

Снеткова Юлия Анатольевна^a

образование по астрономии

педагог дополнительного

Научный руководитель:

(доклад)

эффекта Ярковского

Коллективный анализ

Полильдьякова Ирина

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ШКОЛА

САМАРСКАЯ ОБЛАСТНАЯ

План доклада

1. Введение
2. Сила Яркковского для сферических тел
3. Результаты вычислений и их анализ
4. Заключение

1. Введение

✓ В настоящее время проблема астероидно-кометной опасности начинает привлекать к себе все больше внимания.

✓ Астероидная опасность встала в один ряд с такими глобальными угрозами современному человечеству как загрязнение окружающей среды, парниковый эффект, озоновый коллапс. ✓ Мировое сообщество астрономов призвало ученых к всемерному исследованию этой опасности.



✓ В ряде стран уже начали реализовываться проекты обнаружения потенциально опасных космических тел, ежегодно стали проводиться международные конференции по проблеме астероидно-кометной

опасности, поставлен вопрос о создании глобальной системы защиты Земли от опасных космических объектов.

В 90-е гг. начался регулярный обзор неба с помощью автоматических систем наблюдений, которые совершают в настоящее время основную часть всех открытий. Каждый год обнаруживается до сотни потенциально опасных для Земли объектов. Лишь менее половины из их числа имеют надёжно определённые орбиты.

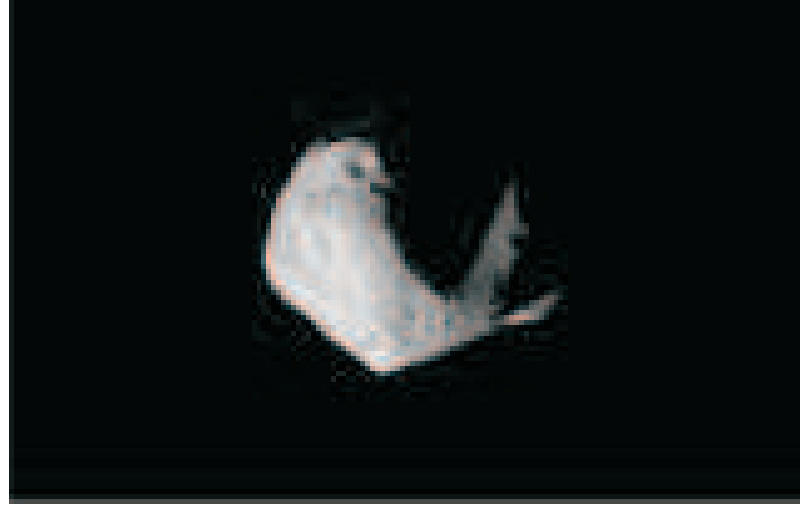


Рис. 1: Астероид 253 Матильда.

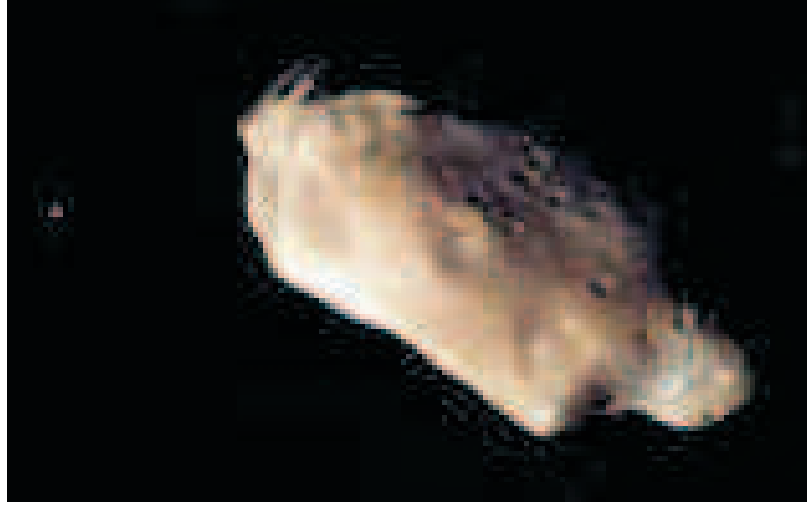


Рис. 2: Ида и Дактиль – астероид Главного пояса.

✓ В списке потенциально опасных для Земли объектов первым стоит **астероид 1999 AN10** размером 1200 м, который приблизится **7 августа 2027 г.** к Земле на расстояние, сравнимое с расстоянием до Луны. В текущем, XXI столетии еще один астероид, **2001 WN5**, диаметром 800 м пройдет вдвое ближе Луны на расстоянии 190 тыс. км **26 июня 2028 г.**

✓ В настоящее время для спасения жизни на Земле чрезвычайно важен **эффект Ярковского-Окифи-Радзиевского-Ладака**, поскольку он может быть положен в основу разрабатываемой методики постепенного увода астероидов, способных столкнуться с Землей, с опасных орбит.



Рис. 3: Эрос – ближайший к Земле астероид.

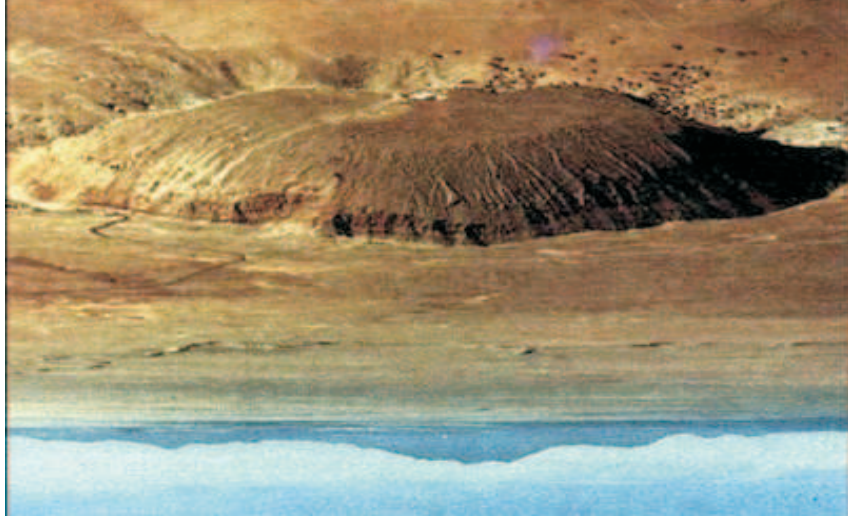


Рис. 4: Кратер-астероид.

Рис. 5: И.О. Янковский (1844-1902).



✓ Этот эффект, предсказанный русским астрономом-любителем XIX века **Иваном Осиповичем Янковским (1844-1902)**, проявляется в изменении орбиты вращающегося вокруг своей оси космического объекта под действием солнечного излучения, что приводит к быстрой (по астрономическим меркам) эволюции его орбиты.

✓ В результате действия эффекта Янковского на астероиды вынуждают ученых внимательнее отслеживать будущие изменения их траекторий.

Экспериментальные исследования

✓ 1991-2003 гг. – международная группа астрономов в составе С. Чесли (JPL NASA), Д. Вокрухлицкого (Карлов университет), М. Нолана (Обсерватория Аресибо) и др. впервые сумела зарегистрировать силу Яркковского, действующую на околоземный астероид 6489 Голевка.



Рис. 6: Астероид 6489 Голевка.

- установить **вероятность опасного сближения** астероида с нашей планетой.

исходящей от них;

- достоверно определить с Земли **массу и плотность** маленьких (меньше километра) астероидов, что важно для оценки потенциальной угрозы,

ВОЗМОЖНОСТЬ:

Измерение силы эффекта Ярковского даст единственную реальную

✓ 2007 г. – группа исследователей под руководством **M. Каасалай-нена** (Финляндия) обнаружила резульят действия силы Ярковского на астероид **1862 Apollo**.

✓ 2007 г. – **C. Лоури** (Белфаст) и его коллеги зафиксировали резульят действия силы Ярковского на астероид **(54507) 2000 RH5**, открытый в 2000 г.

Теоретические исследования

- ✓ Задачей учета эффекта Яркковского при вычислении движений малых планет занимались многие ученые. В их числе **Уильям Ф. Ботки мл.** (Корнельский университет), **Дэвид П. Рубинкам** (Центр космических полетов Годдарда NASA), **Паоло Фаринелла** (Пизанский университет Италия), **Дэвид Вокрухлицкий** (Университет Чарльза Чешской Республики), **Джозеф Снайтэл** (Лаборатория Луны и планет университета Аризона), **Уильям Хартманн** (Институт планетарной науки, Туксон) и др.
- ✓ Наиболее примечательными являются следующие **основные подходы** к учету действия неравновесных сил при построении численных теорий движения малых тел: **метод Дубяго**, **модель Марсдена-Секанины**, **примененная к описанию движения комет**, и **модель Д. Вокрухлицкого**, примененная к описанию движения астероидов и метеоров.

✓ игнорирование зависимости сферического альbedo и температуры малых тел от их геометрических и оптических свойств.

✓ использование большого количества эмпирических величин, определенных совместно с элементами орбиты из наблюдений;

Однако в рамках данных подходов существует ряд серьезных недостатков:

1. Расчет сферического альbedo астероида с учетом его геометрических и оптических свойств.
2. Решение уравнения теплового баланса для определения температуры поверхности астероида в приближении серого тела.

Вспомогательные задачи настоящей работы:

Расчет силы эффекта Ярковского для сферических объектов с использованием новых теоретических результатов, полученных в рамках предложенной модели, основанной на методе геометрической оптики (МГО).

Основная задача данной работы:

Цель данной работы – количественный анализ эффекта Ярковского с привлечением новой модели взаимодействия солнечного излучения со сферической частью (в случае больших размеров, астероидом).

2. Сила Яркковского для сферических тел

2.1. Модель физической системы:

1. Электроматгитное излучение Солнца характеризуется непрерывным спектром, близким по своей природе к спектру абсолютно черного тела с эффективной температурой $T_s = 5777.11 \text{ K}$. Излучение Солнца является неполяризованным (естественный свет), имеющее изотропный характер распространения.
2. Поток излучения – поток фотонов, направление движения которых определяется единичным вектором \mathbf{k} . Для описания процессов взаимод- действия излучения с астероидом воспользуемся методом геометрической оптики (МО).

3. Геометрический центр астероида находится в точке с радиус-вектором \mathbf{r}_A .
4. Астероид – однородный, не вращающийся вокруг своей оси шар с радиусом R_A и сферическим (бондовским) альбедо A_I^{ref} , ввляющийся серым телом с коэффициентом черноты ε_A и показателем преломления $n(\omega)$.

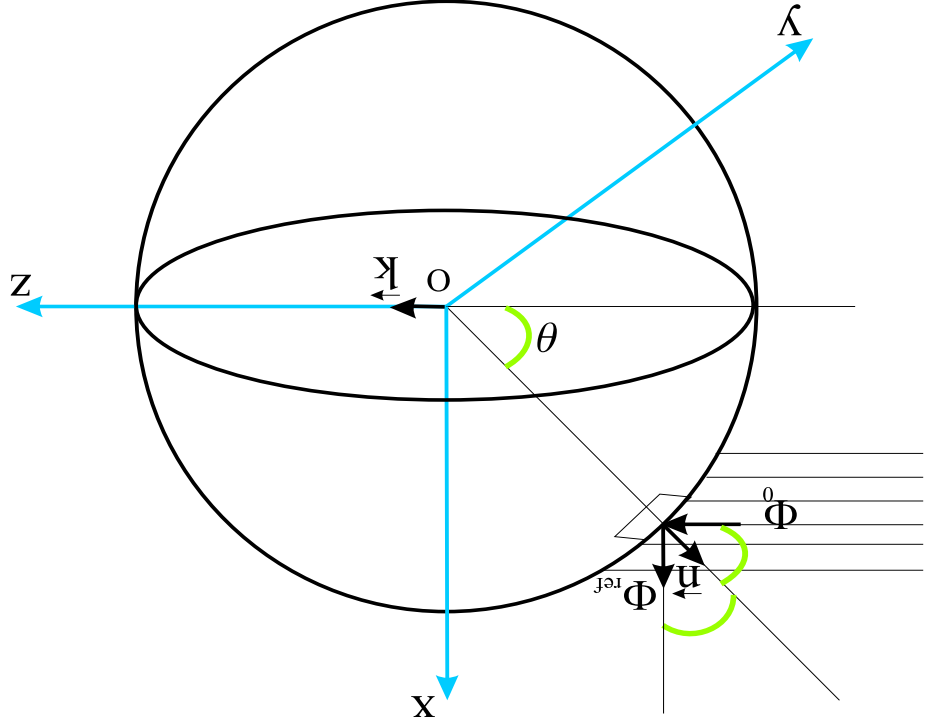
5. Сферическое альбедо и температура поверхности астероида T_A ввляются функциями действительного показателя преломления вещества астероида.

2.2. Сферическое альbedo астероида

Φ_I^{ref} – отношение интегрального потока излучения отраженного и рассеянного сферой во всех направлениях, к интегральному потоку падающему на сферу в виде параллельного пучка лучей:

$$A_I^{ref} = \frac{\Phi_I^0}{\Phi_I^{ref}}$$

(1)



Поток падающего излучения в окрестности точки \mathbf{r}_A представляется в виде:

$$(2) \quad \Phi_I^0(\mathbf{r}_A) = \pi R_A^2 \mathcal{J}(\mathbf{r}_A),$$

где $\mathcal{J}(\mathbf{r}_A)$ – интенсивность излучения в данной точке.

Интегральный поток излучения Φ_I^{ref} может быть представлен в виде:

$$(3) \quad \Phi_I^{\text{ref}} = \pi R_A^2 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\infty} \int_0^{\omega_0} j(\omega) \rho(\omega, \theta) \sin 2\theta d\theta d\omega.$$

В итоге сферическое альbedo может быть представлено следующим образом:

$$(4) \quad A_I^{\text{ref}} = 2 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\infty} \rho_n(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta.$$

2.3. Температура поверхности астероида

Согласно определению модели, астероид – серое тело с коэффициентом черноты ε_A .

Интегральная светимость серого тела:

$$M_{I_{\text{gray}}} = \varepsilon_A \sigma T_A^4.$$

Воспользуемся уравнением баланса, выражающим закон сохранения энергии:

$$(1 - A_I^{\text{ref}}) \mathcal{J}_0 \cos \theta = \varepsilon_A \sigma T_A^4. \quad (8)$$

В случае сферически-симметричного характера распространения излучения

$$\mathcal{J}_0 = \frac{f_{\text{sun}} (r_A/a_0)^2}{4}, \quad (9)$$

где $f_{\text{sun}} = 1370 \text{ (Вт/м}^2\text{)}$ – солнечная постоянная, r_A – гелиоцентрическое расстояние астероида, $a_0 = 1 \text{ а.е.}$

В итоге температура освещенной поверхности астероида

$$T_A = \sqrt[4]{\frac{\varepsilon_A \sigma}{(1 - A_I^{\text{ref}}) \mathcal{J}_0 \cos \theta}}. \quad (7)$$

2.4. Расчет силы Лрковского для сферических тел

Согласно второму и третьему законам Ньютона, сила Лрковского может быть определена выражением:

$$\vec{F} = -\frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t}, \quad (8)$$

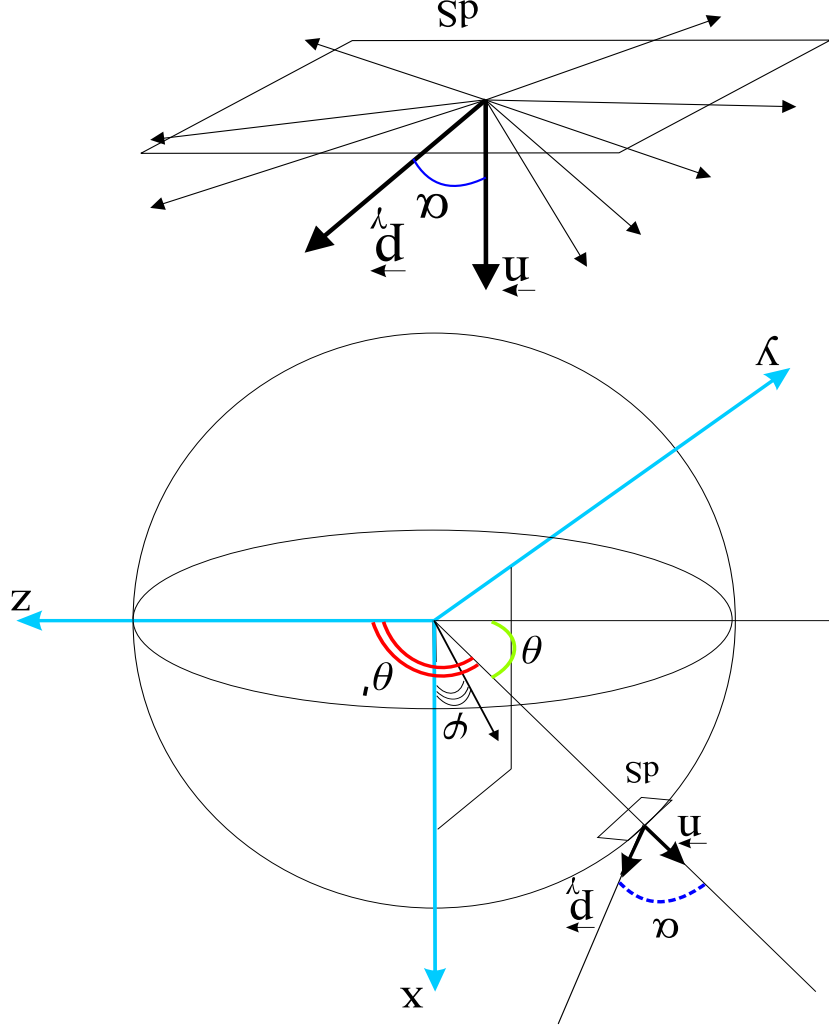
где $\Delta \vec{P}$ – изменение импульса, претерпеваемое системой фотонов, испускаемых единичной площадкой dS за время Δt .

Перепишем (8) в проекции на нормаль к площадке:

$$F_n = -\frac{\Delta P_n}{\Delta t}. \quad (9)$$

Проекция изменения импульса фотона, испускаемого площадкой в заданном направлении:

$$\Delta p_n = p_\gamma \cos \alpha. \quad (10)$$



Спектральный поток фотонов, вылетающих из площадки dS в заданном направлении:

$$(11) \quad d\Phi(\omega) = j(\omega) dS \cos \alpha d\omega,$$

$j(\omega)$ – спектральная плотность потока фотонов.

Изменение импульса, создаваемое системой фотонов, вылетающих из площадки dS в заданном направлении за единицу времени с частотами $(\omega, \omega + d\omega)$:

$$(12) \quad dP_n = d\Phi(\omega) \Delta p_n = j(\omega) p_\gamma \cos^2 \alpha dS d\omega.$$

Усредняя (12) по углу α , получим изменение импульса системы фотонов, испускаемых площадкой dS

во всех направлениях за единицу времени:

$$(13) \quad \overline{dP_n} = \frac{1}{2} p_\gamma j(\omega) dS d\omega.$$

Следовательно,

$$(14) \quad \Delta P_n = \Delta t \int \overline{dP_n} = \frac{1}{2} \Delta t \int p_\gamma j(\omega) dS d\omega.$$

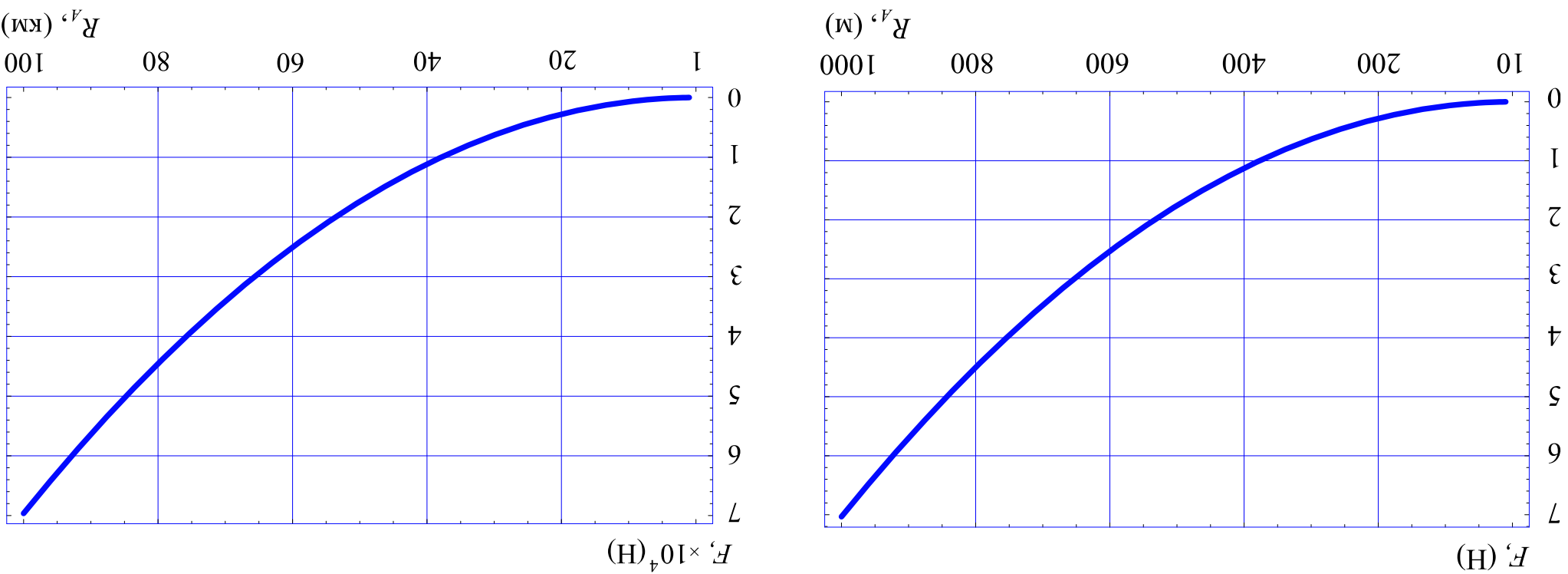
Переходя в сферическую систему координат и вычисляя интегралы, получим выражение для силы

Ярковского:

$$(15) \quad F = \pi R_A^2 (1 - A_I^{\text{ref}}) \frac{3c}{f_{sun}} \left(\frac{r_A/a_0}{2} \right)^2.$$

$$A_I^{\text{ref}} = 0.02.$$

Рис. 7: Зависимость силы Яркковского от радиуса астероида R_A для случая $r_A = 1$ a.e. и



3. Результаты вычислений и их анализ

Рис. 8: Зависимость силы Яковского от гелиоцентрического расстояния астероида r_A для случая $R_A = 1$ км и $A_I^{ref} = 0.02$.

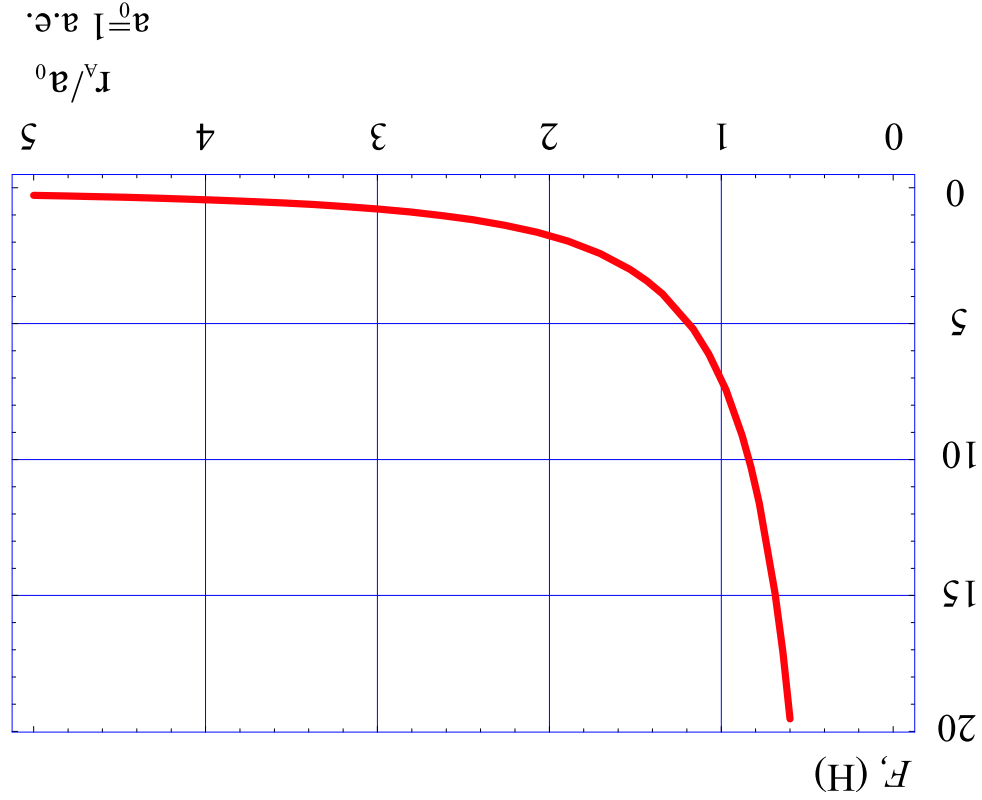
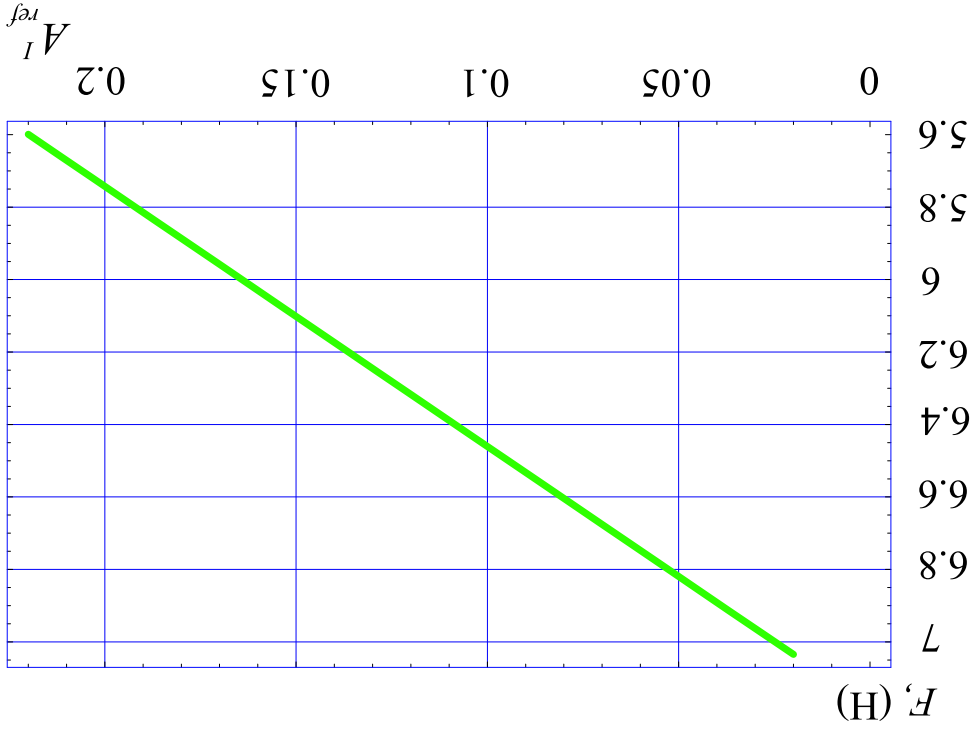


Рис. 9: Зависимость силы Яковского от сферического альбедо астероида A_I^{ref} для случая $R_A = 1$ км и $r_A = 1$ а.е.



- Подробно освещена проблема астероидной опасности для Земли.
- Представлена модель взаимодействия солнечного излучения со сферическим астероидом, на основе которой получено аналитическое выражение для сферического (бондовского) альбедо, являющаяся функцией действительного показателя преломления вещества астероида.
- Получено аналитическое выражение для температуры поверхности сферического астероида в приближении серого тела на основе решения уравнения баланса.
- Проведен прецизионный расчет силы Яковлевского, действующей на сферический, не вращающийся вокруг своей оси астероид. Для расчета указанной характеристики был рассмотрен процесс испускания теплового излучения поверхностью астероида.
- Выражение для силы Яковлевского исследовано на примере зависимости от радиуса, сферического альбедо, гелиоцентрического расстояния астероида.

4. Заключение

В данной работе:

Мы выражаем **большую благодарность** за подготовленные дискуссии и ценные критические замечания преподавателям кафедры общей и теоретической физики Самарского государственного университета, в особенности доктору физико-математических наук **Башкирову Евгению Константиновичу**.

Благодарности