

МЕТОДИКА

УДК 612.014.422

© 2000 г. ТЕРЕЩЕНКО Л.В., КУЗНЕЦОВ Ю.Б., ЛАТАНОВ А.В.,
ШУЛЬГОВСКИЙ В.В.МЕТОДИКА ХРОНИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ РЕГИСТРАЦИИ
ДВИЖЕНИЙ ГЛАЗ И ГОЛОВЫ У ОБЕЗЬЯН

В работе описан электромагнитный метод регистрации движений глаз и головы обезьян по двум координатам, основанный на анализе электродвижущей силы (ЭДС) наведенной магнитным полем в проволочном витке (search coil). Получены калибровочные характеристики оригинальной регистрирующей системы с использованием как эталонного, так и вживленного в глаз обезьян витка. Произведена оценка точности регистрации движений глаз у обезьян в условиях эксперимента. Величина стандартного отклонения собственных шумов системы по обеим координатам составляет 0,16 град. Стандартное отклонение при установке взора обезьянами в диапазоне $-20/+20$ град. по горизонтали составляет 0,27–0,38 град., а в диапазоне $-13/+13$ град. по вертикали – 0,23–0,31 град. Такие показатели точности соизмеримы с угловой величиной периферических стимулов (0,20 град.), по направлению к которым животные совершали движения глаз.

В настоящее время среди методик регистрации движений глаз наиболее точным является электромагнитный (ЭМ) метод (search coil) [1, 6, 10]. В отличие от методов электроокулографии [11] и инфракрасной окулометрии [2] при использовании ЭМ-метода регистрирующий виток непосредственно связан с глазным яблоком и изменение его положения соответствует реальным смещениям взора.

В настоящей статье описана методика хронической регистрации горизонтальных и вертикальных движений глаз у обезьян (*Macaque rhesus*) с вживленным в глазное яблоко проволочным витком.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ОБОРУДОВАНИЕ

Используемый в работе ЭМ-метод основан на принципе синхронной демодуляции [8]. Специально разработанная и изготовленная оригинальная система входит в состав автоматизированного комплекса на базе совместимого с IBM PC AT компьютера и позволяет регистрировать угловое положение двух витков по двум координатам с частотой аналого-цифрового преобразования 500 Гц.

Имплантирование в глаз витка проводилось по методике, описанной в работе [6], с незначительной модификацией, которая заключалась в пропускании проволочных "хвостов" витка через специально проделанное в задней стенке глазницы отверстие. В этом случае проволока витка проходит в глубине тканей головы и не имеет сильных перегибов, что обеспечивает большой срок его использования.

Глазной виток диаметром 18–20 мм (в зависимости от размера глазного яблока обезьяны) изготавливали из многожильной стальной проволоки в тефлоновой изоляции фирмы "Кларк Электрикал Инструментс" (США) диаметром 0,3 мм с удельным сопротивлением 1 Ом/см. При необходимости регистрации движения головы виток такого же диаметра укрепляли на пластмассовой платформе, фиксированной на кальпированной поверхности черепа обезьяны.

Имплантиацию витка в глазное яблоко животных проводили под общим нембуталовым наркозом (35–40 мг/кг внутримышечно). Эксперименты начинали через 7–10 дней после операции.

КАЛИБРОВКА СИСТЕМЫ

Предварительную калибровку каналов экспериментального комплекса производили путем подключения к системе эталонного витка, изготавливаемого аналогично регистрирующему. На рис. 1 представлены калибровочные характеристики системы для эталонного витка в диапазоне $-80/+80$ град. по горизонтали. Выходные характеристики системы в диапазоне поворота витка $-40/+40$ град. как по горизонтали, так и по вертикали близки к синусоидальной зависимости. Как видно из рис. 1, при отклонениях эталонного витка более чем на 40 град. калибровочные характеристики "насыщаются". Рабочий диапазон для ЭДС, наведенной магнитным полем в витке, определяется общим коэффициентом усиления системы и входным диапазоном аналогоцифрового преобразователя. Уровень собственных шумов системы не превышает 10 угл. мин.

Для калибровки имплантированного витка обезьян обучали совершать зрительно-вызванные саккады, обеспечивающие перевод взора от центрального фиксационного (ЦФС) к периферическому стимулу (ПС). В результате обучения обезьяны выполняли саккады, амплитуда и направление которых задавались в эксперименте путем изменения положения ПС по отношению к ЦФС.

Для регистрации параметров, необходимых для калибровки и оценки точности измерения углового положения глаза, использовалась следующая схема эксперимента. ПС представлялись в определенных фиксированных положениях с шагом 4 град. по горизонтали от ЦФС (рис. 2, а). Обезьяны вначале фиксировали взор на ЦФС, затем совершали саккаду к ПС. Траектории горизонтальных движений глаз, совершаемых к различным ПС, незначительно варьировали по амплитуде и группировались для последующей статистической обработки (рис. 2, б). Распределение амплитуд саккад для всех положений ПС приведено на рис. 2, в.

По результатам экспериментов усредняли горизонтальную составляющую выходного сигнала системы для трех витков (рис. 3), вживленных в глазное яблоко обезьян, и эталонного витка. Линии 1–3 показывают, что приведенные зависимости выходного сигнала системы от эксцентриситета ПС для имплантированных витков близки линейному участку синусоидальной функции в исследуемом диапазоне. Линия 4 отражает аналогичную зависимость ЭДС, наведенной магнитным полем в эталонном витке, от угла его поворота. В диапазоне $-10/+10$ град. все полученные зависимости близки к линейной. Разный наклон линий объясняется незначительной вариацией диаметров глазных витков.

Аналогично в интервале $-13/+13$ град. (соответственно снизу и сверху от ЦФС) с шагом 4,3 град. определяли зависимость вертикальной составляющей выходного сигнала системы от положения ПС.

По данным калибровки для установления соответствия между угловым положением глазного яблока и выходного сигнала рассчитывали коэффициенты, по которым определяли реальные угловые координаты глаза в дальнейших экспериментах.

На рис. 4 приведены ошибки фиксации взора по сравнению с собственными шумами системы. Линия 1 соответствует уровню собственных шумов системы, определяемым по данным калибровки эталонного витка. Линия 2 отражает зависимость ве-

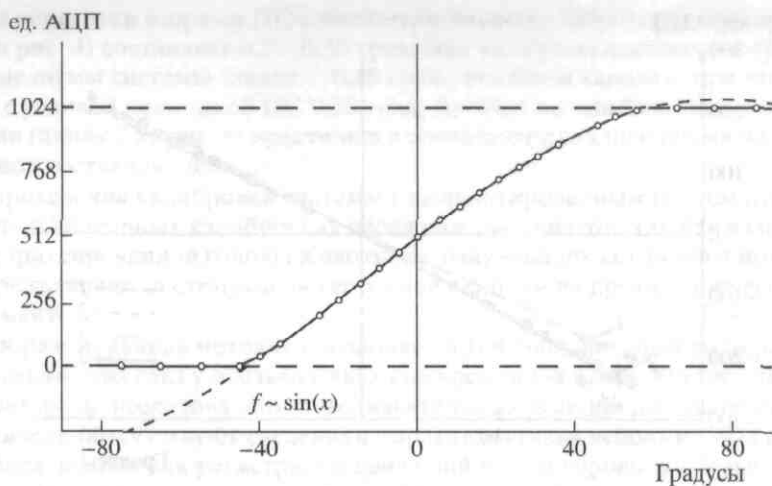


Рис. 1. Зависимость выходного сигнала комплекса от угла поворота эталонного витка в горизонтальной плоскости. Выходной сигнал входит в насыщение при больших углах поворота витка (более 40 град.). Пунктиром обозначена идеальная синусоидальная характеристика.

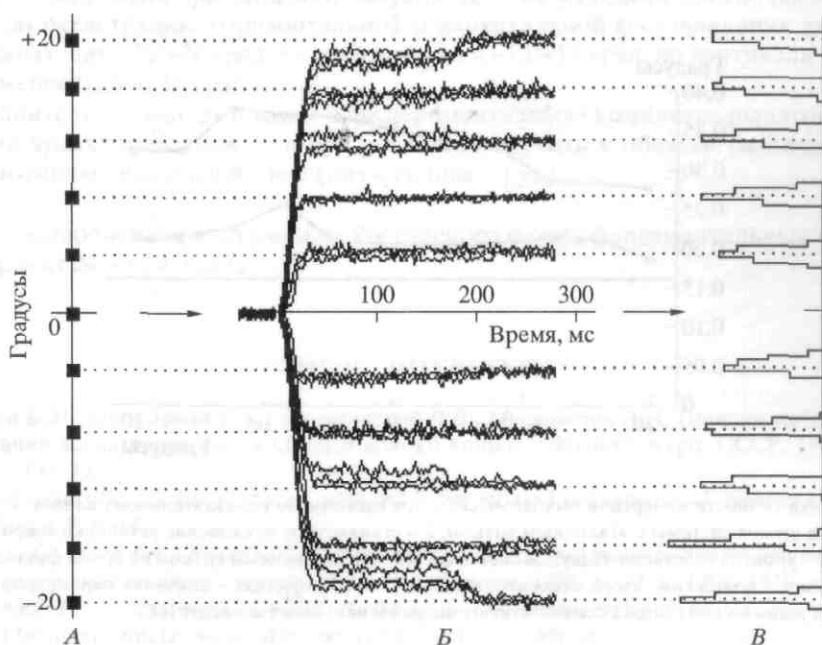


Рис. 2. Схема калибровки глазного витка по горизонтальной координате. *A* – расположение ПС; *B* – траектории перемещения взгляда на предъявленные ПС; по оси абсцисс – время, мс, приведено по 3 траектории на каждый ПС; *V* – распределение положений точек фиксации взгляда на ПС, величина бина 0,4 град., для каждого ПС приведена выборка из 80 значений.

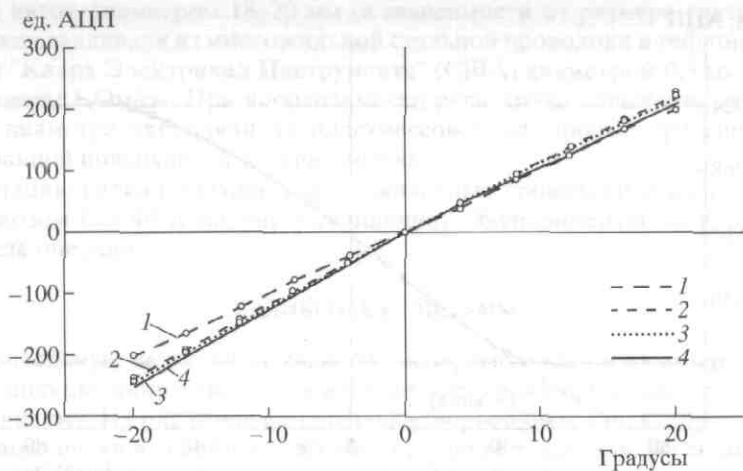


Рис. 3. Калибровочные графики регистрирующих витков по горизонтальной координате. 1-3 – для витков, имплантированных в глаз; 4 – эталонный виток. По оси абсцисс – угловое положение стимула (линии 1-3), угол поворота витка (линия 4); по оси ординат – величина выходного сигнала, ед. АЦП, нулевое значение соответствует установке взора на ЦФС. Отрицательные значения соответствуют направлению взора влево от ЦФС.

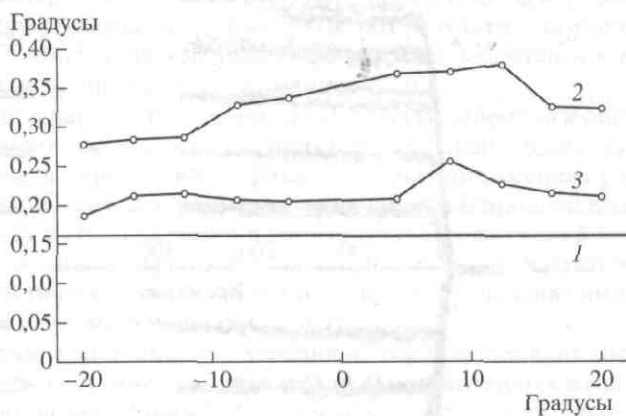


Рис. 4. Оценка точности измерения выходных сигналов системы по горизонтальному каналу. 1 – уровень собственных шумов системы с эталонным витком; 2 – стандартное отклонение установки взора при фиксации ПС; 3 – уровень собственных шумов системы с имплантированным витком во время фиксации ПФС. По оси абсцисс – положение взора относительно ЦФС; по оси ординат – значения параметров. Отрицательные значения по оси абсцисс соответствуют направлению взора влево от ЦС.

личины стандартного отклонения выходного сигнала от положения взора на ПС. Этот разброс определяется неточностью выполненных к данному ПС саккад. Линия 3 отражает зависимость усредненной величины стандартного отклонения от положения взора во время фиксации ПС. Эта величина вычислялась на интервале 100 мс после установки взора по всем реализациям для каждого ПС. Величина стандартного отклонения при этом включает собственные шумы системы и микродвижения глаз во время фиксации взора.

Ошибка установки взора на ПС с эксцентриситетом $-20/+20$ град. по горизонтали (линия 2 на рис. 4) составляет 0,27–0,38 град. Эти величины достоверно превышают собственные шумы системы (линия 1, 0,16 град.) по обоим каналам, при этом они измеримы с угловой величиной ПС 0,20 град. Данные по ошибкам фиксации ПС по горизонтали (линия 3 на рис. 4) практически совпадают с аналогичными данными для вертикальной составляющей.

После проведения калибровки системы с имплантированным витком отпадает необходимость в повторных калибровках перед каждым опытом, так как взаимное расположение фиксированной головы животного, излучающих контуров и монитора, на котором предъявляются стимулы, остается неизменным на протяжении всего периода экспериментов.

Таким образом, данная методика позволяет в течение длительного периода регистрировать движения глаз у обезьян с высокой временной и амплитудной точностью.

В литературе по исследованию глазодвигательных реакций по аналогичной методике практически отсутствуют сведения о характеристиках используемых систем. Во многих исследованиях для регистрации движений глаз и головы у обезьян применяются однокоординатные системы; двухкоординатные системы используются в немногих лабораториях [3–5, 7, 9, 11, 12].

Как показали наши исследования, с помощью описанной методики можно регистрировать положения глаза и головы по двум координатам одновременно. Это существенно расширяет возможности применения системы для изучения взаимодействия движений глаз и головы в условиях, приближенных к реальной обстановке, возникающей при восприятии зрительных стимулов. Данная методика обеспечивает одновременную регистрацию горизонтальной и вертикальной составляющих движений глаз в диапазонах $-20/+20$ град. по горизонтали и $-13/+13$ град. по вертикали с точностью не менее 0,25–0,30 град.

Дополнительное использование в экспериментальном комплексе рычагов для регистрации траекторий движения рук позволяет изучать у обезьян различные зрительно-моторные взаимодействия глаз – голова – рука.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 99-04-48133).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шелига Б.М., Прокофьев С.К., Шульговский В.В., Москвитин А.А. Простая методика имплантации витка проволоки в глазное яблоко кошки // Физиол. журн. СССР. 1987. Т. 73. № 1. С. 133–134.
2. Bach M., Bouis D., Fischer B. An accurate and linear infrared oculometer // J. Neurosci. Methods. 1983. No. 9. P. 9–14.
3. Busetini C., Miles F.A., Krauzlis R.J. Short-latency disparity vergence responses and their dependence on a prior saccadic eye movement // J. Neurophysiol. 1996. V. 75. P. 1392–1410.
4. Godschalk M., van der Burg J., van Duin B., De Zeeuw C.J. Topography of saccadic eye movements evoked by microstimulation in rabbit cerebellar vermis // J. Physiol. (Engl.). 1994. V. 480. Part 1. P. 147–153.
5. Hepp K., van Opstal A.J., Straumann D. et al. Monkey superior colliculus represents rapid eye movements in a two-dimensional motor map // J. Neurophysiol. 1993. V. 69. P. 965–979.
6. Judge S.J., Richmond B.J., Chu F.C. Implantation of magnetic search coils for measurement of eye position: an improved method // Vision Res. 1980. V. 20. P. 535–538.
7. Lucchetti C., Evolani D. The effects of maturation on spontaneous eye movements in the macaque monkey // EEG a. Clin. Neurophysiol. 1992. V. 85. P. 220–224.
8. McElligott J.G., Loughnane M.H., Mays L.E. The use of synchronous demodulation for the measurement of eye movements by means of an ocular magnetic search coil // I.E.E.E. Trans. Biomed. Engng. BME-26. 1979. P. 370–374.

9. Paige G.D., Tomko D.L. Eye movement responses to linear head motion in the squirrel monkey. I. Basic characteristics // *J. Neurophysiol.* 1991. V. 65. P. 1170–1182.
10. Robinson D.A. A method of measuring eye movement using a scleral search coil in a magnetic field // *IEEE Trans. Biomed. Electron.* 1963. BME-10. P. 137–145.
11. Schlag J., Merker B., Schlag-Rey M. Comparison of EOG and search coil techniques in long-term measurements of eye position in alert monkey and cat // *Vision Res.* 1983. V. 23. No. 10. P. 1025–1030.
12. Waitzman D.M., Silakov V.L., Cohen B. Central mesencephalic reticular formation (cMRF) neurons discharging before and during eye movements // *J. Neurophysiol.* 1996. V. 75. P. 1546–1572.

Кафедра высшей нервной деятельности
 Московского государственного университета
 им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию
 3.II.2000
 Принята в печать
 16.III.2000

A SEARCH COIL METHOD FOR CHRONIC ELECTROMAGNETIC REGISTRATION OF EYE AND HEAD MOVEMENT IN MONKEYS

TERESHCHENKO L.V., KUZNETSOV Yu.B., LATANOV A.V., SHULGOVSKII V.V.

Department of Higher Nervous Activity, Lomonosov State University, Moscow

A search-coil method for two-dimensional chronic registration of eye and head movements is described. The method is based on the analysis of the electromotive force induced by a magnetic field in a search coil. The output parameters of the original dual system were measured using both the standard search coil and that implanted into monkey's eye. The precision of eye movement recording was evaluated in real time. Standard deviation of spontaneous noise level for both channels was equal to 0.16 degrees (deg). The same parameters representing eye movement error during gaze fixation in the horizontal (in the range of $-20/+20$ deg) and vertical (in the range of $-13/+13$ deg) directions were equal to 0.27–0.38 and 0.23–0.31 deg, respectively. The obtained errors were comparable with the angular size of the peripheral target stimuli (0.20 deg), which had to be traced by an animal with saccadic movements.