

Система частот спектра резонансной прозрачности водной среды в КВЧ диапазоне.

Петросян В.И., Майбородин А.В., Сеницын Н.И., Креницкий А.П., Ёлкин В.А., Тупикин В.Д..

Аннотация. Разработан совместно сотрудниками ОАО Центрального НИИ измерительной аппаратуры и Саратовского отделения ИРЭ РАН высокочувствительный панорамно-спектрометрический комплекс с квазиоптическим трактом. С его помощью прямым радиопросвечиванием экспериментально подтверждены полученные ранее косвенным методом КВЧ/СВЧ радиоспектроскопии и обнаружены новые частоты резонансной прозрачности воды в КВЧ диапазоне радиоволн. Спектр частот резонансной прозрачности систематизирован и объяснён на основе гипотезы квантования энергии молекулярных осцилляторов воды. Рассматриваются также свойства воды с позиций поведения, присущего активным средам.

Введение. Впервые резонансное взаимодействие водной среды с КВЧ излучением было обнаружено на частотах в диапазоне от 48 до 120 ГГц косвенным методом [1-4]. Спектр резонансных частот состоит из близких дублетов вблизи частот: 50,3 и 51,8 ГГц, 64,5 и 65,5 ГГц, 98 и 107 ГГц. Было показано, что первая линия дублета принадлежит радиальным колебаниям ионов кислорода в гексагональных кольцевых молекулярных фрагментах воды, а вторая линия – поперечным колебаниям относительно плоскости гексагонального кольца. В статье [5] изложены результаты прямого радиопросвечивания водной среды на резонансных частотах 64,6 ГГц и 65,6 ГГц, которые воспроизвели результаты косвенных измерений и подтвердили существование явления резонансной прозрачности водных сред в КВЧ диапазоне, а, следовательно, и биосреды.

Для дальнейшего продвижения в высокочастотную область КВЧ диапазона были разработаны высокочувствительный панорамно-спектрометрический комплекс с квазиоптическим трактом, перекрывающий диапазон частот от 48 до 160 ГГц, и метод измерения коэффициентов отражения и пропускания тонких слоёв водной среды.

Панорамно-спектрометрический комплекс с квазиоптическим трактом (комплекс). Для измерения спектров поглощения и пропускания водной среды.

Комплекс состоит из излучающего генератора 1, рефлектометра 2 и квазиоптического приёмника 3. В состав излучающего генератора 1 входят: СВЧ генератор с волноводно-лучевым переходом ВЛП1, генераторы амплитудной ГАМ и частотной ГЧМ модуляции.

Рефлектометр 2 выполнен в виде квазиоптической конструкции КР [2], каждое из четырёх плеч которого соединено с лучеводами Л1, Л2, Л3, Л4, причём лучевод Л1 соединён с ВЛП1, Л3 - с ВЛП2 приёмника 3, а другие плечи Л2 и Л4 соединены с квазиоптическими согласованными нагрузками Н1 и Н2 соответственно. В качестве полупрозрачного элемента в рефлектометре КР используются кассеты К1, К2, К3. В кассету К1 вставлено зеркало, в кассету К2 полупрозрачный плоский пустой сосуд из оргстекла, а в кассете К3 этот сосуд заполняется исследуемой жидкостью (Рис.1). Толщина слоя воды в плоском сосуде около 0,1 мм. На рис.2 представлена функциональная схема комплекса.

Для возбуждения в исследуемой среде волн H_{11} и E_{11} с круговой поляризацией векторов E и H соответственно в качестве ВАП используются переходы с прямоугольных волноводов сечениями $1,6 \times 0,8$ мм, $1,1 \times 5,5$ мм на круглый или квадратный волновод с размерами, совмещаемыми с диаметром круглого лучевода.

Фотография Рис1.

Облучение водной среды поляризованными волнами позволяет определить структуру поля в среде и повысить эффективность взаимодействия с ней. Для исследования амплитудных поляризационных характеристик в среде в комплексе используют поляризаторы E и H типов, а также вращатели плоскости поляризации и поляризационные аттенюаторы.

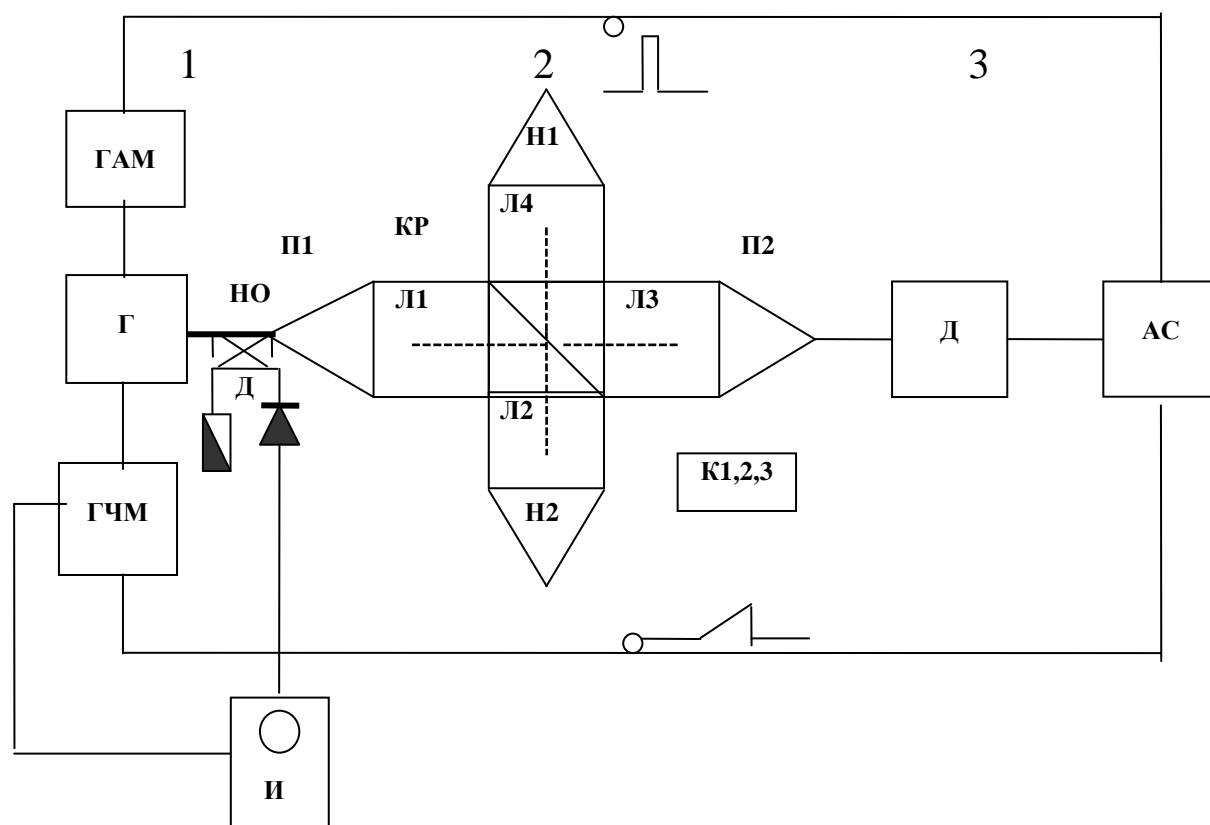


Рис.2. Функциональная схема измерительной установки. 1- излучающий генератор; 2- квазиоптический рефлектометр; 3 - квазиоптический приёмник; И - осциллографический индикатор; НО - направленный ответвитель с детектором стабилизации мощности генератора Г; ГАМ - генератор амплитудной модуляции; ГЧМ - генератор частотной модуляции; Г - генератор СВЧ; ВЛП1 и ВЛП2 - волноводно-лучевые переходы; КР - квазиоптический рефлектометр; Н1 и Н2 квазиоптические согласованные нагрузки; Л1, Л2, Л3, Л4 - лучеводы; К1, К2, К3 - кассеты; Д - амплитудный детектор; АС - анализатор спектров.

Амплитудно и частотно модулированный сигнал прошедший сквозь К2 и К3 поступает через Л3 в лучеводно-волноводный переход ВЛП2 на амплитудный детектор. Далее продетектированный сигнал подаётся на анализатор спектра АС синхронизируемый от генераторов амплитудной и частотной модуляции излучающего блока.

Падающая мощность подаётся через НО и лучевод Л1 в кассеты К2, К3 и расщепляется там на два луча - отражённый и прошедший через К2 или К3. Отражённый луч поступает через лучевод Л2 в согласованную нагрузку Н2, где

полностью поглощается. Прошедший луч через лучеводную секцию ЛЗ подаётся на вход приёмника 3. Для исключения влияния КВЧ мощности, отражённой от исследуемого слоя водной среды, квазиоптический тракт балансируется квазиоптическими согласованными нагрузками Н1 и Н2. Направленность рефлектометра КР составляет 50 дБ, переходное ослабление около 4 дБ. Переходы ВЛП1,2 обеспечивают согласованный переход с волноводного тракта сечением 1,6х0,8 мм на квазиоптический тракт сечением 20 мм, работающий в диапазоне частот до 600 ГГц.

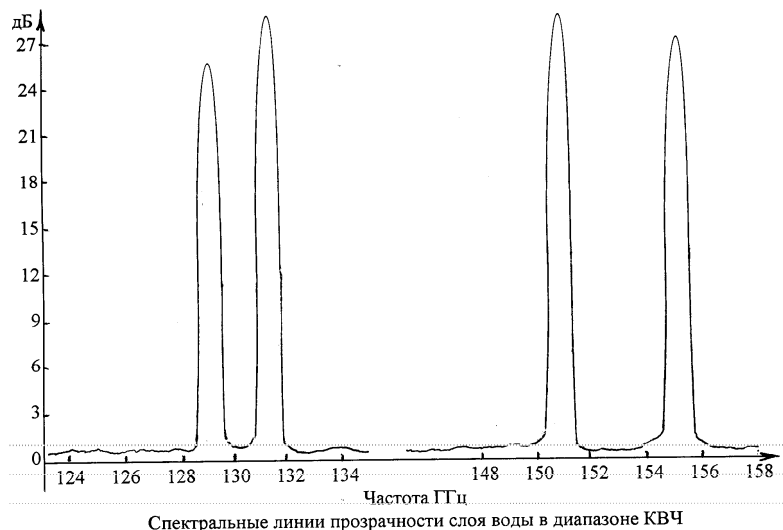
Параметры узлов квазиоптического тракта приведены в [3].

Амплитудный детектор и НО выполнены в волноводном канале сечением 1,6х0,8 мм. Чувствительность детектора 200мкВ/мкВт. В комплексе использован анализатор спектра СК 4-56. Частота амплитудной и частотной модуляции подбирается в процессе настройки измерительного комплекса, так чтобы получить наибольшую чувствительность приёмника. Отметим, что наилучшая чувствительность приёмника достигнута при использовании частоты модуляции 100 ± 1 КГц. Генератором несущей частоты в диапазоне 118-160 ГГц служит КВЧ генератор, разработанный в ОАО ЦНИИИА, генератором амплитудной модуляции - Г5-56, генератор ЧМ - Г4-.... . пилообразное напряжение с ГЧМ синхронизирует напряжение внешней развертки анализатора СК 4-56 и панорамного индикатора

Измерение падающей на кассету мощности P_0 производится путём подключения приёмника 3 к лучеводу Л2 вместо нагрузки Н2, которая в свою очередь подключается к лучеводу Л3. При этом в рефлектометр вставляется кассета К1.

Для измерения мощности отражённой и проходящей волн через водную среду сначала проводилась калибровка, суть которой состояла в измерении падающей на кассету К2 мощности КВЧ излучения и отражённой от неё мощности. Затем выполнялись такие же измерения с кассетой К3. Разностные значения между отражёнными и проходящими мощностями, измеренными анализатором спектров АС при калибровке и измерении, дают искомые значения мощности отражённой от слоя водной среды - P_r и проходящей через него - P_i . Поглощаемая слоем мощность вычисляется с использованием простого равенства: $P_a = P_0 - (P_r + P_i)$.

Результаты исследования резонансного спектра прозрачности слоя водной среды на КВЧ, в частотном диапазоне от 118 до 160 ГГц, позволили обнаружить наличие двух новых резонансных дуплетов 129,2 ГГц; 131,4 ГГц и 150,9 ГГц, 155,4 ГГц, измеренных с точностью не хуже 0,1 ГГц. На рис.3 показан спектр прозрачности слоя воды в частотном диапазоне от 118 до 160 ГГц.



значения КСВН от слоя водной среды на резонансных частотах не превышали значения 1,1 .

Экспериментальное исследование порогового эффекта при взаимодействии электромагнитных волн в водной среде проводилось на комплексе в следующем режиме.

Излучающий генератор включается в режим генератора качающей частоты с синхронной перестройкой мощности напряжением 4 (рис 2), так что на кассету К3 поступает сигнал 1 (рис 4).

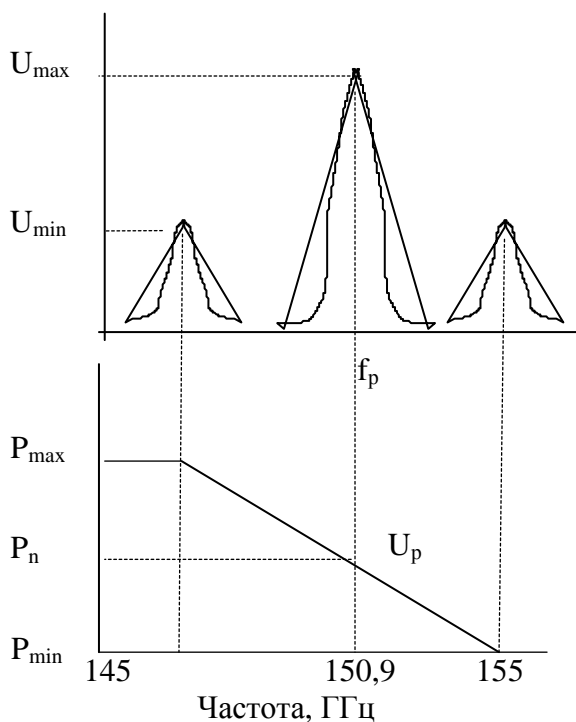


Рис.4. Диаграмма формирования сигнала резонансной прозрачности водной среды. P_n -пороговая мощность, f_p -резонансная частота, U_p -резонансный сигнал на анализаторе спектра.

На диаграмме видно, что при уменьшении мощности и увеличении частоты падающего на кассету сигнала от P_{max} до P_{min} сигнал U_p , прошедший через кассету К3, как это ни парадоксально, увеличивается от U_{min} до U_{max} .

В этом случае можно говорить о том, что водная среда обладает отрицательным сопротивлением, которое свойственно для активных сред.

С учетом обнаруженных новых дуплетов резонансной прозрачности водных сред в диапазоне частот 118 - 160 ГГц и ранее обнаруженных [1] в диапазоне частот 50 - 105 ГГц картина спектра резонансных частот прозрачности показана на рис.5.

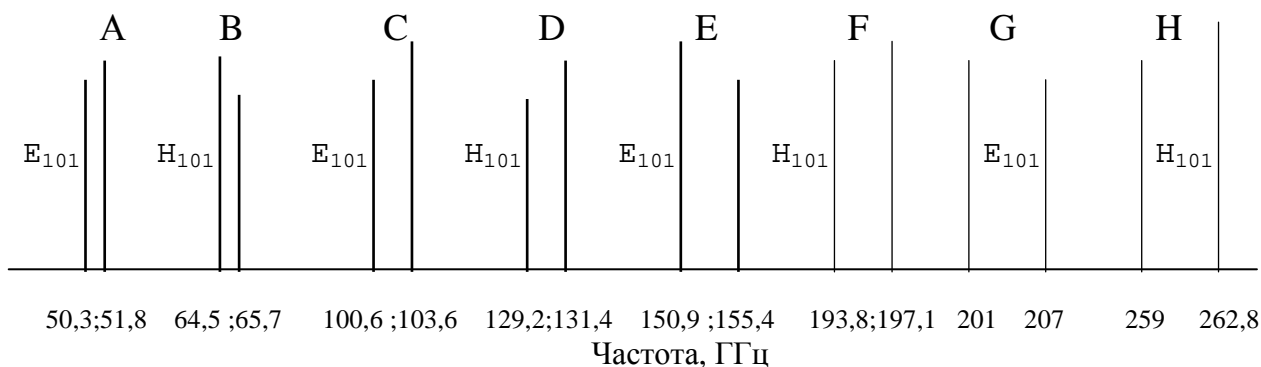


Рис. 5. Спектр резонансных частот воды.

Определённые экспериментальным путем составляющие спектра частот позволяют определить его закономерности.

1. Частоты в спектре расположены в виде дуплетов А (50,3 ; 51,8) ГГц, В (64,5; 65,7) ГГц, С (100,6; 103,6) ГГц, D (129,2; 131,4) ГГц, E (150,9; 155,4) ГГц.
2. Отношения частот в соседних дуплетах, соответствующих **Е** и **Н** типам колебаний, следующие:

$$\frac{B}{A} \left(\frac{64,5}{50,3} = 1,28; \frac{65,7}{51,8} = 1,26 \right); \quad \frac{D}{C} \left(\frac{129,2}{100,6} = 1,28; \frac{131,4}{103,6} = 1,27 \right)$$

3. Отношения частот между дуплетами:

$$\frac{C}{A} \left(\frac{100,6}{50,3} = 2; \frac{103,6}{51,8} = 2 \right); \quad \frac{D}{B} \left(\frac{129,2}{64,5} = 2,003; \frac{131,4}{65,7} = 2 \right); \quad \frac{E}{A} \left(\frac{150,9}{50,3} = 3; \frac{155,4}{51,8} = 3 \right)$$

4. Отношение частот в каждом дуплете:

$$A \left(\frac{51,8}{50,3} = 1,02 \right); \quad B \left(\frac{65,7}{64,5} = 1,01 \right); \quad C \left(\frac{103,6}{100,6} = 1,02 \right); \quad D \left(\frac{131,4}{129,2} = 1,01 \right); \quad E \left(\frac{155,4}{150,9} = 1,02 \right)$$

Из этих соотношений можно сделать следующие выводы:

1. Частоты в дуплете С являются вторыми, а частоты в дуплете Е - третьими гармониками частот дуплета А.
2. Частоты в дуплете D являются вторыми гармониками частот дуплета В.
3. Отношение частот в каждом дуплете приблизительно равно 1,02.
4. Отношение частот, соответствующих **Е** и **Н** типам колебаний, в дуплетах В/А и D/С равны в среднем 1,27.

Следует отметить, что фундаментальными частотами являются частоты 50,3 ГГц, 51,8 ГГц, 64,5 ГГц, 65,7 ГГц, на которых возбуждаются в водной среде волны E₁₀₁ и H₁₀₁ типов, связанных с колебательными движениями молекулярных магнитных и электрических диполей водной среды при взаимодействии

с КВЧ волнами в лучеводах [1]. Волны E типа формируются на частотах 50,1; 51,3 ГГц, а волны H типа - на частотах 64,6 и 65,7 ГГц. Можно предположить, что остальные дуплеты резонансного спектра воды формируются как гармоники фундаментальных частот.

В соответствии с этими закономерностями можно приблизительно предположить наличие следующих дуплетов в спектре резонансных частот водной среды в КВЧ - диапазоне: дуплет F (197,8; 197,7) ГГц, дуплет G (201; 207) ГГц, дуплет H (259; 262,8) ГГц.

Вероятно, возможны колебания и на частотах меньше 50,3 ГГц, например, можно предположить существование дуплета (-A), (-B) и т.д., однако, для этого нужно обеспечить необходимые условия возбуждения среды магнитным и электрическим полем.

Электродинамическая модель водной среды

В работах [1, 2] представлена и экспериментально исследована молекулярная модель взаимодействия КВЧ - волн с водной средой. Однако одно из свойств этой среды, обнаруженное в эксперименте и связанное с изменением диэлектрической проницаемости, которое описано в работе [4], следует отметить особо.

Изменение диэлектрической проницаемости воды, а, следовательно, и эквивалентной емкости, свойственно для активных сред, которые характеризуются поглощением и излучением энергии и должны обладать параметрическим усилением или возбуждением.

Поэтому, определив с помощью молекулярной модели диэлектрическую проницаемость среды, можно предложить электродинамическую модель водной среды.

Процессы в системе с переменной емкостью принято описывать уравнением Маттье, и вопрос о режиме самовозбуждения или усиления в такой системе сводится к нахождению условий, при которых решения становятся неустойчивыми.

Частоты, при которых возможно возбуждение, лежат около значений

$$2 \frac{\omega_0}{\omega_0} = n, \text{ где } n = 1, 2, 3.$$

Причем, чем больше номер гармоники, на которой возбуждаются колебания, тем большая глубина модуляции требуется для их возбуждения, т.е. тем больше должен быть сигнал (порог) КВЧ - мощности, облучающий воду.

Анализ решений [5] показывает, что зоны генерации или усиления зависят от значения коэффициента модуляции эквивалентной емкости среды, т.е. от амплитуды облучающего среду сигнала. Для активных сред основные энергетические соотношения определяются соотношением Мэнли-Роу:

$$\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{mP_{m,n}}{mf_1 + nf_2} \quad (1)$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{nP_{m,n}}{mf_1 + nf_2} \quad (2)$$

где $P_{m,n}$ - поток мощности, падающий на слой воды, на частотах $mf_1 + nf_2$,

f_1, f_2 - частоты облучения слоя воды.

Из этих уравнений следует, что если активная водная среда поглощает энергию КВЧ - волн на заданных частотах f_1 и f_2 , то эта энергия может излучаться на других частотах собственного спектра среды в соответствии с соотношениями (1) и (2) и представленного на рис.4 спектра резонансных частот среды.

Как известно, молекулы воды могут находиться в стационарных состояниях, соответствующих определённым уровням энергии, которые характеризуются вращательными и колебательными квантовыми числами. Под действием падающей электромагнитной волны молекулы воды, обладающие постоянным электрическим дипольным моментом, могут переходить из основного состояния в возбуждённое. Наиболее интенсивное взаимодействие электромагнитных волн с парами воды наблюдается на частотах 22, 179 и 329,6 ГГц.

Рассмотрим систему частиц с двумя энергетическими уровнями E_1 и E_2 ($E_2 > E_1$). В состоянии термодинамического равновесия распределение частиц по энергетическим уровням подчиняется законам статистики Больцмана при любой конечной температуре $N_2 < N_1$.

Если рассматривать водную среду как активную, необходимо ввести понятие прозрачности водных сред. Для этого обратимся к процессам, которые происходят в молекулярном генераторе [6].

Предположим, что водная среда подвергается внешнему облучению с частотой $\omega_{12} = (E_2 - E_1) \frac{1}{h}$. Под действием этого облучения возникают индуцированные переходы по уровням вверх и вниз.

Вероятность этих переходов P_{12} и P_{21} , причем $P_{12} > P_{21}$ т.к. $N_1 > N_2$. Таким образом происходит заселение энергетического уровня E_2 за счет преимущественных индуцированных переходов частиц вверх.

По мере заселения уровня E_2 разность $N_1 - N_2$ становится все меньше и в пределе уменьшается до нуля. Населенности уровней E_2 и E_1 выравниваются. При этом, естественно, становятся равными вероятности переходов $P_{12} = P_{21}$. В этом случае говорят, что среда становится прозрачной для частоты ω_{12} , т.к. интенсивность индуцированного КВЧ излучения и поглощения равны. Такое состояние среды еще называют насыщением перехода. Следует также отметить, что в реальных условиях среда стремится за счет спонтанных и релаксационных переходов возвратиться из состояния насыщения в состояние, соответствующее термодинамическому равновесию. При достаточной плотности внешнего КВЧ - излучения эти процессы могут быть скомпенсированы.

Таким образом, насыщение перехода наблюдается в условиях некоторого поглощения электромагнитной КВЧ - энергии. Поэтому о прозрачности водной среды можно говорить как о таком ее состоянии, при котором энергии излучения и поглощения равны. Если рассматривать водную среду как среду, участ-

вующую в процессе параметрического усиления, то прозрачность среды тогда, когда коэффициент усиления такого параметрического усилителя равен единице.

Выводы.

1. Разработан панорамно-спектрометрический комплекс с квазиоптическим трактом для исследования жидких сред в диапазоне 118 - 160 ГГц, позволивший провести следующие исследования:
 - 1.1. В результате обнаружения новых резонансных частот спектра прозрачности водных сред 129,2; 131,4; 150,9; 155,4 ГГц определена закономерность распределения частот в резонансном спектре водной среды и предсказано существование новых частот прозрачности 193,8 ; 197,1;
 - 1.2. Обнаружено, что при взаимодействии водной среды с КВЧ - волнами на частоте 150,9 ГГц она обладает свойствами активной среды, т.е. поглощает и излучает энергию в КВЧ - диапазоне.
2. Обнаруженное резкое изменение диэлектрической проницаемости водной среды при взаимодействии с КВЧ - волнами на резонансных частотах позволяет говорить о свойствах водной среды с изменяющимся параметром, в частности, эквивалентной емкостью. В этом случае среда может обладать свойствами параметрического усиления и возбуждения колебаний.

Литература.

1. Диэлектрические резонаторы. Под ред. проф. М.Е. Ильиченко. // М "Радио и связь", 1989.
2. Н.И. Сеницын, В. И. Петросян, В.А. Елкин , Н.Д. Девятков, Ю.В. Гуляев, О.В. Бецкий . Особая роль системы "миллиметровые волны - водная среда" в природе. - Биомедицинская радиоэлектроника, №1, 1998 г.