

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ СИСТЕМЫ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВИ

А.С. Бессонов, И.В. Дронов, Ю.Ю. Колбас,  
Д.Г. Лапитан, Т.И. Соловьева

ЗАО “Объединение “Исток ЭОС”, Москва

e-mail: tigr\_eos@rambler.ru

*Рассмотрены вопросы проектирования медицинского аппаратно-программного комплекса, функционирующего на основе неинвазивных спектрофотометрических методов измерения параметров микроциркуляции крови, а также структуры его аппаратного и программного обеспечения. Особое внимание уделено описанию компьютерных моделей, использованных на различных этапах разработки.*

**Ключевые слова:** аппаратно-программный комплекс, функциональная диагностика, микроциркуляция крови, спектрофотометрические методы, проектирование, структура, компьютерное моделирование, среда графического программирования LabVIEW.

**Keywords:** hardware-software complex, functional diagnostics, blood microcirculation, spectrophotometric methods, design, structure, mathematical model, computer simulation, graphic programming environment LabVIEW.

## PECULIARITIES OF DESIGNING OF HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR FUNCTIONAL DIAGNOSTICS OF THE BLOOD MICROCIRCULATION SYSTEM

A.S. Bessonov, I.V. Dronov, Yu.Yu. Kolbas,  
D.G. Lapitan, T.I. Solovieva

ZAO Istok EOS Association, Moscow

e-mail: tigr\_eos@rambler.ru

*Problems of designing of the medical hardware-software complex functioning on the basis of non-invasive spectrophotometric methods for measuring the blood microcirculation parameters, as well as the complex hardware and software structures are considered. The particular attention is paid to the description of computer models used at different stages of the complex development.*

**Keywords:** hardware-software complex, functional diagnostics, blood microcirculation, spectrophotometric methods, designing, structure, computer simulation, graphic programming environment LabVIEW.

Подсистема микроциркуляции крови является структурно-функциональной единицей системы кровообращения человека, в которой происходит обмен веществ между кровью и тканями. Ее нарушения приводят к развитию многих заболеваний [1], и по результатам измерений параметров микроциркуляции крови можно судить о состоянии тканей, органов и организма в целом [2], т.е. проводить диагностику различных заболеваний.

Для оценки функционального состояния системы микроциркуляции крови, а также резервов микроциркуляции или их отсутствия при

развитии различных заболеваний, необходимо проводить измерения до, во время и после выполнения различных провокационных нагрузочных проб на систему микроциркуляции крови. При этом оценивается абсолютное изменение показателей, время латентного периода, время восстановления показателей после снятия нагрузки и ряд других параметров. Наиболее легко выполнимыми и генерализованными дозированными нагрузками являются физические упражнения, поэтому нужна максимальная свобода движения пациента с закрепленными на нем датчиками.

Одним из новых, перспективных и многообещающих направлений развития современных неинвазивных оптических и лазерных методов диагностики системы микроциркуляции крови является неинвазивная медицинская спектрофотометрия (НМС) [3]. Медицинские приборы НМС уже в течение многих лет используются в клинической практике. Стандартными приборами стали пульсовые оксиметры, обеспечивающие измерение артериальной сатурации и частоты пульса, лазерные доплеровские флоуметры, оптические тканевые оксиметры, измеряющие сатурацию оксигемоглобина в периферической смешанной крови [3–5].

Новый аппаратно-программный комплекс (далее АПК) “Гемотест-микро” предназначен для функциональной диагностики системы микроциркуляции крови в коже человека. В его основу были положены методы НМС и накожной термометрии. Аппаратно-программный комплекс отличается компактностью и портативностью, его средства сбора данных крепятся на теле пациента, а измерительная информация передается на компьютер врача по беспроводному интерфейсу связи. В данном комплексе используются известные методы функциональной диагностики, однако новым является возможность одновременного измерения параметров температуры тела (2 точки), частоты дыхания, пульса, оксигенации, сатурации (2 точки), объемное кровенаполнение (2 точки) в реальном масштабе времени без привязки пациента непосредственно к компьютеру.

При создании аппаратного, программного, информационного и другого обеспечения комплекса коллективом разработчиков были использованы современные информационные технологии, базирующиеся на компьютерном моделировании. Особенности их применения при проектировании диагностических приборов и комплексов НМС являются предметом обсуждения в предлагаемой статье. Полученный положительный опыт, которым делятся авторы статьи, может представлять интерес для специалистов в области медицинского приборостроения.

Высокая сложность решаемых АПК задач привела к их декомпозиции и разделению между различными вычислительными устройствами и построению иерархических структур как аппаратного, так

и программного обеспечения комплекса. Структуры аппаратной части и программного обеспечения (ПО) комплекса описываются в первых разделах статьи.

Как известно, компьютерное моделирование, применяемое при проектировании современных аппаратно-программных средств, способно значительно повысить эффективность данного процесса. Практически на всех этапах создания АПК авторами разрабатывались компьютерные модели составных частей системы, причем применяемый математический аппарат и информационные технологии обуславливались спецификой выполняемого этапа. Другими словами, в рассматриваемом случае было использовано так называемое *модельное проектирование* [6]. Описанию конкретных моделей составных частей рассматриваемого АПК посвящены центральные разделы данной статьи.

В заключение обсуждаются полученные достижения и указывается направление дальнейших работ, касающихся исследования и развития АПК.

**Аппаратное обеспечение АПК “Гемотест-микро”.** С точки зрения измерительной техники АПК для функциональной диагностики микроциркуляции крови является информационно-измерительной системой (ИИС). В ходе формирования технического задания (ТЗ) был определен такой состав измеряемых параметров, который обеспечивает реализацию комплексных методов функциональной диагностики системы микроциркуляции крови, соответствует современному этапу развития систем НМС. К измеряемым параметрам были отнесены:

- 1) тканевая сатурация оксигемоглобина смешанной периферической крови  $StO_2$ , %;
- 2) объемное кровенаполнение в области обследования  $Vb$ , %;
- 3) артериальная сатурация оксигемоглобина  $SaO_2$ , %;
- 4) частота пульса  $PR$ , уд./мин;
- 5) кожная температура  $T$ , °С;
- 6) частота дыхания  $BR$ , ед./мин.

Данные параметры, кроме частоты дыхания и пульса, должны измеряться отдельно в правой и левой частях тела человека.

Перечисленные требования ТЗ и определили состав средств измерений (СИ). Для осуществления таких измерений необходимы два тканевых спектрофотометрических анализатора (СФА), измеряющих  $Vb$  и  $StO_2$ , два пульсовых оксиметра (ПОК), измеряющих  $SaO_2$  и  $PR$ , два измерителя температуры (ИТ) и один измеритель частоты дыхания (ИД). Использование для определения частоты дыхания тканевых СФА в портативном приборе оказывается затруднительным из-за большого уровня электромагнитных и световых помех, создаваемых

электронными и светотехническими устройствами в медицинской лаборатории.

Дальнейший анализ разрабатываемой системы показал, что процессы сбора и обработки данных достаточно сложны и требуют значительных аппаратных и программных ресурсов. Одних только СИ насчитывается семь единиц, и каждое из них требует специального управления, считывания данных и проведения вычислений в соответствии с определенными алгоритмами.

Сложный процесс сбора и обработки данных в АПК потребовал разделения на более простые процессы и их распределения между различными устройствами и программами. Для реализации такого подхода в настоящее время используются ИИС, основанные на применении *многих микропроцессоров и микроконтроллеров*, а также *архитектура “клиент–сервер”*.

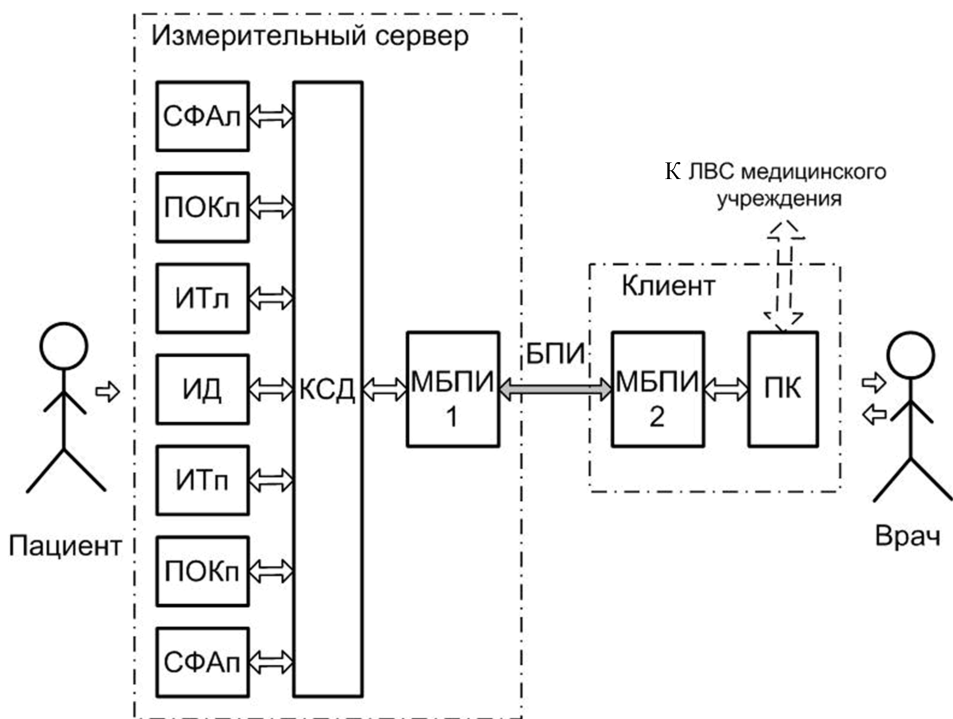
Современные СИ являются цифровыми программируемыми устройствами и строятся с использованием программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), микропроцессоров и микроконтроллеров. Для связи с вычислительными устройствами более высокого уровня или сетями измерительных устройств у них имеются стандартные цифровые интерфейсы (USB, RS-232, RS-485 и др.). Взаимодействие между вычислительным устройством, которым в рассматриваемом случае является компьютер сбора данных (КСД), и СИ осуществляется путем подачи команды и получения отклика, содержащего запрашиваемую информацию.

Системам на многих микроконтроллерах или микропроцессорах свойственна иерархичность. В АПК были образованы три уровня. На нижнем уровне находятся СИ, имеющие в своем составе микроконтроллеры, на среднем — КСД, а высший уровень образует ПК врача. Связь между уровнями осуществляется с помощью проводных и беспроводных стандартных интерфейсов.

При использовании архитектуры “клиент–сервер” система делится на клиентскую и серверную части. Клиентская часть, реализуемая на ПК врача, запрашивает необходимый сервис. В ответ на этот запрос на измерительном сервере, в состав которого входят КСД и СИ, запускаются сбор и предварительная обработка данных, результаты которых отсылаются клиенту, осуществляющему их обработку более высокого уровня.

Связь между клиентом и измерительным сервером осуществляется по стандартному компьютерному интерфейсу. Наиболее удобными среди них являются беспроводные интерфейсы (БПИ), обеспечивающие мобильность и независимость от кабельных линий связи.

Мобильность связи и портативность измерительного сервера для создаваемого АПК является необходимостью, так как во время функ-



**Рис. 1. Упрощенная структурная схема АПК “Гемотест-микро”**

циональной диагностики пациент, будучи подключенным к аппаратуре, должен выполнять тестовые физические упражнения. Среди БПИ следует выделить наиболее распространенные стандартные интерфейсы Bluetooth (IEEE 802.15.1) и Wi-Fi (стандарт IEEE 802.11). В первом случае создается соединение “точка-точка”, а во втором случае при необходимости возможно многоточечное соединение.

Упрощенная структурная схема АПК “Гемотест-микро”, удовлетворяющая приведенным ранее положениям, приведена на рис. 1.

Измерительный сервер имеет радиальную топологию. В центре сервера расположен КСД. К его портам с помощью стандартных интерфейсов USB, RS-232 или Ethernet подключены СИ, в состав которых вошли правый и левый СФА<sub>п</sub>, СФА<sub>л</sub>, правый и левый ПОК<sub>п</sub>, ПОК<sub>л</sub>, правый и левый ИТ<sub>п</sub>, ИТ<sub>л</sub> и ИД. Для подключения клиентской части имеется модем беспроводного интерфейса МБПИ<sub>1</sub>.

В составе клиентской части имеется ПК, также оснащенный МБПИ<sub>2</sub>. Этим ПК пользуется врач для проведения функциональной диагностики. Также ПК может быть связан с локальной вычислительной сетью (ЛВС) медицинского учреждения.

Для построения современных ИИС широко используется принцип модульности. Он особенно эффективен в случае, когда аппаратная часть системы в соответствии с поставленными измерительными задачами создается из готовых унифицированных модулей, входящих

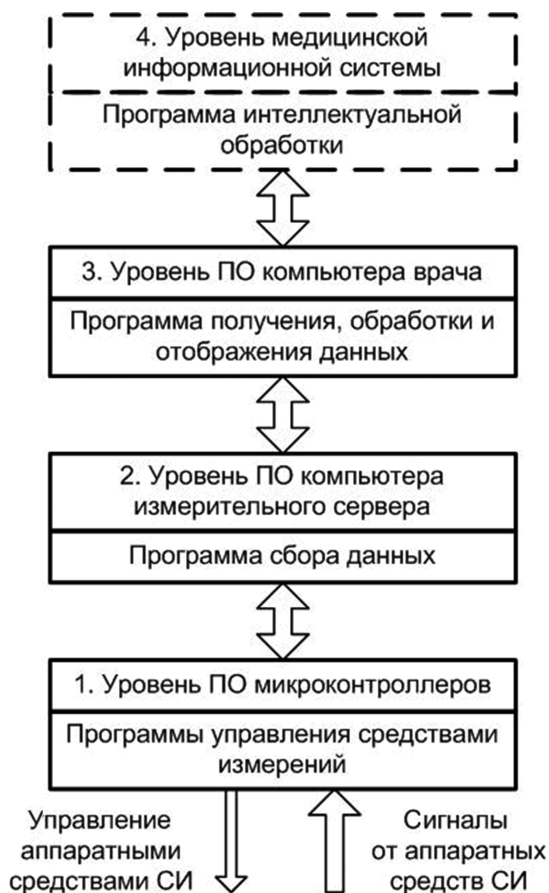
в серию определенного типового состава и выпускаемых различными фирмами-производителями [7]. Поэтому при разработке макета медицинского АПК “Гемотест-микро” в первую очередь анализировалась возможность использования готовых измерительных модулей. Поэтому были закуплены выпускаемые промышленностью пульсовые оксиметры и датчики дыхания [8, 9].

В качестве КСД был выбран одноплатный компьютер Helios 800МГц/Vortex86DX/ 256Мб ОЗУ/DIO стандарта PC/104 с низким энергопотреблением и средним уровнем производительности, объединяющий на одной плате высокоинтегрированный процессор и известную высокой точностью автокалибрующуюся схему сбора данных Diamond Systems. Для подключения СИ компьютер Helios имеет четыре порта USB 2.0, интерфейс 10/100Base-T Ethernet, два последовательных порта RS-232, два последовательных порта RS-232/422/485, а также шестнадцать 16-разрядных аналоговых входов и четыре 12-разрядных аналоговых выхода [10]. Как следует из рассмотренной конфигурации, имеющиеся средства не только позволяют решить поставленные измерительные задачи, но и обладают некоторой избыточностью, что может позволить в дальнейшем при тиражировании АПК выбрать более дешевый одноплатный компьютер.

Фактически из всех аппаратных средств, представленных на рис. 1, полноценной разработке подлежали только СФА, хотя этот процесс был облегчен благодаря известным идеологии и схемотехнике прибора “Спектротест” [4, 5], разработанного авторами в 2007 г. Однако использование одновременно с каналом “Спектротеста” стандартных оксипульсоксиметров, позволило упростить конструкцию: уменьшить число используемых светодиодов до трех, что снизило время одного измерения и позволило проводить измерение не в одной точке тела пациента, а сразу в двух без потери точности и с сохранением одновременности измерений.

**Структура ПО.** Поскольку каждое из входящих в состав АПК “Гемотест-микро” вычислительных устройств имеет программное управление, ПО комплекса, как и аппаратному обеспечению, свойственна иерархическая структура и деление на уровни (рис. 2), соответствующие структуре аппаратной части комплекса.

*Программы управления средствами измерений* образуют самый нижний, первый уровень, или уровень ПО микроконтроллеров. Эти программы управляют аппаратными средствами СИ, образующими измерительные каналы, получают от них измерительную информацию, осуществляют ее первичную обработку и передачу по стандартному интерфейсу в вычислительное средство более высокого уровня, которым является КСД, входящий в состав измерительного сервера. Первичная измерительная информация может представлять значения



**Рис. 2. Структура программного обеспечения**

физических параметров, характеризующих состояние объекта исследования (ОИ), примерами которых могут быть интенсивности, спектры, амплитуды.

Очевидно, что программы микроконтроллеров СИ, покупаемых в готовом виде, полностью определяются производителями и являются недоступными и неизменными. Для СИ, созданных в ходе проектирования комплекса, потребовалась разработка и отладка программ этого уровня.

*Программа сбора данных* компьютера измерительного сервера, относящаяся к второму уровню ПО, поочередно опрашивает и получает информацию от СИ, осуществляет ее вторичную обработку и передачу по БПИ компьютеру или нескольким компьютерам клиентов. Вторичная обработка может заключаться в определении диагностических параметров, которыми в конкретном случае являются параметры микроциркуляции крови.

*Программа получения, обработки и отображения данных* (ПООД), установленная на компьютере врача (клиента), получает диагностиче-

скую информацию, осуществляет ее обработку для сохранения в базе данных (БД) и отображения на экране монитора, а также формирует отчет о проведенной диагностике с возможностью распечатки на бумаге. Блок схемы программ сбора данных и получения, обработки и отображения данных представлены на рис. 3.

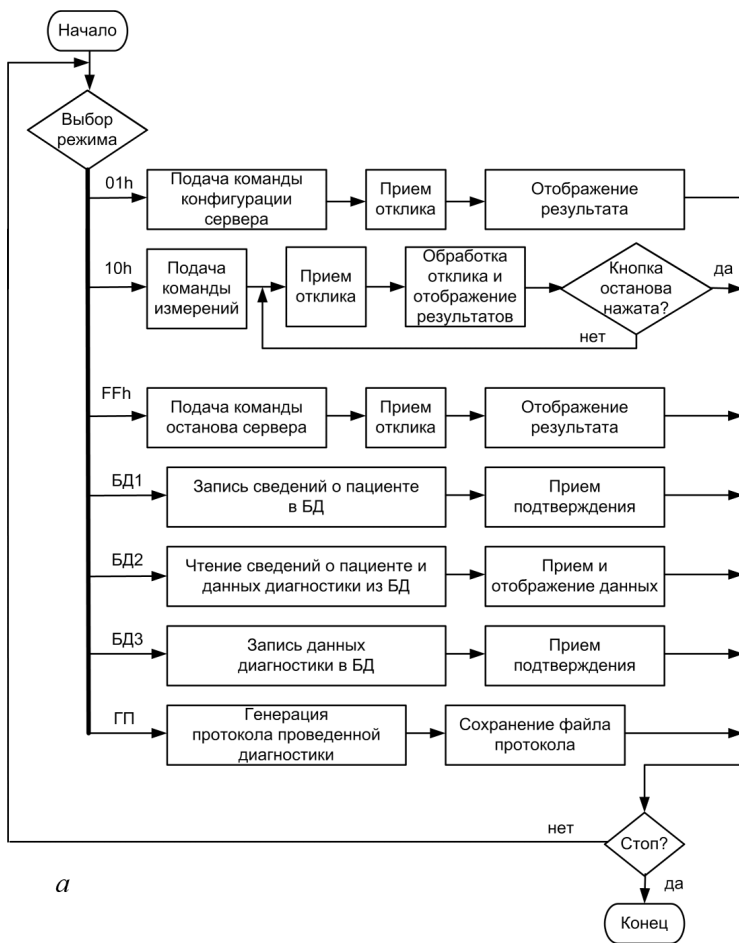
Формирование интерфейса пользователя — наиболее важная задача программы третьего уровня. Интерфейс пользователя ПООД должен обеспечивать возможность гибкого и логичного управления всеми составными частями системы на естественном и понятном врачу языке. Он должен обеспечивать возможность легко просматривать получаемую первичную диагностическую информацию, анализировать служебную информацию, выбирать и запускать необходимые процедуры обработки и анализа диагностических данных, сохранять с комментариями полученную информацию в БД и т.д.

Однако, хотя врачи и обладают базовыми знаниями в области биохимии и биофизики человека, для более оперативной и интегральной трактовки результата и формирования мнения о состоянии пациента нужны дополнительные сведения более узкого плана о значимости каждого из регистрируемых параметров, нормах содержания регистрируемых веществ у человека, возможных вариантах отклонения показателей от нормы для различных нозологических форм заболеваний и т.п. Эту функцию должен выполнять интеллектуальный уровень, на котором формируется медицинская информация, содержащая результат диагностики. Таким значимым медицинским результатом может являться подсказка со стороны системы о вероятности наличия различных функциональных нарушений в тканях, например, вероятности наступления необратимого некроза, воспаления, атрофии сосудов, при этом, безусловно, выбор и постановка окончательного диагноза остаются за врачом.

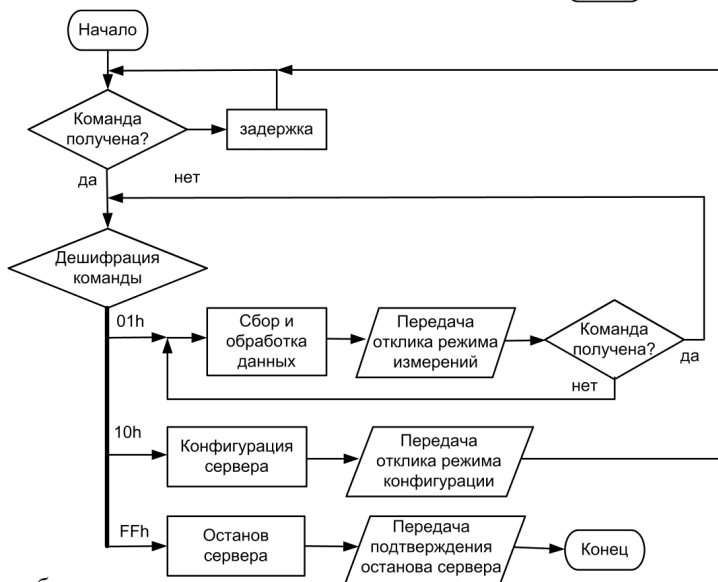
Как показано на рис. 2, интеллектуальной обработкой информации высшего четвертого уровня занимается медицинская информационная система, имеющая в своем составе базу знаний и по сути являющаяся экспертной системой или системой поддержки принятия решения [11]. Использование прерывистой линии для обозначения данного уровня было обусловлено тем, что программы интеллектуальной обработки в составе ПО АПК пока еще отсутствуют.

Описанное деление на уровни ПО АПК является достаточно условным с точки зрения распределения по ним решаемых подзадач и выполняемых функций. Так, низкоуровневая информация может обрабатываться программой более высокого уровня и наоборот. Например, вычисление диагностических параметров тканевой сатурации гемоглобина по данным, получаемым от разрабатываемого СФА, может выполнять программа ПООД на компьютере клиента, что может быть





а



б

Рис. 3. Блок-схемы программы сбора данных (а) и программы ПООД (б)

удобным для отладки алгоритма обработки данных. Вместе с тем, может быть закуплена плата ПОК, которая выдает уже вычисленные значения артериальной сатурации и частоты пульса. Обладая свободой функционального распределения, можно обеспечить повышение эффективности проектирования и дальнейшего использования ПО АПК.

*Программа ПООД.* Перечисленным в предыдущем разделе требованиям к интерфейсу пользователя удовлетворяет программа ПООД АПК “Гемотест-микро”. Она формирует на экране сменные страницы, каждая из которых имеет свое функциональное назначение. С их помощью можно проводить конфигурацию измерительного сервера, настройку и калибровку входящих в его состав СИ, взаимодействие с БД, записывая и считывая служебную и диагностическую информацию, запускать и останавливать процесс функциональной диагностики, наблюдать за его ходом, а также автоматически формировать протокол проведенной диагностики.

На рис. 4 изображена экранная страница “Измерения”. Здесь осуществляется запуск функциональной диагностики, во время которой программа ПООД управляет процессом получения данных с измерительного сервера и отображает диагностические параметры установленного состава на графических экранах и текстовых индикаторах. После выполнения диагностики с помощью соответствующих кнопок программа может быть остановлена, а полученные данные записаны в БД.

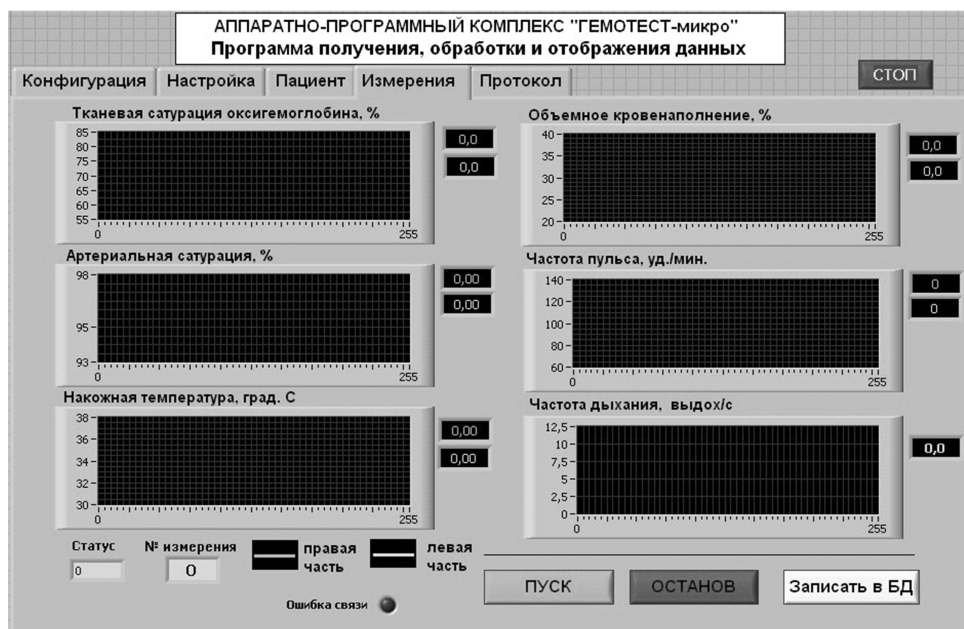


Рис. 4. Интерфейс пользователя программы ПООД

Программа ПООД была разработана на высоком уровне программирования в среде NI LabVIEW 7.1 (компания National Instruments, США). Данная среда, кроме возможности формирования многофункционального, выразительного и удобного в эксплуатации интерфейса пользователя, имеет множество других преимуществ [6, 12]. В частности, как это будет показано далее, LabVIEW является еще и средой моделирования, поддерживающей многие технологии этого процесса.

С помощью дополнительных средств LabVIEW программа ПООД взаимодействует с MS Office 2007. Средства MS Word используются для документирования результатов диагностики, а БД АПК управляется средствами MS Access. Такой подход очень удобен, так как MS Office хорошо знаком большинству компьютерных пользователей, в том числе и врачам.

**Модельное проектирование.** Компьютерное моделирование измерительных процессов в настоящее время проводится в большинстве НИР, связанных с исследованием свойств какого-либо объекта, с определением значений физических величин, со сбором и обработкой данных, а также в ОКР при проектировании новых электронных устройств и систем. Применение компьютерного моделирования автоматизирует процесс разработки новых технических изделий и повышает их качественные показатели.

Компьютерные модели разделяются по назначению и видам. Математические модели используются обычно на ранних этапах проектирования и разрабатываются в математических пакетах (средах), к которым относятся MathCAD, MATLAB, Maple и др. Схемотехническое моделирование также осуществляется в соответствующих средах — Micro-CAP, Multisim и др. Однако при проектировании описываемого комплекса наиболее широко была использована среда LabVIEW, поскольку она универсальна и позволяет проводить разнообразное моделирование как за счет своих базовых и дополнительных средств, так и за счет взаимодействия с другими средами моделирования, к которым относятся уже упомянутые MATLAB и Multisim [13].

Конечно, прежде всего моделированию подвергаются системы или их составные части, которые разрабатываются вновь. В рассматриваемом случае такая необходимость имела для разрабатываемых СФА и измерительного сервера. Моделирование же известных методов измерений и закупаемых в готовом виде СИ вряд ли необходимо.

При разработке СФА моделировался метод спектрофотометрических измерений и проводилось схемотехническое моделирование фотоусилителя, осуществляющего оптико-электрическое преобразование и нормализацию сигнала перед его преобразованием в цифровую форму. Имитационная модель измерительного сервера была использована

при создании ПО компьютера клиента. А при создании БД использовались CASE-средства, где была реализована ее информационная модель.

### **Моделирование метода спектрофотометрических измерений.**

В основе всех методов неинвазивной спектрофотометрии лежит различие коэффициентов поглощения света разных длин волн различными фракциями гемоглобина и иными составляющими биологической ткани, являющейся многокомпонентной и сильно рассеивающей свет средой. Оптические свойства практически всех форм гемоглобина в той или иной степени различны, что позволяет определить их содержание в крови. В частности, на длинах волн 470, 670 и 980 нм наблюдаются наибольшие различия коэффициентов молярной экстинкции для дезоксигемоглобина Hb и оксигемоглобина HbO<sub>2</sub> [13]. Подробно анализ биообъекта для целей спектрофотометрии был проведен нами ранее в работе [5] и Д.А. Рогаткиным с соавторами в работах [14, 15].

Погонный (транспортный) коэффициент поглощения излучения зависит от длины волны  $\lambda$  и определяется следующим образом [14]:

$$\mu_{\alpha}(\lambda) = \sum_i \varepsilon_i(\lambda)c_i,$$

где  $\varepsilon_i(\lambda)$  — коэффициент погонной (молярной) экстинкции для  $i$ -го биохимического компонента ткани;  $c_i$  — погонная (молярная) концентрация  $i$ -го компонента внутри тестируемой области.

В простейшей модельной расчетной схеме среда распространения излучения — кровь — может быть представлена как двухкомпонентная система, содержащая в себе только две основные фракции гемоглобина: HbO<sub>2</sub> и Hb. В этом случае для двух разных длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  (например, для 670 и 980 нм) будет справедлива система двух линейных алгебраических уравнений

$$\mu_a(\lambda_1) = \varepsilon_{\text{Hb}}(\lambda_1) \cdot C_{\text{Hb}} + \varepsilon_{\text{HbO}_2}(\lambda_1) \cdot C_{\text{HbO}_2};$$

$$\mu_a(\lambda_2) = \varepsilon_{\text{Hb}}(\lambda_2) \cdot C_{\text{Hb}} + \varepsilon_{\text{HbO}_2}(\lambda_2) \cdot C_{\text{HbO}_2}.$$

На основе известных концентраций находится параметр функциональной тканевой сатурации оксигемоглобина в крови

$$\text{StO}_2 = \frac{C_{\text{HbO}_2}}{C_{\text{HbO}_2} + C_{\text{Hb}}} \cdot 100 \%.$$

Как показано в работах [14, 15], значения  $\mu_a(\lambda_i)$  могут быть найдены по результатам измерения относительного коэффициента обратного рассеяния полубесконечной среды, которой является исследуемый участок тела пациента. Это измерение проводится путем сравнения данных измерений характеристик ОИ с набором рабочих имитационных мер (РИМ), обладающих различными оптическими свойствами в диапазоне измерений [15].

Описанная математическая модель измерительных процессов для двухкомпонентной/трехкомпонентной среды была сначала реализована в математической среде, а потом — в виде программы LabVIEW. В качестве излучателей были выбраны светодиоды инфракрасного, красного и зеленого свечения. LabVIEW-программа позволила менять значения оптических свойств ОИ и осуществить проверку работоспособности всех вычислительных алгоритмов, используемых для сбора и обработки данных. При неудовлетворительном результате моделирования могло быть принято решение о доработке измерительных процедур и вычислительных алгоритмов.

В результате моделирования метода спектрофотометрических измерений были разработаны программный модуль калибровки СФА с помощью РИМ и расчетный модуль, определяющий тканевую сатурацию оксигемоглобина смешанной периферической крови, объемное кровенаполнение в области обследования.

Оцениваемая методическая погрешность измерений не превышает 5–7%, так как исследуются сигналы в динамике и оценивается их изменение при функциональной диагностике, а такие хромофоры, как меланин не меняются во время проведения теста. Другие же компоненты крови, такие как карбоксигемоглобин составляют единицы процентов.

**Схемотехническое моделирование фотоусилителя.** Автоматизированное проектирование электронных устройств позволяет увеличить производительность труда и повысить качество разработок. Оно проводится в специальных средах схемотехнического моделирования, к которым относится NI Multisim. Среда Multisim отвечает всем современным требованиям, имеет обширные библиотеки компонентов и отличается удобством использования [16]. Но в последнее время у нее появилось еще дополнительное преимущество — возможность совместного использования со средой LabVIEW. При этом LabVIEW может быть сервером автоматизации [12], а Multisim клиентом и наоборот.

Multisim-модель фотоусилителя работает совместно с моделью LabVIEW передачи оптического излучения (рис. 5). Она может учитывать свойства излучателей, которыми являются светодиоды, и среды распространения — ОИ, а также шумы и помехи. Расчетное ослабление оптического сигнала, поступающего на кремниевый фотодиод, составило пять-шесть порядков, а регистрируемые сигналы — единицы микроампер.

Взаимодействие моделей осуществляется через файл измерительных сигналов формата LVM. Этот файл читается в схемотехнической модели элементом V3 (LabVIEW LVM Voltage), после чего полученные

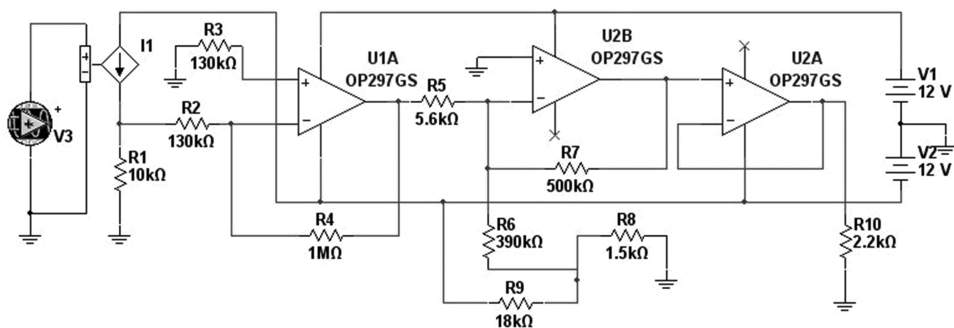


Рис. 5. Схемотехническая модель фотоусилителя

данные преобразуются элементом I1 в значения тока, составляющие единицы микроампер. Дальнейшее усиление сигнала проводится с помощью операционных усилителей OP297GS, модели которых имелись в библиотеке в готовом виде.

Проводя синтез и анализ схемы, можно добиться, чтобы фотоусилитель давал на выходе сигнал нужного уровня и без существенных нелинейных искажений. На рис. 6 представлены результаты моделирования. Здесь более тонкой линией с отметками в виде треугольничков показан входной сигнал (напряжение на резисторе R1), а более жирной — выходной сигнал (напряжение на резисторе R10). Левая ось ординат соответствует входному сигналу, а правая — выходному сигналу. Полученное схемотехническое решение можно использовать при изготовлении макета СФА.

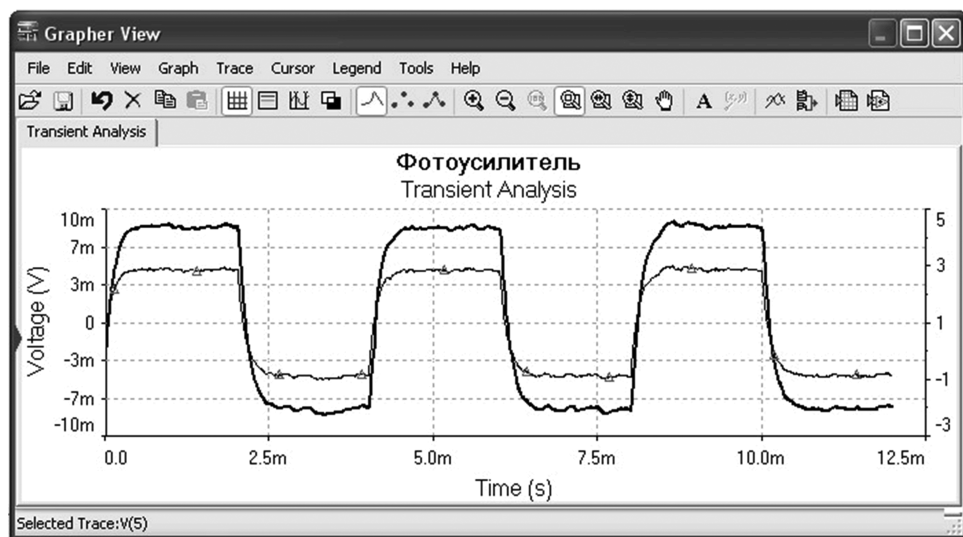


Рис. 6. Результаты схемотехнического моделирования в Multisim:

—Δ—Δ— — входной и — — — — — выходной сигналы

Учет в моделях динамических свойств позволяет определить, с какой задержкой нужно проводить аналого-цифровое преобразование с тем, чтобы переходные процессы закончились.

**Аппаратно-программная модель измерительного сервера.** В современных информационных, информационно-измерительных и информационно-управляющих системах программное обеспечение играет все более значительную роль. От него во многом зависят функциональные возможности и качественные показатели систем.

В соответствии с отчетами американской фирмы EMF [6] ПО несет ответственность за задержку 80 % проектов и за связанные с этим сложности дальнейшего проектирования. Среди средств решения возникающих при разработке ПО проблем называется модельное проектирование. В соответствии с этим подходом должны моделироваться составные части систем от мелких до самых крупных. Разработка ПО должна начинаться как можно раньше и до того, как станут доступны образцы аппаратной части системы.

При разработке АПК была создана имитационная модель измерительного сервера. Она может быть также названа аппаратно-программной моделью, поскольку объединяет в единое целое и имитирующую программу, и ПК с модемом БПИ. Модель, имея средства указанного состава, может подключаться к клиенту и играть роль сервера, принимая запросы и выдавая данные в соответствии с разработанным протоколом обмена данными. Выдаваемые данные берутся из заранее сформированных эталонных массивов, не содержащих ошибок и соответствующих типовому протеканию процесса измерений (диагностики).

Разработка имитационной модели измерительного сервера отличалась низкой трудоемкостью благодаря применению стандартных средств LabVIEW. Использование модели позволило без ОИ, СИ и КСД разработать и отладить ПО компьютера клиента, включая программу ПООД и БД. Это сделало возможным распараллеливание процессов разработки различных составляющих системы и привело к сокращению сроков проведения этих работ.

Поскольку такого рода имитационные модели работают в соответствии с теоретической моделью разрабатываемой системы, их также можно отнести к средствам тестирования. С их помощью можно отлаживать алгоритмы обработки данных, проверять каналы связи частями системы, протокол их взаимодействия, правильность функционирования ПО, включая обработку высокого уровня, работу с БД и формирование отчетов и протоколов.

**Информационная модель данных.** Рост значимости ПО современных АПК сопровождается повышением его сложности. Поэтому

отличительной особенностью современного этапа развития технологий программирования является широкое использование средств автоматизации создания компьютерных программ и их сопровождения. Эти средства, как известно, получили название CASE [17, 18], и часто без них просто нельзя обойтись.

При проектировании АПК “Гемотест-микро” было использовано типичное CASE-средство, используемое при создании БД. Это Sybase Power Designer 15.0 [18]. При использовании Power Designer сначала разрабатывается информационная модель данных одного из видов (объектная, концептуальная или физическая модели), по которой затем автоматически генерируется файл SQL-скрипта. Наконец, при его запуске в соответствующей СУБД создается готовая к использованию БД.

На рис. 7 изображена физическая модель данных, по которой была создана текущая версия БД, входящая в состав ПО компьютера клиента. Модель содержит три таблицы. Таблица SEANS, куда записываются сведения о проведенных сеансах диагностики, связана отношениями с таблицей PATIENT и таблицей DOCTOR, которые соответственно содержат информацию о проходящих диагностику пациентах и проводящих ее докторях. На рисунке можно прочитать сведения о содержащихся в таблицах полях и их типах, об имеющихся ключах и индексах. Например, в таблице PATIENT первичный ключ стоит у поля NIB, в которое записывается номер истории болезни, а в поле

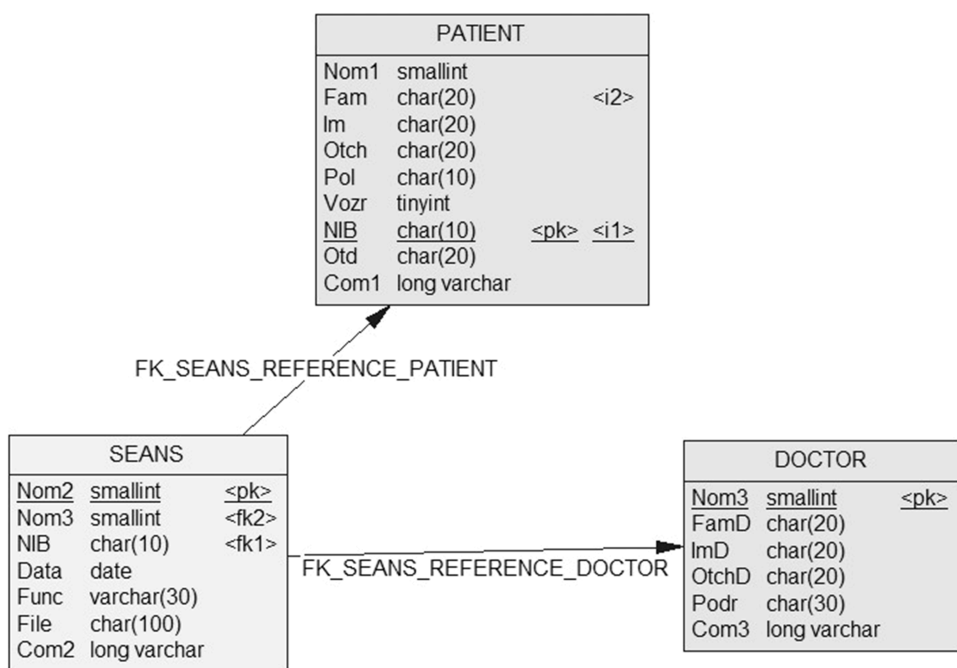


Рис. 7. Физическая модель данных



File таблицы SEANS содержит имя файла, куда собрана диагностическая информация. В составе модели также имеются необходимые для обработки данных триггеры и процедуры, создание которых также автоматизировано.

После анализа представленной модели может возникнуть вопрос, стоит ли создавать такую простую информационную модель данных, поскольку подобную БД несложно создать средствами СУБД. На это можно ответить, что в рассматриваемом случае это необходимо по следующей причине. Имеющаяся БД будет значительно усложняться, так как ее в дальнейшем предполагается использовать в составе медицинской информационной системы (см. рис. 2), а доработку и развитие гораздо проще осуществлять на информационных моделях, пользуясь средствами автоматизации.

**Заключение.** Проектирование АПК для функциональной диагностики микроциркуляции крови проводилось с использованием современных технологий создания информационно-измерительных систем. Это нашло свое отражение при разработке структур аппаратного и программного обеспечения комплекса, обеспечивающих технологичность изготовления, надежное функционирование и способность развития системы.

При детальном проектировании широко использовали средства автоматизации проектирования систем и компьютерное моделирование. Был создан ряд математических, схмотехнических и информационных моделей составных частей системы разного уровня. Результаты моделирования были непосредственно использованы при разработке спектрофотометрического анализатора, алгоритмов обработки данных, нескольких программных модулей и базы данных, устанавливаемой на компьютере клиента. Среди средств программирования и моделирования, используемых на стадиях НИР и ОКР, авторы отдали предпочтение продуктам компании National Instruments, имеющим существенные преимущества по сравнению с аналогами.

Описанные технологии проектирования позволили завершить этот процесс в установленный срок. По проектной документации был изготовлено два макета АПК, прошедших испытания, подтвердившие их работоспособность и соответствие требованиям технического задания. Поэтому можно утверждать, что использование выбранных технологий упростило поставленные задачи, избавило от многих возможных ошибок и в значительной мере гарантировало положительный результат.

Работы текущего этапа касаются создания на основе макетов АПК новых методов функциональной диагностики системы микроциркуляции крови и разработку элементов медицинской информационной

системы, позволяющих получать на выходе системы информацию медицинского уровня.

*Проект создания АПК “Гемотест-микро” был поддержан на конкурсной основе Министерством образования и науки Российской Федерации (госконтракт № 16.512.11.2003 от 10 февраля 2011 года).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поленов С. А. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2008. – Т. 7. – № 1 (25). – С. 5–19.
2. Куприянов В. В., Караганов Я. Л., Козлов В. И. Микроциркуляторное русло. – М.: Медицина, 1975. – 213 с.
3. Рогаткин Д. А., Лапаева Л. Г. Перспективы развития неинвазивной спектрофотометрической диагностики в медицине // Медицинская техника. – 2003. – № 4. – С. 31–36.
4. Афанасьев А. И., Рогаткин Д. А., Сергиенко А. А., Шумский В. И. Новое поколение приборов неинвазивной спектрофотометрии: оптический тканевый оксиметр и анализатор объемного кровенаполнения мягких биологических тканей “Спектротест” // Доктор.ру. – 2007. – № 4. – С. 45–47.
5. Бессонов А. С., Колбас Ю. Ю., Рогаткин Д. А. Виртуальные диагностические приборы в медицинской неинвазивной спектрофотометрии // Технологии живых систем. – 2007. – Т. 4. – № 1. – С. 50–57.
6. Жуков К. Г. Модельное проектирование встраиваемых систем в LabVIEW. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 688 с.
7. Денисенко В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – 608 с.
8. Медицинское оборудование ООО “Микролюкс” [сайт]. URL: <http://www.microlux.ru/index.php/production> (дата обращения: 18.07.2012).
9. Медицинские датчики: информационный портал [сайт]. URL: <http://med-datchiki.ru/index.htm> (дата обращения: 18.07.2012).
10. Helios. Одноплатный компьютер стандарта PC/104 с интегрированной подсистемой УСО (процессорная плата) // Электронный каталог российского представительства корпорации MicroMax Systems. URL: <http://www.micromax.ru/catalog/product.shtml?i=3:1-1:34> (дата обращения 18.07.2012).
11. Кобринский Б. А., Зарубина Т. В. Медицинская информатика. – М.: ИЦ “Академия”, 2009. – 192 с.
12. Тревис Дж., Кринг Дж. LabVIEW для всех. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 904 с.
13. Физиология человека. В 3 т. / Пер. с англ.; под ред. Р. Шмидта и Г. Тевса. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
14. Дунаев А. В., Жеребцов Е. А., Рогаткин Д. А. Методы и приборы неинвазивной медицинской спектрофотометрии: пути обоснования специализированных медико-технических требований // Приборы. – 2011. – № 1 (127). – С. 40–48.
15. Рогаткин Д. А., Дунаев А. В., Лапаева Л. Г. Метрологическое обеспечение методов и приборов неинвазивной медицинской спектрофотометрии // Медицинская техника. – 2010. – № 2 (260). – С. 30–37.
16. Шестеркин А. Н. Система моделирования и исследования радиоэлектронных устройств Multisim 10. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 360 с.
17. Иванов Г. С. Технология программирования: Учебник. – М.: КНОРУС, 2011. – 336 с.

Алексей Станиславович Бессонов — канд. техн. наук., доцент, старший научный сотрудник ЗАО “Объединение “Исток ЭОС”. Автор более 50 научных работ в области информационно-измерительной техники.

A.S. Bessonov — Ph. D. (Eng.), assoc. professor, senior researcher of ZAO Istok EOS Association. Author of more than 50 publications in the field of information and measuring technology.

Игорь Владимирович Дронов — ведущий инженер ЗАО “Объединение “Исток ЭОС”. Автор пяти научных работ в области микропроцессорной техники.

I.V. Dronov — leading engineer of ZAO Istok EOS Association. Author of 5 publications in the field of microprocessor technology.

Юрий Юрьевич Колбас — директор ЗАО “Объединение “Исток ЭОС”. Автор 27 научных работ в области лазерной гироскопии и лазерной медицины.

Yu.Yu. Kolbas — director of ZAO Istok EOS Association. Author of 27 publications in the field of laser gyroscope and laser medicine.

Денис Григорьевич Лапитан — инженер ЗАО “Объединение “Исток ЭОС”, аспирант Московского института электроники и математики. Автор двух научных работ в области лазерной биомедицины.

D.G. Lapitan — engineer of ZAO Istok EOS Association, post-graduate of Moscow Institute of Electronics and Mathematics. Author of 2 publications in the field of laser biomedicine.

Татьяна Ивановна Соловьева — канд. техн. наук. Автор более 70 научных работ в области квантовой электроники и лазерной биомедицины.

T.I. Solovieva — Ph. D (Eng.). Author of more than 70 publications in the field of quantum electronics and laser biomedicine.