ISSN 0025-8075

# Медицинская техника

3



МОСКВА · МЕДИЦИНА · 2006

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2006

УДК 615.471.03:616-072.7]:681.518

*А. Ш. Авшалумов[1], К. В. Судаков[2], Г. Ф. Филаретов[1]*

# НОВАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СИСТЕМНОЙ ДИАГНОСТИКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ОРГАНОВ ЧЕЛОВЕКА

[1]Московский институт кибернетической медицины, [2]ГУ Научно-исследовательский институт нормальной физиологии им. П. К. Анохина РАМН, Москва
E-mail:info@cybermed.ru

Информационные аспекты жизнедеятельности с каждым годом привлекают внимание все большего числа исследователей. Постепенно формируется новое направление медицины — информационная медицина [2—14].

Информация — неотъемлемое свойство кибернетических систем. Как известно, еще Н. Винер отмечал, что "информация есть информация, а не материя и энергия". Наиболее отчетливо информационная составляющая проявляется в деятельности саморегулирующихся функциональных систем живых организмов [5, 8, 9], в которых постоянно циркулирует информация об их состоянии. Информация в живых организмах отражает взаимодействие молекул, клеток, тканей, органов и систем и в значительной степени определяется колебательными процессами, присущими молекулам и живым клеткам (в частности, их мембранам и отдельным структурам). Информационную нагрузку несут специальные информационные молекулы.

Как показали исследования [5, 10], межсистемные информационные связи в организме наиболее чувствительны к стрессовым нагрузкам и нарушаются в первую очередь без видимых изменений внутриклеточных молекулярных связей. Последние нарушаются лишь при далеко зашедших патологических процессах.

Рассматриваемая новая технология диагностики базируется на анализе информационной стороны функционирования и взаимодействия разных органов человека в нормальных условиях и при патологических изменениях. При этом авторы использовали классический системный подход, при котором система определяется как набор взаимосвязанных элементов. Представление об организме как саморегулирующейся системе дано И. П. Павловым, который писал: "Человек есть, конечно, система, как и всякая другая в природе, подчиняющаяся неизбежным для всей природы законам; но система в горизонте нашего современного научного видения единственная по высочайшему саморегулированию..., система в высочайшей степени саморегулирующаяся, сама себя поддерживающая, восстанавливающая" [5, 10].

Уже в 20-х годах XX столетия физики на основе работ В. Гейзенберга и Н. Бора пришли к заключению, что мир — не скопление отдельных объектов, а сеть отношений между различными частями единого целого. Вселенная и отдельные тела на Земле могут рассматриваться как сеть взаимосвязанных событий. Эти события осуществляются за счет постоянного обмена между отдельными составляющими (телами, объектами) веществом, энергией и информацией. В то же время с позиций теории функциональных систем, предложенной П. К. Анохиным, организм представляет собой слаженное взаимодействие функциональных систем молекулярного, клеточного, гомеостатического и поведенческого уровней [10]. При этом каждый отдельный орган, включенный в ту или иную функциональную систему, отражает по голографическому принципу состояние ее полезного для организма результата [4, 6, 13]. Вопрос, таким образом, заключается в том, чтобы объективизировать в организме информационное взаимодействие отдельных клеток и органов.

## Теоретическое обоснование информационной технологии системной диагностики

В последнее время в практической медицине все большее внимание уделяется методам неинвазивной диагностики, отвечающим требованиям обеспечения полной безопасности обследования, его комфортности, оперативности, всесторонности при сохранении высокой достоверности количественных результатов. В связи с этим разработка и практическая апробация новых подходов к построению диагностической аппаратуры при оперативном анализе функционального состояния различных органов и систем человека представляются актуальной задачей. Это особенно важно с учетом современных тенденцией в оценке состояния человека на основе системного подхода и теории функциональных систем [8, 9, 11].

Одно из перспективных направлений создания такого рода диагностической аппаратуры основано на идее использования информационных свойств сверхмаломощного радиоизлучения миллиметрового диапазона, излучаемого организмом человека или другими биообъектами. Такая информация может быть выделена с помощью соответствующих алгоритмов обработки исходного сигнала [1]. Очевидно, что, учитывая только физико-химические факторы, не всегда удается адекватно объяснить процессы, происходящие в организме человека. Наряду с физико-химическими процессами в тесном взаимодействии с ними в организме человека формируются, передаются, воспринимаются, сохраняются и анализируются информационные сигналы различной природы. При этом существенным становится вопрос о физических носителях соответствующих информационных сигналов, обеспечивающих эффективные процессы управления.

Согласно воззрениям школы акад. Н. Д. Девяткова, одним из таких носителей информации могут быть миллиметровые волны, вырабатываемые отдельными клетками организма человека в процессе их жизнедеятельности. С точки зрения физических свойств миллиметровые волны как носители информации обладают рядом уникальных свойств, а именно [1]:

— монохроматические излучения миллиметрового или крайне высокочастотного (КВЧ) диапазо-

на фактически не проходят сквозь земную атмосферу и в окружающей природе практически отсутствуют; это означает, что отсутствуют и внешние помехи для организации межклеточного информационного обмена даже при очень слабом уровне таких сигналов;

— высокая информационная емкость сигналов миллиметрового диапазона. Учитывая, что средний линейный размер живой клетки составляет величину порядка $10^{-5}$ м, для обеспечения необходимого разнообразия сигналов управления длины возбуждаемых волн должны быть очень малыми по сравнению с указанным размером, и в этом смысле миллиметровые волны оказываются оптимальными;

— малые энергозатраты на формирование некоторого объема информации в миллиметровом диапазоне, что весьма существенно для живых организмов.

С момента появления в 60-е годы пионерских работ по биоэффектам миллиметровых волн появилось большое число различных публикаций, касающихся разных аспектов данной проблемы [15]. Однако в целом подавляющее большинство работ посвящено использованию маломощного КВЧ-излучения в лечебных и профилактических целях, когда антенна является излучающей, т. е. связано с задачей анализа внешнего воздействия излучения КВЧ-диапазона на биологические объекты. Исследования вопросов использования собственного излучения в КВЧ-диапазоне отдельных клеток и клеточных конгломератов для целей диагностики практически не проводились.

Известно, что передача сигналов от клетки к клетке осуществляется через межклеточное пространство, причем сами эти сигналы имеют различную физическую природу и порождаются совокупностью взаимосвязанных физико-химических процессов. Одним из элементов сигнального пространства, сопровождающего жизнедеятельность организмов на клеточном уровне, являются электромагнитные поля (ЭМП), в том числе и КВЧ-диапазона.

Согласно современным представлениям [1], механизм генерации электромагнитного поля в этом диапазоне связан с колебаниями заряженных клеточных мембран, поддерживаемыми за счет энергии метаболизма, в результате чего клетки приобретают свойства электромеханических генераторов, своего рода "клеточных излучателей". Микроструктура клеточных мембран — совокупность мембран митохондрий — обеспечивает возникновение дипольной компоненты, причем процесс излучения оказывается тесно связанным с акустическими колебаниями мембран.

Установлено, что акустомеханическая мощность клеточного вибратора составляет величину порядка $10^{-14}$ Вт, а собственное ЭМП клетки, образующееся в результате акустомеханических колебаний заряженных клеточных мембран, являющихся диполями, имеет мощность порядка $10^{-23}$ Вт. Поля клеток в агрегациях взаимодействуют друг с другом в моделях клеточных осцилляторов, множество которых и порождает суммарное ЭМП от определенной агрегации, некоторой части органа или органа в целом.

Собственные ЭМП клеток являются стохастическими по своей природе и при отсутствии соответствующих информационных сигналов управления неупорядочены по частотам, фазам, направленности вектора излучения и поляризации. Однако априорная их неупорядоченность предполагает (учитывая общую антиэнтропийную тенденцию структурирования самоорганизующихся биосистем) появление при определенных условиях кооперативного излучения. Оно тем более вероятно, если учесть наличие управляющих сигналов, координирующих деятельность клеточных ассоциаций, тканей и органов как составных частей функциональных систем. В связи с этим можно говорить о явлении стохастического резонанса, существенно увеличивающего эквивалентную мощность излучения совокупности совместно функционирующих клеток. Именно это излучение доступно непосредственному измерению с помощью высокочувствительных приемников.

По мнению большинства исследователей, исходное поле КВЧ-диапазона модулируется низкочастотными сигналами с частотными характеристиками, соответствующими динамике основных физиологических процессов и ритмам организма и его отдельных частей. Наличие такой модуляции (скорее всего частотной) подтверждается как с помощью специальных экспериментальных исследований, так и косвенно — наличием повышенной эффективности КВЧ-терапии с использованием модулированного воздействия [1].

Излучения КВЧ-диапазона достаточно быстро затухают в тканях организма, имея ограниченный радиус распространения от источника излучения. Поскольку измерение такого излучения в целях оперативной диагностики возможно только с помощью приемников, реагирующих на поверхностные излучения тканей (с отдельных участков кожного покрова), вопрос о транспорте сигналов от внутренних органов к поверхности весьма существен.

Существует несколько возможных трактовок такого транспорта, имея в виду, что сам факт наличия информации о состоянии внутренних органов и даже отдельных клеточных агломераций в излучении КВЧ-диапазона, снимаемого с поверхности тела, является достаточно убедительно доказанным. Считается, что имеется три вероятных канала распространения электромагнитных излучений в живых организмах:

- по мембранам нервных волокон или по микротрубчатым структурам, располагающимся вдоль аксоплазмы, или через глиальные клетки, окружающие мембраны нервов;
- с помощью клеток кровеносной и лимфатической систем; хотя распространение когерентных волн через среды, циркулирующие по элементам гуморальной регуляции, невозможно, клетки, генерирующие такие колебания, благодаря явлению взаимной синхронизации колебаний могут устанавливать связь между различными частями организма по этому каналу;
- система точек акупунктуры.

В процессе жизнедеятельности важную информационную роль играют низкочастотные модулирующие колебания. Если считать, что эти колебания также имеют электромагнитную природу, то соответствующие волны, возникающие во внут-

ренней среде организма, будут затухать относительно слабо, достаточно свободно распространяясь от внутренних слоев организма к поверхностным.



Рис. 1. Функционирование диагностического комплекса.

### Диагностические возможности технологии

Считается, что существует определенная корреляция между нарушениями тех или иных функций организма, дефектами в работе отдельных органов и патологическими изменениями их клеток. При этом такие изменения на начальных стадиях заболевания могут не проявлять себя сколько-нибудь заметным образом во внешней симптоматике. Любое заболевание организма изменяет протекание метаболических процессов в клетках, инициируя тем самым процессы их функциональной перестройки и связанные с ними вариации спектров излучения собственных ЭМП. По сути образ внутриклеточного нарушения кодируется в частоте возбуждающихся в мембранах акустоэлектрических волн, амплитуде этих колебаний, их пространственном распространении, а также в виде изменения ритмики (частотных составляющих) самих физиологических (биохимических) процессов и сопутствующих им низкочастотных (НЧ) электромагнитных колебаний. Можно предполагать, что спектр электромагнитных колебаний во всем возможном частотном диапазоне будет изменяться в зависимости от функционального состояния контролируемого объекта. При этом патологически измененные клетки, ткани или органы будут продуцировать дисгармоничные электромагнитные колебания. Возможно двоякое проявление подобных дисгармоничных колебаний:

— в КВЧ-псевдошумовом спектре, связанном с ЭМП собственных излучений клеток; наличие патологии проявится в виде изменения участка спектра вблизи некоторой характерной частоты, т. е. путем изменения или перераспределения суммарной мощности КВЧ-излучения по частотному диапазону;

— в спектре НЧ модулирующего сигнала (или иначе — в спектре НЧ-огибающей КВЧ-излучения); патология может проявиться, с одной стороны, путем изменения участка НЧ-спектра вблизи некоторой характерной низкой частоты, т. е. путем изменения или перераспределения мощности НЧ-излучения, а с другой стороны, путем появления дополнительных весьма маломощных компонент иной, не шумоподобной природы (например, в виде апериодических случайных импульсов); такие компоненты в силу своей маломощности могут почти не сказываться на форме спектральной характеристики, но иметь важное диагностические значение. Иными словами, под действием патогенных факторов могут возникать новые источники электромагнитных колебаний, не характерные для нормального организма.

С точки зрения использования факта появления и характера дисгармоничных колебаний для диагностики вторая форма проявления патологии на клеточном уровне представляется более важной. Это связано с тем, что обнаружить изменения в спектре НЧ-огибающей КВЧ-излучения с технической точки зрения существенно легче, чем выявить изменения спектра мощности собственно КВЧ-сигнала. В этом случае необходимы не просто сверхвысокочувствительные антенны, а антенны, способные перестраиваться по частоте, что технически в настоящее время вряд ли осуществимо. Кроме того, очевидно, что объем полезной диагностической информации, содержащейся в модулирующем НЧ-сигнале, будет существенно большим.

Идея непосредственного использования КВЧ-излучения биообъектов в качестве диагностического средства оказалась весьма сложной для ее практической реализации. Основная трудность связана с исключительно малой мощностью генерируемых организмом ЭМП и, что еще существеннее, с отсутствием уверенности в принципиальной возможности эффективного их приема с помощью приемников излучения, традиционно используемых в радиофизике и технических приложениях.

Лишь применение новейших разработок в этой области, оригинальных аппаратно-программных и алгоритмических решений позволило принципиальным образом повысить уровень диагностических возможностей рассматриваемого подхода и создать описываемый далее медицинский КВЧ-диагностический комплекс ДКМ-1. Его с полным правом можно отнести к диагностическим средствам нового поколения, обладающим принципиально новыми возможностями по сравнению с существовавшими ранее образцами.

### Практическая реализация информационной технологии системной диагностики

Медицинский КВЧ-диагностический комплекс ДКМ-1 состоит из трех основных аппаратных частей, составляющих его базовое техническое обеспечение:

1) антенно-измерительный блок;
2) интерфейсный узел;

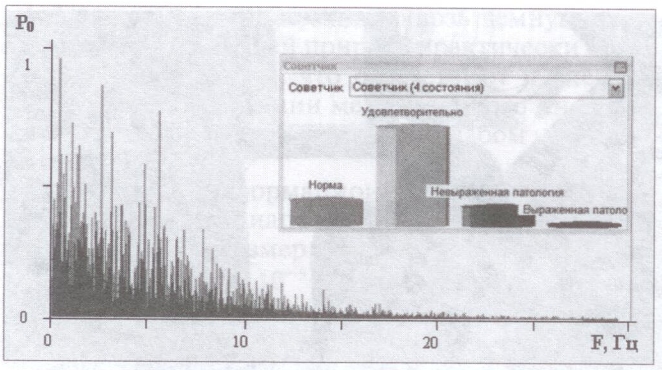


Рис. 2. Усредненная периодограмма и столбчатая диаграмма для практически здоровых мужчин-добровольцев.

3) блок обработки накопления и представления информации.

*Антенно-измерительный блок* предназначен для приема электромагнитных волн миллиметрового диапазона, излучаемых биологическими объектами. Он состоит из антенного модуля и устройства управления. Антенный модуль содержит сверхчувствительную антенну, настроенную на длину волны принимаемого излучения, преобразователь, усилитель промежуточной частоты, демодулятор с низкочастотным фильтром, схему калибровки и автоподстройки измерительного тракта. Он размещен на специальном штативе, позволяющем перемещать блок в пространстве, менять ориентацию оси антенны, фиксировать ее положение в определенной точке.

*Интерфейсный узел* предназначен для преобразования аналогового сигнала, поступающего от антенно-измерительного блока, в цифровую форму и ввода цифровых данных в блок обработки, накопления и представления информации.

*Блок обработки, накопления и представления информации* реализован с помощью персональной ЭВМ типа IBM PC с соответствующим системным и прикладным программным обеспечением.

Функционирование комплекса происходит следующим образом. пациент располагается лежа на кушетке (рис. 1 на 1-й странице обложки). Приемная антенна с помощью штатива подводится к поверхности тела пациента на расстояние примерно 5 мм в точке, ближайшей к исследуемому органу или ткани, располагая продольную ось антенны перпендикулярно поверхности тела.

Антенно-измерительный блок осуществляет прием излучения, усиление соответствующего электрического сигнала и выделение НЧ-модулирующей составляющей. Выделенная НЧ-составляющая поступает на аналого-цифровой преобразователь интерфейсного узла, с помощью которого производится ее ввод в компьютер для последующей обработки и определения необходимых диагностических характеристик. Результаты такой обработки запоминаются в базе данных и индицируются на экране дисплея.

Неотъемлемой составной частью комплекса является его программно-алгоритмическое обеспечение, включающее в себя:

- общесистемные программные средства;
- программу управления съемом и накоплением исходных данных, поступающих через интерфейсный узел от антенно-измерительного блока;
- программу реализации взаимодействия с медицинским персоналом, визуализации информации и управления комплексом;
- систему управления базой данных;
- программные средства предварительной цифровой обработки данных (предварительная фильтрация, удаление аномальных наблюдений, обнаружение систематических трендов);
- программу первичной обработки (определение спектральных характеристик сигнала с различными спектральными окнами, выделение систематических и разностных компонент);
- программу выделения и анализа диагностических признаков с использованием одномерного статистического классификатора;
- многомерный нейросетевой классификатор, реализующий автоматизированную диагностическую процедуру и работающий в режиме советчика, указывающего на наиболее вероятное функциональное состояние обследуемого органа по четырем градациям: "норма", "удовлетворительно", "невыраженная патология", "выраженная патология".

Базовым принципом, заложенным в основу программно-алгоритмического обеспечения комплекса, является принцип максимальной объективизации при анализе и интерпретации результатов диагностики на основе использования алгоритмов искусственного интеллекта. С этой целью на этапе ввода комплекса в действие реализовывался режим обучения, в ходе которого с его помощью было обследовано большое число пациентов. Обследовались как нормально функционирующие органы практически здоровых людей, так и больные органы пациентов с клинически установленным диагнозом. В результате в памяти компьютера были сформированы своего рода "электронные портреты" (образы), соответствующие различным функциональным состояниям органов по указанным четырем градациям. В последующем в режиме нормальной эксплуатации эти образы используются при работе классификаторов, осуществляющих автоматизированную диагностику функционального состояния того или иного органа.

Обследования, проводимые с помощью микроволнового комплекса, совершенно безвредны для пациентов с любыми заболеваниями и для обслуживающего медицинского персонала, поэтому они могут повторяться с любой требуемой частотой. Относительная простота диагностических процедур, их кратковременный характер обеспечивают формирование практически одномоментного порт-

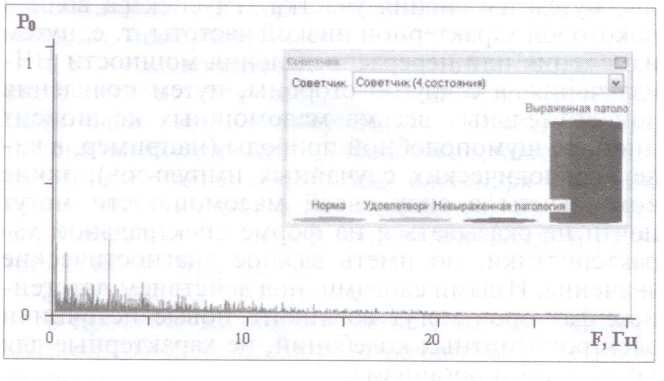


Рис. 3. Типичный вид периодограммы и столбчатой диаграммы при тяжелой патологии.

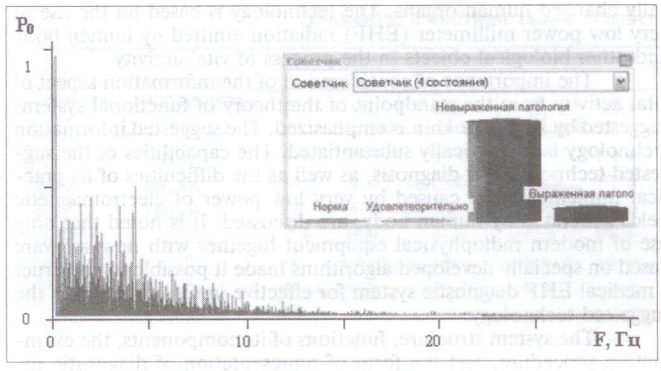


Рис. 4. Типичный вид периодограммы и столбчатой диаграммы при патологии средней тяжести.

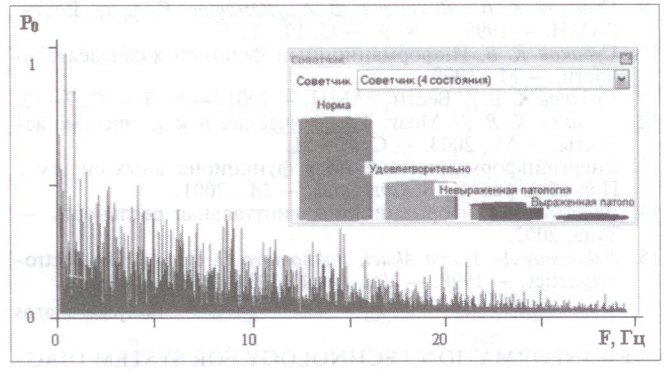


Рис. 5. Типичный вид периодограммы и столбчатой диаграммы при относительно слабой патологии.

рета функционального состояния различных органов пациента в их взаимосвязи и взаимозависимости, т. е. позволяют в полной мере реализовать принцип системности в оценке состояния здоровья человека и его резервном потенциале.

Как показывает практика, микроволновый медицинский комплекс может быть успешно использован для проведения диагностических и мониторинговых исследований в лечебно-профилактических учреждениях, диагностических центрах, клиниках; при скрининговых исследованиях; для массового профилактического осмотра населения.

Диагностические возможности комплекса можно проиллюстрировать рядом характерных примеров. На рис. 2—5 представлены фрагменты экранных форм, содержащие результаты обработки информации, полученной с помощью комплекса в ходе обследования, а именно:

— исходные периодограммы, характеризующие распределение по частоте $F$ относительной мощности $P_0$ НЧ-модулирующей составляющей КВЧ-сигнала, воспринимаемого антенной, в информативном для целей диагностики диапазоне (до 30 Гц с шагом разрешения по частоте 0,01 Гц); в зависимости от функционального состояния обследуемого органа периодограмма будет изменяться, принимая тот или иной характерный вид;

— столбчатые диаграммы, отражающие результаты автоматизированной классификации функционального состояния исследуемого органа с помощью нейросетевого классификатора по указанным ранее четырем градациям; каждый столбец диаграммы представляет собой вероятностную оценку правдоподобия отнесения функционального состояния обследуемого органа к определенной градации и может изменяться в пределах от нуля до единицы.

На рис. 2 приведены усредненные периодограмма и соответствующая столбчатая диаграмма, полученные в ходе обследования 350 практически здоровых мужчин (добровольцев) в возрасте от 26 до 42 лет.

Каждый доброволец прошел предварительный отбор с помощью цикла обязательных исследований, включавших физикальные обследования, ЭКГ в 12 стандартных отведениях, ультразвуковое обследование внутренних органов, общепринятые лабораторные и биохимические анализы. При использовании диагностического комплекса исследовались печень, щитовидная железа (правая и левая доля), почки. После определения индивидуальных периодограмм и столбчатых диаграмм производилось усреднение каждой спектральной линии периодограмм и находились средние значения столбцов диаграмм. Найденные таким способом усредненные периодограмма и столбчатая диаграмма, представленные на рис. 2, могут рассматриваться как некоторые образцы, характерные для здорового человека.

При обследовании с помощью комплекса более чем 700 пациентов с верифицированными диагнозами выявлены существенные изменения в периодограммах, коррелирующие с уровнем патологических отклонений, что нашло свое отражение и на соответствующих столбчатых диаграммах нейросетевого классификатора.

В частности, на рис. 3 приведена периодограмма, полученная при обследовании правой доли печени пациента Н., 42 лет, с циррозом печени, обусловленным гепатитом С; нейросетевой классификатор совершенно справедливо отнес данный случай к разряду тяжелых патологий.

На рис. 4 представлены периодограмма и столбчатая диаграмма пациента А., 38 лет, с диффузно-токсическим зобом (исследовалась левая доля щитовидной железы).

Наконец, на рис. 5 приведена периодограмма, полученная при исследовании правой почки пациента В., 33 лет, с хроническим пиелонефритом.

Анализ формы и характерных особенностей периодограмм в сочетании с использованием полученных на их основе количественных диагностических признаков и данных нейросетевого классификатора позволяет врачу наглядно выявить наличие нарушений (патологии) в функционировании того или иного органа, в том числе с учетом его взаимосвязей с другими органами, количественно оценить степень нарушения функций как отдельных органов, так и функциональных систем организма.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Девятков Н. Д., Голант М. Б., Бецкий О. В.* Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности. — М., 1991.
2. *Зилов В. Г., Судаков К. В., Эпштейн О. И.* Элементы информационной биологии и медицины. — М., 2000.
3. *Илларионов В. Е.* Основы информационной медицины: Учеб. пособие. — М., 2004.
4. Информационные медико-биологические технологии / Под общ. ред. В. А. Княжева, К. В. Судакова. — М., 2002.
5. Информационные модели функциональных систем / Под общ. ред. К. В. Судакова, А. А. Гусакова. — М., 2004.
6. Моделирование функциональных систем / Под общ. ред. В. А. Викторова, К. В Судакова. — М., 2000.
7. *Судаков К. В.* Рефлекс и функциональные системы. — Н. Новгород, 1997.
8. *Судаков К. В.* // Вестн. РАМН. — 1999. — № 5—6. — С. 5—10.