

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р

ордена Трудового Красного Знамени
Научно-исследовательский радиопизический институт (НИРФИ)

Препринт № 131

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОБСТВЕННОГО
ТЕПЛОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЕГО ВНУТРЕННИХ
ОРГАНОВ

В.С.Троицкий
В.И. Абрамов
Е.А.Аранжереев
И.Ф. Белов
В.П.Горбачев
А.И. Густов
В.С.Демидова
Т.Н.Добрынина
В.М.Плечков
Л.К.Сизьмина
А.И.Шмелева

Горький - 1979 г.

А н н о т а ц и я

Разработан радиотермометр, позволяющий проводить бескровные измерения температуры различных органов человеческого тела с точностью $0,1 \pm 0,2$ градуса. Принцип действия прибора основан на измерении собственного теплового радиоизлучения тела.

Предварительные результаты свидетельствуют о возможном использовании прибора для контроля за изменениями температуры внутри тела и для диагностических целей.

Одним из важнейших признаков состояния здоровья человека является температура человеческого тела. Будучи универсальным проявлением активного энергетического обмена в организме, температура тела постоянно интересует медиков и биологов.

В последние годы ведется интенсивная разработка методов измерения температуры тела, основанных на приеме собственного теплового электромагнитного излучения живого организма. Сущность этих методов состоит в том, что интенсивность электромагнитного излучения тела, вызванного тепловым движением электронов пропорциональна температуре тех слоев, из которых это излучение выходит. При методе инфракрасной термографии [1] используется собственное тепловое излучение тела на длине волны $\lambda \approx 10$ мк. При этом измеряется поверхностная температура кожи. В ряде случаев крайне важным является определение температуры внутренних органов. Такую информацию до недавнего времени могли получить лишь вживлением термоэлектродов непосредственно в исследуемый орган. Можно предположить, что применение радиометрического метода (метода СВЧ-термографии) в значительной мере может решать эту задачу, причем совершенно безболезненно и безопасно для человека.

Целью данной работы является выяснение возможностей использования собственного теплового радиоизлучения тела человека в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн для измерения температуры внутренних органов и для диагностики ряда заболеваний.

Толщина излучающего слоя l_3 на фиксированной длине волны λ зависит от гистологических особенностей и электрических свойств биологических тканей. Достаточно подробно эти свойства описаны в работах Пресмана [2], Минина [3], Джонсона и Гая [4], Терещенко [5] и других. Некоторые из этих характеристик приведены в табл. 1. Анализ электрических свойств свидетельствует, что глубина проникновения электрической 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 пропорциональна измеряемой нами интенсивности радиоизлучения.

В общем случае величина l_3 на фиксированной длине волны определяется равенством, при котором оптическая толщина τ равна 1, т.е.

$$\int_0^{l_3} \gamma_\lambda(l) dl = 1, \quad (1)$$

где γ_λ — коэффициент поглощения, в предположении однородности слоя и отсутствия рассеяния радиоволн на неоднородностях в тканях согласно, например, [7] равен:

$$\gamma_\lambda = \frac{\sqrt{-\epsilon' + \sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2}}}{\sqrt{2}}, \quad (2)$$

ϵ' и ϵ'' — соответственно вещественная и мнимая части диэлектрической проницаемости вещества.

Приведенные соотношения лишь в принципе освещают суть дела, т.к. мы не учитываем многослойную структуру биологических тканей, а определяем среднюю температуру излучающих слоев в апертуре антенны.

Т а б л и ц а 1

Параметры электромагнитных волн в биологических средах (мышцы, кожа и др. ткани с высоким содержанием воды)		Параметры электромагнитных волн в биологических средах (жир, кости и др. ткани с низким содержанием воды)							
Длина волны в воздухе, см	Проводимость	Глубина проникновения	Коэффициент отражения						
			Граница "воздух-мышцы"	Граница "жир-мышцы"					
32,8	1,60	3,04	0,772	0,519	Длина волны в воздухе, см	Глубина проникновения	Коэффициент отражения		
							Граница "воздух-жир"	Граница "жир-мышцы"	
10	2,26	1,61	0,751	0,495	32,8	55,6-147	17,7	0,417	0,519
3,75	7,65	0,411	0,744	0,513	10	110-234	9,74	0,406	0,495
					3,75	255-491	4,61	0,371	0,513

Собственное тепловое радиоизлучение человеческого тела имеет очень слабый уровень энергии. В диапазоне волн $3 + 30$ см при нормальной температуре энергия теплового радиоизлучения тела составляет 10^{-21} Вт/см²Гц. Тем не менее этот уровень энергии может быть измерен с помощью радиоприемных систем, аналогичным используемым в радиоастрономии [6, 11].

В наших предварительных исследованиях использовались два радиометрических приемника, разработанных в НИРФИ. Один из них на длину волны $\lambda \approx 3,3$ см, разработанный под руководством В.Л.Рахлина, другой на $\lambda \approx 30$ см разработанный под руководством В.В.Хрулева. Оба приемника собраны по известным схемам модуляционных радиометров. Их характеристики приведены в табл. 2.

Результаты измерений фиксировались на ленте самописца, а также вводились в мини-ЭВМ.

Т а б л и ц а 2

λ , см	Постоянная времени наблюдений,с	Среднеквадратичная чувствительность, К	Полоса приема, МГц	Вид ре- гистрации
3.30	16	0.2	300	КСП-4
30	16	0.08	30	

В работе [8] отмечалось, что основная трудность использования СВЧ-термографии, особенно на дециметровых волнах, состоит в создании приемных систем (датчиков СВЧ-термографа). Во-первых, необходимо обеспечить возможность согласования антенны с разными участками человеческого тела и, во-вторых, сравнительно небольшую апертуру антенны. Естественно, имеют значения и другие требования, как-то: механические, теплоизоляционные, эстетические, но именно первые два в основном обеспечивают

точность измерений радиоизлучения человеческого организма. При измерениях глубинных температур необходимо свести к минимуму эффекты рассеяния антенны вне измеряемых участков и рассогласования антенны на границах раздела антенна-воздух, воздух-тело. Для уменьшения названных мешающих факторов антенну целесообразно располагать непосредственно на коже пациента.

В СВЧ-термографе на длине волны 3,3 см использовался или открытый конец волновода или волноводная секция, суженная до запредельных размеров, заполненная диэлектриком. Для СВЧ-термографа на $\lambda \approx 30$ см была создана антенна, подобная описанной в работе [9]. Антенна представляет собой открытый перестраиваемый щелевой резонатор, окруженный закороченным с одного конца металлическим цилиндром длиной в четверть длины волны. При измерениях осуществлялся непосредственный контакт с поверхностью кожи. КСВН антенны в 5% полосе частот для определенных участков тела не превышает 1,25. Согласование антенны с телом может осуществляться путем изменения размеров щели. Коэффициент полезного действия антенны η составляет не менее 0,9.

Как уже отмечалось принимаемый поток радиоизлучения на длине волны λ пропорционален средней температуре участка тела, из которого мы ведем прием излучения.

Кратко рассмотрим два метода измерения.

Первый из них абсолютный метод, при котором выход радиометра калибруется по эталонам с известной температурой, а значения измеряемой температуры зависят при этом от точности применяемой аппаратуры.

Второй метод — относительный, при котором точное значение температуры не измеряется, а регистрируется величина, пропорциональная изменению температуры одного участка тела по сравнению с другим или изменению температуры на одном и том же участке до и после какого-либо воздействия. Относительный метод более прост и точен, т.к. систематические ошибки при измерениях исключаются.

Процедура абсолютных измерений сводится к тому, что попеременно записываются на конечном регистраторе (самописец или ЭВМ) величины, пропорциональные измеряе-

мым температурам эталонов T_1 , T_2 и тела человека T_T , т.е. значения n_1 , n_2 , n_T причем $T_2 > T_T > T_1$. Взяв разницы показаний выходного прибора: $n_T - n_1$, $n_2 - n_1$, а затем их отношения найдем, что температура тела определяется соотношением

$$T_T = T_1 + (T_2 - T_1) \frac{n_T - n_1}{n_2 - n_1} \quad (3)$$

При выводе (3) были сделаны существенные предположения равенства 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 2-х термостатах с температурами T_1 , T_2 . Их значения поддерживались с точностью до $0,1^\circ\text{C}$. Условия равенства коэффициентов отражений от эталонов и от тела человека выполнялось путем согласования антенны с измеряемыми объектами, а также подбора концентрации NaCl , растворенной в воде. В дальнейшем предполагается использование эталонов, структура которых по электрическим свойствам будет близка к соответствующим параметрам исследуемых участков тела.

Проверка возможностей метода абсолютных измерений с применением расчетной формулы (3) и соблюдением сделанных выше допущений была проведена путем сопоставления кинетической температуры жидкости, измеренной ртутным термометром и определенной по радиоизлучению этой жидкости на длине волны $\lambda \approx 30$ см. Значения измеренных температур совпали с точностью не хуже $0,2^\circ\text{C}$, что и отражено в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

К С В Н жидкостей	Температура жидкости по термометру, °С	Температура жидкости по радиометру, °С	Точность измерений, °С
1.25	40,7	41,0	± 0.15
2.2	41,0	41,5	± 0.15
2.5	40,7	41,0	± 0.15

Результаты измерений

В порядке предварительных экспериментов нами проведены измерения температуры тела человека в диапазонах 30 и 3 см.

Абсолютные значения температур участков тела, полученных по их тепловому радиоизлучению на волне 30 см, как правило, превышают на несколько градусов поверхностные температуры, измеренные термометром.

В какой-то степени о воз- ожности СВЧ-термографии в исследовании температуры тела можно судить по температурной реакции организма на изменение внешних факторов. Например, на рис. 1 дан график изменений температуры желудочной области при приеме натошак одного стакана холодной (18°С) и горячей воды (56°С). Уменьшение температуры, зафиксированное СВЧ-термографом на длине волны $\lambda = 30$ см, в первом случае проявлялось достаточно быстро, т.е. через 20 + 30 с. Время восстановления первоначальной температуры у разных пациентов составляло от 6 до 30 минут. При приеме горячей воды температура желудочной области, измеренная тем же СВЧ-термографом, увеличивалась на 1 + 2°С. В отличие от первого случая, температурная реакция организма на прием горячей воды происходила замедленнее и иногда наблюдалась лишь спустя 3 + 4 минуты после приема жидкости. Время восстановления прежнего температурного уровня 20 + 30 минут. СВЧ-термографом на

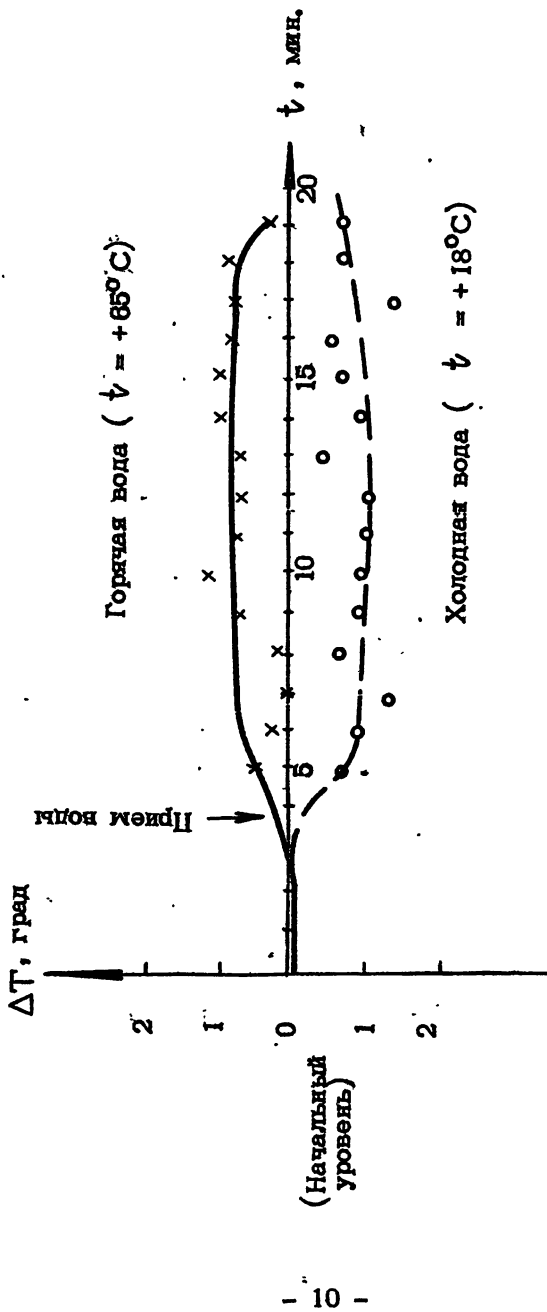


Рис. 1

волне $\lambda = 30$ см были обследованы 16 практически здоровых лиц и 23 больных с патологией желудочно-кишечного тракта и заболеваниями головного мозга. Полученные данные свидетельствуют о повышенном уровне теплового радиоизлучения, а, следовательно, и повышенной температуре глубинных отделов в области проекции пораженных органов. Наиболее убедительно гипертермия отмечалась при опухолевых процессах.

Перспективен метод СВЧ-термографии и для исследования реакции организма на прием лекарственных средств. Прием пациентами сосудорасширяющего средства (никотиновой кислоты) привел к тому, что через 15 + 20 минут температура щек и височной области, измеренная СВЧ-термографом на волне 3,0 см, возрастала на 0,3 + 0,6°C. Через 20 + 30 минут первоначальный температурный уровень восстанавливался. Охлаждение кожи предплечья хлористым этилом привело к снижению поверхностной температуры с 32°C до 1 + 2°C, в то же время температура, отмеченная 3-х см СВЧ-термографом, снизилась на 15°C.

Таким образом, предварительные исследования собственного теплового радиоизлучения тела человека в см. и дц диапазонах показали, что, во-первых, его интенсивность характеризует среднюю температуру излучающих слоев тела, во-вторых, интенсивность радиоизлучения, а, следовательно, и температура биологических тканей, изменяется под воздействием внешних факторов, меняющих температурный режим внутренних органов, либо при введении внутрь организма некоторых лекарственных средств. И, наконец, повышенное тепловое радиоизлучение пораженных органов свидетельствует о диагностических возможностях СВЧ-термографии.

Выполненная нами работа, как и результаты уже опубликованных работ по СВЧ-термографии за рубежом 8, 10 позволяют надеяться, что дальнейшая разработка СВЧ-термографии может привести к появлению в медицинской практике нового и безопасного для пациентов диагностического метода.

В заключение, авторы выражают глубокую благодарность профессору Е.П.Семеновой за методическую и практическую помощь в работе, а также В.В.Хрулеву, Б.Л.Рахлину, Б.К.Федянцеву и Р.А.Самойлову за предоставленную аппаратуру и помощь в ее применении.

Л и т е р а т у р а

1. В.В.Зарешкий, А.Г.Выховская. Клиническая термография, "Медицина", М., 1976.
2. А.С.Пресман. Электромагнитные поля и живая природа, "Наука", М., 1968.
3. Б.А.Минин. СВЧ и безопасность человека, "Советское радио", М., 1974.
4. Джонсон (C.C. Johnson), Гай (A.W. Guy), ТИИЭР, 60, № 6, 49, 1972.
5. А.И.Терещенко, "Радиотехника", 33, № 1, 4, 1978.
6. В.С.Троицкий, ЖТФ, 25, вып. 8, 1426, 1955.
7. И.П.Красюк, В.И.Розенберг. Корабельная радиолокация и метеорология, "Судостроение", Л., 1970.
8. Barrett, Myers, Science, 190, № 4215, 669, 1975.
9. Г.Пюшнер (H. Puschner), Нагрев энергией сверхвысоких частот, "Энергия", М., 1968.
10. Barrett, Myers, Sadowsky, Radio Science, 12, № 6, 167, 1977.
11. Н.М.Цейтлин. Антенная техника и радиоастрономия, "Советское радио", М., 1976.