

УДК 615.822.3 + 612.6.65 + 612.789

**Э. В. Крыжановский**, канд. техн. наук,

**А. Г. Григорян**, ст. науч. сотр.,

**К. А. Живихин**, мл. науч. сотр.,

**А. В. Чистов**, аспирант,

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург,

**К. В. Квашнева**, аспирант,

Институт мозга человека РАН, Санкт-Петербург

## Новая многоканальная система ближней инфракрасной спектроскопии для функционального исследования головного мозга

**Ключевые слова:** спектроскопия, головной мозг, опторитмограф, омегаметрия, фотодатчик, кислородонасыщение, ИК-излучения.

**Key words:** spectroscopy, brain, NIRS, optorhythmograf, omegametry, photosensor, oxygenation.

*Рассматривается проблема создания компактной и недорогой системы, позволяющей осуществлять спектроскопию ближней ИК-области с поверхности головы человека. Приведены результаты эксперимента с использованием разработанного программно-аппаратного комплекса, согласующиеся с данными, полученными при помощи классических спектроскопических методов. Дальнейшее расширение возможностей программно-аппаратного комплекса позволит регистрировать активность мозговых процессов на всем оптическом диапазоне (УФ, видимый и ИК).*

### Введение

Более трети века назад неинвазивный метод спектроскопии ближней инфракрасной (ИК) области был впервые применен для исследования кислородной недостаточности и циркуляции крови в головном мозгу человека [1]. Свои открытия автор описал только спустя 22 года, после продолжительного клинического применения данной методики для исследования процессов мозгового кислородонасыщения [2]. С начала 1990-х г. метод спектроскопии ближней ИК-области начал применяться более широко, так как инструментальная часть стала более совершенной. Подробное описание по применению методики в различных областях медицины дано в работе [3]. В работе [4] сообщается о возможности мониторинга церебральной оксигенации с помощью данного метода, что позволяет повысить точность диагностики и оптимизировать терапию при нарушениях кислородного насыщения головного мозга в целях профилактики неврологических осложнений.

С помощью метода спектроскопии ближней ИК-области были исследованы особенности функциональной активности коры головного мозга у взрослых и у новорожденных. Обзор работ, посвященных изучению картирования мозговой активности представлен в [3]. Возможность картирования мозговой активности, а также создание относительно компактного оборудования (тем не менее весьма дорогого) компанией Hitachi привели к серии работ японских исследователей в психологии и психиатрии [5]. Картирование мозговой активности при помощи спектроскопии ближней ИК-области получило название *оптическая топография*.

Тем не менее современное приборное обеспечение метода спектроскопии ближней ИК-области имеет ряд недостатков — трудоемкость, громоздкость и высокая стоимость измеряющих приборов.

Кроме того, используемые на сегодня методы спектроскопии в медицине и психологии ограничиваются только ИК-областью спектра (в силу наибольшей мощности излучения в данной области спектра) и пренебрегают информативностью видимой и УФ-областей спектра излучения мозга.

Настоящая разработка нашего центра направлена на решение упомянутых проблем с учетом более полной реализации метода оптической топографии, а именно:

1) создание компактного программно-аппаратного комплекса для неинвазивной регистрации мозговой активности (посредством оптических датчиков) в ближней ИК-области; в начальном периоде информация о мозговой активности будет изучаться посредством исследования гемодинамики головного мозга;

2) обеспечение простоты эксплуатации программно-аппаратного комплекса;

3) обеспечение низкой себестоимости прибора;

4) расширение возможности программно-аппаратного комплекса для регистрации мозговой активности на весь оптический диапазон (УФ, видимый и ИК).

Сейчас нами достигнут существенный прогресс в решении первых трех задач. Настоящая работа демонстрирует предварительные результаты исследований, полученных при помощи развиваемой технологии.

## Методы

**Система «Опторитмограф».** Разработанная нами система, названная «Опторитмограф», представляет собой четырехканальный (в перспективе — многоканальный) прибор — персональный компьютер со специализированным программным обеспечением. Четыре полностью идентичных оптических канала измеряют отраженное излучение в ИК-диапазоне исследуемой области головы человека.

Прибор состоит из оптических сенсоров и процессорного блока, расположенных на эластичном ремне. Вся конструкция закрепляется на голове испытуемого, подобно повязке с обхватом лобных и височных областей (рис. 1). Оптические сенсоры представляют собой конструкцию с широкополосным фотодиодом и ИК-светодиодами, расположенными таким образом, чтобы эффективно регистрировать данные с площади примерно  $1 \text{ см}^2$ , сам сенсор занимает площадь порядка  $6 \text{ см}^2$ .

Суть метода заключается в следующем. Исследуемые ткани биологического объекта (в данной методике — лобные и височные области поверхности головы человека) просвечиваются пучком ИК-излучения с помощью источника (светодиода, создающего ИК-излучение с длиной волны  $940 \text{ нм}$ , имеющее глубину проникновения в ткани организма до  $4 \text{ см}$ ), которое, частично проходя через ткань и частично отражаясь от ее внутренних структур, воспринимается фотоприемниками.

Сигнал посылается путем генерации излучения со светодиода с длиной волны  $940 \text{ нм}$  с шириной полосы излучателя фотосенсора по уровню  $0,5-(\pm 20) \text{ нм}$ ,



Рис. 1 Расположение прибора «Опторитмограф» на голове

суммарной импульсной мощностью ИК-излучателей одного фотосенсора не более  $250 \text{ мВт}$ . Регистрируется отраженное оптическое излучение при помощи фотодиода приемника, расположенного конструктивно в непосредственной близости ( $5 \text{ мм}$ ) от оптического излучателя.

Сигналы с датчиков после усиления поступают на входы АЦП микроконтроллера, который с частотой дискретизации  $25 \text{ Гц}$  преобразует каждый из сигналов в цифровой код и передает в ОЗУ компьютера.

Специализированное программное обеспечение реализовано в виде диалоговой интерактивной системы, позволяющей выполнять следующие функции:

- просмотр сигналов всех каналов в режиме осциллографа на экране цветного монитора компьютера;
- запись сигналов одновременно со всех каналов в ОЗУ компьютера;
- измерение амплитудно-временных параметров сигнала;
- статистический анализ основных параметров сигнала.

При помощи инфракрасного излучения хорошо определяются количество проходящего по сосудам гемоглобина (с кислородом и без него) и объем крови в тех или иных участках мозга. Объем крови зависит от параметров сердечно-сосудистой системы (мощности сердечного выброса, величины артериального давления, периферического сопротивления артериальной системы, упругости стенок сосудов) и отражает физиологическое состояние организма человека или животного. Пульсации периферических сосудов, возникающие за счет прохождения пульсовой волны, вызывают колебания оптической плотности живой ткани, поэтому поток ИК-излучения, прошедший и отраженный от тканей, модулируется по амплитуде и наводит в фотоприемнике электрический сигнал, пропорциональный этому потоку. Таким образом, прибор позволяет вести неинвазивную запись.

При активации зон мозга (например, при выполнении исследуемым психофизиологических тестов или других заданий) изменяется потребление кислорода и кровообращение в указанной зоне активизируется. Таким образом, опосредованно изменяется амплитуда ИК-излучения, что регистрируется фотодатчиком. Благодаря высокой скорости регистрации сигнала — мы получаем динамическую картину изменения амплитуды регистрируемого ИК-излучения во времени. Один цикл измерений кровотока, вычислений и выдачи команды занимает у системы  $40 \text{ мс}$ , поэтому можно сказать, что «она реагирует на мысли» подключенного к датчикам человека в реальном времени. Полученный сигнал обрабатывается и калибруется с помощью персонального компьютера, и мы получаем динамическую кривую определенной формы, регистрируемую с определен-

ного участка области головы. Программное обеспечение помогает убрать «шумы», выделить фоновые колебания кривой и специфические (связанные с выполнением тестов) динамические изменения регистрируемых данных.

#### Характеристики прибора

Количество каналов .....	4
Номинальная разрешающая способность по уровню фотоЭДС-сенсоров (на длине волны 940 нМ), нВ .....	Не хуже 50
Рабочий диапазон длин волн для фотосенсора (по уровню 6 дБ), нМ .....	570–1000
Номинальная длина волны ИК-излучателя фотосенсора, нМ .....	940
Суммарная импульсная мощность ИК-излучателей одного фотосенсора, мВт .....	не более 250
Ширина полосы ИК-излучателя фотосенсора, нМ .....	0,5–(±20)
Скорость опроса и съема данных по всем четырем каналам (квазидовременно) при номинальной разрешающей способности .....	Не хуже 1 четырехканального измерения в секунду
Интерфейс с управляющим ПК .....	USB 1.0 или выше
Напряжение питания, В .....	5
Средний ток потребления, мА, не более .....	200
Масса, г, не более .....	180
Диапазон рабочих температур, °С при относительной влажности не более 80 % .....	0...+40

**Метод омегаметрии.** Метод является весьма информативным для экспресс-диагностики уровней бодрствования и психической активации, скорости спонтанной релаксации и компенсаторно-приспособительных реакций организма.

Для оценки текущего функционального состояния обследуемого лица, определения уровня бодрствования, адаптационно — компенсаторных возможностей и резервов организма использовался анализ изменений омега-потенциала (омегаметрия) в отведении vertex- thenar [6].

**Тест Бине.** Была использована модификация теста Бине на запоминание последовательности цифр.

**Методика эксперимента.** В эксперименте участвовали 26 студентов-добровольцев (22 мужского и 4 женского пола) в возрасте от 18 до 21 года.

Вначале измеряли физиологические показатели (ЧД, ЧСС, АД) и оценивали психоэмоциональный статус (тест Люшера), затем выполняли омегаметрию (10 мин в покое), измеряли показатели «Опторитмографа», регистрируемые с лобных и височных зон головы человека в состоянии покоя (5 мин), артефакты (например, движение рук, разговор), и в конце выполняли тест Бине. Показания «Опторитмографа» представляли собой временные серии напряжения, получаемого в процессе регистрации эмиссии ИК-излучения фотодатчиком. Добровольцам предлагали запомнить последовательность из 5–7 двузначных цифр, которые они должны были воспроизвести через 30 с. Тест Бине производился пятикратно.

#### Результаты и анализ

У 20 добровольцев из 26 временные серии, полученные при помощи омегаметрии и «Опторитмографа», имели схожую динамику и высокий коэффициент корреляции (более 0,8).

Примеры приведены на рис. 2–4.

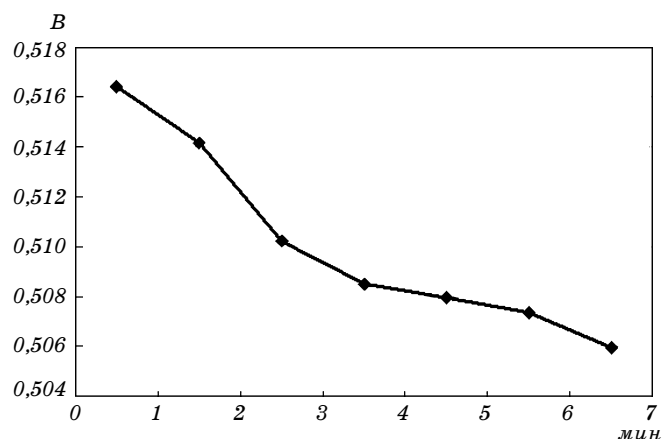


Рис. 2 Динамика изменения функциональной активности, полученная при помощи «Опторитмографа»

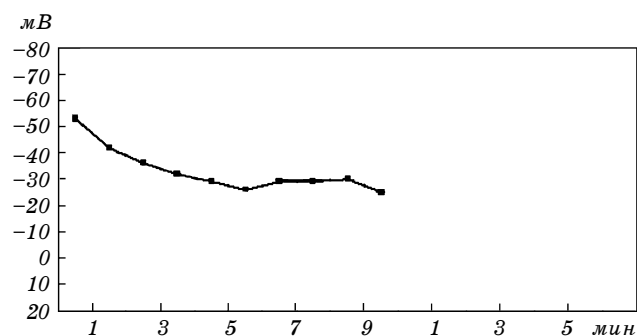


Рис. 3 Динамика изменения омегапотенциала, зарегистрированного в отведении vertex-thenar левой руки

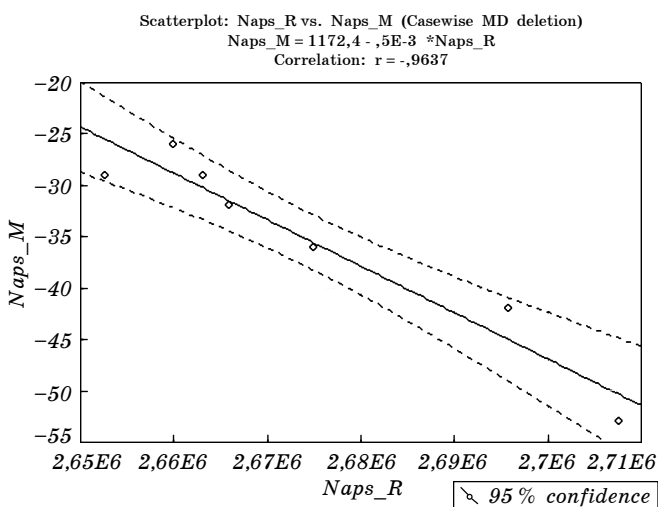


Рис. 4 Корреляционный анализ результатов, полученных при помощи двух методов

Высокая корреляция объясняется тем, что оба метода довольно чувствительны к изменениям мозгового кислородонасыщения, что детально описано в работах [6, 7] и является хорошей верификацией работы прибора «Опторитмограф».

У 22 добровольцев из 26 временные серии изменения напряжения имеют специфические отклонения, выраженные изменением направления тренда в процессе запоминания последовательности цифр и в процессе воспроизведения данных цифр в тесте Бине

(рис. 5). Причем различные артефакты (например, разговоры, повороты головы и движения рук) имеют другой специфический паттерн на прямой, не характерный для процесса, связанного с тестом Бине (рис. 6).

Спектральные плотности временных рядов изменения напряжения в префронтальной зоне имеют статистически значимые различия в фоновом режиме и в процессе прохождения теста Бине. Для 11 из 14 добровольцев, которые смогли воспроиз-



Рис. 5 | Динамика изменения функциональной активности в покое и в процессе выполнения теста Бине, полученная при помощи «Опторитмографа»

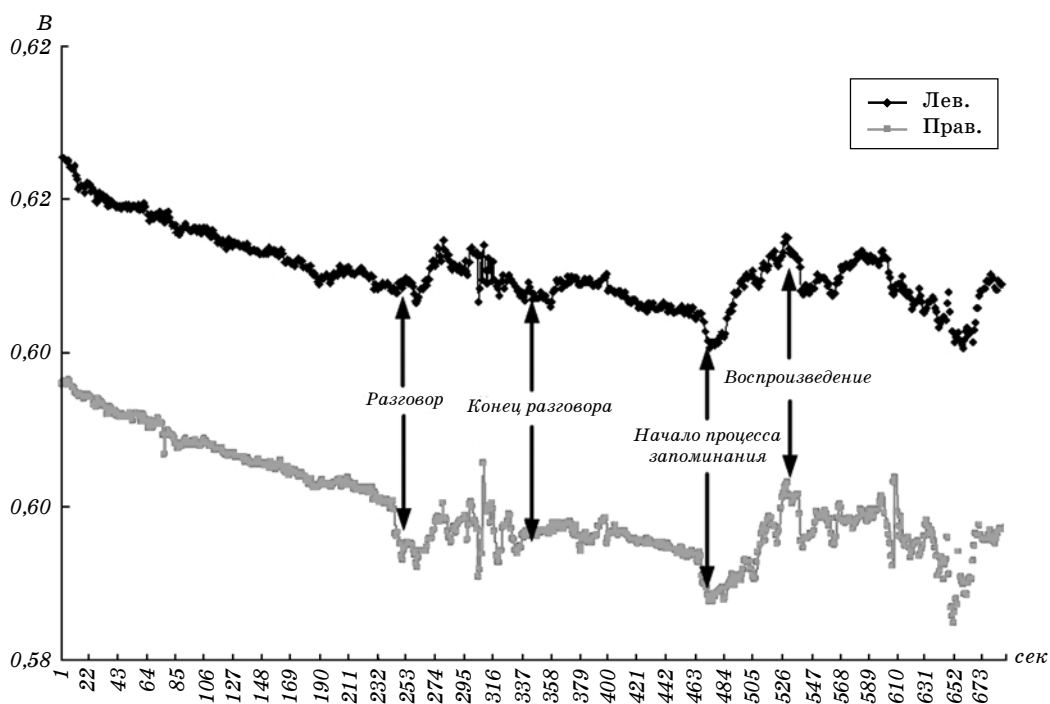


Рис. 6 | Динамика изменения функциональной активности в покое и в процессе нагрузки, полученная при помощи «Опторитмографа». Тест Бине и артефакты

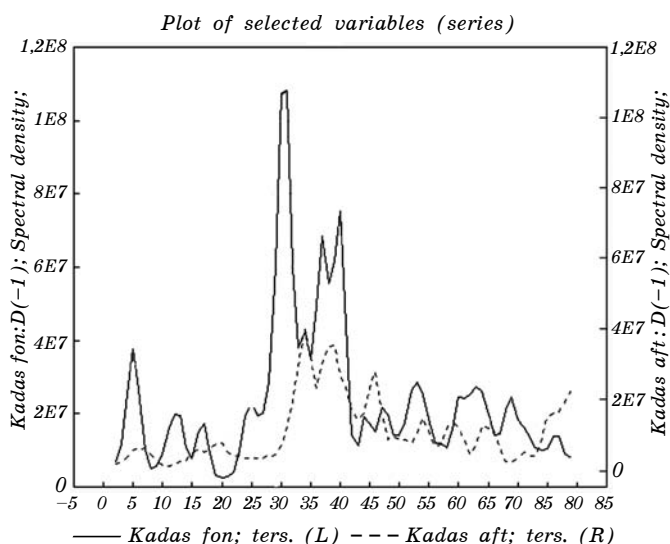


Рис. 7 Спектральные мощности временных рядов в покое (—) и в процессе прохождения теста Бине (---)

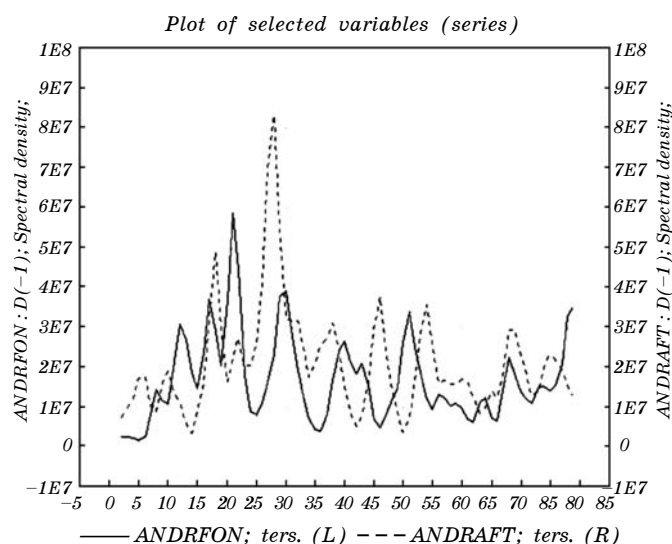


Рис. 8 Спектральные мощности временных рядов в покое (—) и в процессе прохождения теста Бине (---)

вести более чем 65 % предложенных цифр, имелось характерное различие в спектрах временных рядов (рис.7). В этом случае мощность спектров временных рядов, полученных в состоянии покоя, превышала значения этого параметра, полученные в процессе прохождения теста Бине. Для 9 из 12 добровольцев, которые воспроизвели менее 65 % предложенных цифр, мощность спектров временных рядов, полученных в состоянии покоя, имела более низкие значения по сравнению с полученными в процессе прохождения теста Бине (рис. 8).

Данные изменения, по-видимому, отражают гемодинамический отклик на процессы запоминания и воспроизведения информации.

Результаты хорошо согласуются с данными, полученными в работе [5].

## Заключение

Создана компактная и недорогая система, позволяющая осуществлять спектроскопию ближней ИК-области с поверхности головы человека. Полученные данные имеют высокую корреляцию с классическими методиками.

При этом результаты в целом повторяют тенденции, выявленные при помощи дорогостоящих и громоздких зарубежных систем.

Дальнейшее развитие системы позволит более широко использовать этот метод, а также получать данные в полевых условиях.

Созданы предпосылки для применения системы в прикладных направлениях медицины, таких как нейрохирургия, эпилептология и неврология, а также для технологии полиграфического тестирования, применяемого в работе спецслужб.

## Литература

1. Jobsis F. F. Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters// Science 198 4323. 1264–1267. 1977.
2. Jobsis-VanderVliet F. F., Jobsis P. D. Biochemical and physiological basis of medical near-infrared spectroscopy // J. Biomed.Opt. 4 3. 397–402. 1999.
3. Wolf M., Ferrari M. Quaresima. V. (2007). Progress of near-infrared spectroscopy and topography for brain and muscle clinical applications // Journal of biomedical optics. 12 (6): 062104.
4. Al-Rawi P. G., Kirkpatrick P. J. Tissue oxygen index: Thresholds for cerebral ischemia using near-infrared spectroscopy // Stud.Cercet Endocrinol. 37. 11. 2720–2725. 2006.
5. Hoshi Y., Tamura M. Detection of dynamic changes in cerebral oxygenation coupled to neuronal function during mental work in man // Neurosci. Lett. 150. 1. 5–8. 1993.
6. Илохина В. А., Заболотских И. Б. Энергодефицитные состояния здорового и больного человека. СПб.: Печатник, 1993. 122 с.
7. Madsen P. L., Secher N. H. Near-infrared oximetry of the brain // Prog. Neurobiol. 58. 6. 541–560. 1999.