

# ЦЕРЕБРАЛЬНАЯ ИНФРАКРАСНАЯ ОКСИМЕТРИЯ ПРИ ВНУТРИЧЕРЕПНЫХ КРОВОИЗЛИЯНИЯХ

УДК 616.831-001-06-005.1-073.97

Поступила 11.10.2013 г.



**А.О. Трофимов**, к.м.н., ассистент кафедры неврологии, нейрохирургии и медицинской генетики<sup>1</sup>;

врач-нейрохирург<sup>2</sup>;

**Г.В. Калентьев**, врач-реаниматолог<sup>2</sup>;

**О.В. Военнов**, д.м.н., врач-реаниматолог<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Нижегородская государственная медицинская академия, Н. Новгород, 603000, пл. Минина и Пожарского, 10/1;

<sup>2</sup>Нижегородская областная клиническая больница им. Н.А. Семашко, Н. Новгород, 603126, ул. Родионова, 190

Приведены современные данные о применении церебральной инфракрасной оксиметрии при внутричерепных кровоизлияниях. Представлены основы метода, позволяющего проводить неинвазивный мониторинг оксигенации мозговой ткани. Показана сопоставимость церебральной оксиметрии с инвазивными методиками оценки сатурации мозговой ткани, яремной оксиметрии и церебральной микроциркуляции. Представлены все системы для определения кислородного статуса, сертифицированные в Российской Федерации. Акцентируется внимание на использовании некоторых коэффициентов и индексов церебральной инфракрасной оксиметрии для оценки функционального состояния микроциркуляторного русла головного мозга и церебральной ауторегуляции. Приведены перспективы развития церебральной оксиметрии как элемента многокомпонентного мониторинга при черепно-мозговой травме и геморрагических инсультах.

**Ключевые слова:** церебральная инфракрасная оксиметрия; черепно-мозговая травма; геморрагический инсульт.

## English

## Cerebral Infrared Oximetry in Intracranial Hemorrhage

**A.O. Trofimov**, PhD, Tutor, the Department of Neurology, Neurosurgery and Medical Genetics<sup>1</sup>; Neurosurgeon<sup>2</sup>;

**G.V. Kalentiev**, Emergency Physician<sup>2</sup>;

**O.V. Voennov**, D.Med.Sc., Emergency Physician<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State Medical Academy, Minin and Pozharsky Square, 10/1, Nizhny Novgorod, Russian Federation, 603000;

<sup>2</sup>N.A. Semashko Nizhny Novgorod Regional Clinical Hospital, Rodionova St., 190, Nizhny Novgorod, Russian Federation, 603126

There have been presented up-to-date data on cerebral infrared oximetry application in intracranial hemorrhage. The principles of the technique enabling to perform noninvasive monitoring of cerebral tissue oxygenation have been given. There has been shown the comparability of cerebral oximetry and invasive assessment techniques of cerebral tissue saturation, jugular oximetry and cerebral microcirculation. Some systems for oxygen status determination have been presented. Special attention has been paid to the use of coefficients and indices of cerebral infrared oximetry to assess functional state of cerebral microvasculature and cerebral autoregulation.

There have been described prospects for further development of cerebral oximetry as a part of many-component monitoring in craniocerebral injury and hemorrhagic strokes.

**Key words:** cerebral infrared oximetry; craniocerebral injury; hemorrhagic stroke.

Начало клинического использования инфракрасной оксиметрии (синоним — инфракрасная спектроскопия) принято связывать с работой F. Jobsis, который в 1977 г. впервые применил ее *in vivo*. Им было показано, что изменения интенсивности излучения коррелировали с концентрацией естественных хромофоров: оксигемоглобина, дезоксигемоглобина, цитохромоксидазы, меланина и т.д. [1, 2].

Вначале инфракрасная оксиметрия не была количественной и отражала только тенденцию к изменению оксигенации, а регистрируемые сигналы имели значительные колебания и склонность к появлению артефактов [3, 4].

Дальнейшее развитие этой технологии привело к созданию тканевой оксиметрии и, в частности, церебральной инфракрасной оксиметрии (ЦО), в результате

Для контактов: Трофимов Алексей Олегович, тел. моб. +7 910-390-09-55; e-mail: xtro7@mail.ru

чего стала возможной рутинная оценка изменения кислородного статуса паренхимы головного мозга [5–9] при различной церебральной патологии. Это позволило использовать ЦО в качестве одного из методов комплекса нейромониторинга.

Техника ЦО основана на эффекте проникновения света длиной волны от 680 до 1000 нм через ткани человеческого тела и поглощения его естественными хромофорами: оксигемоглобином ( $\text{HbO}_2$ ), дезоксигемоглобином (Hb) и цитохромоксидазой. Инфракрасное излучение доставляется от источника через оптоволоконный кабель (так называемый оптод) к кожным датчикам (детекторам), состоящим из эмиттера и трансмиттера. Эти датчики расположены симметрично относительно средней линии и находятся на расстоянии 3,5–6 см друг от друга (рис. 1) [10].

Световой пучок с трансмиттера проникает через мягкие ткани покровов головы, кости черепа, паренхиму головного мозга и, рассеиваясь, попадает на эмиттер.

Как установлено, концентрация хромофоров:  $\text{HbO}_2$ , Hb и цитохромоксидазы является переменной величиной и зависит от уровня тканевой оксигенации и метаболизма [11]. Концентрация других светопоглощающих субстанций, таких как меланин, билирубин и прочие водорастворимые фракции, носит следовый характер и может быть выведена за пределы вычислений [12, 13].

Для расчета концентрации хромофоров используется модифицированная формула Бугера–Бера–Ламберта (Bouguer–Beer–Lambert)  $I = I_0 e^{-k\lambda l}$  [11, 14–16].

Пучок монохромного света интенсивностью  $I_0$ , пройдя через слой поглощающего вещества толщиной  $l$ , выходит ослабленным до интенсивности  $I$ , определяемой данным выражением, где  $k\lambda$  — показатель поглощения — коэффициент, зависящий от длины волны  $\lambda$  поглощаемого света.

Этот метод расчета вполне применим в неонатологии, так как детский череп достаточно тонкий, что позволяет просвечивание светом от одной стороны к другой [15, 16]. Однако у взрослых относительная толщина кожи головы, костей черепа и головного мозга делают невозможной обычную спектроскопию, и поэтому ЦО должна быть использована в режиме отражения, когда эмиттер и трансмиттер расположены на одной стороне головы. ЦО в режиме отражения зависит от доли того света, который проходит через ткань мозга. Голова человека состоит из нескольких слоев разных тканей, которые обладают различными рассеивающими свойствами и содержат разные концентрации поглощающих свет соединений. В результате, для корректного определения хромофоров в ткани мозга потребовалось введение нелинейных коэффициентов для определения поглощения и рассеяния света [16]. Кроме того, с целью исключения из расчетов крови, находящейся в покровах черепа, в последнее время и было предложено использование двойных приемных датчиков, расположенных на расстоянии 2,5–3 см друг от друга (см. рис. 1).

В настоящее время используют несколько уникальных показателей ЦО:



Рис. 1. Схема использования церебральной оксиметрии

1.  $r\text{SO}_2$  (regional saturation  $\text{O}_2$  — локальная кислородная сатурация) — мониторы INVOS и EQUANOX производства Covidien и Nonin Medical (США) соответственно;

2. TOI (Tissue Oxygenation Index — индекс кислородной сатурации) — монитор NIRO производства Hamamatsu Photonics (Япония);

3.  $r\text{SctO}_2$  (regional cerebral tissue saturation  $\text{O}_2$  — локальная тканевая церебральная кислородная сатурация) — монитор Fore-Sight производства Casmed (США).

Во множестве исследований показана высокая степень достоверности представленных показателей, что делает мониторинг кислородного статуса стандартной процедурой [17].

Для дополнительной оценки состояния кислородного статуса головного мозга предложены различные коэффициенты и индексы, отражающие функциональное состояние микроциркуляторного русла и церебральной ауторегуляции:

1) коэффициент межполушарной асимметрии — отношение разности сатурации обоих полушарий к меньшему их значению, выраженное в процентах [8, 18];

2) индекс гемодинамического соответствия — отношение показателей ЦО в лобных долях к среднему АД [19];

3) индекс цереброваскулярной реактивности церебральной сатурации (ТОх);

4) индекс общей реактивности гемоглобина (ТНх) и т.д.

Основное применение ЦО нашла для оценки изменений регионарной оксигенации и кислородного статуса головного мозга при черепно-мозговой травме [20–22] и цереброваскулярной патологии [3, 6, 23], а также у пациентов с патологией сонных артерий [24].

Установлено, что у пациентов с внутричерепными кровоизлияниями изменения церебральной сатурации статистически значимо коррелируют с изменениями оксигенации в луковиче яремной вены ( $\text{SjvO}_2$ ), а также с показателями напряжения кислорода в мозговой ткани по данным инвазивной тканевой церебральной

оксиметрии ( $PbtO_2$ ) [25, 26]. Исследования церебральной ауторегуляции у пациентов с черепно-мозговой травмой и геморрагическими инсультами на основании сопоставления индексов реактивности показали, что индекс общей реактивности гемоглобина (ТНх) имеет высокую достоверную взаимосвязь с индексом реактивности внутричерепного давления (PРх) [19]. Также была выявлена прямая достоверная корреляция между другими показателями церебральной ауторегуляции: индексами реактивности церебральной сатурации (ТОх) и реактивности линейного мозгового кровотока (Sхa), что свидетельствует о высокой точности и надежности получаемых с помощью ЦО данных [27].

На основании полученных результатов с помощью индекса ТНх и ТОх примерно у половины пациентов стало возможным определить «оптимальное» церебральное перфузионное давление (СРРopt) [19, 28], что позволило ЦО стать незаменимой для оптимизации целевой терапии у пациентов с внутричерепными кровоизлияниями, особенно в случае невозможности по каким-либо причинам проведения мониторинга внутричерепного давления [29–32]. С помощью ЦО также стало возможным неинвазивно оценивать изменения мозговой перфузии [33–37].

Р. Таусску с соавт. [38] исследовали взаимосвязь между параметрами компьютерно-томографической перфузии мозга и уровнем церебральной оксигенации у пациентов с нетравматическими внутричерепными кровоизлияниями и нашли высокодостоверную взаимосвязь между  $SctO_2$  и объемной скоростью кровотока (СВФ). Подобные результаты были получены и при сопоставлении данных ЦО и позитронно-эмиссионной томографии [39].

Необходимо заметить, что до настоящего времени не найдено идеального метода, чтобы измерить регионарный объем циркулирующей в мозге крови (СВУ) или объемный мозговой кровоток (СВФ) эффективно, быстро, многократно и неинвазивно у кровати больного. Существующие методы измерения СВФ технически сложны, трудоемки, используют радиоактивные вещества или требуют транспортировки больных к месту проведения нейровизуализации [40].

В то же время, поскольку ЦО может измерить ННб и  $HbO_2$ , то создается возможность измерить полный гемоглобин (ТНgb) [33, 35, 36, 41]. Предполагая, что концентрация гемоглобинов складывается из большого числа меньших уровней гематокрита и это соотношение остается постоянным во время исследования, изменения в ТНgb подразумевают изменение регионарного объема циркулирующей в мозге крови (СВУ) согласно следующему уравнению:  $\Delta CBV = \Delta [THgb] \cdot (0,89/Hgb)$ .

Таким образом, становится возможным неинвазивно оценивать изменения мозговой перфузии, что было использовано для лечения пациентов с нетравматическим субарахноидальным кровоизлиянием и показало высокую надежность [39, 42–45].

В то же время данные исследований компьютерно-томографической перфузии головного мозга и ЦО у пациентов с черепно-мозговыми травмами, напротив, выявили достоверную взаимосвязь между уровнем це-

ребральной оксигенации и значениями регионарного объема циркулирующей крови (СВУ) [40]. Авторы отметили, что объяснением особенностей мозговой перфузии и церебральной оксигенации при травматическом и сосудистом повреждении головного мозга является тот факт, что регионарный объемный мозговой кровоток в отличие от регионарного объема крови также может зависеть от состояния артериального русла, а значит, существенно варьировать при развитии церебрального ангиоспазма [46].

Вместе с тем внедрение в клиническую практику ЦО позволило выявить ряд ограничений ее использования. Было показано, что кровоизлияния в мягкие ткани и переломы костей черепа ведут к локальному изменению концентрации естественных хромофоров, что не дает возможности корректно определить регионарную сатурацию в паренхиме мозга [47, 48]. Подобные же погрешности описаны при расположении датчиков в областях высокой концентрации волосных луковиц, в области расположения синусов и лобных пазух [8].

Поскольку ЦО измеряет сатурацию смешанной крови головного мозга, находящейся в артериях, венах и капиллярах, невозможным остается определение раздельной сатурации серого и белого вещества [8, 19], а также выполнение одновременного с ЦО магнитно-резонансного исследования [15, 16]. Кроме того, существующие церебральные оксиметры несовместимы с магнитно-резонансной томографией (МРТ), что пока ограничивает использование в одновременных исследованиях [15, 16].

Некоторые исследователи [22] предполагают, что критическое повышение внутричерепного давления может снизить точность измерений сатурации мозга, что связано с нарушением венозного оттока из полости и развитием вазогенного отека головного мозга.

Наконец, ограничением ЦО считаются индивидуальные изменения уровня хромофоров, которые уменьшают точность абсолютных значений церебральной сатурации, поэтому до последнего времени практическую значимость имела только динамика изменения показателей. Вместе с тем разработанная в последние годы инфракрасная церебральная спектроскопия с применением источников когерентного света (лазеров) существенно улучшила результаты мониторинга, что позволило некоторым исследователям позиционировать подобные приборы как «абсолютный церебральный оксиметр» [26].

Следует сказать, что церебральная оксиметрия — быстроразвивающаяся технология, которая обладает существенным потенциалом для технического совершенствования. Улучшение методологии, повышение точности и специфичности расширят возможности ее применения в клинике. ЦО обещает стать не только дешевым неинвазивным методом прикроватного измерения объемного мозгового кровотока у пациентов, но и стать основой для картирования структуры и функции мозга [40, 49–52].

Становятся реальными перспективы создания и внедрения в практику так называемых гибридных аппаратов, объединяющих электроэнцефалографию и

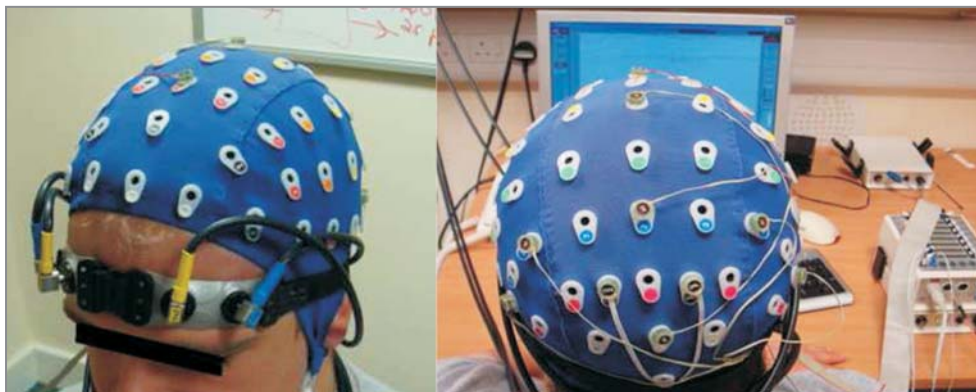


Рис. 2. Внешний вид перспективного гибридного устройства — Brain-Computer Interface [55]

ЦО. В англоязычной литературе подобные устройства получили название «Brain-Computer Interface» — интерфейс «мозг-компьютер». Они позволяют значительно повысить разрешающую способность картирования функционального состояния головного мозга (рис. 2) [53–59].

С этой же целью ведется работа по интеграции ЦО в системы контроля и визуализации, такие как компьютерная томография, магнитно-резонансная томография и дуплексные ультразвуковые приборы [4]. Тестируются портативные инструменты ЦО, объединенные с беспроводной телеметрией [42].

Большие надежды возлагаются на такие технологии, как инфракрасная церебральная спектроскопия с временным, фазовым и пространственным разрешением [60–63].

**Заключение.** Церебральная инфракрасная спектроскопия имеет ряд преимуществ перед другими способами мониторинга. Она обеспечивает непрерывный неинвазивный контроль состояния кислородного статуса головного мозга, относительно легкий в использовании и в то же время достаточно чувствительный, чтобы зарегистрировать изменения оксигенации мозга.

Отслеживание в реальном масштабе времени изменений сатурации мозговой ткани с помощью инфракрасной спектроскопии дает возможность распознать критические ишемические состояния на ранней стадии — прежде, чем они проявятся клинически. Это позволяет методу занять достойное место в современном комплексе нейромониторинга.

**Финансирование исследования.** Работа профинансирована Территориальным фондом обязательного медицинского страхования.

**Конфликт интересов.** У авторов нет конфликта интересов.

## Литература

- Jobsis F.F. Non-invasive infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters. *Science* 1977(4323); 198: 1264–1267, <http://dx.doi.org/10.1126/science.929199>.
- Gersten A., Perle J., Raz A., Fried R. Probing brain oxygenation with near infrared spectroscopy *NeuroQuantology* 2009; 7(2): 258–266, <http://dx.doi.org/10.14704/nq.2009.7.2.229>.
- Dylst D., De Deyne C.S., Weyns F., Jans F., Heylen R. Monitoring of absolute cerebral oxygen saturation during craniotomy for acute intracerebral bleeding. *Eur J Anaesthesiol* 2009; 26(Suppl 45): 5–6.
- Cutini S., Moro S.B., Bisconti S. Functional near infrared optical imaging in cognitive neuroscience: an introductory review. *J Near Infrared Spectrosc* 2012; 20: 75–92, <http://dx.doi.org/10.1255/jnirs.969>.
- Highton D., Elwell C., Smith M. Noninvasive cerebral oximetry: is there light at the end of the tunnel? *Curr Opin Anaesthesiol* 2010; 23(5): 576–581.
- Мацкеплишвили М.Т. Церебральная оксиметрия в комплексном неинвазивном мониторинге церебральных функций у больных в острой стадии полушарного инсульта. Автореф. дис. ... канд. мед. наук. М; 2012.
- Bauernfeind G., Leeb R., Wriessnegger S.C., Pfurtscheller G. Development, set-up and first results for a one-channel near-infrared spectroscopy system. *Biomed Tech (Berl)* 2008; 53(1): 36–43, <http://dx.doi.org/10.1515/BMT.2008.005>.
- Лазарев В.В. Церебральная оксиметрия и нейромониторинг в диагностике вторичных повреждений головного мозга после внутричерепных кровоизлияний. Автореф. дис. ... канд. мед. наук. М; 2004.
- Abdelnour A.F., Huppert T. Real-time imaging of human brain function by near-infrared spectroscopy using an adaptive general linear model. *NeuroImage* 2009; 46(1): 133–143, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.01.033>.
- Rodriguez A., Lisboa T., Martin-Loeches I., Diaz E., Treffer S., Restrepo M.I., Rello J. Mortality and regional oxygen saturation index in septic shock patients: a pilot study. *J Trauma* 2011; 70(5): 1145–1152, <http://dx.doi.org/10.1097/TA.0b013e318216f72c>.
- Komiyama T., Quaresima V., Shigematsu H., Ferrari M. Comparison of two spatially resolved near-infrared photometers in the detection of tissue oxygen saturation: poor reliability at very low oxygen saturation. *Clin Sci (Lond)* 2001; 101(6): 715–718.
- De Backer D., Ospina-Tascon G., Salgado D., Favory R., Creteur J., Vincent J.L. Monitoring the microcirculation in the critically ill patient: current methods and future approaches. *Intensive Care Med* 2010; 36(11): 1813–1825, <http://dx.doi.org/10.1007/s00134-010-2005-3>.
- Durduran T., Choe R., Baker W.B., Yodanis A.G. Diffuse optics for tissue monitoring and tomography. *Rep Prog Phys* 2010; 73: 076701, <http://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/73/7/076701>.
- Toet M.C., Lemmers P.M.A. Brain monitoring in neonates. *Early Hum Dev* 2009; 85(2): 77–84, <http://dx.doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2008.11.007>.
- Kleinschmidt A., Obrig H., Requardt M., Merboldt K.D., Dirnagl U., Villringer A., Frahm J. Simultaneous recording of cerebral blood oxygenation changes during human brain activation by magnetic resonance imaging and near-infrared spectroscopy. *J Cereb Blood Flow Metab* 1996; 16(5): 817–826, <http://dx.doi.org/10.1097/00004647-199609000-00006>.
- Quaresima V., Bisconti S., Ferrari M. A brief review on the use of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) for language imaging

- studies in human newborns and adults. *Brain Lang* 2012; 121(2): 79–89, <http://dx.doi.org/10.1016/j.bandl.2011.03.009>.
17. Moerman A., Wouters P. Near-infrared spectroscopy monitoring in contemporary anesthesia and critical care. *Acta Anaesthesiol Belg* 2010; 61(4): 185–194.
  18. Drayna P.C., Abramo T.J., Estrada C. Near-infrared spectroscopy in the critical setting. *Pediatr Emerg Care* 2011; 27(5): 432–439, <http://dx.doi.org/10.1097/PEC.0b013e3182188442>.
  19. Zweifel C., Castellani G., Czosnyka M., Helmy A., Manktelow A., Carrera E., et al. Noninvasive monitoring of cerebrovascular reactivity with near infrared spectroscopy in head-injured patients. *J Neurotrauma* 2010; 27: 1951–1958.
  20. Tachtsidis I., Tisdall M., Pritchard C., Leung T.S., Ghosh A., Elwell C.E., Smith M. Analysis of the changes in the oxidation of brain tissue cytochrome-c-oxidase in traumatic brain injury patients during hypercapnoea: a broadband NIRS study. *Oxygen Transport to Tissue XXXII. Adv Exp Med Biol* 2011; 701: 9–14, [http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-7756-4\\_2](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-7756-4_2).
  21. Diedler J., Zweifel C., Budohoski K. Assessment of cerebrovascular reactivity using THx depends on power of slow oscillations. In: 14th International Conference Intracranial Pressure and Brain Monitoring; 2010 Sept 12–16. Tübingen, Germany; 2010; p. 145–146.
  22. Weerakkody R., Czosnyka M., Zweifel C., Castellani G., Smielewski P., Brady K., et al. Near infrared spectroscopy as possible non-invasive monitor of slow vasogenic ICP waves. *Intracranial Pressure and Brain Monitoring XIV. Acta Neurochirurgica Supplementum* 2012; 114: 181–185, [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-0956-4\\_35](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-0956-4_35).
  23. Mutoh T., Ishikawa T., Suzuki A., et al. Continuous cardiac output and near-infrared spectroscopy monitoring to assist in management of symptomatic cerebral vasospasm after subarachnoid hemorrhage. *Neurocrit Care* 2010; 13(3): 331–338.
  24. Heringlake M., Garbers C., Kabler J., Anderson I., Heinze H., Schon J., et al. Preoperative cerebral oxygen saturation and clinical outcomes in cardiac surgery. *Anesthesiology* 2011; 114: 58–69, <http://dx.doi.org/10.1097/ALN.0b013e3181fef34e>.
  25. Budohoski K., Diedler J., Zweifel C. Comparison of changes in brain tissue oxygenation, tissue oxygen index and tissue hemoglobin index in response to transient changes in cerebral hemodynamics In: 14th International Conference Intracranial Pressure and Brain Monitoring; 2010 Sept 12–16. Tübingen, Germany; 2010; p. 148.
  26. MacLeod D. Simultaneous comparison of FORE-SIGHT and INVOS cerebral oximeters to jugular bulb and arterial CO<sub>2</sub>oximetry measurements in healthy volunteers. *Anesth Analg* 2009; 108(Suppl): 1–104.
  27. Budohoski K., Czosnyka M., Smielewski P., Varsos G.V., Kasprovicz M., Brady K.M. Cerebral autoregulation after subarachnoid haemorrhage: comparison of three methods. *J Cereb Blood Flow Metab* 2013 Mar; 33(3): 449–456, <http://dx.doi.org/10.1038/jcbfm.2012.189>.
  28. Steiner L., Pfister D., Strebels S., Radolovich D., Smielewski P., Czosnyka M. Near-infrared spectroscopy can monitor dynamic cerebral autoregulation in adults. *Neurocrit Care* 2009; 10(1): 122–128, <http://dx.doi.org/10.1007/s12028-008-9140-5>.
  29. Diedler J., Zweifel C., Budohoski K., Kasprovicz M., Sorrentino E., Haubrich C. The limitations of near-infrared spectroscopy to assess cerebrovascular reactivity: the role of slow frequency oscillations. *Anesth Analg* 2011 Oct; 113(4): 849–8457, <http://dx.doi.org/10.1213/ANE.0b013e3182285dc0>.
  30. Highton D., Panovska-Griffiths J., Ghosh A., Tachtsidis I., Banaji M., Elwell C., Smith M. Modelling cerebrovascular reactivity: a novel near-infrared biomarker of cerebral autoregulation? *Oxygen Transport to Tissue XXXIV. Advances in Experimental Medicine and Biology* 2013; 765: 87–93, [http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-4989-8\\_13](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-4989-8_13).
  31. Kim M., Durduran T., Frangos S., Edlow B.L., Buckley E.M., Moss H.E., et al. Noninvasive measurement of cerebral blood flow and blood oxygenation using near-infrared and diffuse correlation spectroscopies in critically brain-injured adults. *Neurocrit Care* 2010 Apr; 12(2): 173–180, <http://dx.doi.org/10.1007/s12028-009-9305-x>.
  32. Zweifel C., Castellani C. Non-invasive monitoring of cerebrovascular reactivity with near infrared spectroscopy in head injured patients. In: 14th International Conference Intracranial Pressure and Brain Monitoring; 2010 Sept 12–16. Tübingen, Germany; 2010; p. 48–49.
  33. Gupta C.N., Palaniappan R. Novel analysis techniques for a brain biometric system. *Int J Medical Engineering and Informatics* 2008; 1(2): 266–273.
  34. Zweifel C., Castellani G., Czosnyka M. Continuous assessment of cerebral autoregulation with near infrared spectroscopy in adults after subarachnoid hemorrhage. In: 14th International Conference Intracranial Pressure and Brain Monitoring; 2010 Sept 12–16. Tübingen, Germany; 2010. P. 194–195.
  35. Lemm S., Dickhaus T., Blankertz B., Müller K.R. Introduction to machine learning for brain imaging. *NeuroImage* 2011; 56(2): 387–399, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.11.004>.
  36. Blankertz B., Dornhege G., Krauledat M., Müller K.R., Curio G. The non-invasive Berlin Brain–Computer Interface: fast acquisition of effective performance in untrained subjects. *NeuroImage* 2007; 37(2): 539–550, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.01.051>.
  37. Multidetector computed tomography in cerebrovascular disease. Miles K.A., Eastwood J.D., König M. (eds). London: Informa UK; 2007; 192 p.
  38. Taussky P., O'Neal B., Daugherty W.P., Luke S., Thorpe D., Pooley R.A., et al. Validation of frontal near-infrared spectroscopy as noninvasive bedside monitoring for regional cerebral blood flow in brain-injured patients. *Neurosurg Focus* 2012; 32(2): e2, <http://dx.doi.org/10.3171/2011.12.FOCUS11280>.
  39. Brady K., Joshi B., Zweifel C., Smielewski P., Czosnyka M., Easley R.B., Hogue C.W.Jr. Real-time continuous monitoring of cerebral blood flow autoregulation using near-infrared spectroscopy in patients undergoing cardiopulmonary bypass. *Stroke* 2010; 41(9): 1951–1956, <http://dx.doi.org/10.1161/STROKEAHA.109.575159>.
  40. Orihuela-Espina F., Leff D.R., James D.R.C., Darzi A.W., Yang G.Z. Quality control and assurance in functional near infrared spectroscopy (fNIRS) experimentation. *Phys Med Biol* 2010; 55(13): 3701–3724, <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/55/13/009>.
  41. Takeuchi M., Hori E., Takamoto K., Tran A.H., Satoru K., Ishikawa A., et al. Brain cortical mapping by simultaneous recording of functional near infrared spectroscopy and electroencephalograms from the whole brain during right median nerve stimulation. *Brain Topogr* 2009; 22(3): 197–214, <http://dx.doi.org/10.1007/s10548-009-0109-2>.
  42. Ou W., Nissilä I., Radhakrishnan H., Boas D.A., Hämäläinen M.S., Franceschini M.A. Study of neurovascular coupling in humans via simultaneous magnetoencephalography and diffuse optical imaging acquisition. *NeuroImage* 2009; 46(3): 624–632, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.03.008>.
  43. MacLeod D., Ikeda K., White W. Relationship of cerebral oximetry measured hemoglobin per volume of tissue to arterial blood hemoglobin. *Anesth Analg* 2008; 106: S–120.
  44. Трофимов А.О., Юрьев М.Ю., Военнов О.В. Мозговой кровоток и церебральная оксигенация у пациентов с черепно-мозговой травмой. Сопоставление данных перфузионной компьютерной томографии и церебральной инфракрасной спектроскопии. *Украинский нейрохирургический журнал* 2013; 1: 40–45.
  45. Wolf M., Ferrari M., Quaresima V. Progress of near-infrared spectroscopy and topography for brain and muscle clinical applications. *J Biomed Opt* 2007; 12(6): 062104, <http://dx.doi.org/10.1117/1.2804899>.
  46. Leal-Noval S., Cayuela A., Arellano-Orden V., Marín-Caballeros A., Padilla V., Ferrándiz-Millón C., Corcia Y., et al. Invasive and noninvasive assessment of cerebral oxygenation in patients with severe traumatic brain injury. *Intensive Care Med* 2010; 36: 1309–1317, <http://dx.doi.org/10.1007/s00134-010-1920-7>.
  47. Трофимов А.О., Калентьев Г.В., Алейников А.В. Использование церебральной оксиметрии в остром периоде тяжелой политравмы. *Соврем технол мед* 2012; 4: 64–67.
  48. Smith M. Shedding light on the adult brain: a review of the clinical applications of near-infrared spectroscopy. *Phil Trans R Soc A* 2011; 36: 4452–4469, <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2011.0242>.

49. Ferrari M., Quaresima V. A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) development and fields of application. *NeuroImage* 2012, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.03.049>.

50. Herrmann M.J., Huter T., Plichta M.M., Ehlis A.C., Alpers G.W., Mühlberger A., Fallgatter A.J. Enhancement of activity of the primary visual cortex during processing of emotional stimuli as measured with event-related functional near-infrared spectroscopy and event-related potentials. *Hum Brain Mapp* 2008; 29(1): 28–35, <http://dx.doi.org/10.1002/hbm.20368>.

51. Budohoski K., Zweifel C., Kasprovicz M., Sorrentino E., Diedler J., Brady K.M., et al. What comes first? The dynamics of cerebral oxygenation and blood flow in response to changes in arterial pressure and intracranial pressure after head injury. *Br J Anaesth* 2012 Jan; 108(1): 89–99, <http://dx.doi.org/10.1093/bja/aer324>.

52. Constantoyannis C., Sakellaropoulos G.C., Kagadis G.C., Katsakiori P.F., Maraziotis T., Nikiforidis G.C., Papadakis N. Transcranial cerebral oximetry and transcranial doppler sonography in patients with ruptured cerebral aneurysms and delayed cerebral vasospasm. *Med Sci Monit* 2007; 13(10): MT35–40.

53. Coyle S., Ward T., Markham C., McDarby G. On the suitability of near-infrared (NIR) systems for next-generation brain-computer interfaces. *Physiol Meas* 2004; 25(4): 815–822.

54. Hirshfield L.M., Chauncey K., Gulotta R., Girouard A., Solovey E.T., Jacob R.J.K., Sassaroli A., Fantini S. Combining electroencephalograph and functional near infrared spectroscopy to explore users' mental workload. *Foundations of Augmented Cognition. Neuroergonomics and Operational Neuroscience. Lecture Notes in Computer Science* 2009; 5638: 239–247, [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-02812-0\\_28](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-02812-0_28).

55. Hermes D., Vansteensel M.J., Albers A.M., Bleichner M.G., Benedictus M.R., Mendez Orellana C., Aarnoutse E.J., Ramsey N.F. Functional MRI-based identification of brain areas involved in motor imagery for implantable brain-computer interfaces. *J Neural Eng* 2011; 8(2): 025007, <http://dx.doi.org/10.1088/1741-2560/8/2/025007>.

56. Kanoh S., Murayama Y.M., Miyamoto K., Yoshinobu T., Kawashima R. A NIRS based brain-computer interface system during motor imagery: system development and online feedback training. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc* 2009; 2009: 594–547, <http://dx.doi.org/10.1109/EMBS.2009.5333710>.

57. Nagaoka T., Sakatani K., Awano T., Yokose N., Hoshino T., Murata Y., et al. Development of a new rehabilitation system based on a brain-computer interface using near-infrared spectroscopy. *Oxygen Transport to Tissue XXXI. Advances in Experimental Medicine and Biology* 2010; 662: 497–503, [http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-1241-1\\_72](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-1241-1_72).

58. Wilson J., Palaniappan R. Analogue mouse pointer control via an online steady state visual evoked potential (SSVEP) brain-computer interface. *Journal of Neural Engineering* 2011; 8(2): 025026, <http://dx.doi.org/10.1088/1741-2560/8/2/025026>.

59. Sitaram R., Zhang H., Guan C., Thulasidas M., Hoshi Y., Ishikawa A., et al. Temporal classification of multichannel near-infrared spectroscopy signals of motor imagery for developing a brain-computer interface. *NeuroImage* 2007; 34(4): 1416–1427, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.11.005>.

60. Gratton G., Fabiani M. Fast optical imaging of human brain function. *Front Hum Neurosci* 2010; 4: 52, <http://dx.doi.org/10.3389/fnhum.2010.00052>.

61. Wriessnegger S.C., Kurzmann J., Neuper C. Spatio-temporal differences in brain oxygenation between movement execution and imagery: a multichannel near-infrared spectroscopy study. *Int J Psychophysiol* 2008; 67(1): 54–63, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2007.10.004>.

62. Tsubone T., Muroga T., Wada Y. Application to robot control using brain function measurement by near-infrared spectroscopy. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc* 2007; 2007: 5342–5345, <http://dx.doi.org/10.1109/EMBS.2007.4353548>.

63. Gupta C.N., Palaniappan R., Swaminathan S. Novel analysis technique for a brain biometric system. *International Journal of Medical Engineering and Informatics* 2008; 1(2): 266–273.

## References

1. Jobsis F.F. Non-invasive infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters. *Science* 1977(4323); 198: 1264–1267, <http://dx.doi.org/10.1126/science.929199>.

2. Gersten A., Perle J., Raz A., Fried R. Probing brain oxygenation with near infrared spectroscopy *NeuroQuantology* 2009; 7(2): 258–266, <http://dx.doi.org/10.14704/nq.2009.7.2.229>.

3. Dylst D., De Deyne C.S., Weyns F., Jans F., Heylen R. Monitoring of absolute cerebral oxygen saturation during craniotomy for acute intracerebral bleeding. *Eur J Anaesthesiol* 2009; 26(Suppl 45): 5–6.

4. Cutini S., Moro S.B., Bisconti S. Functional near infrared optical imaging in cognitive neuroscience: an introductory review. *J Near Infrared Spectrosc* 2012; 20: 75–92, <http://dx.doi.org/10.1255/jnirs.969>.

5. Highton D., Elwell C., Smith M. Noninvasive cerebral oximetry: is there light at the end of the tunnel? *Curr Opin Anaesthesiol* 2010; 23(5): 576–581.

6. Matskeplishvili M.T. *Tserebral'naya oksimetriya v kompleksnom neinvazivnom monitoringe tserebral'nykh funktsiy u bol'nykh v ostroy stadii polusharnogo insulta*. Avtoref. dis. ... kand. med. nauk [Cerebral oximetry in a complex noninvasive monitoring of cerebral functions in patients with acute hemispheric stroke. Abstract for Dissertation for the degree of Candidate of Medical Science]. Moscow; 2012.

7. Bauernfeind G., Leeb R., Wriessnegger S.C., Pfuertscheller G. Development, set-up and first results for a one-channel near-infrared spectroscopy system. *Biomed Tech (Berl)* 2008; 53(1): 36–43, <http://dx.doi.org/10.1515/BMT.2008.005>.

8. Lazarev V.V. *Tserebral'naya oksimetriya i neyromonitoring v diagnostike vtorschnykh povrezhdeniy golovnogo mozga posle vnutricherepnykh krovoizliyanij*. Avtoref. dis. ... kand. med. nauk [Cerebral oximetry and neuromonitoring in diagnostics of secondary brain injuries after intracranial hemorrhage. Abstract for Dissertation for the degree of Candidate of Medical Science]. Moscow; 2004.

9. Abdelnour A.F., Huppert T. Real-time imaging of human brain function by near-infrared spectroscopy using an adaptive general linear model. *NeuroImage* 2009; 46(1): 133–143, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.01.033>.

10. Rodriguez A., Lisboa T., Martin-Loeches I., Dhaz E., Trefer S., Restrepo M.I., Rello J. Mortality and regional oxygen saturation index in septic shock patients: a pilot study. *J Trauma* 2011; 70(5): 1145–1152, <http://dx.doi.org/10.1097/TA.0b013e318216f72c>.

11. Komiyama T., Quaresima V., Shigematsu H., Ferrari M. Comparison of two spatially resolved near-infrared photometers in the detection of tissue oxygen saturation: poor reliability at very low oxygen saturation. *Clin Sci (Lond)* 2001; 101(6): 715–718.

12. De Backer D., Ospina-Tascon G., Salgado D., Favory R., Creteur J., Vincent J.L. Monitoring the microcirculation in the critically ill patient: current methods and future approaches. *Intensive Care Med* 2010; 36(11): 1813–1825, <http://dx.doi.org/10.1007/s00134-010-2005-3>.

13. Durduran T., Choe R., Baker W.B., Yodh A.G. Diffuse optics for tissue monitoring and tomography. *Rep Prog Phys* 2010; 73: 076701, <http://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/73/7/076701>.

14. Toet M.C., Lemmers P.M.A. Brain monitoring in neonates. *Early Hum Dev* 2009; 85(2): 77–84, <http://dx.doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2008.11.007>.

15. Kleinschmidt A., Obrig H., Requardt M., Merboldt K.D., Dirnagl U., Villringer A., Frahm J. Simultaneous recording of cerebral blood oxygenation changes during human brain activation by magnetic resonance imaging and near-infrared spectroscopy. *J Cereb Blood Flow Metab* 1996; 16(5): 817–826, <http://dx.doi.org/10.1097/00004647-199609000-00006>.

16. Quaresima V., Bisconti S., Ferrari M. A brief review on the use of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) for language imaging studies in human newborns and adults. *Brain Lang* 2012; 121(2): 79–89, <http://dx.doi.org/10.1016/j.bandl.2011.03.009>.

17. Moerman A., Wouters P. Near-infrared spectroscopy monitoring in contemporary anesthesia and critical care. *Acta Anaesthesiol Belg* 2010; 61(4): 185–194.

18. Drayna P.C., Abramo T.J., Estrada C. Near-infrared spectroscopy in the critical setting. *Pediatr Emerg Care* 2011; 27(5): 432–439, <http://dx.doi.org/10.1097/PEC.0b013e3182188442>.
19. Zweifel C., Castellani G., Czosnyka M., Helmy A., Manktelow A., Carrera E., et al. Noninvasive monitoring of cerebrovascular reactivity with near infrared spectroscopy in head-injured patients. *J Neurotrauma* 2010; 27:1951–1958.
20. Tachtsidis I., Tisdall M., Pritchard C., Leung T.S., Ghosh A., Elwell C.E., Smith M. Analysis of the changes in the oxidation of brain tissue cytochrome-c-oxidase in traumatic brain injury patients during hypercapnoea: a broadband NIRS study. *Oxygen Transport to Tissue XXXII. Adv Exp Med Biol* 2011; 701: 9–14, [http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-7756-4\\_2](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-7756-4_2).
21. Diedler J., Zweifel C., Budohoski K. Assessment of cerebrovascular reactivity using THx depends on power of slow oscillations. In: *14th International Conference Intracranial Pressure and Brain Monitoring; 2010 Sept 12–16*. Tübingen, Germany; 2010; p. 145–146.
22. Weerakkody R., Czosnyka M., Zweifel C., Castellani G., Smielewski P., Brady K., et al. Near infrared spectroscopy as possible non-invasive monitor of slow vasogenic ICP waves. *Intracranial Pressure and Brain Monitoring XIV. Acta Neurochirurgica Supplementum* 2012; 114: 181–185, [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-0956-4\\_35](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-0956-4_35).
23. Mutoh T., Ishikawa T., Suzuki A., et al. Continuous cardiac output and near-infrared spectroscopy monitoring to assist in management of symptomatic cerebral vasospasm after subarachnoid hemorrhage. *Neurocrit Care* 2010; 13(3): 331–338.
24. Heringlake M., Garbers C., Kabler J., Anderson I., Heinze H., Schon J., et al. Preoperative cerebral oxygen saturation and clinical outcomes in cardiac surgery. *Anesthesiology* 2011; 114: 58–69, <http://dx.doi.org/10.1097/ALN.0b013e3181fef34e>.
25. Budohoski K., Diedler J., Zweifel C. Comparison of changes in brain tissue oxygenation, tissue oxygen index and tissue hemoglobin index in response to transient changes in cerebral hemodynamics. In: *14th International Conference Intracranial Pressure and Brain Monitoring; 2010 Sept 12–16*. Tübingen, Germany; 2010; p. 148.
26. MacLeod D. Simultaneous comparison of FORE-SIGHT and INVOS cerebral oximeters to jugular bulb and arterial CO<sub>2</sub> oximetry measurements in healthy volunteers. *Anesth Analg* 2009; 108(Suppl): 1–104.
27. Budohoski K., Czosnyka M., Smielewski P., Varsos G.V., Kasproicz M., Brady K.M. Cerebral autoregulation after subarachnoid haemorrhage: comparison of three methods. *J Cereb Blood Flow Metab* 2013 Mar; 33(3): 449–456, <http://dx.doi.org/10.1038/jcbfm.2012.189>.
28. Steiner L., Pfister D., Strebel S., Radolovich D., Smielewski P., Czosnyka M. Near-infrared spectroscopy can monitor dynamic cerebral autoregulation in adults. *Neurocrit Care* 2009; 10(1): 122–128, <http://dx.doi.org/10.1007/s12028-008-9140-5>.
29. Diedler J., Zweifel C., Budohoski K., Kasproicz M., Sorrentino E., Haubrich C. The limitations of near-infrared spectroscopy to assess cerebrovascular reactivity: the role of slow frequency oscillations. *Anesth Analg* 2011 Oct; 113(4): 849–8457, <http://dx.doi.org/10.1213/ANE.0b013e3182285dc0>.
30. Highton D., Panovska-Griffiths J., Ghosh A., Tachtsidis I., Banaji M., Elwell C., Smith M. Modelling cerebrovascular reactivity: a novel near-infrared biomarker of cerebral autoregulation? *Oxygen Transport to Tissue XXXIV. Advances in Experimental Medicine and Biology* 2013; 765: 87–93, [http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-4989-8\\_13](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-4989-8_13).
31. Kim M., Durduran T., Frangos S., Edlow B.L., Buckley E.M., Moss H.E., et al. Noninvasive measurement of cerebral blood flow and blood oxygenation using near-infrared and diffuse correlation spectroscopies in critically brain-injured adults. *Neurocrit Care* 2010 Apr; 12(2): 173–180, <http://dx.doi.org/10.1007/s12028-009-9305-x>.
32. Zweifel C., Castellani C. Non-invasive monitoring of cerebrovascular reactivity with near infrared spectroscopy in head injured patients. In: *14th International Conference Intracranial Pressure and Brain Monitoring; 2010 Sept 12–16*. Tübingen, Germany; 2010; p. 48–49.
33. Gupta C.N., Palaniappan R. Novel analysis techniques for a brain biometric system. *Int J Medical Engineering and Informatics* 2008; 1(2): 266–273.
34. Zweifel C., Castellani G., Czosnyka M. Continuous assessment of cerebral autoregulation with near infrared spectroscopy in adults after subarachnoid hemorrhage. In: *14th International Conference Intracranial Pressure and Brain Monitoring; 2010 Sept 12–16*. Tübingen, Germany; 2010; p. 194–195.
35. Lemm S., Dickhaus T., Blankertz B., Müller K.R. Introduction to machine learning for brain imaging. *NeuroImage* 2011; 56(2): 387–399, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.11.004>.
36. Blankertz B., Dornhege G., Krauledat M., Müller K.R., Curio G. The non-invasive Berlin Brain–Computer Interface: fast acquisition of effective performance in untrained subjects. *NeuroImage* 2007; 37(2): 539–550, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.01.051>.
37. *Multidetector computed tomography in cerebrovascular disease*. Miles K.A., Eastwood J.D., König M. (eds). London: Informa UK; 2007; 192 p.
38. Taussky P., O’Neal B., Daugherty W.P., Luke S., Thorpe D., Pooley R.A., et al. Validation of frontal near-infrared spectroscopy as noninvasive bedside monitoring for regional cerebral blood flow in brain-injured patients. *Neurosurg Focus* 2012; 32(2): e2, <http://dx.doi.org/10.3171/2011.12.FOCUS11280>.
39. Brady K., Joshi B., Zweifel C., Smielewski P., Czosnyka M., Easley R.B., Hogue C.W.Jr. Real-time continuous monitoring of cerebral blood flow autoregulation using near-infrared spectroscopy in patients undergoing cardiopulmonary bypass. *Stroke* 2010; 41(9): 1951–1956, <http://dx.doi.org/10.1161/STROKEAHA.109.575159>.
40. Orihuela-Espina F., Leff D.R., James D.R.C., Darzi A.W., Yang G.Z. Quality control and assurance in functional near infrared spectroscopy (fNIRS) experimentation. *Phys Med Biol* 2010; 55(13): 3701–3724, <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/55/13/009>.
41. Takeuchi M., Hori E., Takamoto K., Tran A.H., Satoru K., Ishikawa A., et al. Brain cortical mapping by simultaneous recording of functional near infrared spectroscopy and electroencephalograms from the whole brain during right median nerve stimulation. *Brain Topogr* 2009; 22(3): 197–214, <http://dx.doi.org/10.1007/s10548-009-0109-2>.
42. Ou W., Nissild I., Radhakrishnan H., Boas D.A., Hämäläinen M.S., Franceschini M.A. Study of neurovascular coupling in humans via simultaneous magnetoencephalography and diffuse optical imaging acquisition. *NeuroImage* 2009; 46(3): 624–632, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.03.008>.
43. MacLeod D., Ikeda K., White W. Relationship of cerebral oximetry measured hemoglobin per volume of tissue to arterial blood hemoglobin. *Anesth Analg* 2008; 106: S–120.
44. Trofimov A.O., Yur’ev M.Yu., Voennov O.V. Mozgovoy krovotok i tserebral’naya oksigenatsiya u patientsov s cherepno-mozgovoy travmoy. Sopotavlenie dannykh perfuzionnoy komp’yuternoy tomografii i tserebral’noy infrakrasnoy spektroskopii [Cerebral blood flow and cerebral oxygenation in patients with craniocerebral injury. Comparison of perfusion computed tomography and cerebral infrared spectroscopy data]. *Ukrainskiy neyrokhirurgicheskiy zhurnal — Ukraine Neurosurgery Journal* 2013; 1: 40–45.
45. Wolf M., Ferrari M., Quaresima V. Progress of near-infrared spectroscopy and topography for brain and muscle clinical applications. *J Biomed Opt* 2007; 12(6): 062104, <http://dx.doi.org/10.1117/1.2804899>.
46. Leal-Noval S., Cayuela A., Arellano-Orden V., Marín-Caballeros A., Padilla V., Ferrándiz-Millón C., Corcia Y., et al. Invasive and noninvasive assessment of cerebral oxygenation in patients with severe traumatic brain injury. *Intensive Care Med* 2010; 36: 1309–1317, <http://dx.doi.org/10.1007/s00134-010-1920-7>.
47. Trofimov A.O., Kalentiev G.V., Aleynikov A.V. Ispol’zovanie tserebral’noy oksimetrii v ostrom periode tyazhelyo politravmy [The use of cerebral oximetry in acute period of severe polytrauma]. *Sovrem Technol Med — Modern Technologies in Medicine* 2012; 4: 64–67.
48. Smith M. Shedding light on the adult brain: a review of the clinical applications of near-infrared spectroscopy. *Phil Trans R Soc A* 2011; 36: 4452–4469, <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2011.0242>.
49. Ferrari M., Quaresima V. A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) development and fields

of application. *NeuroImage* 2012, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.03.049>.

50. Herrmann M.J., Huter T., Plichta M.M., Ehlis A.C., Alpers G.W., Mühlberger A., Fallgatter A.J. Enhancement of activity of the primary visual cortex during processing of emotional stimuli as measured with event-related functional near-infrared spectroscopy and event-related potentials. *Hum Brain Mapp* 2008; 29(1): 28–35, <http://dx.doi.org/10.1002/hbm.20368>.

51. Budohoski K., Zweifel C., Kasprovicz M., Sorrentino E., Diedler J., Brady K.M., et al. What comes first? The dynamics of cerebral oxygenation and blood flow in response to changes in arterial pressure and intracranial pressure after head injury. *Br J Anaesth* 2012 Jan; 108(1): 89–99, <http://dx.doi.org/10.1093/bja/aer324>.

52. Constantoyannis C., Sakellariopoulos G.C., Kagadis G.C., Katsakiori P.F., Maraziotis T., Nikiforidis G.C., Papadakis N. Transcranial cerebral oximetry and transcranial doppler sonography in patients with ruptured cerebral aneurysms and delayed cerebral vasospasm. *Med Sci Monit* 2007; 13(10): MT35–40.

53. Coyle S., Ward T., Markham C., McDarby G. On the suitability of near-infrared (NIR) systems for next-generation brain-computer interfaces. *Physiol Meas* 2004; 25(4): 815–822.

54. Hirshfield L.M., Chauncey K., Gulotta R., Girouard A., Solovey E.T., Jacob R.J.K., Sassaroli A., Fantini S. Combining electroencephalograph and functional near infrared spectroscopy to explore users' mental workload. *Foundations of Augmented Cognition. Neuroergonomics and Operational Neuroscience. Lecture Notes in Computer Science* 2009; 5638: 239–247, [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-02812-0\\_28](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-02812-0_28).

55. Hermes D., Vansteensel M.J., Albers A.M., Bleichner M.G., Benedictus M.R., Mendez Orellana C., Aarnoutse E.J., Ramsey N.F. Functional MRI-based identification of brain areas involved in motor imagery for implantable brain-computer interfaces. *J Neural Eng* 2011; 8(2): 025007, <http://dx.doi.org/10.1088/1741-2560/8/2/025007>.

56. Kanoh S., Murayama Y.M., Miyamoto K., Yoshinobu T.,

Kawashima R. A NIRS based brain-computer interface system during motor imagery: system development and online feedback training. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc* 2009; 2009: 594–547, <http://dx.doi.org/10.1109/IEMBS.2009.5333710>.

57. Nagaoka T., Sakatani K., Awano T., Yokose N., Hoshino T., Murata Y., et al. Development of a new rehabilitation system based on a brain-computer interface using near-infrared spectroscopy. *Oxygen Transport to Tissue XXXI. Advances in Experimental Medicine and Biology* 2010; 662: 497–503, [http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-1241-1\\_72](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-1241-1_72).

58. Wilson J., Palaniappan R. Analogue mouse pointer control via an online steady state visual evoked potential (SSVEP) brain-computer interface. *Journal of Neural Engineering* 2011; 8(2): 025026, <http://dx.doi.org/10.1088/1741-2560/8/2/025026>.

59. Sitaram R., Zhang H., Guan C., Thulasidas M., Hoshi Y., Ishikawa A., et al. Temporal classification of multichannel near-infrared spectroscopy signals of motor imagery for developing a brain-computer interface. *NeuroImage* 2007; 34(4): 1416–1427, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.11.005>.

60. Gratton G., Fabiani M. Fast optical imaging of human brain function. *Front Hum Neurosci* 2010; 4: 52, <http://dx.doi.org/10.3389/fnhum.2010.00052>.

61. Wriessnegger S.C., Kurzmann J., Neuper C. Spatio-temporal differences in brain oxygenation between movement execution and imagery: a multichannel near-infrared spectroscopy study. *Int J Psychophysiol* 2008; 67(1): 54–63, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2007.10.004>.

62. Tsubone T., Muroga T., Wada Y. Application to robot control using brain function measurement by near-infrared spectroscopy. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc* 2007; 2007: 5342–5345, <http://dx.doi.org/10.1109/IEMBS.2007.4353548>.

63. Gupta C.N., Palaniappan R., Swaminathan S. Novel analysis technique for a brain biometric system. *International Journal of Medical Engineering and Informatics* 2008; 1(2): 266–273.