

Кафедра общей и теоретической физики

В. Лапковская¹

Построение карты сублимации основных космических льдов для Солнечной системы

(научно-исследовательская работа)

Аннотация

В данной работе представлен краткий обзор современных представлений о космических льдах и Солнечной системе. Решена задача о коэффициенте отражения плоской неполяризованной электромагнитной волны от плоской границы раздела двух диэлектрических сред. Рассчитано сферическое альbedo, как функция коэффициента преломления среды. С использованием законов излучения черного и серого тела построены уравнения теплового баланса, как для сублимирующих, так и для несублимирующих частиц. Получено аналитическое выражение для радиуса сферы сублимации макроскопической сферической частицы из космического льда в приближении модели серого тела. Построены карты сублимации двух видов: 1) *малые сферы сублимации* (H_2O , NH_3 , O_2 , CO_2), располагаются в области орбит классических планет; 2) *большие сферы сублимации* (CH_4 , N_2 , CO), которые располагаются в области орбит транснептуновых объектов. Показано, что радиус сферы сублимации "чувствителен" к величине коэффициента черноты космического льда. Для систем спутников Юпитера и Сатурна, планет-карликов и комет свойственен сезонный характер сублимации основных космических льдов.

Комментарии: работа выполнена под научным руководством старшего преподавателя кафедры общей и теоретической физики СамГУ, к.ф.-м.н., Филиппова Ю.П.² и представлена на Самарской областной научно-практической конференции школьников в 2010 г в секции "Астрономия".



Работа выставлена на **ASTRODROME**: 2.04.2010

¹E-mail:

²E-mail:yuphil@ssu.samara.ru

Оглавление

Введение	3
1 Современные представления о физике космических льдов и Солнечной системе	7
1.1 Физические свойства водяного и других космических льдов . . .	7
1.2 Современный состав Солнечной системы	14
1.3 Основные носители космических льдов	31
2 Построение карты сублимации ледяных частиц	34
2.1 Элементы теории излучения и термодинамики сферических ча- стиц	34
2.2 Расчет коэффициента отражения $\rho_n(\theta)$	37
2.3 Расчет сферического альбеда A_{ref}^I	39
2.4 Расчет эффективной температуры ледяных частиц	40
2.5 Расчет радиуса сферы сублимации космических льдов	43
2.6 Численные результаты и анализ	43
Заключение	52
Литература	54

Введение

Актуальность. Исследования карликовых планет, малых спутников классических планет и *малых тел Солнечной системы (комет)* с помощью беспилотных космических аппаратов составляют одно из самых приоритетных направлений космических исследований Солнечной системы в XXI веке [1, 2]. Главная цель таких полетов к указанным телам — объективная необходимость пополнения наших эмпирических знаний для решения одной из фундаментальных проблем естествознания — *проблемы происхождения и эволюции Солнечной системы*. Решение этой проблемы крайне необходимо для дальнейшего успешного развития наук о Земле. Именно ее нерешенность сильно затрудняет построение надежной геохимической модели Земли. Надежная геохимическая модель Земли нужна для разработки эффективной стратегии поисков и освоения новых ресурсов жизнеобеспечения человечества. Другая важная цель исследования Солнечной системы с помощью космических аппаратов — *поиск внеземной жизни в ее пределах*. В настоящее время к ней вновь проявляется повышенный интерес. В далекой перспективе возможна постановка и других целей таких полетов, например, освоение новых практически неисчерпаемых ресурсов околосолнечного космического пространства и поиск новых источников энергии.

На сегодняшний день уже выполнена серия космических экспедиций к телам Солнечной системы указанных типов, которые дали ценный эмпирический материал, обрабатываемый и по настоящее время. Однако этого материала явно недостаточно для решения указанной выше проблемы. Причин тому несколько. Одна из них заключается в том, что зондирование исследуемых тел, как правило, было дистанционным. Лишь с кометы P/Wild 2 были доставлены космохимические материалы, которые были подвергнуты тонкому химическому анализу в земных лабораториях. Дистанционное же определение химического состава тел, при всем совершенстве современных методов, имеет ограниченные возможности.

Другая причина для таких полетов заключается в *характере большинства тел, уже подвергавшихся дистанционному космохимическому зондированию*. Эти тела (классические планеты и их крупнейшие спутники) являются крупными массивными объектами, и за время существования Солнеч-

ной системы их поверхность и сами тела в целом претерпели значительную трансформацию в результате магматической дифференциации с последующим метаморфизмом их вещества и мощных эрозионных процессов на их поверхности. Эти процессы коренным образом преобразовали вещество планет и практически стерли память о первородном веществе. Таким образом, обнаружить на них первичное реликтовое вещество, сохранившееся со времени образования Солнечной системы, оказалось пока невозможным. Между тем, такое реликтовое вещество, собранное из различных областей Солнечной системы, может дать ключ к пониманию механизма важнейших процессов, происходивших в период формирования Солнечной системы. Поэтому его поиск должен быть одним из важнейших ориентиров при формировании современной программы исследования космического пространства. Информация о реликтовом веществе в начальный период образования Солнечной системы будет способствовать углублению наших знаний о больших планетах, которые сформировались из мельчайших небесных тел, содержавших данное вещество.

Принципиально иная ситуация обстоит с малыми телами в Солнечной системе — кометами, астероидами и малыми спутниками классических планет. Ввиду их малости при обычном содержании в их веществе радиоактивных элементов исключается внутренний нагрев и эндогенная тектоническая активность. Все карликовые планеты (за исключением Цереры) находятся на очень больших расстояниях от Солнца — основного источника энергии в Солнечной системе. Поэтому они могут сохранить тот исходный, первичный материал протопланетного облака, из которого образовались планеты Солнечной системы. Воздействие внешних факторов (солнечный ветер, космические лучи, метеориты), которому подвергаются малые тела, лишь в незначительной степени модифицируют поверхностный слой. Детальные исследования таких тел позволяют получить данные о ранних этапах образования тел Солнечной системы, происхождении и эволюции планет, в том числе и Земли.

В настоящее время осуществляется одновременно несколько космических миссий, ориентированных на изучение тел данных типов. Так с июля 2002 года Национальное управление США по авиации и исследованию космического пространства (NASA) осуществляет миссию «Контур» (The Comet Nucleus Tour, CONTOUR), главной целью которой является исследование трех комет Энке (Encke), Швассманна-Вахменна-3 (Schwassmann-Wachmann-3), де Арреста (d' Arrest). Та же организация с января 2006 года осуществляет управление космическим аппаратом «Новые горизонты» (New Horizons), нацеленным на изучение природы системы «Плутон», а также объектов пояса Койпера. Несколько космических миссий NASA к кометам получили продление программ исследований и функционируют сегодня, например, «Stardust»,

«Deep Impact». Европейское космическое агентство (ESA) с марта 2004 года осуществляет проект «Розетта» (Rosetta). Данный аппарат должен достичь в 2014 году окрестностей кометы Чурюмова-Герасименко (67 P/Churyumov-Gerasimenko) и детально изучить последнюю.

Поверхности всех исследуемых тел содержат космические льды (*объект настоящих исследований*), которые при приближении к Солнцу начинают активно сублимировать и порождают газовую оболочку около тела — *кому* у кометы, *нестационарную атмосферу* у карликовых планет. При сублимации газ увлекает с собой мельчайшие пылевые частицы. Именно такие газо-пылевые оболочки данных тел, главным образом, исследуют эти аппараты. Для количественного анализа химического состава газовых оболочек детекторы должны быть откалиброваны на регистрацию основных химических соединений, могущих быть при данных физических условиях. Именно поэтому необходимо точно знать какие основные составляющие оболочек могут быть при этих условиях.

Сегодня известно большое множество различных сортов космических льдов, но основными, по праву, считаются льды следующих химических соединений H_2O , CO_2 , CO , N_2 , O_2 , NH_3 , CH_4 . Поскольку каждый лед начинает активно сублимировать при температуре выше некоторой критической, называемой *температурой сублимации* T_{sub} , а в Солнечной системе основным источником энергии является Солнце, то должна существовать *сфера сублимации* для каждого сорта льда [3]. Под *сферой сублимации* будем понимать *сферу определенного радиуса, с центром совпадающим с центром Солнца, находясь внутри которой, любое макроскопическое тело, поверхность которого содержит лед данного сорта, уже активно сублимирует его в окружающее пространство*. Зная расположения сфер сублимации и орбиты небесных тел, можно дать надежные прогнозы о присутствии соответствующих химических элементов в их газо-пылевых оболочках (что составляет *предмет настоящей работы*).

Данный вопрос является особенно актуальным в отношении системы «Плутон» и миссии New Horizons. Организаторы миссии обеспокоены одним вопросом — успеет ли аппарат прийти к Плутону (в 2015 году) до того, как вымерзнет основная часть атмосфер Плутона и его спутника — Харона. Многие специалисты придерживаются следующей оценки даты последнего события — 2015-2020 гг. В силу малости масс данных тел состав и темпы эволюции их атмосфер существенно зависят от скорости сублимации льдов, покрывающих поверхности планет, а следовательно, и от их температуры. Если температура льда меньше его температуры сублимации T_{sub} , то процесс сублимации прекращается. Это достигается на гелиоцентрических расстояниях $r_P \geq R_{\text{sub}}$, где R_{sub} — радиус сферы сублимации. Зная R_{sub} и температуру T_{sub} для данных

сортов льда, можно дать жесткие оценки на процентный состав атмосферы и давление к моменту прибытия аппарата.

В связи со сказанным главной целью настоящей работы является построение карты сублимации основных космических льдов для Солнечной системы.

Согласно сформулированной цели основными задачами настоящей работы являются следующие положения:

1. Расчет эффективной температуры макроскопических сферических частиц из космических льдов с использованием метода геометрической оптики и модели серого тела.

2. Расчет радиусов сфер сублимации для H_2O , CO_2 , CO , N_2 , O_2 , NH_3 , CH_4 космических льдов.

3. Количественный анализ полученных результатов и построение карты сублимации. Определение основных составляющих атмосфер на разных участках их траекторий следующих космических тел: Плутона, Эриды, Седны и крупных спутников планет-гигантов. Построение прогноза о присутствии метана в атмосфере Плутона к моменту прилета аппарата.

Основными методами решения поставленных задач являются:

1. Метод геометрической оптики и некоторые результаты волновой оптики;

2. Элементы теории кривых второго порядка, основные свойства эллипса;

3. Элементы термодинамики и астрофизики Солнечной системы.

Данная работа имеет следующую структуру.

Первая глава посвящена современным представлениям о физике космических льдов и Солнечной системе.

Во **второй главе** подробно представлены решения поставленных теоретических задач и анализ численных результатов.

Резюме по проделанной работе представлено в **заключении**. Финальная часть работы содержит список использованных источников.

Глава 1

Современные представления о физике космических льдов и Солнечной системе

В настоящей главе будут подробно изложены современные представления о Солнечной системе и физике космических льдов. Будут также представлены элементы термодинамики и фотометрии.

1.1 Физические свойства водяного и других космических льдов

В широком смысле, лёд — это твёрдое состояние неметаллического вещества, которое при стандартной температуре и давлении находится в жидком или газообразном состоянии. К основным космическим льдам стоит отнести льды таких химических соединений как H_2O (водяной лёд), CO_2 (сухой лёд), CO (моноксид углерода), NH_3 (аммиачный лёд), CH_4 (метановый лёд), N_2 (азотный лёд), O_2 (кислородный лёд). Именно льды данных химических соединений наиболее часто встречаются в Солнечной системе.



Рис. 1. Массивы водяного льда в околополярных областях.

Физические свойства водяного льда. Наиболее распространенным и хорошо изученным видом льда является водяной лёд (см. рис. 1), в связи со сказанным рассмотрим его физические свойства подробнее. Водяной лёд бесцветен. В больших скоплениях он приобретает синеватый оттенок. Имеет, как правило, стеклянный блеск. Представляет собой оптически прозрачную среду с низким показателем преломления ($n = 1.310$).

Эффекты спайности льду, как правило, не свойственны. Водяной лёд яв-