральных областях: зеленой ($\lambda_{peak} = 520 \text{ nm}$) и красной ($\lambda_{peak} = 625 \text{ nm}$), относительная чувствительность которых составляет 0.65 и 0.3 соответственно согласно кривой светочувствительности

глаза (ГОСТ 8.332–2013). Для повышения достоверности и чувствительности методики в эксперимент также был добавлен синий свет ($\lambda_{peak} = 460 \text{ nm}$), имеющий существенно меньшую относительную чувствительность для глаз (0.1). Измерения спектров излучения проводились в установке OL770 LED Test and Measurement System (Optronic Lab, США) [9]. На рис. 1 представлена кривая светочувствительности человеческого глаза с указанием пиковых значений длин волн светового излучения источника, использованных в работе.

Измерение КЧСМ проводилось на четырех последовательных ступенях интенсивности световых импульсов (от минимального значения яркости до максимального) согласно методике [1]. Площадь светового пятна составила 10 пикселей, яркость — $400\text{--}800 \text{ cd/m}^2$ для каждой ступени соответственно согласно безопасному уровню яркости для глаз с соблюдением стандартов светобиологической безопасности для ламп и ламповых систем (ГОСТ Р МЭК 62471–2013). В качестве маркера снижения ФС принималась инверсия знака разности значений КЧСМ в парных сравнениях красный–зеленый ($\text{CFFF}_{red} - \text{CFFF}_{green} < 0$) и зеленый–синий ($\text{CFFF}_{green} - \text{CFFF}_{blue} < 0$) с учетом как абсолютных значений, так и тенденций, демонстрируемых характером кривых индивидуально для каждого испытуемого.

Результаты измерений показали наличие выраженной реакции всех испытуемых для значений экспериментов с использованием синего света, в то время как реакция на красный свет практически отсутствовала для 20 % испытуемых. Пример индивидуальных кривых КЧСМ для зеленого и синего цвета представлен на рис. 2.

Приведенный пример демонстрирует актуальность добавления синего цвета в протокол эксперимента и

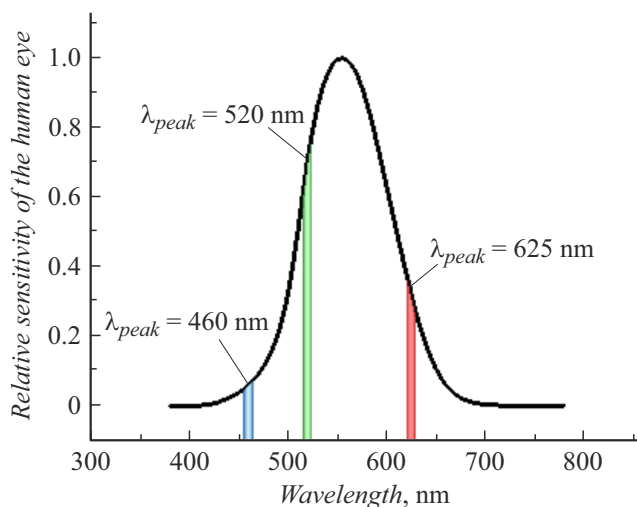


Рис. 1. Кривая светочувствительности человеческого глаза. Пиковые значения длин волн источника соответствуют различным цветам: синий — $\lambda_{peak} = 460 \text{ nm}$, зеленый — $\lambda_{peak} = 520 \text{ nm}$, красный — $\lambda_{peak} = 625 \text{ nm}$.

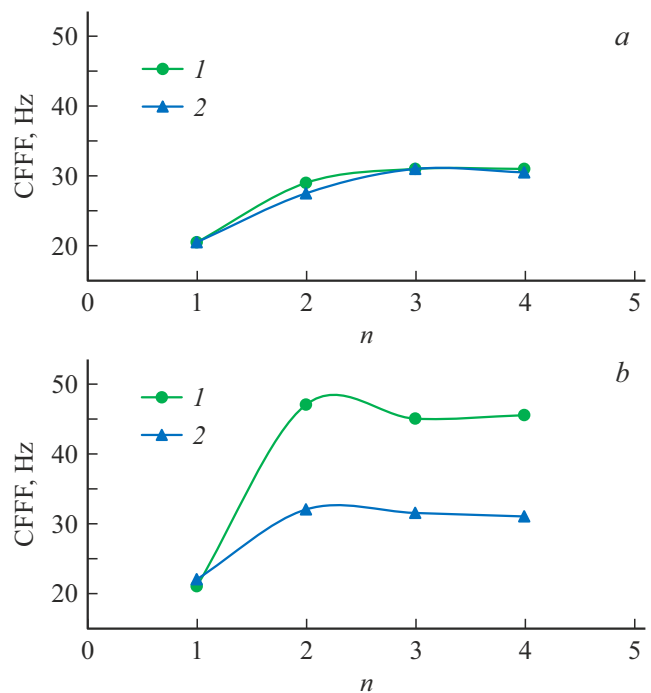


Рис. 2. Кривая изменения значений КЧСМ у испытуемого для зеленого (1) и синего (2) цвета для четырех ступеней интенсивности светового импульса (n). *a* — нагрузка в формате тестовых заданий, *b* — нагрузка в формате игры-головоломки.

отражает явное различие значений КЧСМ по типу интеллектуальной нагрузки.

Следует отметить, что частотные кривые всех испытуемых обладали высокой степенью индивидуальности, что создало необходимость поиска адекватного способа обработки данных. Для этого был введен безразмерный параметр R , определяемый отношением значений КЧСМ, измеренных после соответствующей нагрузки для красного, зеленого и синего света, к контрольным значениям на каждой ступени интенсивности ($R = \text{CFFF}_{workload} / \text{CFFF}_{control}$). Результаты обработки с использованием введенного коэффициента для 11 испытуемых представлены на рис. 3 ($p < 0.05$).

Для проверки статистической значимости при $p < 0.05$ различий результатов использовался однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с апостериорным критерием Тьюки для множественных сравнений.

По данным литературных источников снижение абсолютных значений КЧСМ свидетельствует об утомлении [1]. В соответствии с этим значения параметра R можно рассматривать как маркер изменения ФС, где $R < 1$ связан с наступлением утомления. Характер построенных кривых демонстрирует наличие наибольших различий реакции при малых значениях интенсивности световых сигналов (n). При этом коэффициент для синего света имел значения меньше единицы для тестовых нагрузок (рис. 3, *a*). Это свидетельствует о том, что данный вид нагрузки вызывает большее утомление.

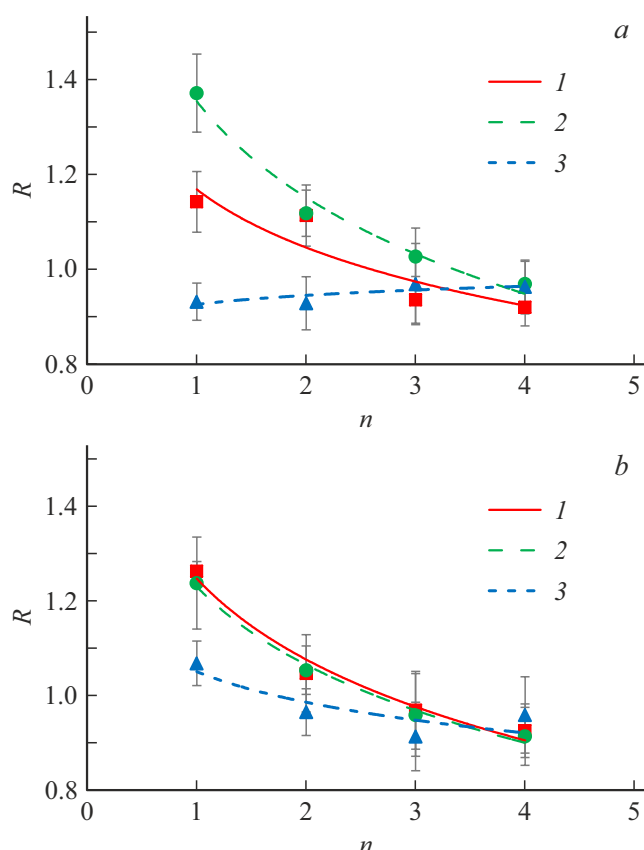


Рис. 3. Кривая изменения показателя R для красного (1), зеленого (2) и синего (3) цвета для четырех ступеней интенсивности светового импульса (n). *a* — нагрузка в формате тестовых заданий, *b* — нагрузка в формате игры-головоломки.

Дополнительно предварительный анализ позволил выделить подгруппы в соответствии с типом реакции на конкретный вид нагрузки (устомление от одного или обоих видов воздействия либо отсутствие реакции), однако малый размер выборки затрудняет возможность корректной интерпретации данного разделения.

Полученные результаты демонстрируют проявление большей степени утомления от монотонной нагрузки в сравнении с игровой, что коррелирует с данными аналогичных работ [10]. Добавление в эксперимент дополнительно световых импульсов синей области спектра позволило повысить чувствительность и информативность методики. Длины волн используемых световых импульсов следует выбирать, опираясь на их относительную чувствительность кривой видности глаза. КЧСМ является инструментом экспресс-диагностики ФС, учитывающим индивидуальные особенности зрительной системы в частности и центральной нервной системы человека в целом. Изменения значений этого показателя могут быть связаны как с простой утомляемостью, так и с возможным проявлением заболевания [11], что указывает на актуальность использования данной методики в исследовательских работах.

Благодарности

Исследования спектральных параметров выполнены в ЦКП „Элементная база радиопотоники и наноэлектроники: технология, диагностика, метрология“.

Соблюдение этических стандартов

Работа была одобрена на заседании этического комитета ИЭФБ РАН в области исследований с привлечением людей комитетом по биоэтике 01-10 (11 октября 2024 г.) и соответствует всем нормативным требованиям к исследованиям с привлечением людей, утвержденным приказом директора ИЭФБ РАН № 9 (30 января 2024 г.). От каждого из включенных в исследование участников было получено информированное добровольное согласие на участие в исследовании.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Л.П. Павлова, А.Д. Ноздрачев, Вестн. СПбГУ. Сер. 3, № 2, 91 (2005).
- [2] Л.П. Павлова, *Доминанты деятельного мозга человека* (Информ-Навигатор, СПб., 2017), с. 26.
- [3] И.Б. Ушаков, А.В. Богомолов, Ю.А. Кукушкин, Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова, **100** (10), 1130 (2014).
- [4] А.А. Ухтомский, *Учение о доминанте* (Юрайт, М., 2017), с. 149.
- [5] М.И. Виноградов, *Физиология трудовых процессов* (Медицина, М., 1966), с. 208.
- [6] А.Д. Ноздрачев, Т.И. Баранова, Р.И. Коваленко, Л.П. Павлова, И.Н. Январева, в сб. *Фундаментальная наука и клиническая медицина* (СПб., 2007), с. 81–82. [https://pureportal.spbu.ru/publications/-----032a8b15-737b-4415-9fc5-3d207150bf86\).html](https://pureportal.spbu.ru/publications/-----032a8b15-737b-4415-9fc5-3d207150bf86).html)
- [7] С.Г. Терехин, Л.Т. Наурзбаева, А.Е. Черняков, А.В. Аладов, Письма в ЖТФ, **50** (23), 62 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.23.59403.6521k [S.G. Terekhin, L.T. Naurzbaeva, A.E. Chernyakov, A.V. Aladov, Tech. Phys. Lett., **50** (12), 56 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2025.18.61080.8016].
- [8] A.V. Aladov, D.N. Berlov, A.E. Chernyakov, Y.A. Chilagina, A.L. Zakgeim, in *2021 Joint Conf. — 11th Int. Conf. on energy efficiency in domestic appliances and lighting and 17th Int. Symp. on the science and technology of lighting* (IEEE, 2022), p. 1–4.
- [9] А.Л. Закгейм, А.Е. Черняков, Светотехника, № 4, 51 (2013).
- [10] C.K. Endukuru, K.N. Maruthy, T.S. Deepthi, Int. J. Physiol., **2** (5), 499 (2015). DOI: 10.5958/2320-608X.2016.00029.9
- [11] A. Abiyev, F.D. Yakarylmaz, Z.A. Öztürk, Dement. Neuropsychol., **16** (1), 89 (2022). DOI: 10.1590/1980-5764-DN-2021-0054