

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕЩЕСТВ РАДИОВОЛНОВЫМ МЕТОДОМ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ

© 2019 г. Р. Ю. Герасимов<sup>а,\*</sup>, Г. Н. Фадеев<sup>а</sup>, Ю. В. Герасимов<sup>а</sup>, Е. А. Кондракова<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

\* e-mail: r\_guerassimov@mail.ru

Поступила в редакцию 09.10.2018 г.

После доработки 28.10.2018 г.

Принята к публикации 13.11.2018 г.

Предложен метод, основанный на регистрации спектров радиоволновых излучений СВЧ-диапазона от объекта исследований сканирующим широкополосным приемником. Полученные спектры проанализированы на своей программе аппаратно-программным комплексом. Показано, что метод позволяет различать вещества по качественному и количественному составу и определять изменение их структуры. Экспериментально установлено, что метод позволяет достичь точность 5–6 нм/Гц.

**Ключевые слова:** Радиоволны, спектр, идентификация, СВЧ, дейтерий

**DOI:** 10.1134/S0044453719050108

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Использовали радиоволновой метод исследования объектов в СВЧ-диапазоне [1, 2]. Суть метода состоит в следующем. Переменный сигнал СВЧ-генератора подается на объект исследования. Этот электромагнитный сигнал активизирует исследуемый объект, который в свою очередь становится излучателем электромагнитного сигнала, подобно антенным системам. Сигнал, излучаемый объектом, фиксируется широкополосным приемником и анализируется на аппаратно-программном комплексе. По виду спектра и его изменению по сравнению с эталоном можно определить как качественный, так и количественный состав объекта исследования.

Прежде, чем приступить к изучению водных растворов, метод протестировали при исследовании воды с различным содержанием технических примесей. В качестве эталона сравнения (рис. 1) брали бидистиллят (спектр 1). Максимумы спектров 2, 3, 4 смещены относительно эталонного образца. Сравнение спектров позволяет делать вывод о наличии примесей. Различия спектров 1 (эталонного образца) и 4 (воды, взятой из дистиллятора после его длительной эксплуатации) свидетельствуют о накоплении примесей в процессе эксплуатации на рабочих поверхностях.

Представлялось важным установить, каким образом влияет температура на состояние воды. На рис. 2 представлены спектры воды при различных температурах. Видно изменение спектров 1 и 2 разных агрегатных состояний одного и того

же образца: жидкой воды и льда. Следует отметить появление дополнительных пиков в спектре 2 в области 2456.54–2458.52 МГц. Представленные результаты свидетельствуют о том, что предлагаемым методом с высокой точностью можно различать агрегатные состояния такого важного объекта исследований как вода.

Особенный интерес представляет сравнение спектров одного и того же образца исходного состояния воды и оттаявшей после заморозания (спектры 1 и 3). Казалось бы, после таяния вода должна прийти к исходному состоянию, чего, однако, не происходит. Об этом свидетельствует наличие изменений в спектрах, которые, по-видимому, следует приписать образованию и разрушению водных кластеров. Чтобы точнее судить об изменении структуры воды в процессе оттаивания, были отдельно и специально сняты спектры исходного образца деионированной воды и той же воды, оттаявшей после замораживания (рис. 3, спектры 1 и 2). Полученные данные свидетельствуют о возможности фиксации используемым методом изменения структуры воды под влиянием температуры.

Были проведены исследования, позволившие установить пределы чувствительности метода. Для экспериментов брали высокодисперсный порошок карбида кремния с размерами частиц от 3 до 63 мкм [3]. На рис. 4 приведены спектры электромагнитного излучения образцов при непрерывном облучении проб микропорошков карбида кремния с преимущественными размерами частиц от 3–5 до 50–63 мкм при возбуждении в

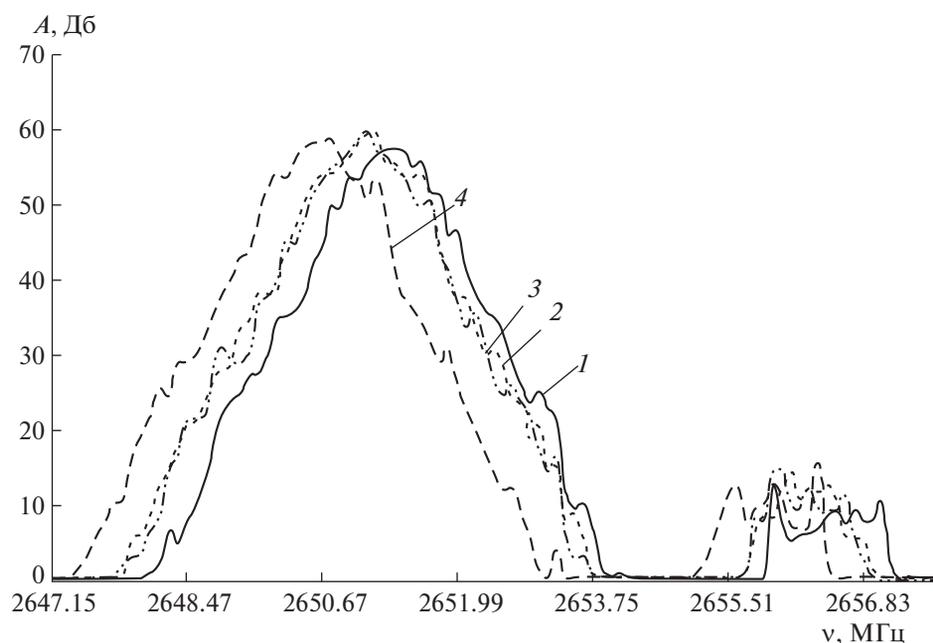


Рис. 1. Спектры: 1 – эталона; 2 и 3 – воды, содержащей примеси; 4 – воды из дистиллятора после его длительной эксплуатации.

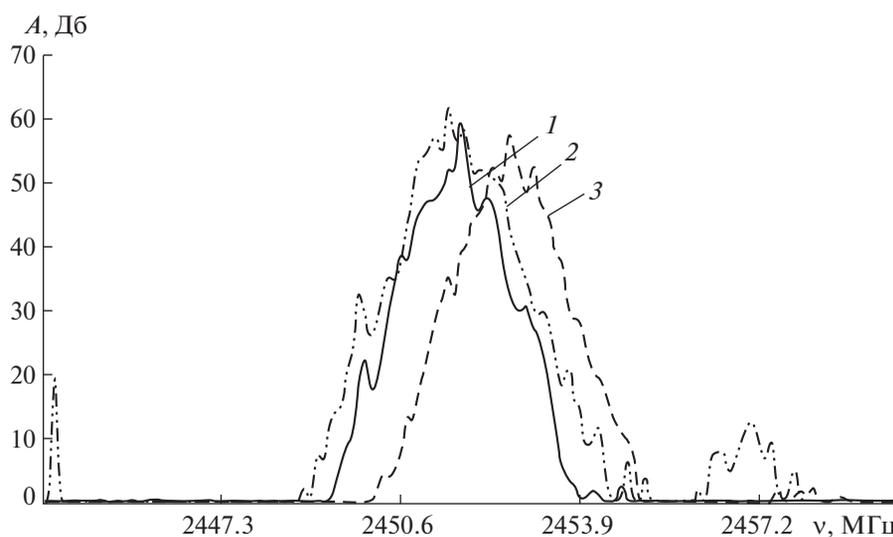


Рис. 2. Спектры бидистиллированной воды при 299 К (1), после постепенного охлаждения до 273 К (лед, 2) и после доведения от 273 К до исходной температуры 299 К (3).

емкостном резонаторе на частоте возбужденной генератором  $\nu = 2.4$  ГГц.

Чувствительность метода определяли по характеристикам спектров и размеру частиц порошка. Изменения формы спектров наблюдали во всех случаях. Общая тенденция такова: по мере увеличения размеров частиц порошка происходили уменьшение частоты пика и увеличение амплитуды, что выражалось в смещении полосы спектра. По спектрам и размерам частиц порошка определяли чувствительность. При разрешающей способности приемника по

частоте  $\Delta\nu = 0.01\text{--}0.10$  ГГц точность метода составила 5–6 Гц/нм.

Обработку экспериментальных данных проводили методом определения координат центра тяжести  $A_c$  спектральных характеристик, ограничивающих площади плоских фигур спектров. Полученные результаты представлены на рис. 5.

Значения параметра  $A_c$  – центра тяжести по амплитуде найдены по известной формуле [4]:

$$A_c = \frac{\sum(\nu_i A_i)}{\sum A_i}$$

После обработки данных, полученных в предыдущей работе [5] (по определению тяжелых изото-

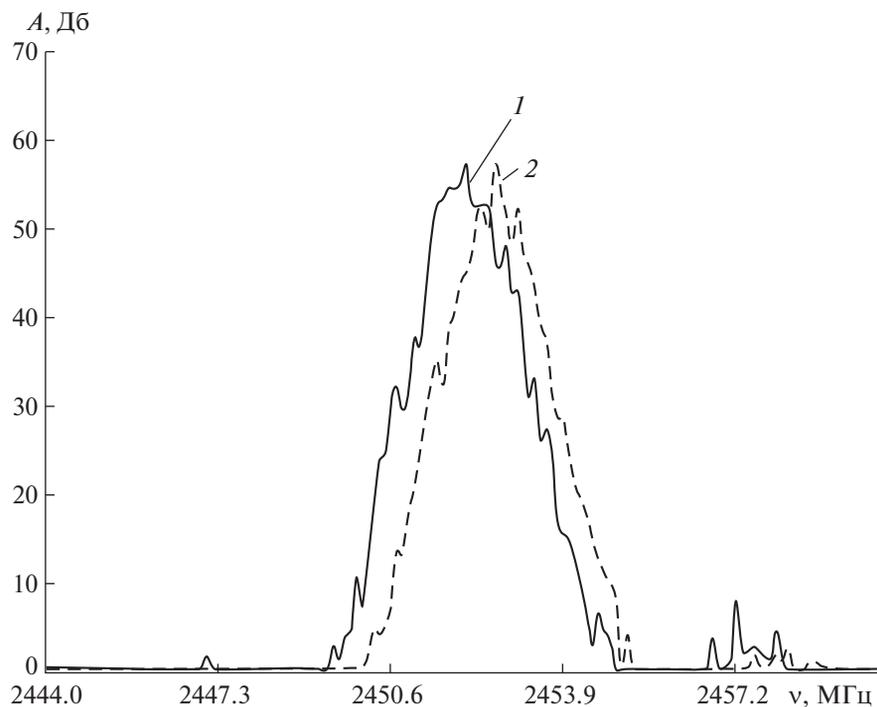


Рис. 3. Спектры воды-эталоны при 299 К (1) и льда, оттаявшего до 299 К (2).

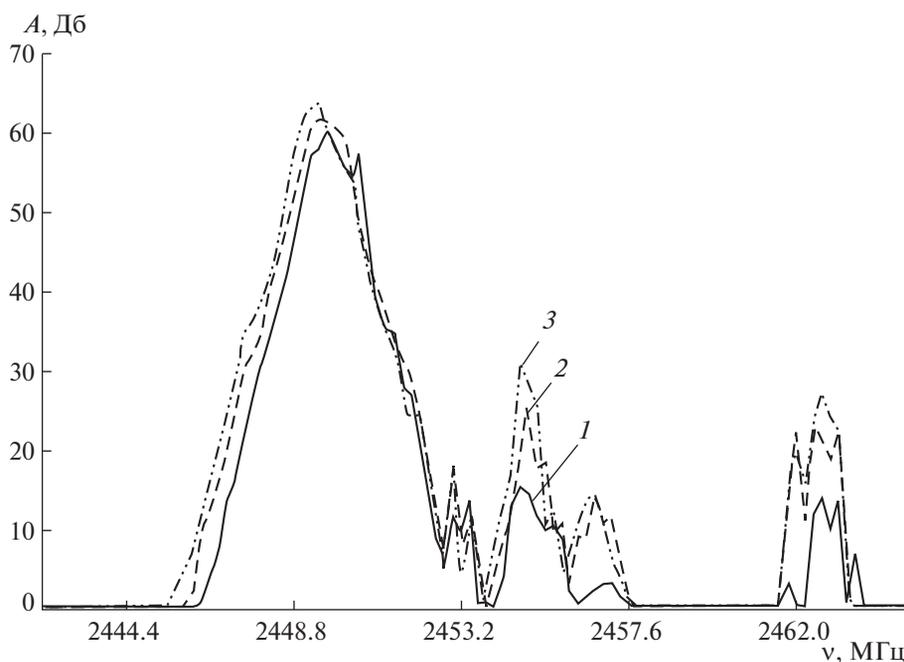


Рис. 4. Спектральные характеристики порошков карбида кремния с размерами частиц: 1 – 3–5, 2 – 20–28, 3 – 50–63 мкм.

пов водорода дейтерия и трития в водных растворах), получили зависимость значений  $A_c$ , приведенную на рис. 6.

Из рис. 5 и 6 видно, что среднее значение амплитуды сигналов сначала возрастает по мере уменьшения концентрации (увеличения размера  $A_c$ ), а затем уменьшается. На основании теорети-

ческих представлений [3, 6] построена зависимость интенсивности рассеянного излучения от размера частиц исследуемого вещества (рис. 7).

На рис. 7 можно выделить три характерные области формирования спектра сигналов. Область 1, в которой интенсивность рассеянного излучения единицей объема пропорциональна третьей степени размера частицы. Пока размер микроча-

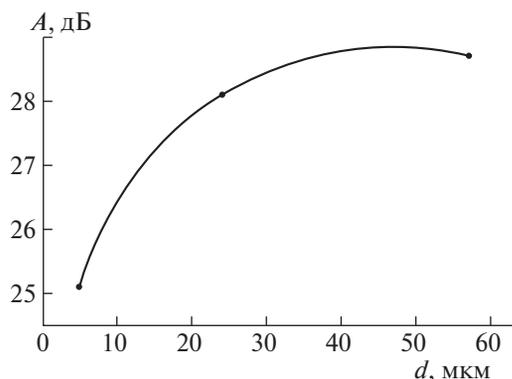


Рис. 5. Зависимость средних значений амплитуды сигналов от размеров частиц карбида кремния.

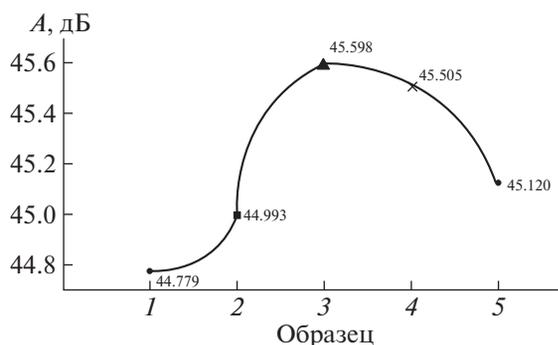


Рис. 6. Результаты обработки данных для эталона  $\text{H}_2\text{O}$  (1) и воды с различным содержанием  $\text{D}_2\text{O}$ : 2 – 0.1357, 3 – 0.0905, 4 – 0.0679, 5 – 0.0452 моль  $\text{D}_2\text{O}/\text{л}$ .

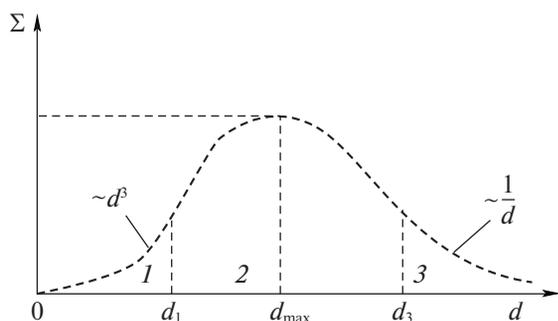


Рис. 7. Зависимость суммарного значения “эффективного сечения” рассеяния (и поглощения) единицей объема от размера частиц.

стицы  $d$  меньше длины радиоволны  $\lambda$ , все рассеивающие атомы частиц излучают электромагнитные волны с близкими фазами. В этом случае интенсивность рассеянного излучения и “эффективное сечение” рассеяния (и поглощения)  $\sigma$ , как известно, пропорциональны квадрату числа атомов в частице ( $N^2$ ), а  $N$  в свою очередь пропорционально  $d^3$ . Тогда суммарное сечение рассеяния (и поглощения) единицей объема:

$$\Sigma = \sigma n,$$

где  $n$  – число частиц в единице объема ( $n \sim 1/d^3$ ).

Тогда получаем следующий ряд формул:

$$I \sim \sigma \sim N^2 \sim d^6, \quad I_s \sim \Sigma = \sigma n \sim d^3.$$

В области 3 удельная интенсивность обратно пропорциональна размеру частицы. При  $d > \lambda$  ситуация меняется: в процессах поглощения и рассеяния принимают участие только атомы, расположенные на поверхности частиц. В этом случае суммарное “эффективное сечение” поглощения и рассеяния примерно равно поперечному сечению частицы, т.е.  $\sigma \sim d^2$ , а  $\sigma n \sim 1/d$ . Поэтому эффективность рассеяния единицей объема достигает максимума при  $d_{\text{max}}$ .

Область 2 является переходной областью между 1 и 3.

Следовательно, при размерах частиц  $d < \lambda$  формирование спектра сигналов в СВЧ-диапазоне обусловлено эффектами усиливающейся интерференции при увеличении размеров частиц. Отметим, что термин “усиливающейся интерференции” был введен Р. Фейнманом [6] при рассмотрении рассеяния света на микрочастицах конденсированного вещества, представляющих собой большое скопление атомов, например, в виде капелек жидкости, которые возникают в атмосфере. Сходство зависимостей полученных результатов, представленных на рис. 5–7 подтверждает наше мнение о том, что имеет место общая зависимость распределения образований по размерам в твердой и жидкой системах.

Таким образом, метод радиоскопии в СВЧ-диапазоне:

- может быть использован для исследования жидкофазных, твердофазных и гетерофазных систем;
- характеризуется широким диапазоном объектов исследования: от макро- до наноразмеров;
- высокой чувствительностью, позволяющей определять следовые количества вещества.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов Р.Ю., Фадеев Г.Н., Герасимов Ю.В., Кондракова Е.А. // Докл. АН. 2015. Т. 464. № 3. С. 302.
2. Герасимов Р.Ю., Фадеев Г.Н. // Шестая Всероссийская конференция “Необратимые процессы в природе и технике”. М.: МГТУ, 2011. Ч. 2. С. 284.
3. Бовенко В.Н., Герасимов Р.Ю. // Нелинейный мир. 2011. № 6. С. 369.
4. Выгодский М.Я. // Справочник по высшей математике. М.: Наука, 1977.
5. Герасимов Р.Ю., Фадеев Г.Н., Герасимов Ю.В., Кондракова Е.А. // Журн. физ. химии. 2016. Т. 90. № 9. С. 1354.
6. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. // Фейнмановские лекции по физике. Вып. 3: Излучение. Волны. Кванты: Пер. с англ. / Под ред. Я.И. Смородинского. Изд. 4-е, испр. М.: УРСС, 2004. 240 с.