

УДК 537.86.523.164

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СОБСТВЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА В ДЕЦИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН

*В. С. Троицкий, В. И. Абрамов, И. Ф. Белов, В. П. Горбачев,
А. В. Густов, В. М. Плечков, Л. К. Сизьмина*

Разработан радиотермограф, позволяющий проводить бескровные измерения температуры в глубине человеческого тела. Принцип действия прибора основан на измерении собственного теплового радиоизлучения тела. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования радиотермографа для контроля за изменением температуры внутри тела в диагностических целях

Радиофизические методы исследований жизнедеятельности живых организмов находят все более широкое применение в медицине и биологии. В последние годы внимание исследователей привлекла возможность разработки диагностического метода, основанного на приеме собственного электромагнитного излучения тела человека, обусловленного тепловым движением электронов в биологических тканях. Интенсивность этого излучения пропорциональна температуре тех областей тела, из которых оно выходит [1]. Принимая излучение тела человека в радиодиапазоне, например, на дециметровых волнах, мы можем измерять температуру отдельных участков, расположенных в глубине человеческого тела.

Достоинством радиометрического метода измерений глубинных (висцеральных) температур по сравнению с имеющимися является бескровность, безболезненность и безопасность для пациента. Этот метод в дальнейшем изложении именуется методом СВЧ термографии, а соответствующий прибор для его реализации — СВЧ термографом.

Целью данной работы является выяснение возможностей использования собственного теплового радиоизлучения тела человека в дециметровом диапазоне длин волн для измерения температуры внутренних органов.

Толщина излучающего слоя на фиксированной длине волны зависит от электрических свойств биологических тканей. Некоторые из характеристик приведены в табл. 1 [2-4]. Их анализ свидетельствует, что глубина проникновения электромагнитной волны, а следовательно, и глубина радиоизлучающего слоя растет с длиной волны и, например, в диапазоне волн от 3 до 30 см для жировой и костной тканей составляет соответственно от 3 до 17 см, а для мышечной ткани — от 0,3 до 3 см. Именно температура этих слоев ответственна за измеряемую нами интенсивность радиоизлучения. Таким образом, измеряемая нами температура равна средней температуре излучающих слоев.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Собственное тепловое радиоизлучение человеческого тела имеет очень слабый уровень энергии. Например, в диапазоне волн 3—30 см при нормальной температуре энергия теплового радиоизлучения тела

составляет примерно 10^{-21} Вт/см².Гц. Тем не менее этот уровень энергии может быть измерен с помощью радиоприемных систем; аналогичных используемым в радиоастрономии.

Таблица 1

Параметры электромагнитных волн в биологических средах (мышцы, кожа и др. ткани с высоким содержанием воды)

Длина волны в воздухе, см	Проводимость, S/m	Глубина проникновения, см	Коэффициент отражения	
			граница воздух—мышцы	граница мышцы—жир
32,8	1,60	3,04	0,772	0,519
10	2,26	1,61	0,751	0,495
3,75	7,65	0,411	0,744	0,513

Параметры электромагнитных волн в биологических средах (жир, кости и др. ткани с низким содержанием воды)

Длина волны в воздухе, см	Проводимость, mS/m	Глубина проникновения, см	Коэффициент отражения	
			граница воздух—жир	граница жир—мышцы
32,8	55,6—147	17,7	0,417	0,519
10	110—234	9,74	0,406	0,495
3,75	255—431	4,61	0,371	0,513

В наших исследованиях был применен радиометрический приемник, разработанный в НИРФИ под руководством В. В. Хрулева. Приемник собран по известной схеме модуляционного радиометра. Его характеристики приведены в табл. 2.

Таблица 2

λ , см	Постоянная времени наблюдений, с	Среднеквадратичная чувствительность, К	Полоса приема, МГц	Вид регистрации
32	16	0,08	30	КСП-4

В работе [6] сообщалось, что основная трудность использования СВЧ термографии, особенно на дециметровых волнах, состоит в создании датчика температуры (антенны) СВЧ термографа. Во-первых, необходимо обеспечить возможность согласования антенны с разными участками человеческого тела и, во-вторых, целесообразно использовать антенну со сравнительно небольшой апертурой. Естественно, имеют значения и другие требования: механические, теплоизоляционные, эстетические, но именно первые два в основном обеспечивают точность измерений радиоизлучения человеческого организма. Для СВЧ термографа на $\lambda \approx 32$ см была создана антенна, подобная предлагаемой в работе [7]. Антенна представляет собой открытый перестраиваемый щелевой резонатор, окруженный закороченным с одного конца четвертьволновым металлическим цилиндром. При измерениях осуществлялся непосредственный контакт с поверхностью кожи. КСВН антенны в 5-процентной полосе частот для определенных участков тела не превышает 1,25. Согласование антенны с различными участками тела может осуществляться путем изменения длины щели. Коэффициент полезного действия антенны составляет не менее 0,9.

Кратко рассмотрим два метода измерения. Первый из них — абсолютный метод, при котором выход радиометра калибруется по эталонам с известной температурой, а значения измеряемых температур зависят при этом от точности применяемой аппаратуры.

Второй метод — относительный, при котором точное значение температуры не измеряется, а регистрируется величина, пропорциональная разности температур двух участков тела или изменению температуры на одном и том же участке до и после какого-либо воздействия. Относительный метод более прост и точен, так как систематические ошибки при измерениях исключаются.

Процедура абсолютных измерений сводится к тому, что попеременно записываются на конечном регистраторе (самописец или ЭВМ) величины, пропорциональные измеряемым температурам эталонов T_1 , T_2 и тела человека T_3 , т. е. значения n_1 , n_2 , n_3 , причем $T_2 > T_3 > T_1$. Взяв разности показаний выходного прибора $n_3 - n_1$, $n_2 - n_1$, а затем их отношения, найдем, что температура тела определится равенством

$$T_3 = T_1 + (T_2 - T_1) \frac{n_3 - n_1}{n_2 - n_1}.$$

При выводе были сделаны существенные предположения идентичности коэффициентов отражений от эталонов и от исследуемых участков тела. Предполагалось также постоянство температуры материала антенны во время измерений. В качестве калибровочных эталонов использовалась вода, находившаяся в двух термостатах с температурами T_1 , T_2 . Их значения поддерживались с точностью до $0,1^\circ\text{C}$. Условие равенства коэффициентов отражений от эталонов и от тела человека достигалось путем согласования антенны с измеряемыми объектами, а также подбора концентрации NaCl, растворенной в воде.

Проверка возможностей метода абсолютных измерений с применением расчетной формулы и соблюдением сделанных выше допущений была проведена путем сопоставления кинетической температуры жидкости, измеренной термометром и определенной по радиоизлучению этой жидкости, на длине волны $\lambda \approx 32$ см.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Аппаратура и методика, разработанные в НИРФИ, были применены авторами для измерений температуры тела по его радиоизлучению на волне $\lambda \approx 32$ см.

Ряд экспериментов подтвердил глубинное происхождение измеряемых нами температур. Приведем результаты двух из них.

Пациент натощак выпивал стакан холодной (18°C), а спустя 1 час стакан горячей воды (56°C). После приема холодной воды через 30 секунд температура в области проекции желудка снижалась на $1-1,5^\circ\text{C}$ и восстанавливалась до исходной у разных пациентов через 6—30 минут. После приема горячей воды температура той же области тела, измеренная тем же СВЧ термографом возрастала на $1-2^\circ\text{C}$, но рост ее происходил медленнее и наблюдался в ряде случаев только через 3—4 минуты. Время восстановления первоначальной температуры составило 20—30 минут.

Методические и аппаратные разработки дали возможность провести достаточно детально сравнение висцеральных и поверхностных температур, измеренных соответственно СВЧ термографом и электро-термометром в 38 точках у 20 практически здоровых лиц.

Оказалось, что глубинные температуры во всех случаях превышают поверхностные на $1-3^\circ\text{C}$. Наиболее низкие глубинные температуры зарегистрированы на конечностях (31°C). Наиболее высокие (35°C)

и, заметим, стабильные — на туловище и голове, в тех участках, которые принято относить к «ядру» тела. СВЧ термографом на длине волны $\lambda \approx 32$ см было проведено обследование 23 больных с патологией желудочно-кишечного тракта и заболеваниями головного мозга. Измерения показали наличие повышенного уровня радиоизлучения, а следовательно, и повышенной температуры глубинных отделов в области проекции пораженных органов. При некоторых заболеваниях отмечалась наиболее убедительная гипертермия.

Метод СВЧ термографии может оказаться весьма полезным для исследования реакции организма на прием некоторых лекарственных средств. Этот метод, например, позволил выяснить, какие температурные изменения происходят в глубинных отделах мозга при воздействии на человека никотиновой кислотой. Прямых и бескровных методов подобных исследований до применения СВЧ термографии не существовало. Пациенту внутривенно вводилось 6 мл 1% раствора никотиновой кислоты. В области головы непрерывно регистрировались как поверхностная, так и внутренняя температуры. Оказалось, что поверхностная температура через 2 минуты поднялась на 1,5°C и через 30 минут вернулась к исходному значению. Внутричерепная температура, измеренная СВЧ термографом, поднималась медленнее, чем первая, и ее максимальный прирост (2°C) отмечался через час после введения препарата. К 80-й минуте глубинная температура все еще оставалась выше первоначальной на 1°C.

Результаты исследований собственного теплового радиоизлучения тела человека, приведенные выше, с учетом работ в этом направлении других авторов [6, 8] показывают перспективность использования радиоизлучения человеческого организма для создания достаточно информативного и в то же время безопасного диагностического метода.

В заключение авторы благодарят Е. П. Семенову, В. Д. Трошина, а также Е. А. Аранжерева, В. С. Демидову, Т. Н. Добрынину, А. И. Шмелеву за помощь в выполнении данных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Троицкий В. С. — Астрон. ж., 1955, 31, вып. 6, с. 511.
2. Пресман А. С. Электромагнитные поля и живая природа. — М.: Наука, 1968.
3. Минин Б. А. СВЧ и безопасность человека. — М.: Сов. радио, 1974.
4. Джонсон К. К., Гай А. У. — ТИИЭР, 1972, 60, № 6, с. 49.
5. Красюк И. П., Розенберг В. И. Корабельная радиолокация и метеорология. — Л.: Судостроение, 1970.
6. Barret A. H., Myers P. S. — Science, 1975, 190, № 4215, p. 669.
7. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот. — М.: Энергия, 1968
8. Хиндин Х. — Электроника, 1979, 52, № 8, с. 88.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
12 мая 1980 г.

INVESTIGATION RESULTS OF INHERENT HUMAN BODY RADIATION IN DECIMETER WAVELENGTH

*V. S. Troitskij, V. I. Abramov, I. F. Belov, V. P. Gorbachev, A. V. Gustov,
V. M. Plechkov, L. K. Siz'mina*

A radiotermograph is developed which permits to make bloodless measurements of temperature in the depth of the human body. The principle of the device operation is based on measurement of the body inherent radiation. Results obtained testify to the possibility of the radiotermograph utilization for the control of the temperature measurement inside the body for diagnostic purposes.