

# АСТРОНОМИЯ

УДК 521 : 523.4

## ПОСТРОЕНИЕ 3D-КАРТ ЗОН СУБЛИМАЦИИ ДЛЯ ОСНОВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛЬДОВ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ. КАЧЕСТВЕННЫЙ ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОГО СОСТАВА АТМОСФЕР СПУТНИКОВ КЛАССИЧЕСКИХ ПЛАНЕТ ТРАНСНЕПТУНОВЫХ ОБЪЕКТОВ И КОМЕТ

Ю. П. Филиппов

В настоящей работе, с использованием результатов предшествующих работ автора настоящей работы, выполнен расчёт температуры сферической частицы состоящей из летучего вещества. Аналитические результаты представлены в терминах как светимости Солнца, так и эффективной температуры его фотосферы. С использованием полученных результатов выполнен расчёт радиуса сферы сублимации летучего вещества, из которого состоит частица. Выполнен численный анализ полученных результатов для сферического альbedo и эффективной температуры. Показано, что наибольшая чувствительность последнего параметра достигается в случае его зависимости от коэффициента черноты летучего вещества. Построены 3D-карты для семи основных космических льдов Солнечной системы при различных значениях коэффициента черноты. Продемонстрировано, что орбиты всех планет земной группы лежат полностью внутри сфер сублимации всех рассматриваемых космических льдов, следовательно в атмосферах этих планет могут наблюдаться рассматриваемые химические соединения в газовой фазе. В случае Юпитера показано, что его спутники не могут в своих атмосферах содержать диоксид углерода, в атмосферах спутников Сатурна невозможно наблюдать как диоксид углерода, так и водяной пар, а в атмосферах спутников Урана и Нептуна невозможно присутствие диоксида углерода, водяного пара, паров аммиака и молекулярного кислорода. Однако данные вещества могут формировать поверхности этих спутников. Большинство карликовых планет имеет сезонный характер присутствия метана в своих атмосферах. Транснептуновый объект Седна, лишь часть своего орбитального периода может пребывать в пределах зон сублимаций молекулярного азота и монооксида углерода. Однако на большей части ее периода, её атмосфера полностью кристаллизуется, а сама Седна является безатмосферным небесным телом.

**Ключевые слова:** сублимация, карта, лёд, атмосфера, планета, Солнечная система.

*Актуальность работы.* Исследования природы карликовых планет, малых спутников классических планет и малых тел Солнечной системы (астероидов, комет и транснептуновых объектов) с помощью космических аппаратов составляют одно из приоритетных направлений исследований Солнечной системы в XXI веке [1]. Главная цель таких исследований – объективная необходимость пополнения наших эмпирических знаний для решения одной из фундаментальных проблем естествозна-

ния – проблемы происхождения и эволюции Солнечной системы. Решение этой проблемы крайне необходимо для дальнейшего успешного развития наук о Земле. Именно её нерешённость сильно затрудняет построение надёжной геохимической модели Земли. Последняя нужна для разработки эффективной стратегии поисков и освоения новых ресурсов жизнеобеспечения человечества.

Другая важная цель этих исследований – поиск внеземной жизни в Солнечной системе. В настоящее время к ней вновь проявляется повышенный интерес.

В перспективе возможна постановка других целей этих исследований, например, освоение новых практически неисчерпаемых ресурсов около-солнечного космического пространства и поиск новых источников энергии.

© Филиппов Ю. П., 2023.

Филиппов Юрий Петрович,

(filippov.yur@ssau.ru),

доцент кафедры общей и теоретической физики

Самарского университета,

443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34.

На сегодняшний день уже выполнена серия экспедиций к данным телам Солнечной системы, которые дали ценный эмпирический материал, обрабатываемый и по настоящее время. Однако этого материала явно недостаточно для решения указанных выше проблем. Причин тому несколько. Одна из них заключается в том, что зондирование исследуемых тел, как правило, было дистанционным. Лишь с кометы P/Wild 2 и астероида Итокава (с помощью космических аппаратов, КА) были доставлены космохимические материалы, которые были подвергнуты тонкому химическому анализу в земных лабораториях [2,3]. Дистанционное определение химического состава тел, при всем совершенстве современных методов, имеет ограниченные возможности.

Ввиду малости значений масс комет, астероидов и малых спутников классических планет в их телах отсутствует дифференцирование вещества, поэтому здесь радиоактивные элементы должны быть распределены равномерно, что исключает значительный внутренний нагрев и эндогенную тектоническую активность.

Все карликовые планеты (за исключением Цереры), транснептуновые объекты и почти все известные кометы всю свою «жизнь» (или, как минимум, её большую часть) находятся на очень больших расстояниях от Солнца – основного источника энергии в Солнечной системе. Поэтому они могут сохранить тот первичный материал протопланетного облака, из которого образовалась вся Солнечная система. Воздействие внешних факторов (солнечный ветер, космические лучи, метеориты), которому подвергаются малые тела, лишь в незначительной степени модифицируют их поверхностный слой. Прецизионные исследования природы таких тел с помощью КА в будущем позволят получить ценные данные об образовании и ранних этапах эволюции тел Солнечной системы, в частности, о происхождении и эволюции планет, в том числе и Земли.

Поверхности всех исследуемых тел содержат космические льды (*объект настоящих исследований*), которые при приближении к Солнцу активно сублимируют и порождают газовую оболочку вокруг тела – *кому* у кометы, *нестационарную атмосферу* у карликовых планет. При сублимации газ увлекает с собой мельчайшие пылевые частицы. Именно такие газо-пылевые оболочки (ГПО) данных тел, главным образом, исследуют в настоящее время КА. Для количественного анализа химического состава ГПО детекторы КА должны быть откалиброваны на регистрацию основных химических соединений, которые могут быть в них при данных физических условиях. Именно поэтому предварительно необходимо точно знать основные газовые фракции этих оболочек.

Сегодня известен широкий спектр космических льдов (КЛ). Каждый лёд начинает активно сублимировать при температуре выше некоторой критической, называемой *температурой сублимации*  $T_{\text{sub}}$ . В Солнечной системе основным источником энергии является Солнце, следовательно должна существовать *сфера сублимации*<sup>1</sup> для космического льда каждого вида [4]. Зная расположения сфер сублимации КЛ и орбиты небесных тел, можно дать надёжные прогнозы о присутствии/отсутствии соответствующих химических соединений в их ГПО (что составляет *предмет настоящей работы*).

В связи со сказанным, *главной целью настоящей работы* является построение 3D-карт сублимации основных космических льдов для Солнечной системы. Выполнение качественного химического анализа возможного состава атмосфер спутников классических планет, транснептуновых объектов и комет на данном гелиоцентрическом расстоянии.

### 1. Основные космические льды и их некоторые физические свойства

*Лёд* – это твердое состояние неметаллического вещества, которое при нормальных условиях ( $p_0 = 101325$  Па,  $T_0 = 273.15$  К) находится в жидком или газообразном состоянии. К основным космическим льдам относятся следующие химические соединения:  $\text{H}_2\text{O}$  (водяной лёд),  $\text{CO}_2$  (сухой лёд),  $\text{CO}$  (моноксид углерода),  $\text{NH}_3$  (аммиачный лёд),  $\text{CH}_4$  (метановый лёд),  $\text{N}_2$  (азотный лёд),  $\text{O}_2$  (кислородный лёд). Льды именно данных химических соединений наиболее часто встречаются в Солнечной системе.

*Физические свойства водяного льда.* Плотность воды, как и других веществ, является функцией температуры и давления. При нормальных условиях данный параметр равен  $1000 \text{ кг/м}^3$ , при этом температура кристаллизации воды составляет  $273.15 \text{ К}$ . *Процесс кристаллизации* происходит скачком, с выделением теплоты. Обратный процесс – *плавление* сопровождается равномерным поглощением того же количества теплоты.

Данные наблюдений показывают, что с понижением температуры удельная теплоёмкость льда понижается, а теплопроводность и плотность льда увеличиваются. Теплопроводность льда в 4 раза больше соответствующего значения для жидкой воды при одинаковых граничных условиях. В теле льда всегда имеются полости с рассолом, воздухом или газом. Отношение объёма пузырьков с газом или воздухом к общему объёму образца льда, выраженное в процентах, называется *пористостью* льда. Пористость морских льдов может колебаться в интервале  $5 \div 13\%$ . Пористость льда, как твёрдость и прочность, зависит от плотности льда, – чем больше плотность льда, тем меньше

<sup>1</sup>Под *сферой сублимации* будем понимать сферу определённого радиуса, с центром совпадающим с центром Солнца, находясь внутри которой, любое макроскопическое тело, поверхность которого содержит лёд данного сорта, уже активно сублимирует его в окружающее пространство.



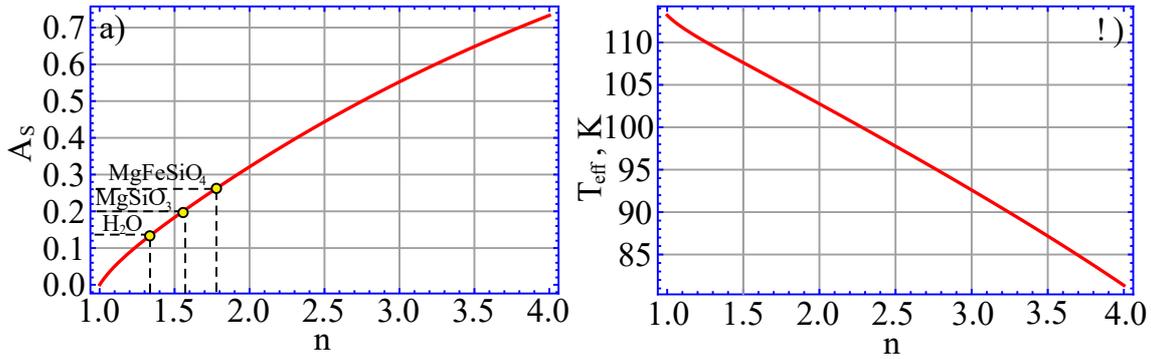


Рис. 2. К определению зависимости от показателя преломления а) сферического альbedo, б) эффективной температуры вещества частицы, при значениях коэффициента черноты  $\varepsilon = 0.98$  и гелиоцентрического расстояния  $r = 6$  а.е. (пояснения в тексте)

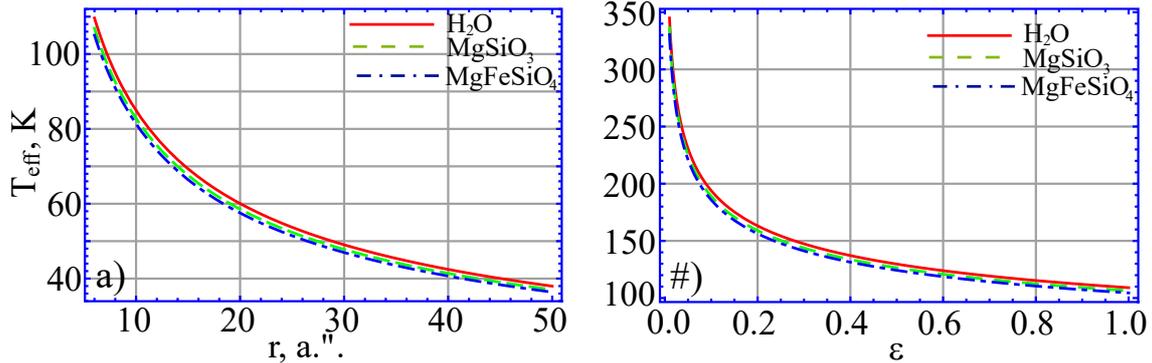


Рис. 3. К определению зависимости эффективной температуры частицы от а) её гелиоцентрического расстояния, при значении коэффициента черноты  $\varepsilon = 0.98$ ; б) коэффициента черноты ( $\varepsilon$ ) вещества частицы при  $r = 6$  а.е. в случае трёх космических сред: водяного льда ( $\text{H}_2\text{O}$ ), пироксена ( $\text{MgSiO}_3$ ), оливина ( $\text{MgFeSiO}_4$ ) (пояснения в тексте)

дости близка к мелу. Некоторые свойства основных космических льдов, используемые в настоящей работе, представлены в таблице 1.

## 2. Уравнение энергетического баланса и определение температуры сферической частицы из летучего вещества

Рассмотрим сферическую частицу из летучего вещества (космического льда) радиуса  $R_p$ , находящуюся в прямом потоке электромагнитного излучения (ЭМИ) Солнца. Предположим, что у поверхности частицы болометрическая интенсивность ЭМИ Солнца составляет  $\mathcal{I}$ . Тогда на частицу падает поток излучения, определяемый выражением:  $\Phi_0 = \mathcal{I} \pi R_p^2$ . Доля  $A_S$  (называемая сферическим альbedo) от потока  $\Phi_0$  отражается поверхностью частицы в космическое пространство и определяется формулой  $\Phi_{\text{ref}} = A_S \Phi_0$ . Здесь и далее будем использовать явное выражение для сферического альbedo частицы, как функции абсолютного действительного показателя преломления  $n$  ее вещества, согласно [5,6]:

$$A_S = \frac{1}{3(n^2 - 1)^2(n^2 + 1)^3} \left[ 1 + 3n^2 - 10n^3 + 18n^4 - 6n^5 + 10n^6 - 6n^7 - 3n^8 - 10n^9 + 3n^{10} + 24(n^4 + n^8) \ln[n] - 3(n^2 - 4n^4 + 6n^6 - 4n^8 + n^{10}) \ln \left[ \frac{n+1}{n-1} \right] \right]. \quad (2.1)$$

Тогда поток ЭМИ, поглощённый частицей, есть  $\Phi_{\text{abs}} = \Phi_0 - \Phi_{\text{ref}} = \mathcal{I} \pi R_p^2 (1 - A_S)$ . Согласно зако-

ну сохранения энергии, в равновесном состоянии поток поглощённого ледяной частицей излучения тратится на испускание ЭМИ ( $\Phi_{\text{rad}}$ ) и на сублимацию льда ( $\Phi_{\text{sub}}$ ):

$$\Phi_{\text{abs}} = \Phi_{\text{rad}} + \Phi_{\text{sub}}. \quad (2.2)$$

Поток ЭМИ, испускаемого поверхностью ледяной частицы можно представить выражением [7]:  $\Phi_{\text{rad}} = M 4 \pi R_p^2$ , здесь  $M$  – поверхностная светимость источника, которая для серого тела может быть представлена обобщением закона Стефана-Больцмана:  $M = \varepsilon \sigma T_{\text{eff}}^4$ , здесь  $\varepsilon$  – коэффициент черноты для данного тела (данная величина может принимать значения из интервала  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ ),  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана-Больцмана,  $T_{\text{eff}}$  – эффективная температура ледяной частицы.

Поток энергии, затрачиваемый на сублимацию вещества, можно представить в виде [8]:  $\Phi_{\text{sub}} = \frac{L}{N_A} Z_{HK}(T_P) \theta (T_P - T_{\text{sub}}) 4 \pi R_p^2$ , здесь  $L$  – теплота сублимации единицы вещества частицы,  $N_A$  – постоянная Авогадро,  $Z_{HK}(T_P)$  – коэффициент сублимации Герца-Кнудсена, определяемого выражением

$$Z_{HK}(T_P) = \frac{p(T_P)}{\sqrt{2 \pi m k T_P}}, \quad p(T_P) = A \exp[-B/T_P],$$

где  $m$  – масса молекулы сублимируемого вещества,  $p$  – давление сублимируемого газа,

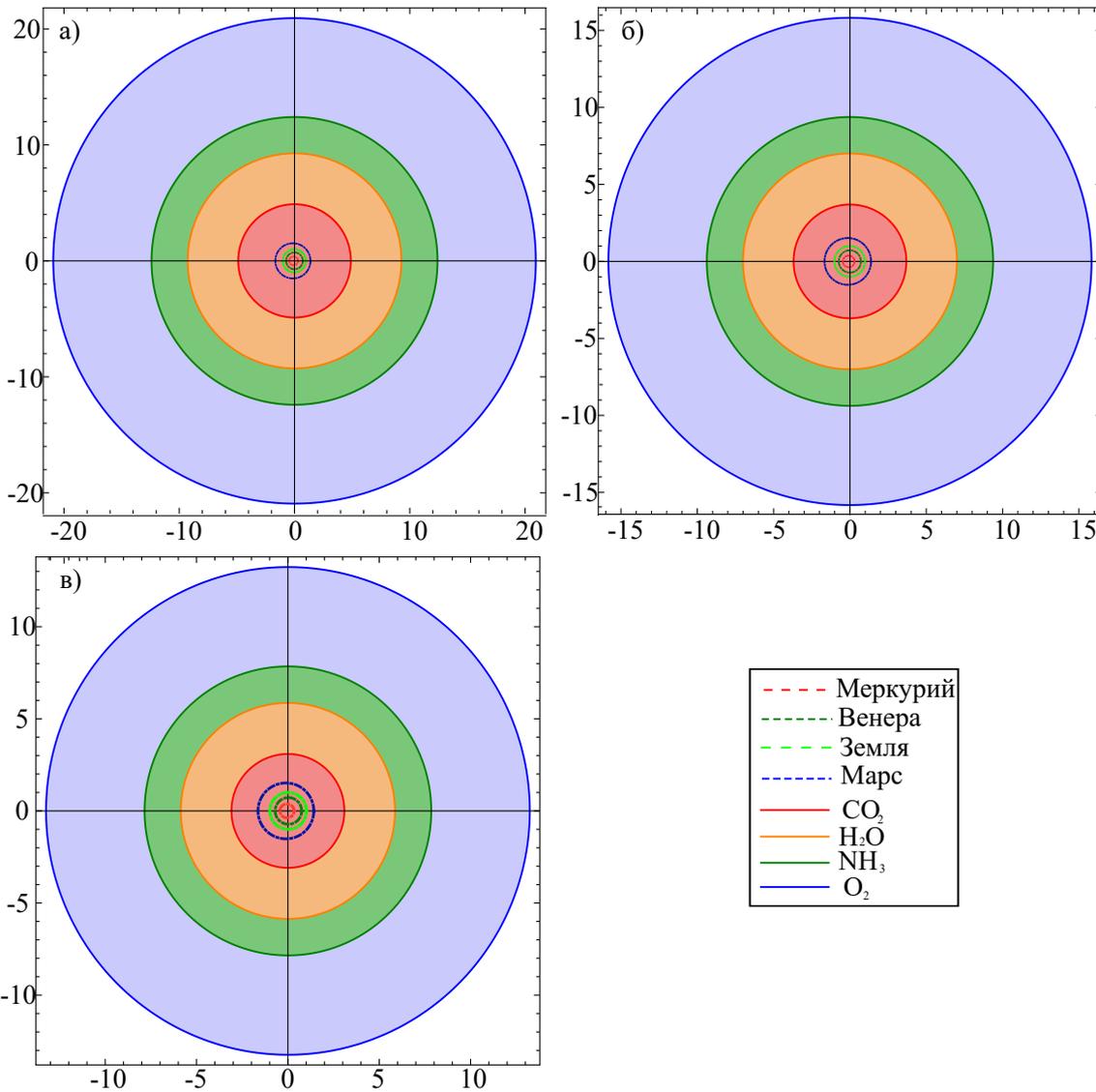


Рис. 4. Карты сфер сублимации космических льдов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{O}_2$ ) и орбит планет земной группы, в случае значений коэффициента черноты ( $\varepsilon$ ): а)  $\varepsilon = 0.4$ , б)  $\varepsilon = 0.7$ , в)  $\varepsilon = 1$  (пояснения в тексте)

$A, B$  – эмпирические параметры;  $\theta(x)$  – функция Хевисайда,  $T_{\text{sub}}$  – температура сублимации вещества частицы. В результате уравнение (2.2) можно представить в виде:

$$(1 - A_S)\mathcal{I} = 4 \left[ \frac{L}{N_A} Z_{HK}(T_P)\theta(T_P - T_{\text{sub}}) + \varepsilon\sigma T_P^4 \right].$$

Решая последнее трансцендентное уравнение численным образом, можно определить температуру  $T_P$  ледяной частицы [9].

В случае  $T_P < T_{\text{sub}}$  процесс сублимации льда подавлен, решение для температуры частицы можно представить в явном виде:

$$T_P = \sqrt[4]{\frac{(1 - A_S)\mathcal{I}}{4\varepsilon\sigma}}. \quad (2.3)$$

Далее определим интенсивность падающего света на частицу, находящуюся на гелиоцентрическом расстоянии  $r$  от Солнца. Для этого учтём, что ЭМИ Солнца имеет изотропный характер распространения в пространстве. Кроме того, область

межпланетного пространства, отделяющая Солнце и частицу, является ультраразреженной средой, поэтому поглощением ЭМИ Солнца данной межпланетной средой будем пренебрегать. Следовательно, интенсивность ЭМИ Солнца запишется так [10]:

$$\mathcal{I} = \frac{L_{\odot}}{4\pi r^2},$$

здесь  $L_{\odot}$  – светимость Солнца ( $L_{\odot} = 3.827 \cdot 10^{26}$  Вт). С учетом последнего результата, формулу (2.3) можно переписать в виде:

$$T_{\text{eff}} = \frac{1}{2} \sqrt[4]{\frac{(1 - A_S)L_{\odot}}{\pi\varepsilon\sigma}} \frac{1}{\sqrt{r}}. \quad (2.4)$$

Представим температуру частицы в терминах эффективной температуры  $T_{\odot}$  поверхности Солнца. Светимость Солнца можно представить следующим выражением:  $L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4$ , здесь  $R_{\odot}$  – радиус Солнца. Тогда температуру частицы можно записать так:

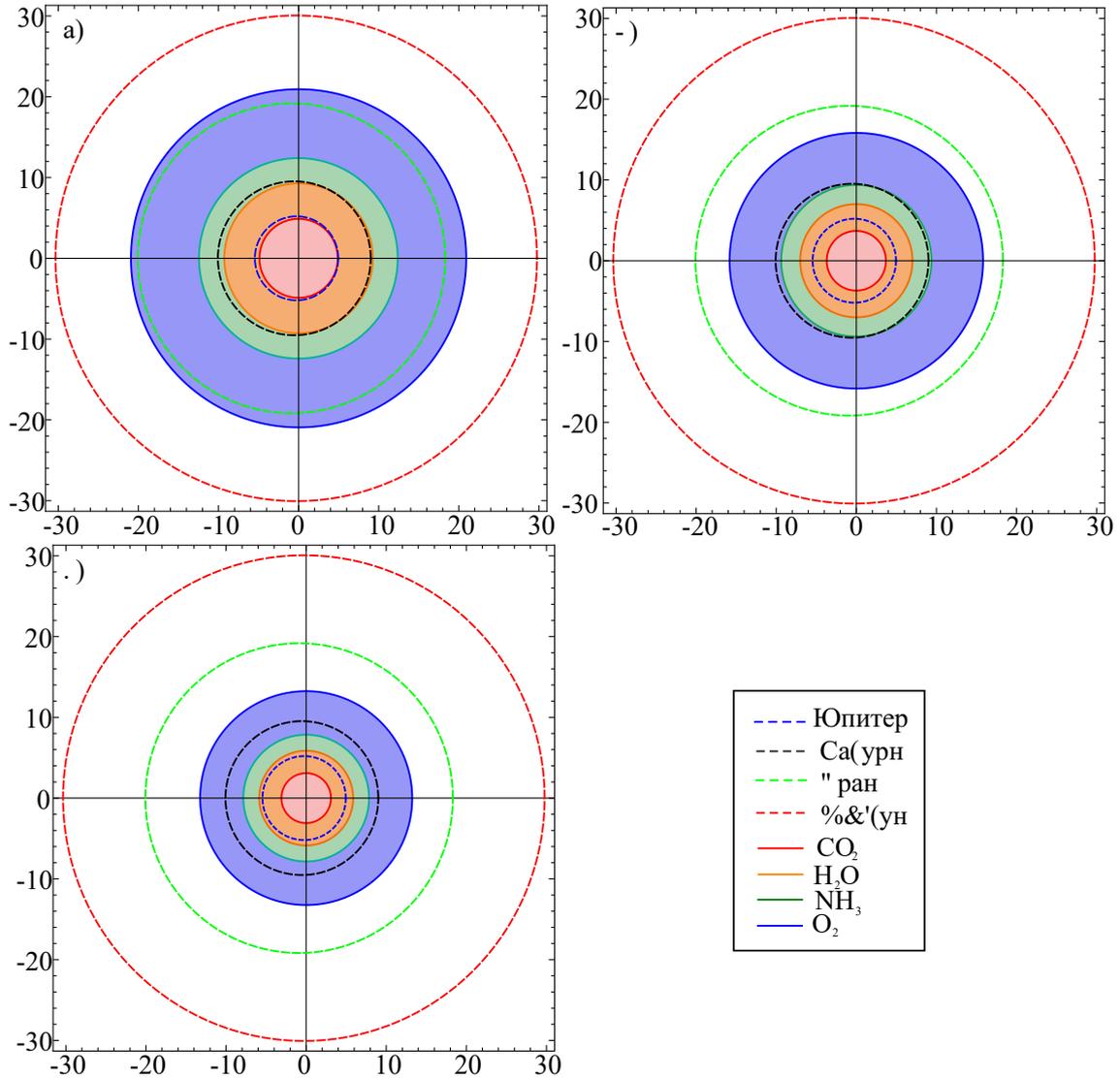


Рис. 5. Карты сфер сублимации космических льдов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{O}_2$ ) и орбит планет-гигантов, в случае значений коэффициента черноты ( $\varepsilon$ ): а)  $\varepsilon = 0.4$ , б)  $\varepsilon = 0.7$ , в)  $\varepsilon = 1$  (пояснения в тексте)

$$T_{\text{eff}} = T_{\odot} \sqrt[4]{\frac{1 - A_S}{4\varepsilon}} \sqrt{\frac{\mathfrak{R}_{\odot}}{r}}. \quad (2.5)$$

### 3. Расчет радиуса сферы сублимации для сферической частицы из летучего вещества

В настоящем параграфе получим аналитический результат для радиуса сферы сублимации для сферической частицы из летучего вещества (космического льда) с температурой сублимации  $T_{\text{sub}}$ . Предположим, что данная частица располагается точно на гелиоцентрическом расстоянии  $r$ , на котором её температура поверхности равна температуре сублимации космического льда ( $T_{\text{eff}} = T_{\text{sub}}$ ), из которого она состоит. Поскольку солнечное излучение имеет изотропный характер распространения, то в любой точке поверхности сферы радиуса  $r = R_{\text{sub}}$ , центр которой совпадает с центром Солнца, будет выполняться указанное равенство. Данную сферу будем называть далее *сферой сублимации* космического льда с температурой сублимации  $T_{\text{sub}}$ . В итоге искомый радиус сфе-

ры сублимации в терминах светимости Солнца, согласно (2.4), представляется так:

$$R_{\text{sub}} = \frac{1}{4T_{\text{sub}}^2} \sqrt{\frac{(1 - A_S)L_{\odot}}{\pi\varepsilon\sigma}}. \quad (3.1)$$

Представим также полученный результат в терминах радиуса Солнца и эффективной температуры его поверхности. С использованием выражения (2.5), последний результат можно представить в виде:

$$R_{\text{sub}} = \mathfrak{R}_{\odot} \left( \frac{T_{\odot}}{T_{\text{sub}}} \right)^2 \sqrt{\frac{(1 - A_S)}{4\varepsilon}}. \quad (3.2)$$

Из результатов (3.1)-(3.2) следует, что радиус сферы сублимации зависит от значений светимости Солнца (от температуры поверхности Солнца и его радиуса), сферического альbedo частицы и её коэффициента черноты.

### 4. Численные результаты и их анализ

В настоящем параграфе будут рассмотрены основные численные результаты и выполнен их анализ.

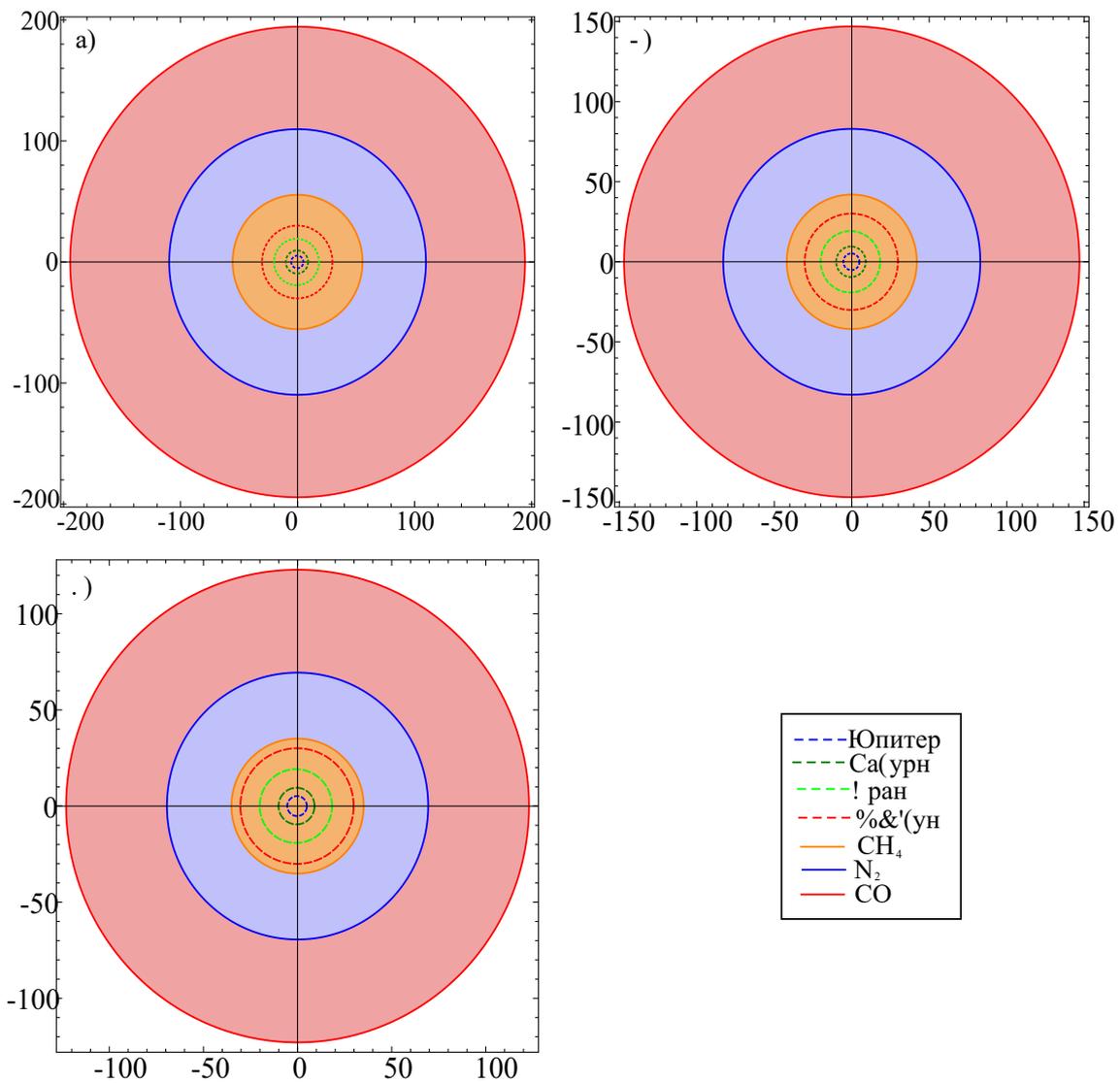


Рис. 6. Карты сфер сублимации космических льдов ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ) и орбит планет-гигантов, в случае значений коэффициента черноты ( $\varepsilon$ ): а)  $\varepsilon = 0.4$ , б)  $\varepsilon = 0.7$ , в)  $\varepsilon = 1$  (пояснения в тексте)

На рисунке 2.а) представлена зависимость сферического альbedo сферической частицы от абсолютного показателя преломления  $n$ , в случае диапазона значений аргумента:  $1 \div 4$ . Очевидно, что на данном интервале искомая функция является монотонно возрастающей. При этом в случае частицы из водяного льда ( $\text{H}_2\text{O}$ ) альbedo принимает значение 0.12, в случае пироксена ( $\text{MgSiO}_3$ ) и оливина ( $\text{MgFeSiO}_4$ ) (основных космических минералов) данный параметр принимает значения 0.21 и 0.26 соответственно. В случае оптически плотных искусственных органических сред (при  $n = 4$ ) сферическое альbedo принимает высокое значение – 0.73.

На рисунке 2.б) приведена кривая зависимости температуры сферической частицы от показателя преломления её вещества. Нетрудно заметить, что данная зависимость является монотонно убывающей и квазилинейной.

На рисунке 3.а) продемонстрированы кривые зависимости эффективной температуры части-

цы от а) ее гелиоцентрического расстояния, при значении коэффициента черноты  $\varepsilon = 0.98$ . Очевидно, что данная зависимость в случае трёх видов космических веществ является монотонно убывающей и слабо зависит от рода вещества, при этом величина температуры падает от 110 К до менее 40 К, при изменении расстояния от 6 до 50 а.е.

На рисунке 3.б) представлена зависимость температуры частицы от коэффициента черноты ( $\varepsilon$ ) вещества частицы при  $r = 6$  а.е., в случае трёх космических сред: водяного льда, пироксена, оливина. Легко заметить, что данная зависимость является сильной: при изменении параметра от 0.1 до 1 температура частицы падает от 350 до чуть более 100 К, при этом, как в предыдущем случае, данная зависимость имеет малую «чувствительность» к роду вещества.

На рисунке 4 представлены карты сфер сублимации космических льдов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{O}_2$ ) и орбит планет земной группы, в случае трёх значений коэффициента черноты ( $\varepsilon$ ): а)  $\varepsilon = 0.4$ ,

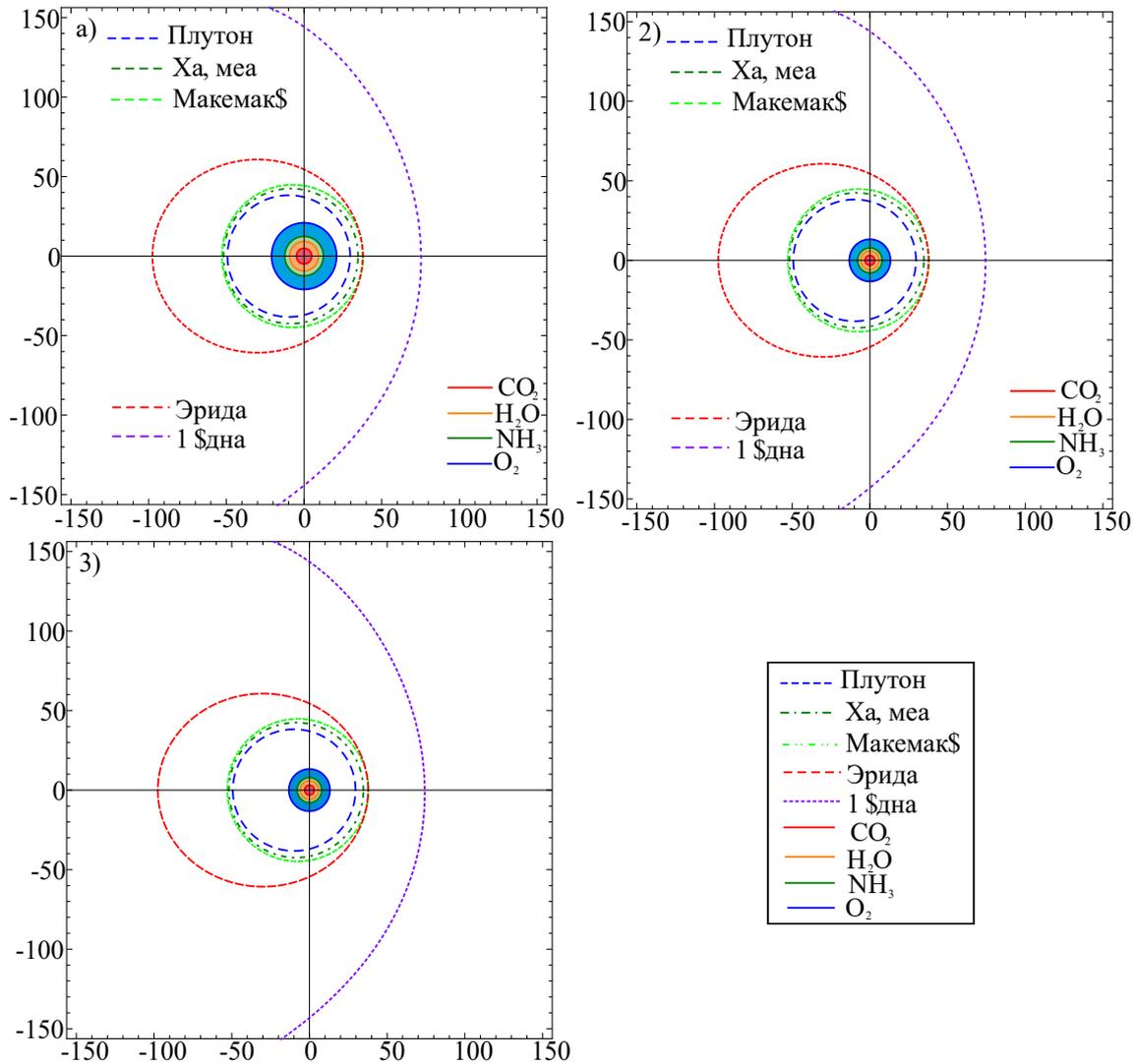


Рис. 7. Карты сфер сублимации космических льдов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{O}_2$ ), орбит четырёх карликовых планет и одного транснептунового объекта (Седны), в случае значений коэффициента черноты ( $\varepsilon$ ): а)  $\varepsilon = 0.4$ , б)  $\varepsilon = 0.7$ , в)  $\varepsilon = 1$  (пояснения в тексте)

б)  $\varepsilon = 0.7$ , в)  $\varepsilon = 1$ . Орбиты всех планет земной группы лежат глубоко внутри всех рассматриваемых сфер сублимации, значит газы данных видов могут быть составляющими атмосфер планет данной группы, но не могут слагать их поверхности.

На рис. 5 представлены карты сфер сублимации космических льдов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{O}_2$ ) и орбит планет-гигантов, в случае трёх значений коэффициента черноты ( $\varepsilon$ ): а)  $\varepsilon = 0.4$ , б)  $\varepsilon = 0.7$ , в)  $\varepsilon = 1$ . При  $\kappa \geq 0.4$  сфера сублимации  $\text{CO}_2$  лежит внутри орбиты Юпитера, следовательно в атмосферах спутников всех планет-гигантов присутствие данного газа невозможно. При  $\kappa > 0.7$  в атмосферах спутников Сатурна не могут присутствовать в газовой фазе: диоксид углерода, пары воды и аммиака, но могут слагать их поверхности; лишь молекулярный кислород (среди рассматриваемых веществ) может пребывать в атмосферах данных тел. При  $\kappa \geq 0.7$  в атмосферах спутников Урана и Нептуна не могут быть в принципе рассматриваемые вещества в газовой фазе, но могут формировать их твердые поверхности.

На рис. 6 продемонстрированы карты сфер сублимации космических льдов ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ) и орбит планет-гигантов, в случае трёх значений коэффициента черноты ( $\varepsilon$ ): а)  $\varepsilon = 0.4$ , б)  $\varepsilon = 0.7$ , в)  $\varepsilon = 1$ . Очевидно, что при всех рассматриваемых значениях  $\varepsilon$  орбиты всех планет-гигантов лежат внутри указанных сфер. Следовательно в атмосферах их спутников можно ожидать данные химические соединения в газовой фазе.

На рис. 7 продемонстрированы карты сфер сублимации космических льдов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{O}_2$ ) и орбит четырёх карликовых планет (Плутона, Хаумеи, Макемаке и Эриды) и одного крупного транснептунового объекта (Седны), в случае трёх значений коэффициента черноты ( $\varepsilon$ ): а)  $\varepsilon = 0.4$ , б)  $\varepsilon = 0.7$ , в)  $\varepsilon = 1$ . Очевидно, что сферы сублимации всех рассматриваемых льдов существенно меньше орбит далёких карликовых планет и Седны. Таким образом, атмосферы данных тел также должны быть лишены соответствующих газов, но их поверхности должны содержать данные вещества в твёрдой фазе.

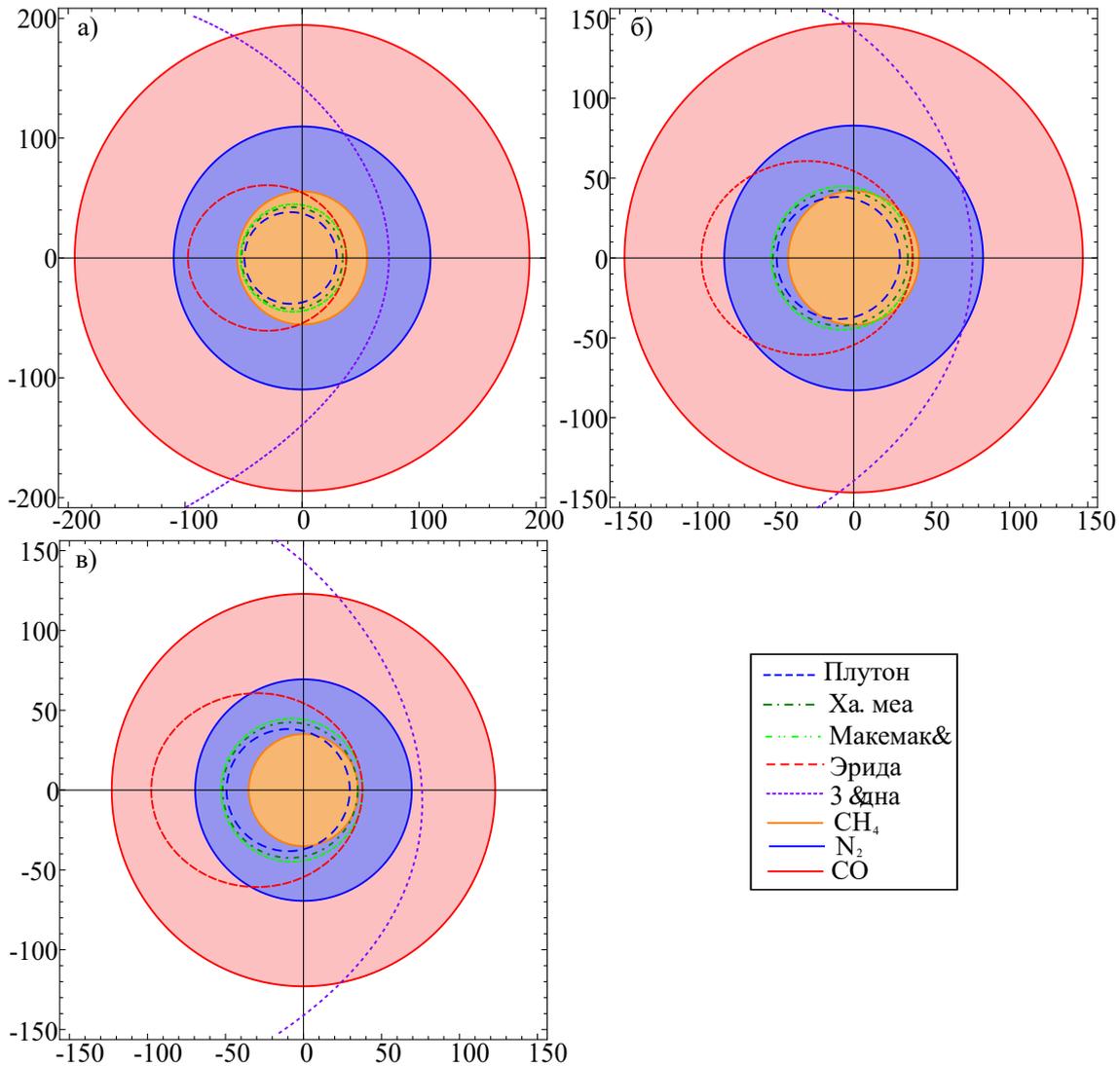


Рис. 8. Карты сфер сублимации космических льдов ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ), орбит четырёх карликовых планет и одного транснептунового объекта (Седны), в случае значений коэффициента черноты ( $\varepsilon$ ): а)  $\varepsilon = 0.4$ , б)  $\varepsilon = 0.7$ , в)  $\varepsilon = 1$  (пояснения в тексте)

На рис. 8 представлены карты сфер сублимации космических льдов ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ), орбит четырёх карликовых планет и одного транснептунового объекта (Седны), в случае трёх значений коэффициента черноты ( $\varepsilon$ ): а)  $\varepsilon = 0.4$ , б)  $\varepsilon = 0.7$ , в)  $\varepsilon = 1$ . Очевидно, при  $\varepsilon = 0.4$  орбиты трёх карликовых планет (Плутона, Хаумеи и Макемаке) полностью погружены в рассматриваемые сферы сублимации, т. е. в их атмосферах могут присутствовать метан, молекулярный азот и монооксид углерода. При этом атмосфера Эриды на протяжении всего сидерического периода обращения вокруг Солнца должна содержать молекулярный азот и монооксид углерода, а часть периода в её атмосфере может находиться даже метан, – это проявление сезонного характера состояния атмосфер карликовых планет и транснептуновых объектов.

При  $\varepsilon = 0.7$  в атмосферах всех карликовых планет метан может находиться лишь часть их сидерических периодов. Именно по этой причине организаторы космической миссии «New Horizons»

(NASA) торопились отправить исследовательский зонд к карликовой планете Плутон, чтобы успеть исследовать метановую составляющую его атмосферы. Согласно работе [4], при  $\varepsilon = 0.96$  полная кристаллизация газообразного метана в атмосфере Плутона произойдёт в 2032 году, а при  $\varepsilon = 0.70$  – в 2059 году. При  $\varepsilon = 1.0$  нахождение метана в атмосферах Макемаке и Эриды невозможно, однако метановый лёд может формировать их поверхности.

При  $\varepsilon \geq 0.7$  часть сидерического периода обращения вокруг Солнца атмосфера Эриды может состоять лишь из монооксида углерода, при этом её поверхность могут образовывать остальные космические льды, рассматриваемые в данной работе.

Особо интересная ситуация складывается в отношении Седны: при  $\varepsilon = 0.4$  Седна часть своего орбитального периода проводит сразу в двух сферах сублимации ( $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ). Однако, если  $\varepsilon = 1.0$ , то Седна проходит лишь одну сферу сублимации ( $\text{CO}$ ) в окрестности своего перигелия. Большую

часть своего орбитального периода этот транснептуновый объект полностью лишен атмосферы!

### Литература

1. Астрономия: век XXI / Ред. сост. Сурдин В. Г. – Фрязино: «Век-2», 2007. – 608 с.

2. Meyer T. History of the Comet 81P/Wild-2 and How to Observe it in 1997. – Solar System Exploration (NASA) – <https://solarsystem.nasa.gov/stardust/comets/wild2.html>.

3. Takahiro Hiroi et al. Developing space weathering on the asteroid 25143 Itokawa. – Nature. – 2006. – V.443. – P. 56-58.

4. Филиппов Ю. П., Снеткова Ю. А. Температура и радиус сферы сублимации сферических частиц из H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> льдов. – Теоретическая физика. – 2006. – №7. – С. 123-132.

5. Philippov J. P., Snetkova J. A. New restrictions on nucleus mass density of some shortperiodic comets. – Proceedings of the International Conference "100 years since Tunguska

phenomenon: Past, present, future". – 2008. – P. 150-150.

6. Филиппов Ю. П. Новый метод определения интервала допустимых значений средней массовой плотности ядра периодической кометы. – Вестник молодых учёных и специалистов Самарского университета. – 2018. – №1(12). – С. 19-31.

7. Divine N. A simple radiation model of cometary dust of P/Halley. – ESA SP-174. – 1981. – P. 25-30.

8. Fanale F. P., Salvail J. R. An idealized short-period comet model: surface insolation, H<sub>2</sub>O flux, dust flux, and mantle evolution. – Icarus. – 1984. – V.60. – P. 476-511.

9. Jewitt D., Hui M., Mutchler M., Weaver H., Li J. and Agarwal J. A Comet Active Beyond the Crystallization Zone. – The Astrophysical Journal Letters. – 2017. – V847. – №2. – L19.

10. Кононович Э. В., Мороз В. И. Общий курс астрономии. – М.: УРСС, 2019. – 544 с.

# CONSTRUCTION OF 3D-MAPS OF SUBLIMATION ZONES FOR THE MAIN SPACE ICES IN THE SOLAR SYSTEM. QUALITATIVE CHEMICAL ANALYSIS OF THE POSSIBLE COMPOSITION OF THE ATMOSPHERES OF THE CLASSICAL PLANETS SATELLITES, TRANSNEPTUNIAN OBJECTS AND COMETS

Ju. P. Philippov

In this work the temperature of a spherical particle consisting of a volatile substance was calculated using the results of the author previous works. Analytic results are presented in terms of both Sun's luminosity and effective temperature of its photosphere. Using the obtained results, the sublimation sphere radius was calculated for the particle from volatile substance. A numerical analysis for spherical albedo and effective temperature is performed. It is shown that the highest sensitivity of the last parameter is achieved for dependence on the emissivity coefficient of the volatile substance. 3D-maps were constructed for the seven main cosmic ices of the Solar System at various values of the emissivity coefficient. It has been demonstrated that the orbits of all terrestrial planets lie completely within the sublimation spheres of all the considered cosmic ices; therefore, all chemical compounds can be observed in the gas phase in the atmospheres of these planets. In the case of Jupiter, it is shown that its satellites cannot contain carbon dioxide in their atmospheres. It is impossible to observe in the atmospheres of Saturn's satellites both carbon dioxide and water vapor. In the atmospheres of Uranus and Neptune's satellites it is impossible to detected carbon dioxide, water vapor, ammonia vapor and molecular oxygen. However these cosmic ices can form the surfaces of these satellites. Most dwarf planets has a seasonal character of the methane presence in its atmospheres. Trans-Neptunian object Sedna, only part of its orbital period can reside within the sublimation zones of molecular nitrogen and carbon monoxide. However, for most of its period, its atmosphere is completely crystallized, and Sedna is an atmosphereless celestial body.

**Keywords:** sublimation, map, ice, atmosphere, planet, Solar system.

*Статья поступила в редакцию 30.11.2023.*

---

© Philippov Ju. P. 2023.

Philippov Jury Petrovich,

(filippov.yup@ssau.ru),

associate professor of General and

Theoretical Physics Department of the

Samara University,

443086, Russia, Samara, Moscovskoye shosse, 34.