

РЕЗОНАНСНЫЙ ЗОНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ И ФЛУКТУАЦИЙ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА МИКРО И НАНОСПУТНИКАХ

А.Г. Галка¹, Д.В. Янин¹, А.В. Костров¹, С.И. Климов², Д.И. Новиков²

¹Институт прикладной физики Российской Академии наук, Нижний Новгород, Россия

²Институт Космических Исследований Российской Академии Наук, Москва, Россия

galasnn@appl.sci-nnov.ru

Нижний Новгород

Актуальность проблемы

Исследование динамических и пространственных характеристик ионосферы является одной из ключевых задач физики Земли. Большинство наших знаний о структуре и динамике ионосферы получены привычными радиофизическими методами. Несмотря на большое количество методик измерения концентрации лабораторной плазмы, соответствующих спутниковых локальных диагностик не так много. В первую очередь это связано со спецификой ионосферных условий, низкими значениями концентрации плазмы, стоимостью и массогабаритными параметрами научной аппаратуры.

Спутниковые методы измерения концентрации ионосферной плазмы:

1. Зонды Ленгмюра и их модификации
2. Метод плазменного резонанса
3. Интерферометрический метод

Основные недостатки существующих зондовых методов:

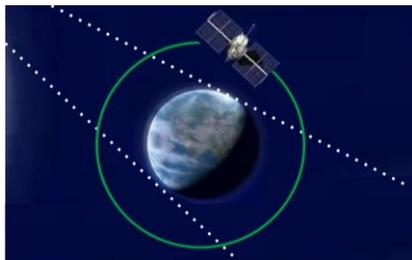
- скорости движения спутника, влияние на ВАХ зонда магнитного поля, Земли, потенциала его корпуса
- некорректная интерпретация полученных результатов
- большие массогабаритные размеры приемной аппаратуры из-за малых значений измеряемых токов
- активное воздействие на аппаратуру спутника

Цель работы

Разработка локальной методики и создание комплекта научной аппаратуры для измерения концентрации ионосферной плазмы и исследования ее частотных и пространственных флуктуаций на микро- и нано- спутниках на орбитах высотой порядка 500км

Измерение электронной компонентны концентрации плазмы по траектории движения

- среднее значение концентрации плазмы N_e
- терминатор (граница день-ночь)
- баблы и крупномасштабные неоднородности

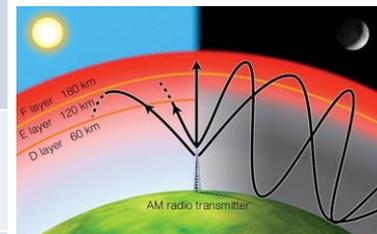


Характерное значение $N_e \sim 10^3 - 10^6 \text{ см}^{-3}$

Измерение колебаний концентрации, вызванных волновыми эффектами в ионосфере

Характерные частоты в ионосферной плазме на высоте 500 км:

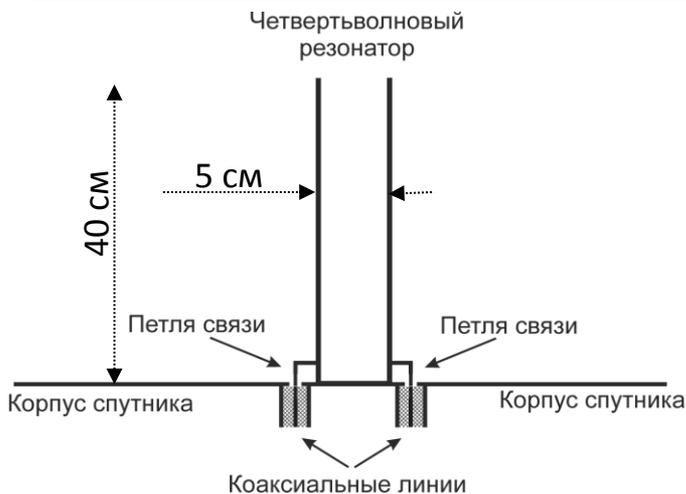
f	частота
f_{pi}	10 КГц
f_H^+	400 Гц
f_O^+	20 Гц
f_N^+	30 Гц



Необходимая полоса пропускания порядка **100КГц**

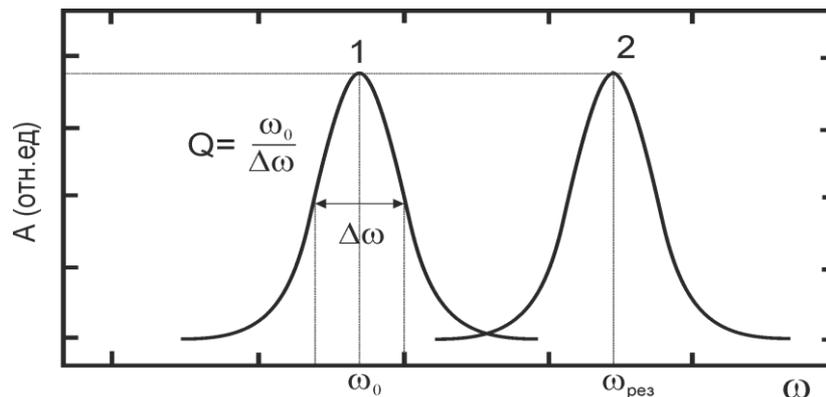
Описание датчика

Диагностика основана на измерении диэлектрической проницаемости плазмы ϵ , величина которой зависит от концентрации электронов N_e .



$f_0=180\text{МГц}$ – резонансная частота
 $Q=350$ – добротность резонатора

$$\epsilon = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}$$



1 - без плазмы; 2 - с плазмой

$$\omega_{res}^2 = \omega_{0res}^2 + \omega_{pe}^2(N) \quad N = \frac{m\omega_{pe}^2}{4\pi e^2}$$

Сдвиг резонансной частоты: 200Гц-300КГц ($N_e=10^3\text{-}10^6\text{см}^{-3}$)

Стандартный способ измерения f_{res} по положению максимума резонансной кривой неприменим. Для регистрации малых вариаций резонансной частоты диагностической системы в зависимости от концентрации плазмы был использован метод измерения фазового сдвига

Динамические параметры измерительной системы определяются добротностью резонатора: характерный временной масштаб флуктуации плотности, регистрируемый датчиком, должен быть больше характерного времени затухания колебаний в резонаторе $Q/(2\pi f_0) \sim 0,3$ мкс.

Планируемая полоса пропускания – 100КГц

Блок схема включения резонансного датчика

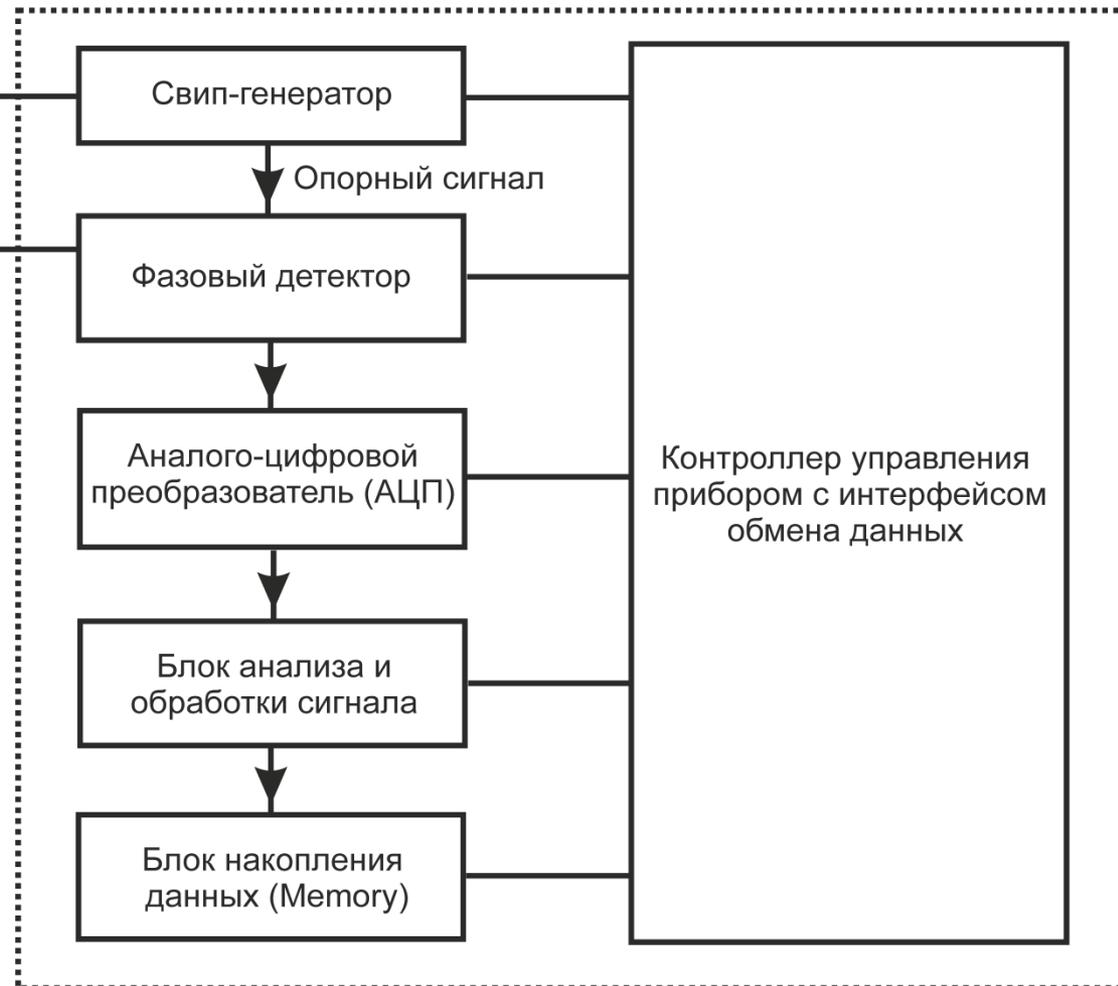
Измерительный блок

(располагается в ионосферной плазме)



Цифровой блок

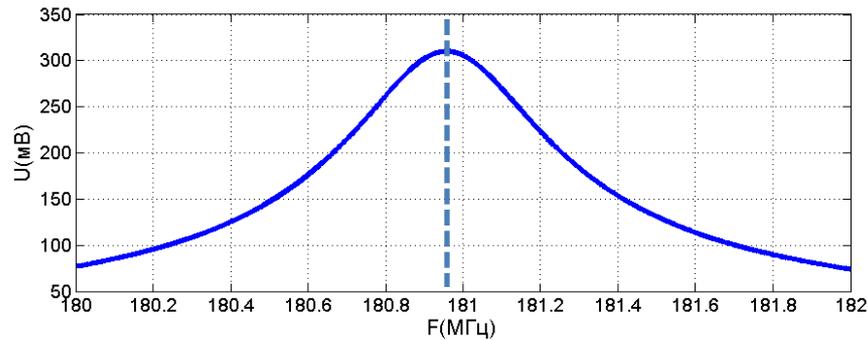
(располагается в корпусе спутника)



Цифровой блок

- цифровой свип-генератор (СГ), диапазон качания частоты 150-200 МГц, шаг по частоте 1-100кГц;
- Фазовый детектор;
- аналого-цифровой преобразователь (ADC),
- блок анализа и обработки сигнала в соответствии с логикой прибора;
- скоростную память (Memory);
- контроллер управления прибором с интерфейсом обмена с блоком накопления данных от всех датчиков микроспутника;

Электродинамические параметры датчика плотности плазмы

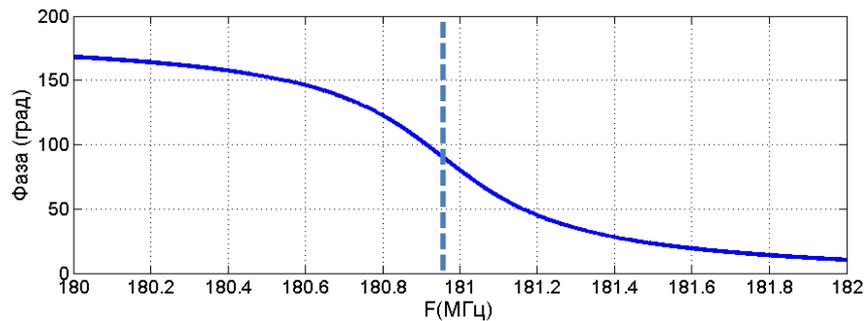


Резонансная кривая $U(\omega)$
измерительной системы.

$$f_{0res} = 180.956 \text{ МГц}$$

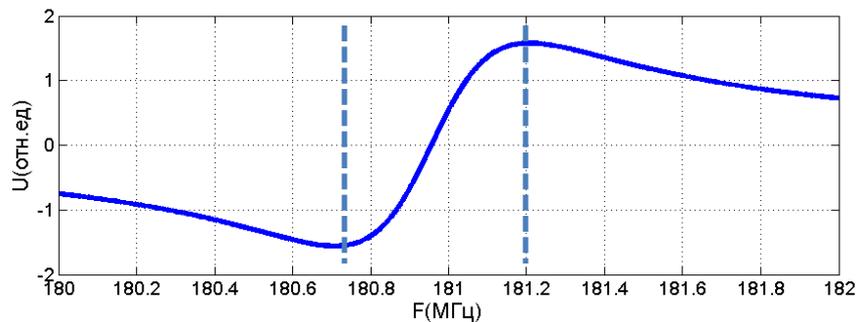
$$U_{max} = 310 \text{ мВ}$$

$$Q = 350$$



Фазовая характеристика $\varphi(\omega)$
измерительной системы.

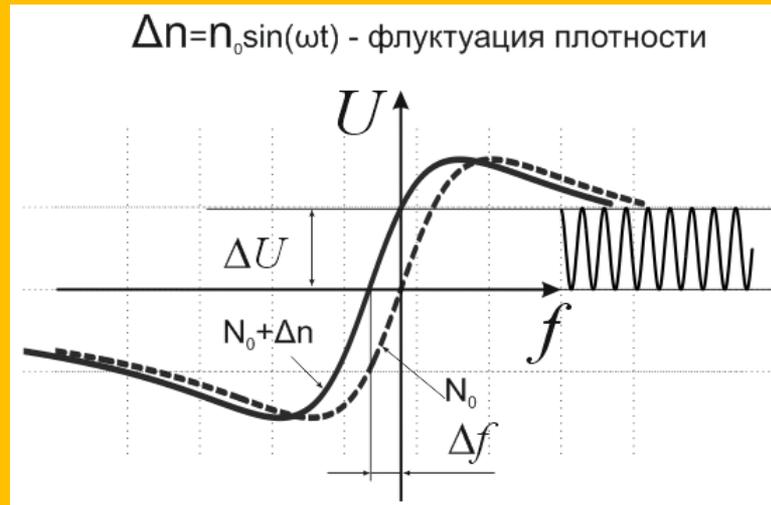
$$\varphi|_{f_{0res}} = \frac{\pi}{2}$$



Сигнал после фазового
детектора $\Phi(\omega)$

$$\Phi(\omega) = U(\omega) \cos \varphi(\omega)$$

Измерение флуктуаций концентрации плазмы



$$\Delta U = k U_0 Q_0 \Delta n / N c r$$

Ограничения метода: характерный временной масштаб возмущения $T < Q/\omega_{res}$.

Чувствительность метода:

$$\frac{\delta n}{N} = 10^{-3}$$

в плазме с концентрацией

$$N = 10^6 \text{ см}^{-3}$$

Тестирование датчика параметров плазмы для спутника

Тестирование датчика плотности плазмы проведена на крупномасштабной плазменной установке “КРОТ” в условиях, близких к натурным.



Крупномасштабная плазменная установка “КРОТ” (ИПФ РАН, г. Н. Новгород)

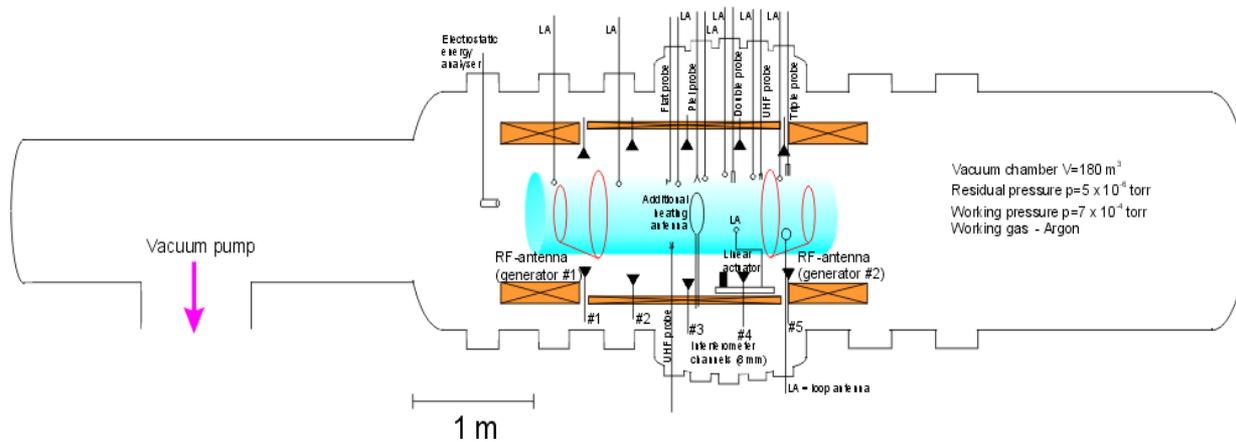
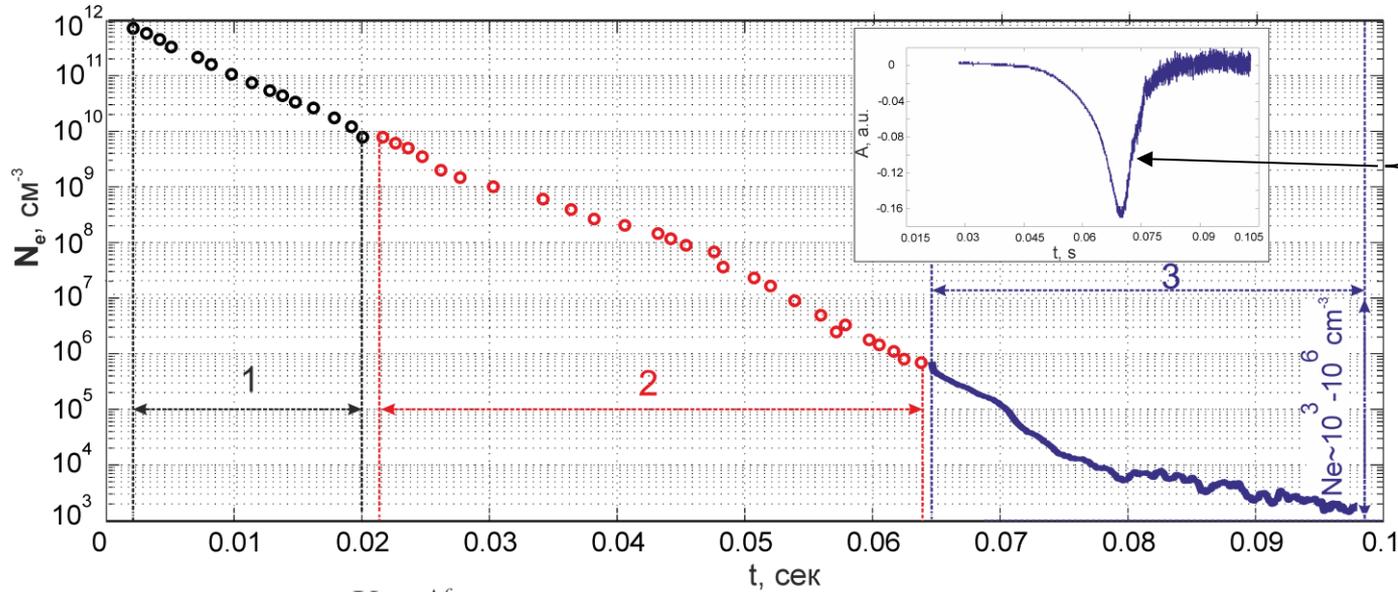


Схема Крупномасштабной плазменной установки “КРОТ”



Фотография разряда

Измерение концентрации на крупномасштабном стенде КРОТ

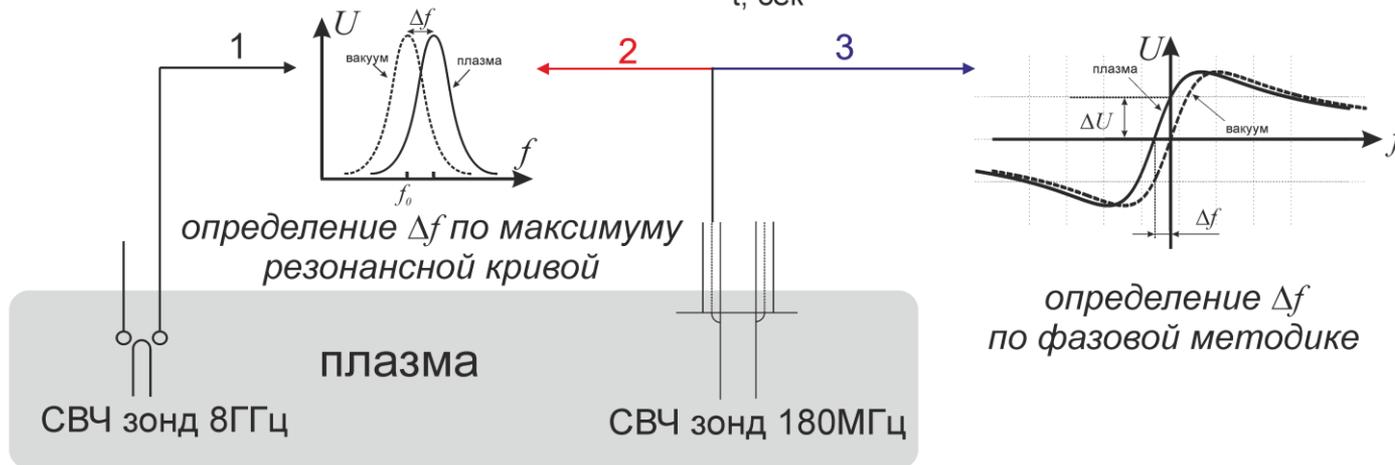


Характерный вид выходного сигнала с фазового детектора.

Время отсчитывается от пласмосоздающего импульса.

Температура электронов 0.5 эВ.

Чувствительность диагностики 10^3 см^{-3}



определение Δf по максимуму резонансной кривой

определение Δf по фазовой методике

1 – концентрация определена по сдвигу максимума резонансной кривой СВЧ зонда 8ГГц

2 – концентрация определена по сдвигу максимума резонансной кривой СВЧ зонда 180МГц

3 – концентрация определена по фазовой методике СВЧ зонда 180МГц

Приложения резонансного зонда

1. Датчик частиц

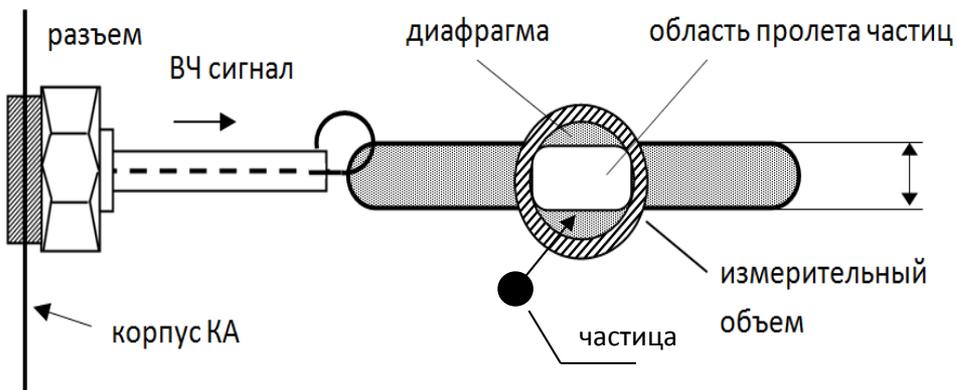
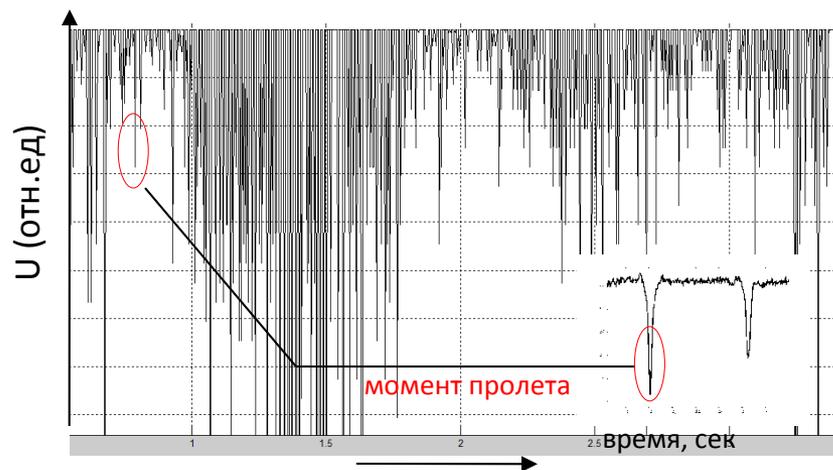
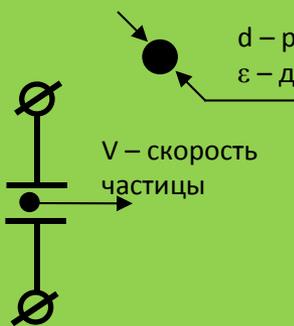


Схема датчика пыли



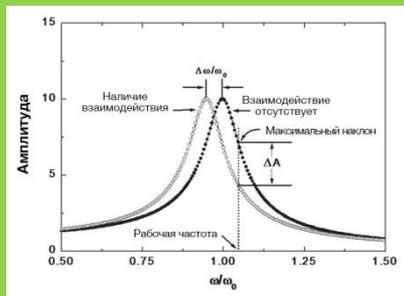
Осциллограмма сигнала с датчика при исследовании пролетных частиц

Оценка чувствительности метода



d – размер частицы
 ϵ – диэлектрическая проницаемость

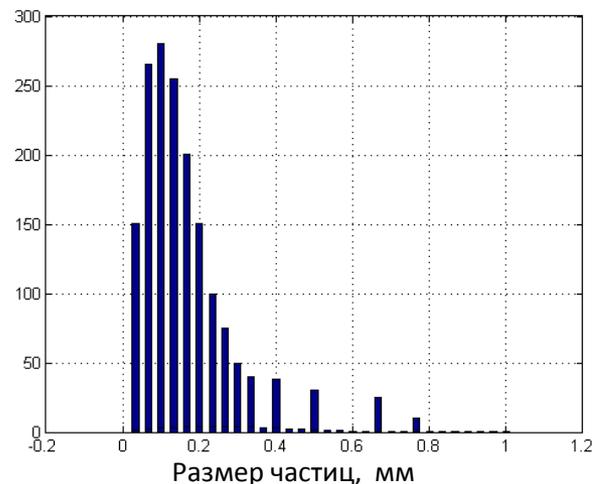
V – скорость частицы



$$1 \mu\text{м} \rightarrow \Delta f = 200 \text{ Гц}$$

Измерительная емкость

$$C = C_0 \cdot \left(1 + \frac{\epsilon - 1}{3} \frac{\Delta V}{V} \right)$$

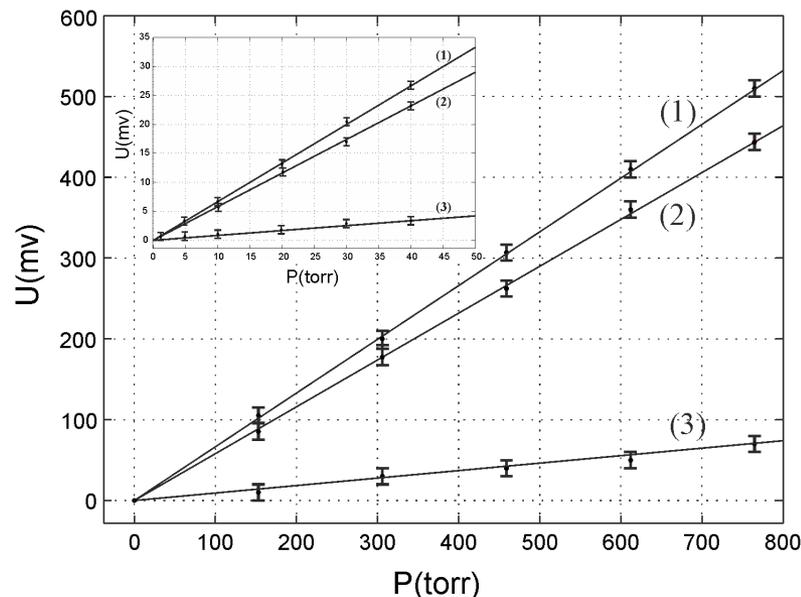


распределения частиц по размерам

2. Датчик давления газа



Фотография датчика
давления газа



Амплитуда сигнала с диагностической системы в зависимости от давления рабочего газа: (1) – воздух влажностью 2%, (2) – аргон, (3) – гелий.

**Точность измерения диэлектрической
проницаемости газа**

$$\varepsilon - 1 \propto 10^{-7}$$

Диапазон рабочих давлений

0.1- 760 мм.рт.ст.

Д. В. Янин, А. Г. Галка, А. В. Костров, С. Э. Привер, А.И. Смирнов.
Резонансный датчик давления газа на отрезке коаксиальной линии

// *Прикладная физика*. 2017. №1. С. 74-81.

Заключение

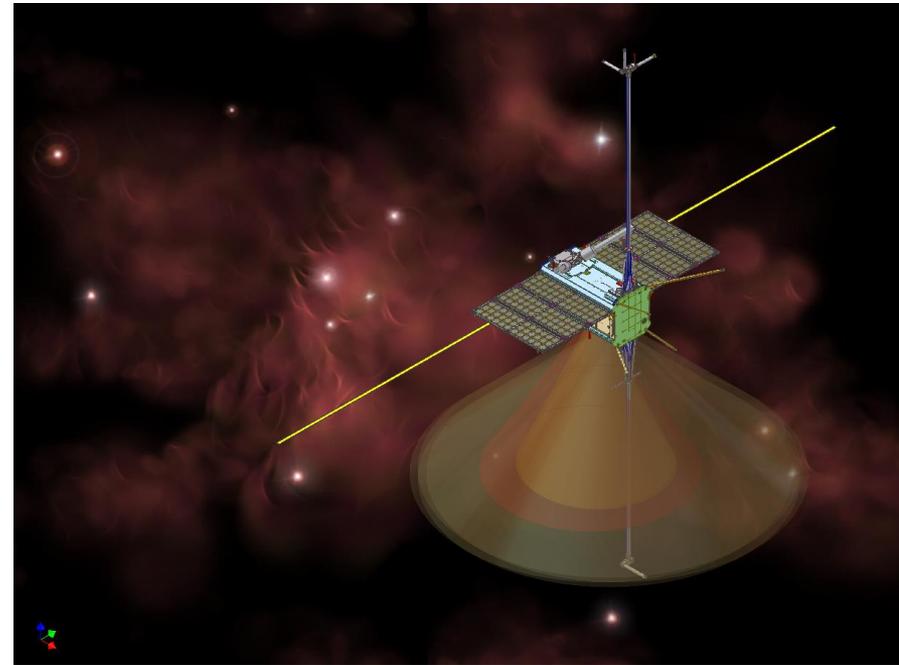
Основные параметры датчика параметров плазмы

Измеряемое значение концентрации: $10^3-10^6 \text{ см}^{-3}$

Частотный диапазон: **0-100 КГц**

Общая масса аппаратуры: **2кг**

Характерные размеры измерительной системы: **40см**



Запуск спутника намечен на 2020 год