

## Возможности радиолокации при идентификации типа льда в ядре кометы

О.В. Юшкова<sup>1</sup>, М.А. Анненков<sup>2</sup>, Е.В. Юшков<sup>2</sup>

*1* Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

[o.v.y@mail.ru](mailto:o.v.y@mail.ru)

*2* МГУ им. М.В. Ломоносова

[annenkov@physics.msu.ru](mailto:annenkov@physics.msu.ru)

*В работе обсуждаются возможности определения внутреннего строения кометы радиолокационными методами.*

*The possibility of determining the internal structure of the comet is discussed with radar methods.*

Приближение к Солнцу кометы Галлея в 1986 г. послужило импульсом для систематизации существующих данных о кометах и разработки новых методик исследования малых космических тел. Используя накопленный опыт запуска космических аппаратов к комете Галлея (“Вега-1”, “Вега-2”, “Giotto”, “Suisei”, “Sakigake”), в 2004г. Европейское Космическое Агентство осуществило запуск спутника к комете Чурюмова-Герасименко. Аппарат «Rosetta» вышел на орбиту кометы, и 12 ноября 2014 г. посадочный модуль «Philae» совершил мягкую посадку. После посадки было запланировано выполнение научной программы: определение параметров ядра кометы; исследование химического состава; изучение изменения активности кометы во времени. Однако из-за низкого запаса содержания аккумуляторов модуль «Philae», временно, переведен в спящий режим. После выхода из этого режима предполагается с помощью радиофизических методов провести исследование внутренней структуры и диэлектрических характеристик вещества кометы. И на орбитальный аппарат и на посадочный модуль установлены передатчик и приемник, как что возможно исследование кометы в режимах радиопросвечивания и моно- и бистатической локации. Цель данной работы – оценка возможности идентификации пород, слагающих ядро кометы.

Длительное существование комет, многократно пролетавших вблизи Солнца, обуславливается, по-видимому, незначительной потерей вещества при каждом пролете. Это можно объяснить тем, что при постепенной длительной сублимации водяного льда на расстояниях меньше 2-2,5 а. е. от Солнца, а льдов из  $C_2O$  и других более летучих газов на более далеком расстоянии, на поверхности ядра образовался пористый теплоизолирующий слой. Существует представление, что под теплоизолирующим слоем можно выделить менее пористый слой метеорных пород с вкраплением кристаллов льдов - “сухого снега”. Глубже, за счет увеличения доли льдистых компонентов залегает так называемый слой “кристаллизованного льда”, состоящий из смеси метеоритного вещества, космической пыли и льдистых включений. С увеличением глубины объем полостей, заполненных газами, видимо, уменьшается: полости полностью заполняются льдом. Этот слой был назван “слоем аморфного льда”. Сердцевину кометы, возможно, слагают твердые каменные (макробрекчиевые) структуры различного состава. Толщина слоев зависит от возраста комет и количества появления их около Солнца. Для интерпретации результатов радиофизических экспериментов, было бы интересно понять, как влияют столь разнообразные состояния ледовых слоев на распределение диэлектрических параметров в ядре кометы.

Ядра комет состоят приблизительно на две трети из льда  $H_2O$ ,  $CO$  или  $CO_2$  с примесью льдов других газов и из каменистого метеоритного вещества и осевшей космической пыли. Для расчета диэлектрической проницаемости льда  $\epsilon_l = \epsilon_l' + j\epsilon_l''$

использовалась формула Дебая, учитывающая явление релаксации поляризационных молекул в теории ориентационной поляризации:

$$\varepsilon'_i = \frac{\varepsilon_{st} + (f\tau)^2 \varepsilon_\infty}{1 + (f\tau)^2}$$

$$\varepsilon''_i = \frac{(\varepsilon_{st} - \varepsilon_\infty) f\tau}{1 + (f\tau)^2},$$

где  $\varepsilon_{st} = \lim_{\omega \rightarrow 0} \varepsilon'$ ,

$\varepsilon_\infty = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \varepsilon'$ ,

$\omega = 2\pi f$ ,

$f$  - частота волны;

$\lg \tau = 2900/T$ ,

$T$  – температура.

Электрические характеристики льдов исследованы подробно. При температурах ниже 100°K расчетные значения хорошо согласуются с экспериментальными данными при  $\varepsilon_\infty = 3.15$ ,  $\lg \tau = 15.3$  и  $\varepsilon_{st} \approx 133$  для частот 0.1- 10 МГц. Для определения диэлектрической проницаемости сред, представляющих собой смесь различных пород, взята формула:

$$\varepsilon_m = \left( \varepsilon_h^{1/2} + v_i (\varepsilon_i^{1/2} - \varepsilon_h^{1/2}) \right)^2,$$

где  $\varepsilon_h$  - диэлектрическая проницаемость основного компонента,

$\varepsilon_i$  - диэлектрическая проницаемость интрузии (включения),

$v_i$  - ее объемная часть ( $v_i = \frac{V_i}{V}$ , где  $V$  - объем смеси,  $V_i$  - объём интрузии).

Была проведена серия расчетов глубинного распределения диэлектрической проницаемости и поглощения в ядре кометы с учетом вариаций процентного состава составляющих его веществ. Анализ проведенных расчетов показал, что в тех случаях, когда процентный состав ледосодержащих компонент ядра кометы мал (до 40%) или, что скорее всего, процентное нарастание содержания льда при увеличении глубины меняется плавно (без скачков) – слой “сухого снега”, “кристаллизованного льда”, “слой аморфного льда” можно рассматривать как единый однородный, с точки зрения распространения радиоволн, слой с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 3 \div 4,5$  и тангенсом потерь  $\operatorname{tg} \delta$  не превышающим 0.045. Если внешний теплоизолирующий слой не достаточно плотный - твердые включения составляют меньше 30 - 40 % , его диэлектрическая проницаемость будет такая же, как и диэлектрическая проницаемость внутреннего ядра. Таким образом, при проведении радиолокационных исследований комета может рассматриваться либо как двухслойная структура: однородная макробрекчиевая сердцевина, окруженная толстым диэлектрически-однородным слоем смеси ледово-каменной крошки, либо как однородное тело.

*Работа выполнена при частичной поддержке Программы №9 фундаментальных исследований Президиума РАН "Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд".*