

УДК 621.391.6 : 612.172.4

ФИЗИОЛОГИЯ

Д. С. Мелконян, С. Г. Адамян, Т. Г. Арешян,
 Х. А. Роолайд, А. М. Шамшинова

Частотные характеристики осцилляторного потенциала в электроретинограмме человека

(Представлено чл.-корр. АН Армянской ССР В. В. Фанарджяном 15/IV 1981)

Осцилляторный потенциал (ОП) в электроретинограмме (ЭРГ) человека, возникающий при засвете сетчатки интенсивным импульсом света (¹), обусловлен согласно современным взглядам существенно иными механизмами генерации, чем волны *a* и *b* ЭРГ (^{2,3}). Полагают, что в происхождении ОП существенную роль играет синхронная активация клеточных ансамблей внутренних ядерного и плексиформного слоев сетчатки, для возникновения осцилляций в которых важное значение имеют синаптические механизмы и осуществляемые ими обратные связи (вероятно, посредством цепей латерального торможения (^{4,5})).

Поскольку ОП является сложным колебательным процессом, задачам его адекватного количественного исследования хорошо соответствует метод частотного анализа по Фурье ЭРГ, вызванных вспышкой света (⁶). Такой путь обработки ЭРГ с осцилляторными компонентами применялся в работах (^{2,4,7}), однако невысокое разрешение по частоте использованных алгоритмов быстрого преобразования Фурье дало грубые оценки поведения частотных спектров в области доминантных частот ОП.

В настоящей работе на основе более совершенных методов машинной обработки ЭРГ (цифровой спектральный анализ с высоким разрешением по частоте и расчетом текущих спектров, цифровая фильтрация частотных характеристик, расчет обратных преобразований Фурье) ставятся задачи детального исследования частотных характеристик ЭРГ и ОП в целях выяснения возможностей выделения ОП в «чистом виде» и уточнения свойств и характеристик их генераторов.

Регистрацию ЭРГ производили на здоровых взрослых испытуемых с остротой зрения 1,0 (рефракция эмметропическая) по ранее описанной методике с использованием кожных электродов (⁸). Свето-

вой стимул, создаваемый импульсной лампой ИФК—120, подводили к исследуемому глазу посредством световода. Дискретизацию ЭРГ производили с шагом 150 мксек. Усредняли 20 ЭРГ при интервале между вспышками 2,5 сек.

Цифровой спектральный анализ ЭРГ осуществляли с помощью машинного метода расчета преобразований Фурье, основанного на аппроксимации анализируемой функции кусочно-линейной кривой (метод КЛПФ) (8,9). Для сокращения избыточности исходных данных и достижения высокого разрешения по частоте использовали вариант КЛПФ (9), при котором отсчеты берутся с неравномерным шагом дискретизации, выбираемым в зависимости от особенностей изменения обрабатываемой кривой. Расчет частотных спектров производили по сегментам разной длины от начала ЭРГ, что давало возможность получения картин текущих спектров.

Для выделения компонентов ЭРГ, соответствующих разным частотным диапазонам, использовали оригинальный цифровой метод фильтрации, сущность которого заключается в следующем.

Пусть $U(j\omega) = R(\omega) + jI(\omega)$ — комплексный спектр ЭРГ, описываемой функцией времени $u(t)$. Пусть ЭРГ состоит из некоторого числа $N+1$ компонентов, соответствующих различным частотным диапазонам. Представим соответствующие компоненты мнимой частотной характеристики $I(\omega)$ в виде

$$I(\omega) = \sum_{j=0}^N I_j(\omega), \quad (1)$$

где $I_j(\omega)$ — мнимая частотная характеристика j -го компонента. Разработанный способ выделения частотных компонентов состоит во введении „компонентной функции“ $\xi(\omega)$, определяемой следующим образом:

$$\xi(\omega) = \mu(\omega) + \sum_{j=1}^{N-1} \xi_j(\omega) + \nu(\omega), \quad (2)$$

где

$$\mu(\omega) = \alpha(\omega; \omega_0; n_0), \quad \nu(\omega) = \beta(\omega; \omega_{N-1}; n_{N-1}),$$

$$\xi_j(\omega) = \beta(\omega; \omega_{j-1}; n_{j-1}) + \alpha(\omega; \omega_j; n_j),$$

$$\beta(\omega; \omega_j; n_j) = 1 - \alpha(\omega; \omega_j; n_j),$$

$$\alpha(\omega; \omega_j; n_j) = \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_j} \right)^{2n_j} \right]^{-\frac{1}{2}} \text{ — функция Баттерворта (9), } \omega_j > \omega_{j-1} \quad (j = 1, \dots, N).$$

Поскольку $\xi(\omega) = 1$, можно записать:

$$I(\omega) = I(\omega) \cdot \xi(\omega) = I_0(\omega) + \sum_{j=1}^{N-1} I_j(\omega) + I_N(\omega), \quad (3)$$

где

$$I_0(\omega) = I(\omega) \cdot \mu(\omega), \quad I_N(\omega) = I(\omega) \cdot \nu(\omega),$$

$$I_j(\omega) = I(\omega) \cdot \xi_j(\omega) \quad (j = 1, \dots, N-1).$$

Функция $\mu(\omega)$ соответствует фильтру Баттерворта верхних частот (¹⁰), $\nu(\omega)$ — фильтру нижних частот, $\xi_j(\omega)$ — полосовому фильтру. Таким образом, при соответствующем выборе параметров фильтров выражение (3) дает разложение частотной характеристики на компоненты, принадлежащие различным частотным диапазонам. Соответствующие временные компоненты определяются обратным синус-преобразованием Фурье

$$u_j(t) = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} I_j(\omega) \cdot \sin \omega t d\omega. \quad (4)$$

При этом $\sum_{j=0}^N u_j(t) = u(t).$

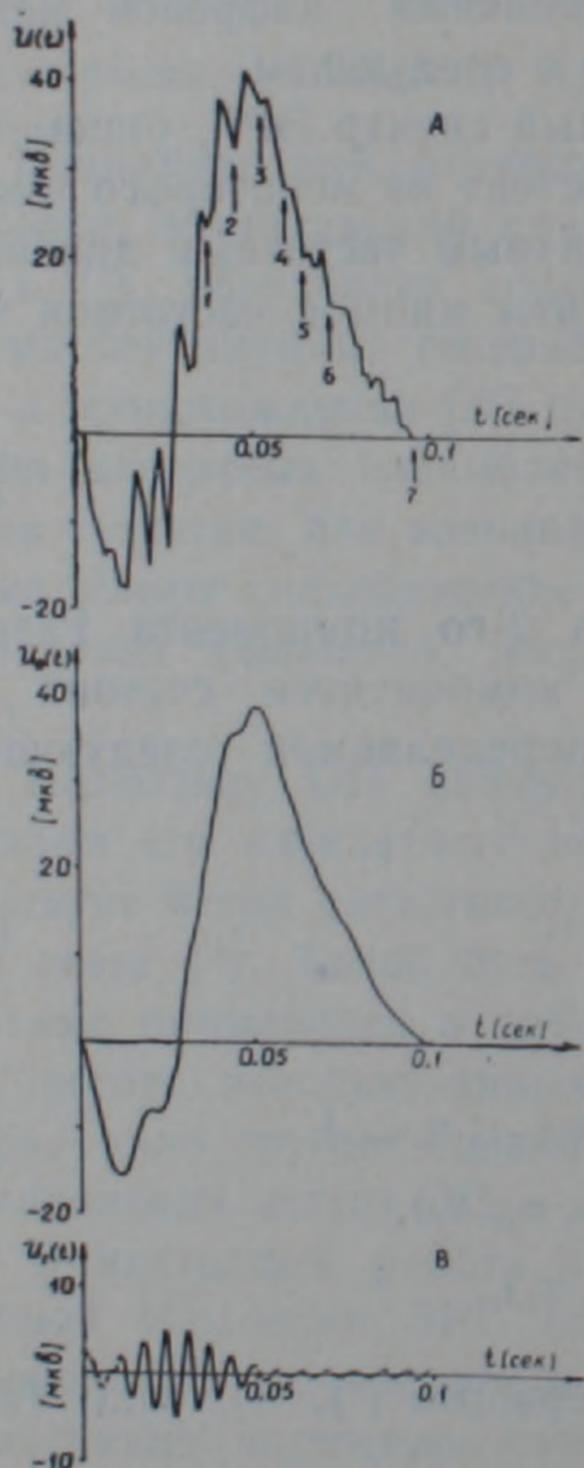


Рис. 1. Разделение ЭРГ на компоненты: А—ЭРГ здорового глаза человека, адаптированного к темноте в течение 7 мин, в ответ на вспышку света (энергия вспышки 40,5 дж, красный фильтр); Б—ЭРГ, из спектра которой фильтром $\mu(\omega)$ вырезаны высокие частоты; В—осцилляторный потенциал, выделенный из исходной ЭРГ фильтром $\xi_1(\omega)$

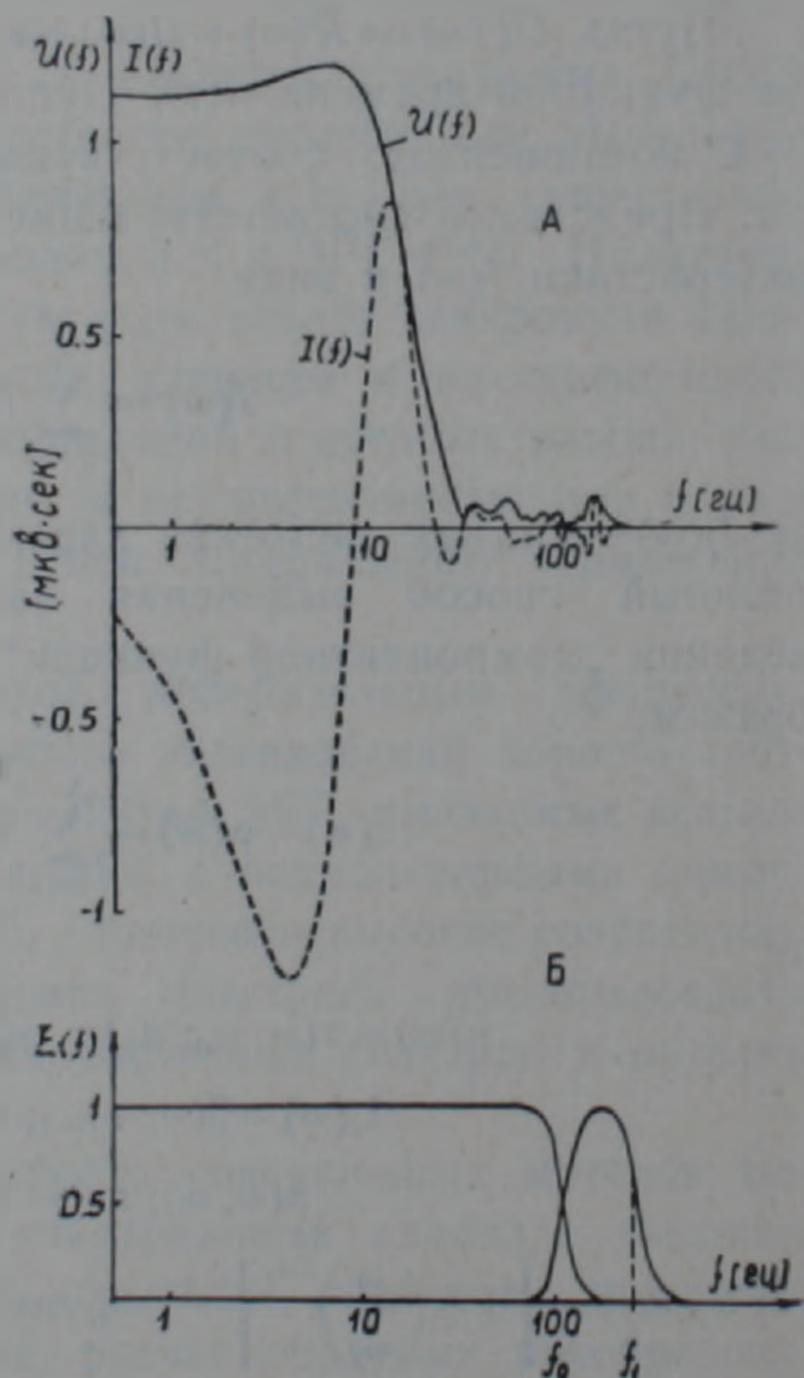


Рис. 2. Цифровая фильтрация частотных характеристик: А—амплитудная и мнимая частотные характеристики ЭРГ; Б—частотные фильтры, с помощью которых производится разделение частотных и временных характеристик ЭРГ на два компонента

Расчет временных компонентов согласно выражению (4) осуществляется с помощью машинного алгоритма, в котором исходными данными являются равноотстоящие отсчеты функции $I(\omega)$ в логарифмической шкале частот (11), или с помощью соответствующего варианта метода КЛПФ (9).

Основные особенности частотных характеристик проиллюстрируем на примере обработки характерной ЭРГ, показанной на рис. 1, А (запись на графопостроителе NE—230). Осцилляторный потенциал возникает на 10-й мсек после подачи стимула и характеризуется 7 хорошо выраженными волнами.

Аппроксимирующая кусочно-линейная кривая, которая является исходным материалом для спектрального анализа, в масштабе рисунка практически совпадает с экспериментальной кривой.

Стрелками 1—7 обозначены моменты времени, до которых рассчитывались текущие спектры. Данные для более поздних участков ЭРГ не приводятся, поскольку они могут быть искажены артефактами, связанными с миоклоническими рефлексамии. Результаты цифрового спектрального анализа ЭРГ на отрезке от $t=0$ до момента, отмеченного стрелкой 7, представлены на рис. 2, А в виде амплитудной $U(\omega)$ и мнимой $I(\omega)$ частотных характеристик. На этих характеристиках ОП проявляется в виде экстремумов на частотах порядка 150 гц.

Более детально состав частотного спектра ЭРГ характеризуется с помощью данных расчета текущих спектров, представленных на рис. 3. Здесь для диапазона частот от 125 до 200 гц представлены текущие спектры, вычисленные до моментов времени, отмеченных на исходной ЭРГ (рис. 1, А) стрелками 1—7.

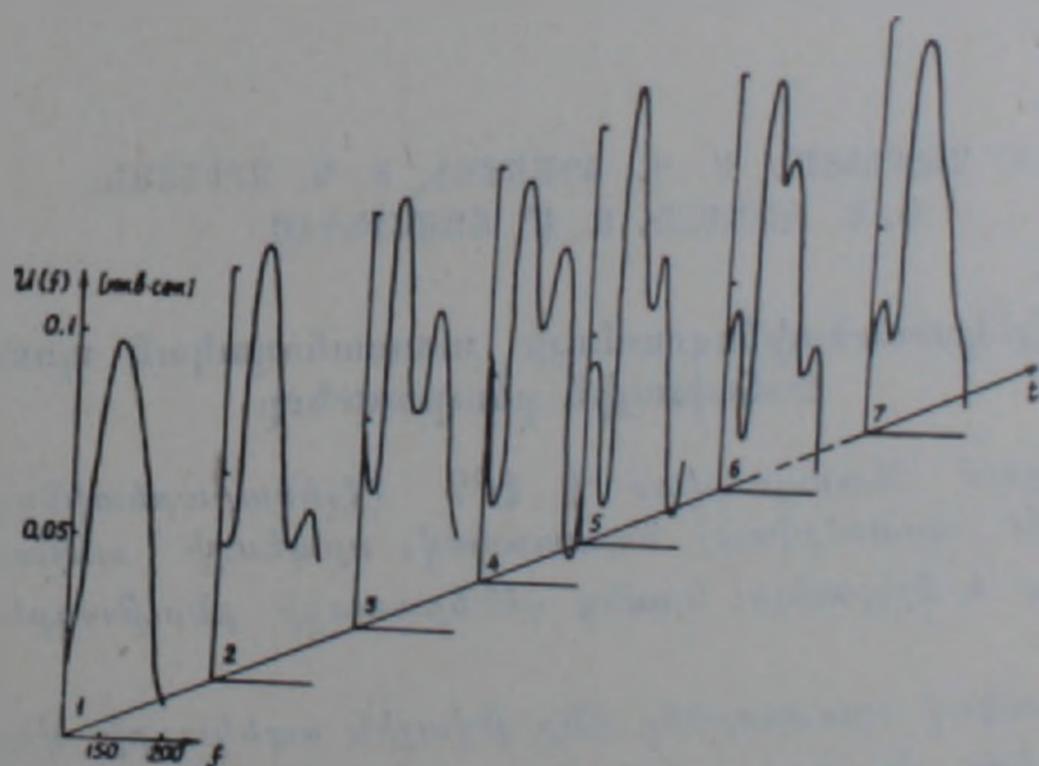


Рис. 3. Текущие спектры ЭРГ

Как видно из картины изменения текущих спектров ОП, цифровой спектральный анализ выявляет на отрезке времени до 70 мсек наличие в составе ОП двух источников разных частот (144 и 174 гц). При более длительных интервалах анализа этот эффект маскируется составляющими, связанными с шумовыми компонентами ЭРГ, видными на ниспадающей части волны v (рис. 1, А).

Как следует из представленных данных, основные частотные компоненты ОП лежат в области высоких частот, выходящих за пределы частотного диапазона (примерно до 100 гц), в котором содержатся соответствующие компоненты волн *a* и *b*. Это позволяет с помощью соответствующей компонентной функции отделить низкочастотную компоненту ЭРГ от ОП. На рис. 2, Б показаны фильтры $\mu(\omega)$ и $\xi_1(\omega)$ (кривая $\nu(\omega)$ для простоты не начерчена), соответствующие следующим параметрам: $n_0 = n_1 = 8$, $f_0 = 100$ гц, $f_1 = 251$ гц. Получаемые при использовании такой компонентной функции составляющие мнимой частотной характеристики $I_\mu(\omega)$ и $I_1(\omega)$ соответствуют во временной области осцилляторному потенциалу (рис. 1, В) и обычной ЭРГ (без ОП) с характерной двухфазностью волн *a* и *b* (рис. 1, Б).

Выделенная кривая ОП имеет форму, характерную для «биения», т. е. сложения двух колебаний близких частот. Наличие в частотном спектре ОП двух ведущих частотных компонентов обнаружилось при анализе всех исследованных ЭРГ, в частности полученных при различных хроматическом составе стимула и условиях адаптации.

Хотя этот эффект на основе полученных данных не может быть непосредственно связан с какими-либо конкретными клеточными процессами в сетчатке, очевидно, что ОП формируется как сумма колебаний двух близких частот и таким образом представляет более сложную характеристику нейронных взаимодействий в сетчатке, чем это представлялось ранее.

Институт физиологии им. Л. А. Орбели
Академии наук Армянской ССР
Московский НИИ глазных болезней им. Гельмгольца

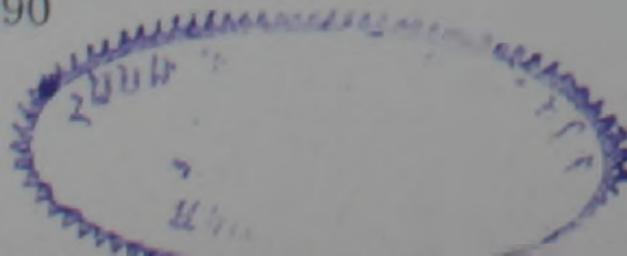
Գ. Ս. ՄԵԼՔՈՆՅԱՆ, Ս. Գ. ԱԴԱՄՅԱՆ, Տ. Գ. ԱՐԵՇՅԱՆ,
Խ. Ա. ՌՈՍԼԱՅԴ, Ա. Մ. ՇԱՄՇԻՆՈՎԱ

Մարդու էլեկտրարետինոգրամայի տատանողական պոտենցիալի հաճախային բնութագրերը

Աշխատանքում հետազոտված է էՐԳ (էլեկտրարետինոգրամա) և SՊ (տատանողական պոտենցիալ) նպատակով, որպեսզի անջատվի SՊ «Մարդու վիճակում» և ճշգրտելու նրանց գեներատորի բնութագրերը և հատկությունները:

Այդ նպատակով օգտագործել ենք թվային սպեկտրի վերլուծիչ, ընթացող սպեկտրների հաշվարկ, հաճախային բնութագրերի թվային գտիչ, Ֆուրյեի հետադարձ ձևափոխությունների հաշվարկ:

Ցույց է տրված, որ SՊ-ի հիմնական հաճախային բաղադրիչը գտնվում է ավելի բարձր հաճախություններում (100 հց բարձր): Ենթադրվում է, որ SՊ ձևավորվում է որպես գումար երկու մոտ հաճախակությունների և այդպիսով հանդիսանում է ցանցաթաղաթի նեյրոնների փոխազդեցության բարդ բնութագիր, քան առաջ պատկերացնում էին:



- ¹ W. A. Cobb, H. B. Morton, *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, vol. 4, 547—556 (1952). ² P. Alguere, S. Westbeck, *Vision Res.*, vol. 12, 195—214 (1972). ³ А. И. Богословский, В. К. Жданов, Г. Б. Милдажене, в сб.: Механизмы работы рецепторных элементов органов чувств. Наука, Л., 1973. ⁴ W. Kozak, in: *Intern. Symp. on vision processes in vertebrates. Vision Res. Suppl.*, No. 3, Pergamon Press 1971. ⁵ L. Wachtmeister, J. E. Dowling, in: *Proc. 16th ISCERG Symp. Morioka. Junk, The Hague 1979.* ⁶ D. S. Melkonian, in: *Advances in Electrophysiology and Pathology of the Visual System. 6th ISCERG Symp., VEB Thleme, Leipzig, 1968.* ⁷ M. Gur, Y. Zeevi, *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 70, 53—59 (1980). ⁸ С. Г. Адамян, Л. Г. Барсегян, Д. С. Мелконян и др., *Журн. экспериментальной и клинической медицины*, т. 20, 628—631 (1980). ⁹ А. А. Газарян, Д. С. Мелконян, *Автометрия*, № 6, 1979. ¹⁰ Э. А. Гиллемин, *Синтез пассивных цепей. Связь*, М., 1970. ¹¹ Д. С. Мелконян, В. И. Сааков, *Изв. АН Арм ССР, сер. техн. наук*, т. 24, 24—32 (1971).