



*Рис. 3. Девочка с врожденными локальными флебэктазами в области лица до лечения и через 2 года после комбинированного лечения.*

Таким образом, биотехнологии, включающие сочетание склерозирования образования и локальной СВЧ-деструкции позволяет добиться полного лечебного эффекта и получить при этом хороший функциональный и косметический результат.

#### Литература

1. Терновский С.Д., Хирургия детского возраста. М., 1959, стр. 179-200.
2. Исаков Ю.Ф., Тихонов Ю.А., Врожденные пороки периферических сосудов у детей. М., 1963, 103 стр.
3. Феган Джордж, Варикозная болезнь-компрессионная склеротерапия. М. Изд-во НЦССХ им Бакулева РАМН, 1997, 83 с.
4. Sadick NS Sclerotherapy of varicose and Telangiectactic leg veins J Dermatol Surg 17: 65-70, 1991.

## **Возможность применения СВЧ аппаратуры для медицинских целей**

***В.Н.Митрохин, \*А.В. Буторина, А.М. Архаров, В.А. Матвеев**  
**Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана**  
**\*Российский национальный исследовательский медицинский университет им.**  
**Н.И. Пирогова***

*Достаточный уровень локализованной мощности облучения ткани при минимальном попадании СВЧ-энергии на здоровые ткани и минимальный уровень излучения в окружающее пространство важен для медицинских целей.*

***Possibility to apply the UHF apparatus in medicine. V.N. Mitrokhin, A.V. Butorina, A.M. Arkharov, V.A. Matveev. A sufficient level of localized power of tissue radiation at minimal penetration of the UHF energy into healthy tissues and minimal radiation level in the environment are very important for medical purposes.***

Электромагнитные волны широко применяются в клинической практике. Среди всего спектра электромагнитных излучений радиоволнового диапазона наибольшее применение в медицине нашли СВЧ электромагнитные поля, к которым практически относят весь диапазон волн, занимающий промежуточное положение между ультравысокочастотным и оптическим. При этом, наиболее хорошо изучен тепловой эффект СВЧ полей, связанный с повышением температуры облучаемой биологической ткани. Благодаря тепловому действию

электромагнитного поля дециметровых и сантиметровых волн средней и высокой интенсивности методы СВЧ терапии широко используются при лечении различных заболеваний. В частности, большой интерес проявляется к разработкам СВЧ аппаратуры для диагностики и лечения таких заболеваний, как злокачественные и качественные опухоли, пороки сердца, отёк лёгкого, утолщение стенок артерий [1].

Терапевтические применения СВЧ техники, связанные с повышением температуры облучаемой ткани включают: нагрев опухолевых тканей до температур, при которых наступает их разрушение (гипертермия), а также глубокий прогрев подкожных тканей и внутренних органов для снятия болевых ощущений и ускорения процессов заживления патологически измененных тканей (диатермия). Для повышения эффективности диагностики и лечения ряда заболеваний СВЧ техника может применяться в сочетании с другими средствами терапии и диагностики.

При диатермии обеспечивается эффективный прогрев глубоких биологических тканей без прогрева поверхностных тканей. Селективный нагрев отдельных участков тела осуществляется с помощью регулируемого по интенсивности источника СВЧ излучения. Диатермия оказывает благоприятное воздействие на больные ткани при лечении таких хронических заболеваний, как контрактура суставов, воспаление тазовых органов, артриты, фиброзы и т.п., способствует устранению последствий мышечных травм, растяжений и деформаций связок. Повышение температуры тканей приводит к увеличению скорости кровяного потока, улучшению проницаемости клеточных мембран и ускоряет обмен веществ в организме. Эти процессы способствуют заживлению больных и травмированных тканей, увеличению числа лейкоцитов и антител в органах, пораженных болезнью, расслаблению мышц и снятию болевых ощущений.

При гипертермии осуществляется локализованный нагрев опухолей до температур, при которых наступает разрушение клеток опухолевых тканей. Последние имеют более плотную консистенцию и характеризуются нарушением кровообращения. При облучении опухоли могут быть достигнуты температуры 42,5...43,5<sup>0</sup>С (в отдельных случаях до 45<sup>0</sup>С), при которых наблюдается максимальное разрушение и прекращение роста опухоли без существенного влияния на окружающие здоровые ткани. СВЧ прогрев опухолей до указанных выше температур, кроме того, приводит к повышению эффективности некоторых видов медикаментов и увеличению чувствительности опухолевых клеток к воздействию других видов терапии. В частности, для злокачественных опухолей увеличивается чувствительность клеток к воздействию радиоактивного и ионизирующего облучения, а также к химиотерапии.

Ткани человеческого тела представляют собой источник с заметным уровнем излучения в СВЧ и ИК диапазонах волн. Интенсивность собственного излучения тела на частотах СВЧ диапазона пропорциональна температуре тканей. Температура патологически измененных и опухолевых тканей превышает нормальную температуру тела примерно на 1<sup>0</sup>С. Аппаратура, измеряющая приращение температуры тканей, дает возможность диагностировать по термограмме некоторые виды опухолей, наличие травм, смещений позвонков и другие патологические состояния тканей, приводящие к повышению температуры. Собственное излучение тканей, наблюдаемое на различных частотах, позволяет определить точное местоположение опухолей.

Определение дисфункции стенок артерий и нарушений ритма сокращений желудочка сердца необходимы для своевременного лечения заболеваний сердца и органов кровообращения. Частота зондирующего СВЧ сигнала при обследовании движущихся объектов (желудочков сердца и стенок артерий, совершающих колебательные движения) изменяется. Сравнение наблюдаемого сдвига частоты с данными, соответствующими нормальной работе сердца, позволяет установить диагноз заболевания.

Скопление жидкости в легких вследствие бронхита, воспаления легких, отека легких крайне трудно своевременно обнаружить с помощью методов рентгенографии и радиографии. Метод бесконтактного исследования консистенции тканей путем измерения уровней падающей и отраженной волн СВЧ поля основан на изменении комплексной диэлектрической проницаемости патологических легочных тканей. Регистрация уровней отраженного СВЧ излучения позволяет получить СВЧ изображение тканей, характеризующее содержание жидкости в них. Этот метод используется для обнаружения отеков. Отечные ткани

характеризуются возрастанием модуля и уменьшением фазы коэффициента отражения по сравнению с модулем и фазой коэффициента отражений здоровых тканей.

В соответствии с изложенным выше разрабатываемые СВЧ установки для терапии, диагностики заболеваний и контроля за лечебными процедурами разделяются на следующие группы конкретного назначения [2]:

1. СВЧ установки нагрева живых тканей для целей даитермии и гипертермии.
2. СВЧ установки для измерения собственного излучения тела пациента при диагностике опухолей.
3. СВЧ установки для определения доплеровского сдвига частоты при контроле за работой сердца и движением стенок артерий.
4. СВЧ установки для измерения коэффициента отражений волн при наблюдении за состоянием отечных тканей.

Исходя из функционального назначения перечисленных групп СВЧ установок можно выделить общие основные элементы СВЧ аппаратуры (за исключением устройств регистрации и обработки информации): СВЧ генераторы с волноводным трактом, включающим функциональные СВЧ устройства (вентили, циркуляторы, направленные ответвители, аттенюаторы, фазовращатели, волноводные нагрузки, уголки и переходы); антенные устройства (передающие и приемные); радиометры с эталонным генератором шума.

Требования к элементам аппаратуры определяются, прежде всего, частотным диапазоном, электродинамическими параметрами живой ткани и необходимой структурой электромагнитного поля в области взаимодействия с облучаемой тканью. Международным союзом по радиосвязи в пределах СВЧ диапазона волн выделены определенные частоты  $f$  и соответствующие им длины волн  $\lambda$  для промышленных, научных и медицинских целей. В частности, для медицинского оборудования отведены частоты:  $f=915$  МГц ( $\lambda=32,7869$  см),  $2450$  МГц ( $\lambda=12,2449$  см),  $3300$  МГц ( $\lambda=9,0909$  см),  $5800$  МГц ( $\lambda=5,1724$  см),  $10525$  МГц ( $\lambda=2,8504$  см). Живые ткани для электромагнитного поля являются диэлектрической средой с большим уровнем потерь. Глубина проникновения СВЧ излучения в живую ткань является функцией содержания воды в облучаемой ткани и частоты излучения. В большинстве случаев глубина проникновения поля увеличивается для тканей с малым содержанием воды и при понижении частоты. Что касается структуры электромагнитного поля в области взаимодействия с облучаемой тканью, то следует учитывать, что источник электромагнитного поля и окружающее его пространство как целое представляют собой открытую динамическую диссипативную систему с присущей ей самоорганизацией, бифуркациями и катастрофами, а механизм формирования излучения – как неравновесный фазовый переход от квазистатического состояния поля к волновому [3]. Этот переход происходит на верхней границе ближней зоны источника излучения, на собственных критических сечениях неоднородных электродинамических структур, на каустиках, фокальных линиях и фокальных точках сфокусированного электромагнитного поля [4].

Рассмотрим свойства переходных полей на примере анализа неоднородных электродинамических структур со сферическими и цилиндрическими направляемыми волнами. Решение уравнений Максвелла в таких структурах представляется суперпозицией электрических  $E_{mn}$  и магнитных  $H_{mn}$  типов волн, компоненты которых выражаются через потенциальные функции Бромвича  $U$  и  $V$ .

Для структур со сферическими направляемыми волнами в системе координат  $r, \Theta, \varphi$  при замене  $U = ru, V = rv$  потенциалы Дебая  $u$  и  $v$  удовлетворяют однородным уравнениям Гельмгольца

$$\Delta u + k^2 u = 0, \quad \Delta v + k^2 v = 0, \quad (1)$$

где  $\Delta$  – оператор Лапласа,  $k = \omega \sqrt{\epsilon_a \mu_a} = 2\pi / \lambda$  – волновое число свободного пространства в среде с параметрами  $\epsilon_a, \mu_a$ ,  $\omega$  – круговая частота,  $\lambda$  – длина волны.

В результате разделения переменных в уравнениях (1) для потенциалов  $U$  и  $V$  частные решения принимают вид:

$$\left. \begin{matrix} U \\ V \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} A \\ B \end{matrix} R_{\eta}(kr) L_{\eta}^{p_m}(\cos \theta) \frac{\cos}{\sin} p_m \varphi \right. \quad (2)$$

где А, В – постоянные коэффициенты;  $L_{\eta}^{p_m}(\cos \theta)$  - линейная комбинация присоединенных функций Лежандра первого и второго рода;  $\eta = \nu_{mn}, \mu_{mn}$  – собственные значения  $E_{mn}$  и  $H_{mn}$  типов волн соответственно, определяемые из граничных условий по координате  $\theta$ ;  $p_m$  – собственные значения, определяемые из граничных условий по координате  $\varphi$ ;  $R_{\eta}(kr)$  – радиальная зависимость, удовлетворяющая дифференциальному уравнению второго порядка

$$R_{\eta}''(kr) + \left[ 1 - \eta(\eta + 1)/(kr)^2 \right] R_{\eta}(kr) = 0, \quad (3)$$

где штрих означает производную по всему аргументу. Точки поворота уравнения (3) при  $\left[ 1 - \eta(\eta + 1)/(kr)^2 \right] = 0$  определяют критические сечения электродинамических структур, поскольку при  $kr < \sqrt{\eta(\eta + 1)}$  - запрещенная область (квазистатическое поле), а при  $kr > \sqrt{\eta(\eta + 1)}$  - область распространяющихся волн. С другой стороны, точки поворота уравнения (3) при геометрикооптическом подходе соответствуют каустикам. Это значит, что критическое сечение  $(kr)_{кр} = \sqrt{\eta(\eta + 1)}$  неоднородной электродинамической структуры есть каустика конгруенции лучей соответствующего типа волны с точки зрения концепции бриллюэновских лучей в неоднородных структурах.

Критическое сечение разграничивает области пространства с различным характером поведения поля собственной волны. Учитывая этот факт, частные решения уравнения (3), удовлетворяющие условиям: ограниченности поля при  $kr \rightarrow 0$ , непрерывности радиальной зависимости при  $kr = (kr)_{кр}$  и излучения при  $kr \rightarrow \infty$  представляются в виде

$$R_{\eta}(kr) = kr \begin{cases} j_{\eta} \left[ (kr)_{кр} \right] h_{\eta}^{(2)}(kr), & kr \geq (kr)_{кр}, \\ h_{\eta}^{(2)} \left[ (kr)_{кр} \right] j_{\eta}(kr), & kr \leq (kr)_{кр}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $j_{\eta}(kr)$  – сферические функции Бесселя первого рода,  $h_{\eta}^{(2)}(kr)$  – сферические функции Ханкеля второго рода (временная зависимость  $e^{i\omega t}$ , рассматриваются прямые волны).

Подставляя выражения (2) с учетом (4) в уравнения Максвелла, получаем компоненты электромагнитного поля. Векторы поля  $E^{\eta}, H^{\eta}$  каждого  $\eta$ -го типа волны запишем, выделяя продольные и поперечные компоненты  $E^{\eta} = E_{\perp}^{\eta} + r^0 E_{\parallel}^{\eta}, H^{\eta} = H_{\perp}^{\eta} + r^0 H_{\parallel}^{\eta}$  где  $E_{\perp}^{\eta} = \theta^0 E_{\theta}^{\eta} + \varphi^0 E_{\varphi}^{\eta}, H_{\perp}^{\eta} = \theta^0 H_{\theta}^{\eta} + \varphi^0 H_{\varphi}^{\eta}, r^0, \theta^0, \varphi^0$  – единичные векторы – орты сферической системы координат.

При известных выражениях для компонент поля можно найти волновой импеданс каждого  $\eta$ -го типа волны. Для  $E_{mn}$  и  $H_{mn}$  типов волн получаем

$$Z_{\nu_{mn}} = iZ_0 R'_{\nu_{mn}}(kr) / R_{\nu_{mn}}(kr), \quad Z_{\mu_{mn}} = -iZ_0 R'_{\mu_{mn}}(kr) / R_{\mu_{mn}}(kr),$$

где  $Z_0 = \sqrt{\mu_a / \varepsilon_a}$  - волновой импеданс свободного пространства.

«Постоянная» распространения  $\eta$ -го собственного типа волны  $\Gamma_{\eta}$  определяется выражением  $\Gamma_{\eta} = -k R'_{\eta}(kr) / R_{\eta}(kr)$ . Как видим,  $\Gamma_{\eta}$  зависит от  $r$ , поэтому слово «постоянная» взято в кавычки. Фазовая скорость  $v_{\phi}$  и длина волны в системе  $\lambda_{\eta}$  собственного  $\eta$ -го типа волны определяются, соответственно, формулами

$$v_{\phi} = \omega / \text{Im } \Gamma_{\eta} = c \left| kr h_{\eta}^{(2)}(kr) \right|^2, \quad \lambda_{\eta} = 2\pi / \text{Im } \Gamma_{\eta} = \lambda \left| kr h_{\eta}^{(2)}(kr) \right|^2,$$

где  $c = 1 / \sqrt{\mu_a \varepsilon_a}$  - скорость распространения электромагнитных волн в свободном пространстве.

Из выражений для компонент поля с учётом представления радиальной зависимости в форме (4) следует, что для каждого собственного  $E_{mn}$  типа волны вектор  $H_{\perp}^{\eta}$  на собственном критическом сечении непрерывен, хотя и претерпевает излом, характерный для физических величин, испытывающих фазовый переход 2-го рода. В то же время вектор  $E_{\perp}^{\eta}$  на собственном критическом сечении претерпевает скачок, характерный для физических величин, испытывающих фазовый переход 1-го рода, определяющий эквивалентный магнитный

поверхностный ток плотностью  $\mathbf{I}_{V_{mn}}^M$ . Для каждого собственного  $H_{mn}$  – типа волны скачок на собственном критическом сечении претерпевает вектор  $H_{\perp}^{\mu}$ , определяющий эквивалентный электрический поверхностный ток плотностью  $\mathbf{I}_{\mu_{mn}}^{\mathcal{E}}$ . Выражения для этих токов имеют вид.

$$\mathbf{I}_{V_{mn}}^M = -[\mathbf{r}^0 \cdot \text{sign} \mathbf{E}_{\perp}^V] = \frac{ikA_{V_{mn}}}{(kr)_{\text{кр}}^2} \mathbf{h}_{V_{mn}}(\theta, \varphi),$$

$$\mathbf{I}_{\mu_{mn}}^{\mathcal{E}} = [\mathbf{r}^0 \cdot \text{sign} \mathbf{H}_{\perp}^{\mu}] = \frac{ikB_{\mu_{mn}}}{(kr)_{\text{кр}}^2} \mathbf{e}_{\mu_{mn}}(\theta, \varphi).$$

Следуя и далее принципу эквивалентности, будем рассматривать собственный сферический лист эквивалентного магнитного тока на критическом сечении как источник  $E_{mn}$  – типа волны, а собственный сферический лист эквивалентного электрического тока – как источник  $H_{mn}$  – типа волны. Воспользовавшись теоремой Умова-Пойнтинга в комплексной форме для каждого собственного типа волны, получим выражения: для мощности, излучаемой с собственного критического сечения

$$P_{\Sigma}^{V_{mn}} = \frac{1}{2} |A_{mn}|^2 \frac{k^2}{Z_0} j_{V_{mn}}^2 [(kr)_{\text{кр}}]; \quad P_{\Sigma}^{\mu_{mn}} = \frac{1}{2} |B_{mn}|^2 k^2 Z_0^2 j_{\mu_{mn}}^2 [(kr)_{\text{кр}}]$$

- для проводимости излучения  $G_{\Sigma}^{V_{mn}}$  каждого  $E_{mn}$  типа волны и сопротивления излучения

$R_{\Sigma}^{\mu_{mn}}$  каждого  $H_{mn}$  – типа волны.

$$G_{\Sigma}^{V_{mn}} = (kr)_{\text{кр}}^2 \frac{1}{Z_0} j_{V_{mn}}^2 [(kr)_{\text{кр}}], \quad R_{\Sigma}^{\mu_{mn}} = (kr)_{\text{кр}}^2 Z_0 j_{\mu_{mn}}^2 [(kr)_{\text{кр}}].$$

Аналогичный анализ электромагнитного поля с учетом его поведения в окрестности собственных критических сечений проведен и для неоднородных электродинамических структур с цилиндрическими направляемыми волнами.

Каждому собственному типу волны поставим в соответствие модель пространственного осциллятора, описываемого уравнением типа

$$y''(x) + f(x)y(x) = 0, \tag{5}$$

здесь  $y(x) \equiv R_{\eta}(kr)$ ,  $x \equiv kr$ ,  $f(x) = 1 - x_0^2 / x^2$ ,  $x_0 \equiv (kr)_{\text{кр}} = \sqrt{\eta(\eta + 1)}$ .

Семейство потенциальных функций (потенциальных энергий  $W_{\text{п}} = W_{\text{п}}(y, \xi)$ , где  $\xi = x/x_0$  – управляющий параметр,  $0 < \xi < \infty$ ) представляет собой семейство парабол  $W_{\text{п}}(y, \xi) = 0,5(1 - 1/\xi^2)y^2$ . Трансформация потенциальной энергии, связанная со сменой минимума на максимум (или наоборот) при достижении единственного управляющего параметра своего критического значения называется катастрофой складки и характерно для динамических систем, испытывающих фазовые переходы 2-го рода. Так как значение  $\xi = \xi_0 = 1$  соответствует  $f(x) = 0$  в (5), то это значит, что в критическом сечении неоднородной электродинамической структуры происходит фазовый переход 2-го рода, сопровождающийся катастрофой складки. Анализ фазового портрета, соответствующего трансформации потенциальной функции  $W_{\text{п}}(y, \xi)$  показывает, что при  $\xi > 1$  фазовыми траекториями являются эллипсы, а при  $\xi < 1$  – сопряженные гиперболы. Сепаратриса  $y' = \pm \sqrt{C}$ , ( $C$  – постоянная величина) соответствует бифуркационному значению управляющего параметра  $\xi_0 = 1$ . При  $\xi \rightarrow \infty$  колебания осциллятора гармонические. С уменьшением  $\xi$  они все более отличаются от гармонических, их период непрерывно растет и при  $\xi \leq 1$  (переход через сепаратрису) движение неперiodическое. Если электродинамическая система имеет сепаратрисы отделяющие области с различным характером поведения поля, то в процессе его эволюции через них возможны структурные переходы. В этом случае система имеет локальные адиабатические инварианты, значения которых при пересечении сепаратрисы изменяются скачком. Локальный адиабатический инвариант в области  $x > x_0$  пропорционален излучаемой с критического сечения мощности.

Итак, сформулируем основные свойства переходных электромагнитных полей в неоднородных СВЧ – структурах с критическими сечениями:

- аналитические, определяемые точками бифуркации дифференциального уравнения радиальной зависимости поля собственной волны;
- топологические, определяемые характером сепаратрисы фазового пространства при скачкообразном изменении на ней локальных адиабатических инвариантов поля;
- волновые, определяемые неравновесным фазовым переходом электромагнитного поля от квазистатического состояния к волновому и обратно;
- лучевые, определяемые условиями формирования каустики конгруенцией лучей, соответствующих собственному типу волны;
- энергетические, определяемые эквивалентными поверхностными токами на собственных критических сечениях и излучаемой с них мощности.

В результате анализа интеграла излучения сфокусированных апертур

$$F(S) = \int_{S_0} f(S_0) e^{i\psi(S_0)} \frac{e^{-ikR(S,S_0)}}{R(S,S_0)} dS_0, \quad (6)$$

где  $f(S_0)$ ,  $\psi(S_0)$  – распределение амплитуд и фаз плотностей реальных или эквивалентных электрических (магнитных) токов на поверхности  $S_0$ ;  $R(S,S_0)$  – расстояние между точкой интегрирования  $Q(x_0, y_0, z_0) \in S_0$  и точкой наблюдения  $P(x, y, z) \in S$ ; получены точные аналитические выражения геометрических мест каустик, фокальных линий и точек.

Результаты этих исследований имеют практическое значение:

- при разработке устройств возбуждения зеркальных и линзовых антенн, а также фазированных антенных решеток в режиме сфокусированного поля, открытых СВЧ резонаторов со сферическими и цилиндрическими зеркалами;
- при определении размеров зоны локальной концентрации СВЧ поля на биологическом объекте;
- при разработке требований защиты от высококонцентрированных СВЧ полей обслуживающего СВЧ установки персонала.

Достаточный уровень локализованной мощности облучения ткани при минимальном попадании СВЧ-энергии на здоровые ткани и минимальный уровень излучения в окружающее пространство важен для защиты медицинского персонала.

#### Литература

1. Использование СВЧ техники для медицинских целей // Радиоэлектроника за рубежом. Информационный бюллетень. – 1982. – Вып. 8 (954). – М.: НИИЭИР.
2. Митрохин В.Н. СВЧ-установки для медицинских целей: Учебное пособие / Под ред. Н.А.Бая. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1998. – 19 с.
3. Митрохин В.Н. Исследование переходных полей в неоднородных СВЧ структурах с критическими сечениями // Радиотехника. – 1999. – № 4. – С.86–91.
4. Митрохин В.Н., Павлович А.Л. Каустики и катастрофы ближнего поля антенн // 165 лет МГТУ им.Н.Э.Баумана: Тез. докл. науч.-техн. конф. – М., 1995. – С.71.
5. Митрохин В.Н. Интеграл излучения и переходные состояния электромагнитного поля // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 1995. – № 4. – С.24–33.
6. Митрохин В.Н. Структура сфокусированного электромагнитного поля // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 1994. – № 4. – С.16–27.
7. Митрохин В.Н. Электромагнитное поле изолированного диэлектрическим шаром диполя // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 1991. – № 3. – С.31–40.