

ДЕПАРТАМЕНТ КУЛЬТУРЫ ЯРОСЛАВСКОЙ ОБЛАСТИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ КУЛЬТУРЫ ЯРОСЛАВСКОЙ ОБЛАСТИ
«КУЛЬТУРНО-ПРОСВЕТИТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИМЕНИ В. В. ТЕРЕШКОВОЙ»

**МАТЕРИАЛЫ
III МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«ЧТЕНИЯ ИМЕНИ ВАЛЕНТИНЫ
ВЛАДИМИРОВНЫ ТЕРЕШКОВОЙ»**

**Ярославль
10 марта 2022 г.**

Ярославль
2022

УДК 52:521: 620: 678
ББК 22.6 я 434
Ч 914

Ч 914 **Чтения имени В. В. Терешковой:** Сборник материалов III Международной научно-практической конференции «Чтения имени Валентины Владимировны Терешковой». Ярославль, 10 марта 2022 г. // Сост. Тихомирова Е. Н., Перов Н. И., Роменская О. М. — Ярославль, 2022. — 160 с.

В сборнике представлены статьи, доклады, тезисы докладов участников III Международной научно-практической конференции «Чтения имени Валентины Владимировны Терешковой». Материалы охватывают широкий круг вопросов, связанных с космонавтикой, астрономией, астрокосмическим образованием и просвещением и их объединением в общественной жизни общества.

Авторский коллектив:

**Белозерская Л. Н., Залуцкий А. А., Исаченков Н. Ю., Кравец З. И.,
Мальцева Е. В., Матасов Н. А., Мещеринов Е. В., Муртазов А. К.,
Нагнибеда В. Г., Перов Н. И., Плавалова Е., Розаев А. Е., Роменская О. М.,
Самадов М. А., Сергиенко А. В., Сеницын Е. Е., Тихомирова Е. Н., Топчило Н. А.,
Трофилева И. Н., Трофимова С. А., Филиппов Ю. П., Фомичев Н. И.,
Хайруллин И. И., Щепалова М. В.**

Ответственный за выпуск **Е. Н. Тихомирова**

ISBN 978-5-91722-459-6

© ГАУК ЯО «Культурно-просветительский центр имени В. В. Терешковой»
© Коллектив авторов, 2022
© Тихомирова Е. Н., Перов Н. И., Роменская О. М., 2022, составление

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
Обращение В. В. Терешковой	7
Приветствие врио губернатора Ярославской области М. Я. Евраева	8
ИССЛЕДОВАНИЯ ПО АСТРОНОМИИ И КОСМОНАВТИКЕ	9
<i>Муртазов А. К.</i> Геометрические условия мониторинга объектов техногенного и естественного происхождения в околоземном пространстве	10
<i>Перов Н. И.</i> Небесномеханические модели происхождения комет	18
<i>Перов Н. И., Исаченков Н. Ю.</i> Космические путешествия	30
<i>Перов Н. И., Трофимова С. А.</i> Модели политропных звезд	43
<i>Нагнибеда В. Г., Топчило Н. А.</i> Радиоастрономические наблюдения солнечных затмений	51
<i>Залуцкий А. А.</i> Прикладные аспекты зондовой мёссбауэровской спектроскопии в применении к некоторым задачам космического грунтоведения	60
<i>Филиппов Ю. П., Щепалова М. В.</i> Метод гравитационного линзирования: возможно ли прямое обнаружение массивного тёмного тела на периферии Солнечной системы?	71
<i>Филиппов Ю. П.</i> Аксиально симметричная модель внутренней комы кометы 67P/Churyumov – Gerasimenko: алгоритм и численные результаты	79
<i>Розаев А. Е.</i> Аппроксимация эволюции орбит Юпитера и Марса за миллион лет с помощью результатов численного интегрирования	88
<i>Сергиенко А. В.</i> Прецессия орбиты в классической механике	93

<i>Исаченков Н. Ю.</i> Определение оптимальной траектории и минимальной стартовой скорости космического аппарата при одноимпульсном полёте по траектории «Земля – Луна – Венера»	98
<i>Исаченков Н. Ю.</i> Определение оптимальных траекторий и скоростей космического аппарата по траектории «Земля – Луна – Марс»	103
<i>Самадов М. А., Хайруллин И. И., Мещеринов Е. В.</i> Обработка фотоизображений Солнца с помощью искусственного интеллекта	114
<i>Плавалова Е., Розаев А. Е.</i> Молодое семейство астероидов Аделаида: пример возможного каскадного распада	118
АСТРОНОМИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ И ПРОСВЕЩЕНИЕ	121
<i>Филиппов Ю. П., Белозерская Л. Н.</i> Самарская областная астрономическая школа: 20 лет на благо школьного астрономического образования Самарской области и не только	122
<i>Фомичев Н. И.</i> Астрономическая обсерватория с удалённым доступом	130
<i>Мальцева Е. В.</i> Применение элементов астрономии на каждом уроке физики	135
<i>Роменская О. М.</i> Абонемент по астрономии: опыт проведения в Центре имени В. В. Терешковой	137
<i>Кравец З. И.</i> Персональный сайт учителя как современный инструмент обучения и просвещения	140
<i>Тихомирова Е. Н.</i> Деятельность НАЕС: астрономическое образование и просвещение	147
КОСМИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ И ПРОСВЕЩЕНИЕ	151
<i>Роменская О. М.</i> Интеллектуальные игры проекта «Космическая история России»	152
<i>Матасов Н. А.</i> Популяризация космонавтики среди молодёжи: от проекта к реализации	154
<i>Синицын Е. Е.</i> Космос и «цифровое» поколение	156

III Международная научно-практическая конференция «Чтения имени Валентины Владимировны Терешковой», посвящённая космическим исследованиям в России и мире и инновационным путям развития, состоялась 10 марта 2022 года. Организаторы конференции: Благотворительный фонд В. В. Терешковой, департамент культуры Ярославской области и ГАУК ЯО «Культурно-просветительский центр имени В. В. Терешковой».

Конференция отразила влияние освоения космоса на следующие сферы:

- повышение конкурентоспособности России и Ярославского региона на мировом рынке;
- стимулирование развития экономики путём создания и внедрения новых материалов, технических средств и методов, развития новых сфер деятельности;
- обеспечение национальной безопасности и развитие международного сотрудничества;
- сохранение окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов;
- повышение национального престижа и гордости, уровня образования, культуры и духовности.

В конференции приняли участие учёные, педагоги, учащиеся, творческая интеллигенция, представители средств массовой информации и общественных организаций из различных городов России.

Среди устных выступлений необходимо отметить доклады:

- Б. М. Шустова, доктора физико-математических наук, профессора, члена-корреспондента РАН, научного руководителя Института астрономии РАН, председателя секции «Внеатмосферная астрономия» Совета РАН по космосу, председателя экспертной группы «Космические угрозы» Совета РАН по космосу, научного руководителя проекта космической обсерватории «Спектр-УФ» («Космические ресурсы для развития экономики и науки»);
- Ю. П. Филиппова, кандидата физико-математических наук, доцента кафедры общей и теоретической физики ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва» («Самарская областная астрономическая школа: 20 лет на благо школьного астрономического образования Самарской области и не только»);
- З. И. Кравец, заместителя директора по УВР МОУ Константиновская средняя школа Тутаевского МР Ярославской области («Персональ-

ный сайт учителя как современный инструмент обучения и просвещения»);

- Н. И. Перова, кандидата физико-математических наук, доцента ЯГПУ имени К. Д. Ушинского, ведущего методиста ГАУК ЯО «Центр имени В. В. Терешковой» («Небесномеханические модели происхождения комет»);
- Н. И. Фомичева, старшего преподавателя ЯрГУ имени П. Г. Демидова («Астрономическая обсерватория с удалённым доступом. Возможности и перспективы»);
- Е. В. Мальцевой, методиста Луганского информационно-методического центра, учителя физики и астрономии луганской средней общеобразовательной школы № 6 («Применение элементов астрономии на каждом уроке физики»).

Работали три секции: «Исследования по астрономии и космонавтике», «Астрономическое образование и просвещение» и «Космическое образование и просвещение».

В итоге была достигнута цель конференции: показана роль космонавтики и астрономии в развитии культуры, науки, образования и просвещения.

Были выполнены поставленные задачи:

- привлечена к инновационной деятельности в космических и астрономических исследованиях молодёжь региона, преподаватели вузов, аспиранты, студенты, школьники;
- представлены достижения Ярославского региона в области астрономии, космонавтики и культуры;
- в ходе работы докладчики обратили внимание на необходимость совершенствования работы по патриотическому воспитанию учащейся молодёжи через приобщение к современным техническим средствам и методам;
- конференция способствовала повышению уровня образования, культуры и просвещения молодого поколения;
- представлены более 20 статей и тезисов докладов для опубликования в сборнике материалов конференции.

Несомненно, участники III Международной научно-практической конференции «Чтения имени В. В. Терешковой» получили мощный инструмент для воспитания интеллектуальных кадров со стойкой жизненной позицией, способных обеспечить прогресс нашей страны.

*И. Н. Трофилева,
директор Государственного автономного
учреждения культуры Ярославской области
«Культурно-просветительский центр имени В. В. Терешковой»*

Обращение В. В. Терешковой

Уважаемые участники и гости III Международной научно-практической конференции!



Приветствую вас на III Международной научно-практической конференции, посвящённой космическим исследованиям в России и мире.

Мероприятие проходит на площадке Ярославского планетария, который стал местом притяжения учёных, космонавтов и талантливой молодёжи, увлечённых изучением космического пространства.

Во время конференции участники обсудят широкий круг вопросов, связанных с астрономией и космонавтикой, проблемы совершенствования образования и междисциплинарного диалога со смежными областями знания. Уверена, что результаты конференции найдут продолжение в новых исследованиях Вселенной, а молодое поколение приумножит достижения тех, кто своим трудом и талантом закладывал и укреплял космический потенциал нашего Отечества.

От души желаю участникам успехов, доброго здоровья, благополучия и новых достижений!

*Ваша
Валентина Терешкова*

Приветствие врио губернатора Ярославской области М. Я. Евраева

Уважаемые участники III Международной научно-практической конференции «Чтения имени В. В. Терешковой»!



Ваши доклады, проекты, прикладные исследовательские работы свидетельствуют о неослабевающем интересе молодёжи к тайнам Вселенной. На конференции у вас есть уникальная возможность представить результаты вашей деятельности на суд сверстников и специалистов, приобрести бесценный опыт научной дискуссии.

Ярославская область внесла значимый вклад в развитие космической эры. На нашей земле родилась Валентина Терешкова — первая в мире женщина, совершившая орбитальный полёт, вписавшая яркую страницу в историю освоения космоса. Благодаря ей о Ярославле узнал весь мир. Закономерно, что сегодня наш край становится центром общения учёных с мировым именем, любознательных студентов и школьников, объединённых общим увлечением — интересом к изучению космического пространства.

В 2022 году Валентина Владимировна отмечает юбилей. Неоценим её вклад в общественную деятельность России, в развитие нашего региона. Практически в каждом районе Ярославской области есть школа, детский сад, новый микрорайон или новые заводские цеха, которые появились при её участии. И сегодня общественно-политическая деятельность Валентины Владимировны направлена на активное созидание и решение социальных и экономических проблем региона и страны.

Желаю всем участникам конференции плодотворной работы, конструктивного диалога и обмена опытом!

Врио губернатора Ярославской области
М. Я. Евраев

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО АСТРОНОМИИ И КОСМОНАВТИКЕ



ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ ТЕХНОГЕННОГО И ЕСТЕСТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

 **А. К. Муртазов**

 РГУ имени С. А. Есенина

 a.murtazov@365.rsu.edu.ru

Общая схема мониторинга околоземного пространства оптическими средствами (Рис. 1) разработана нами при отработке методики оптического мониторинга геостационарных искусственных спутников Земли (ИСЗ) и анализа его данных с точки зрения идентификации объектов в ближнем космосе.

Она включает в себя структурно связанные между собой информационные блоки:

- блок получения информации об объектах в оптическом диапазоне спектра (технические характеристики оптических средств мониторинга, данные мониторинга, модели мусора, математические и физические модели параметров, характеризующих видимость объектов); этот блок поставляет информацию о распределении оптических характеристик обнаруженных объектов, на основе чего ставится и решается задача систематизации процессов в околоземном пространстве;
- блок анализа информации на основе данных моделирования: а) для техногенных объектов — модели техногенного космического мусора; каталог моделей блеска космических объектов (КО), каталог отражательных характеристик КО — для целей решения задачи распознавания техногенных объектов; б) для метеоров — модели естественного мусора в околоземном пространстве; каталог активности метеорных потоков, каталог орбит космических аппаратов (КА) — для решения задачи оценки метеороидного риска в околоземном пространстве.

Совместный анализ полученных данных позволяет провести идентификацию техногенных объектов по результатам их оптического мониторинга, оценить метеороидную и космическую опасность в околоземном пространстве.



Рис. 1. Схема организации системы мониторинга объектов в ОКП оптическими средствами.

ГЕОМЕТРИЯ МОНИТОРИНГА ТЕЛ ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ОКП

Движение КО вокруг Земли имеет свои особенности. При мониторинге объектов на LEO значительные трудности при их фотометрии представляют оценки видимого блеска ввиду быстрого топоцентрического изменения топоцентрического расстояния и атмосферной массы. Эффекты затенения для КО сложной конструкции проявляются в большей степени, чем для астероидов. Поэтому, несмотря на более широкий диапазон изменения фазового угла КО, вплоть до 180° за пролёт, получить его надёжную фазовую кривую значительно сложнее.

В данном случае панорамная телевизионная фотометрия низкоорбитальных КО имеет преимущество перед более точными методами фотоэлектрической фотометрии.

На Рис. 2 представлена геометрия мониторинга КО. Здесь Z — направление на зенит пункта наблюдений M с широтой φ и долготой λ . Полуденная линия SN лежит в плоскости горизонта пункта наблюдений. P_N — направление на полюс мира составляет с направлением на север N пункта наблюдений угол, равный его географической широте. M' — подспутниковая точка, в которой КО наблюдается в зените.

Фазовый угол $\varphi_{КО}$ на Рис. 2а — это угол между направлением на Солнце S и направлением N на пункт наблюдений с объекта.

Наиболее удобной системой координат при фотометрии КО является спутникоцентрическая система. На Рис. 2б показана такая система, связанная с цилиндрическим КО (направление главной нормали n совпадает с осью цилиндра). Угол падения к основной плоскости i , угол рассеивания (наблюдения) — i' . Здесь фазовый угол φ определяется широтами Солнца \varnothing_S и наблюдателя \varnothing_N и разностью их долгот $\Delta\theta$

$$\cos \varphi = \sin \varnothing_S \sin \varnothing_N + \cos \varnothing_S \cos \varnothing_N \cos \Delta\theta. \quad (1)$$

В случае, когда ось цилиндра параллельна оси Земли, эти координаты связаны с экваториальными координатами КО простыми соотношениями

$$\begin{cases} \varnothing_S = \delta_{\odot} \\ \varnothing_N = -\delta_{КО} \\ \Delta\theta = \alpha_{\odot} - \alpha_{КО}, \end{cases} \quad (2)$$

где α_{\odot} и $\alpha_{КО}$ — видимое топоцентрическое прямое восхождение Солнца и КО; δ_{\odot} и $\delta_{КО}$ — их видимое топоцентрическое склонение.

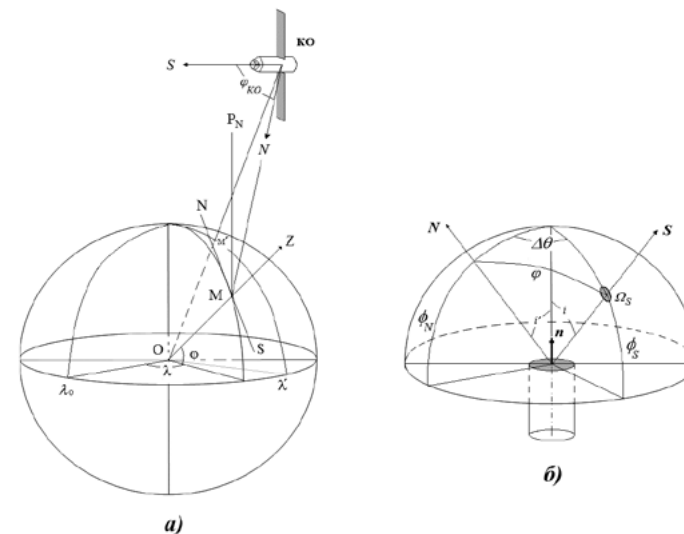


Рис. 2. Геометрия мониторинга искусственных космических объектов в ОКП (а) и спутникоцентрическая система координат (б).

Это позволяет определять геометрию расположения КО относительно пункта наблюдений, используя только его видимые топоцентрические координаты и данные о положении Солнца.

Наиболее удобными объектами для фотометрического мониторинга являются геостационарные космические объекты (GEO), точка стояния которых располагается над экватором Земли.

Объекты на GEO имеют малое собственное движение, что позволяет проводить их детальную фотометрию и спектральные наблюдения с использованием не только панорамных телевизионных ПЗС-приёмников, но и высокоточных фотоэлектрических (спектро)фотометров с малой полевой диафрагмой.

Геометрические условия видимости таких КО определяются из наблюдений

$$\sin t_{КО} = \frac{\sin z_{КО} \sin A_{КО}}{\cos \delta_{КО}}, \quad (3)$$

где

$$\begin{cases} \sin \delta_{КО} = \sin \varphi \sin h_{КО} - \cos \varphi \cos h_{КО} \cos A_{КО} \\ \tan A_{КО} = \frac{\tan (\lambda - \lambda')}{\sin \varphi} \end{cases} \quad (4)$$

Здесь φ и λ — географическая широта и долгота пункта наблюдений; λ' — долгота подспутниковой точки.

Азимут $A_{КО}$ и высота над горизонтом $h_{КО}$ (зенитное расстояние ($z_{КО} = 90 - h_{КО}$)) определяются непосредственно из наблюдений. Часовой угол КО $t_{КО}$ вычисляется по формулам сферической тригонометрии.

Внеатмосферная топоцентрическая звёздная величина геостационарного КО с долготой подспутниковой точки λ' , равной долготе пункта наблюдения λ , определяется как

$$m_{КО} = -11,77 - \lg F(\varphi_{КО}) + 5 \lg d - 2,5 \lg \frac{R_{\oplus} \sin \varphi}{\sqrt{(R_{\oplus}^2 + (R_{\oplus} + r)^2 - 2Rr \cos \varphi)}}. \quad (5)$$

где φ — широта пункта наблюдений, d — топоцентрическое расстояние геостационарного КО, $R_{\oplus} = 6378,2$ км — средний экваториальный радиус Земли; $r = 35822$ км — среднее расстояние объекта на GEO от земного экватора в точке стояния при наклонении орбиты $i = 0$.

Таким образом, изменение блеска геостационарного КО в данном пункте наблюдений определяется только изменением его фазовой функции $F(\varphi_{КО})$, взаимными затенениями и загораживаниями элементов конструкции. Эта особенность мониторинга геостационарных КО позволяют полностью сосредоточиться на решении основной задачи спектрофотометрии искусственных космических объектов.

Определение фазовой функции требует:

1. тщательного расчёта ориентации элементов конструкции КО относительно наблюдателя и Солнца для учёта их взаимозатенений и взаимозагораживаний и является геометрической задачей;
2. знания или моделирования законов рассеяния света покрытиями конструкций КО.

Следует отметить, что все основные исследования в рамках решения основной задачи фотометрии КО проводились на базе фотометрического мониторинга геостационарных КО.

МОНИТОРИНГ ТЕЛ ЕСТЕСТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ОКП

Основная часть космического мусора естественного происхождения представляет собой метеорное вещество, пролетающее через ОКП со скоростями 11,2 / 72,4 км/с. Ввиду этого его мониторинг представляет собой наблюдения метеорных явлений, которые вызваны сгоранием мусора в атмосфере.

Основные параметры метеорного роя можно рассчитать, исходя из простых соображений (Рис. 3). Здесь H — высота сгорания метеоров; v — скорость метеорного потока; h — высота радианта потока над горизонтом; α — диагональ поля зрения камеры или вообще зоны наблюдений, Z — направление на зенит пункта наблюдения, R — направление на радиант потока.

Плотность потока метеорных частиц в рое, определяемая при наземном мониторинге, вычисляется как

$$\Phi = \frac{N}{7,2 \times 10^3 H^2 \times \sinh \times \tan A \times \tan B} [\text{км}^2 \text{с}^{-1}], \quad (6)$$

где N (час^{-1}) — часовое число метеоров в поле зрения телевизионной камеры с угловыми размерами $A \times B$ (град); H (км) — высота сгорания метеоров.

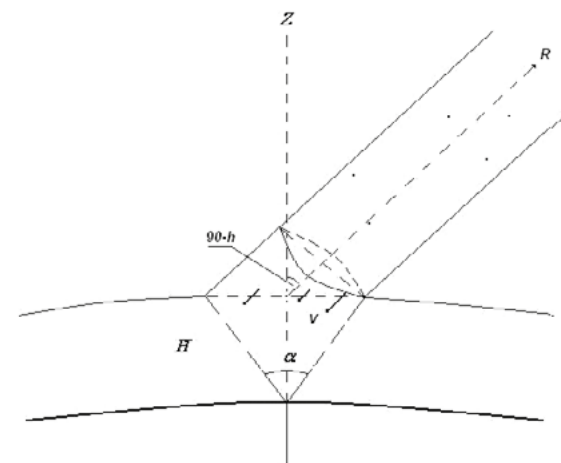


Рис. 3. Определение плотности потока метеорных частиц.

Пространственная плотность потока частиц в рое

$$D = \frac{\Phi}{v} [\text{км}^{-3}]. \quad (7)$$

где v [км/с] — скорость метеорного потока.

При фотометрических наблюдениях метеорных явлений видимая звёздная величина метеора определяется как

$$m = m_0 + \Delta m_d + \Delta m_z, \quad (8)$$

где m_0 — абсолютная величина метеора (блеск метеора в зените на стандартном расстоянии его вспышки — 100 км); Δm_d — поправка в блеск за расстояние метеора, наблюдаемого не в зените; Δm_z — поправка в блеск за атмосферное поглощение; Z — зенитное расстояние метеора.

Соответственно,

$$\begin{cases} \Delta m_d = 5 \lg \frac{d(\text{км})}{100}, \\ \Delta m_z \propto -2,5 \lg (\cos Z). \end{cases} \quad (9)$$

Максимальное расстояние d метеора определяется дальностью видимого горизонта с высоты его вспышки и составляет около 1 130 км; для этого случая поправка за блеск составляет $\Delta m_d \approx 5,3$.

Поправка за атмосферное поглощение максимальна на горизонте и в идеале для нормальной рэлеевской атмосферы составляет $\Delta m_z \approx 2,3$. Реально эта величина значительно выше и определяется для каждого метеора из наблюдений.


Список литературы


1. *Курьшев В. И., Муртазов А. К.* Методы расчёта блеска ИКО (обзор) // *Астрономический вестник*. — М, 1986. ВИНТИ. № 6851. — 27 с.
2. *Миронов В. В., Муртазов А. К., Усовик И. В.* Системные методы мониторинга околоземного космического пространства. Монография / Издание 2. — Рязань: Изд. Коняхин А. В. (Book Jet), 2018. — 312 с.
3. *Муртазов А. К., Носова Н. Н., Прокофьева В. В.* Фотометрические измерения яркости геостационарного спутника в полосах В, V, R в момент изменения его ориентации // *Ракетно-космическая техника*. 1991. Серия 2.
4. *Муртазов А. К.* Мониторинг загрязнений околоземного пространства оптическими средствами. Монография. — Рязань: РГУ имени С. А. Есенина, 2010. — 252 с.
5. *Муртазов А. К.* Организация комплексных телевизионных метеорных наблюдений на астрономической обсерватории Рязанского государственного университета // *Вестник СибГАУ*. 2011. № 6 (39).
6. *Муртазов А. К.* Организация системы оптического мониторинга загрязнения околоземного пространства // *Экологические системы и приборы*. 2009. № 1.
7. *Муртазов А. К.* Прямая задача фотометрии при оптическом мониторинге космических объектов в околоземном пространстве // *Известия вузов. Физика*. 2006. № 11.

8. *Муртазов А. К.* Экология околоземного космического пространства. Монография. — М.: Физматлит, 2004. — 304 с.
9. *Murtazov A. K., Efimov A. V., Titov P. V.* Double-Station Meteor Observations in Ryazan, Russia: Proceedings of the International Meteor Conference. La Palma, Canary Islands, Spain, 20–23 September, 2012. — International Meteor Organization, Mattheessensstraat 60, 2540 Hove, Belgium. — 2013. — Pp. 192.
10. *Murtazov A. K.* Physical simulation of space objects' spectral characteristics for solving the reverse problem of their photometry // *American Journal of Modern Physics*. — Science PG, 2013, V 2(n 6). Pp. 282–286.

НЕБЕСНОМЕХАНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОИСХОЖДЕНИЯ КОМЕТ

 **Н. И. Перов**

 ГАУК ЯО «Центр имени В. В. Терешковой»
ЯГПУ имени К. Д. Ушинского

 perov@yarplaneta.ru

В рамках различных модификаций ограниченных задач трёх тел («ядро Галактики — Солнце — комета», «Солнце — планета — комета») определяются положения источников комет, рассматривается процесс их формирования, интервалы начальных скоростей кометных ядер в указанных источниках, времена сближений первоначально далёких комет с Солнцем и планетами и приводятся траектории движения этих малых тел. Подчёркивается, что для перехода периферийных комет во внутреннюю часть Солнечной системы, в рассматриваемых моделях, начальные условия движения комет должны находиться в узких пределах («замочных скважинах»).

ВВЕДЕНИЕ

В монографии [Томанов, Родин, 2013] дана краткая история кометной космогонии.

В работе [Ипатов, Маров, 2017] исследована миграция малых тел из различных областей Солнечной системы к формирующимся и современным планетам земной группы, основанная на результатах численного моделирования эволюции орбит десятков тысяч малых тел под гравитационным влиянием планет.

В статье [Fouchard, M., Emel'yanenko, V., Higuchi, A., 2020] исследуется связь некоторых долгопериодических комет с облаком Оорта.

В работах [Емельяненко, 2015, 2021] исследуются особенности сближений малых тел с планетами.

В работах [Perov, 2016, 2017] рассматриваются небесномеханические модели происхождения опасных небесных тел.

Ниже, в рамках различных ограниченных круговых задач трёх тел, определяются положения источников комет, рассматривается процесс их формирования, интервалы начальных скоростей кометных ядер в указанных источниках, времена сближений первоначально далёких комет с Солнцем и планетами и приводятся траектории движения этих малых тел. Особое внимание уделяется «замочным скважинам».

Заметим, в соответствии с определением, «замочные скважины» — области в плоскости цели, приводящие к соударению астероидов и комет с планетой в будущем [Chodas, 2012].

ПЛАНЕТЫ-ГИГАНТЫ И ТРАНСФОРМАЦИЯ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ ОРБИТ КОМЕТ В ЭЛЛИПТИЧЕСКИЕ ОРБИТЫ СБЛИЖЕНИЙ С ПЛАНЕТАМИ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

В работах [Perov, 2016] и [Perov, 2017] рассматривается переход комет из облаков Оорта и Хиллса к планетам земной группы. Массы возмущающих тел при этом могут быть в десятки раз меньше массы Луны, а перигелийные расстояния составлять 10^4 а. е. Ниже определяются условия столкновений малых тел (с параболическими орбитами), в начальный момент времени находящихся за орбитой Плутона, и планет земной группы. Планеты-гиганты с круговыми орбитами предполагаются возмущающими телами. Примем, что начальные перигелийные расстояния малых тел имеют величину 3 а. е. Установим области начальных положений планет-гигантов, в которых параболические орбиты малых тел трансформируются в гелиоцентрические эллиптические орбиты кроссеров — тел, пересекающих орбиты планет земной группы (при этом в некоторый момент времени гелиоцентрическое расстояние малого тела равно большой полуоси орбиты планеты земной группы).

В рамках плоской ограниченной круговой задачи трёх тел («Солнце — планета-гигант — малое тело») векторное дифференциальное уравнение движения малого тела представим в виде [Мюррей, Дермот, 2009]

$$d^2\mathbf{r} / dt^2 = -Gm_S\mathbf{r} / r^3 - Gm_J(\mathbf{r} - \mathbf{r}_J) / |\mathbf{r} - \mathbf{r}_J|^3. \quad (1)$$

Здесь \mathbf{r} и \mathbf{r}_J — гелиоцентрические радиус-векторы малого тела и планеты-гиганта соответственно; G — гравитационная постоянная; m_S и m_J — массы Солнца и планеты-гиганта; t — ньютоновское время.

Используя систему единиц, в которой большая полуось земной орбиты равна $a_E = 1$ AU, $m_S = 1$, $G = 1$, а в качестве независимой переменной выберем среднюю долготу Земли (v_E), отсчитываемой от оси абсцисс, уравнение (1) запишем в виде

$$d^2\mathbf{r} / dv_E^2 = -\mathbf{r} / r^3 - m'_J(\mathbf{r} - \mathbf{r}_J) / |\mathbf{r} - \mathbf{r}_J|^3, \quad (2)$$

где $m'_J = m_J / m_S$.

Обозначим через φ угол между осью Ox и начальным положением планеты-гиганта. При этом значении угла φ малое тело должно пересечь орбиту планеты земной группы. Введём обозначения: $r_{(j-c)min}$ — минимальное расстояние между планетой-гигантом и малым телом, $r_{(s-c)min}$ — минимальное расстояние между Солнцем и малым телом.

Начальные условия для движения малого тела по гелиоцентрической параболической орбите, являющейся невозмущённой только в начальный момент времени, выберем следующими:

$$x_0 = 34.0000000000000000000000000000 \text{ а. е. (единиц длины),}$$

$$y_0 = 21.0713075057054776968028 \text{ а. е. (единиц длины),}$$

$$(dx/dv)_0 = -0.21505813167606566929323 \text{ (единица длины/рад),}$$

$$(dy/dv)_0 = -0.0612372435695794524549320 \text{ (единица длины/рад).}$$

Ниже представлены результаты численного интегрирования (метод Рунге — Кутты) дифференциального уравнения (2) для процессов сближения малых тел с планетами-гигантами и появления искоемых кроссеров.

Юпитер

Примем $R_J = 0.00047789$ а. е. — радиус Юпитера.

Минимальные расстояния между малыми телами и Солнцем, а также условия образования кроссеров установлены при следующих предельных значениях параметра φ :

$$\varphi = -8.72323 \text{ рад;}$$

$$r_{(S-c)min} = 0.9639 \text{ а. е.;}$$

$$v_E = 191.04 \text{ рад;}$$

$$r_{(J-c)min} = 0.00014 \text{ а. е. } < R_J,$$

$$v_E = 123.9538005 \text{ рад (столкновение с Юпитером);}$$

$$\varphi = -8.7271 \text{ рад;}$$

$$r_{(S-c)min} = 0.98545 \text{ а. е.,}$$

$$v_E = 132.825 \text{ рад;}$$

$$r_{(J-c)min} = 0.01631 \text{ а. е. } > R_J,$$

$$v_E = 123.9695 \text{ рад;}$$

$$\varphi = -8.7247523821 \text{ рад;}$$

$$r_{(S-c)min} = 0.095 \text{ а. е.}$$

$$v_E = 133.45 \text{ рад;}$$

$$r_{(J-c)min} = 0.004999 \text{ а. е. } > R_J,$$

$$v_E = 123.9612 \text{ рад.}$$

Образование кроссеров происходит при $-8.7271 \text{ рад} < \varphi < -8.72323 \text{ рад}$.

Рисунки (1—5) иллюстрируют переходы малых тел с гелиоцентрических параболических орбит — с перигелиями в главном поясе астероидов (при отсутствии возмущений) — на гелиоцентрические эллиптические орбиты, которые пересекают орбиту Земли.

Заметим, что угловой диаметр Юпитера равен 0.00022 рад для земного наблюдателя, поэтому все малые тела, падающие на Юпитер, не будут пересекать орбиты планет земного типа.

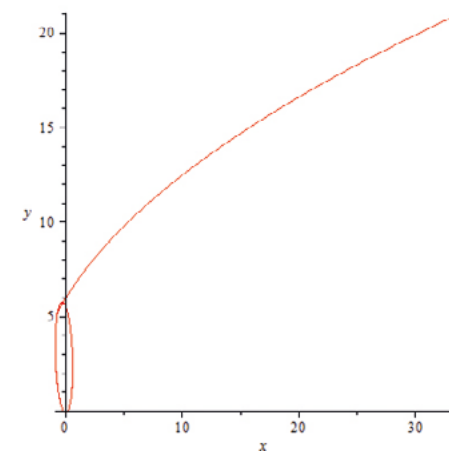


Рис. 1. Переход малого тела с гелиоцентрической параболической на йовоцентрическую траекторию и на гелиоцентрическую эллиптическую орбиту. $\varphi = -8.7247523821$ рад. $r_{(J-c)min} = 0.004999$ а. е. $> R_J$, $0 < v_E < 200$ рад. $r_{(Sun-c)min} = 0.095$ а. е., $v_E = 133.45$ рад.

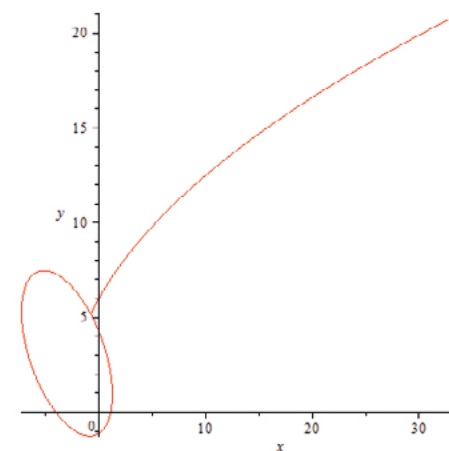


Рис. 2. Гелиоцентрическая траектория малого тела. $0 < v_E < 200$ рад. $\varphi = -8.72323$ рад. $r_{(Sun-c)min} = 0.9639$ а. е., $v_E = 191.04$ рад. $r_{(J-c)min} = 0.00014$ а. е. $< R_J$, $v_E = 123.9538005$ рад (падение на Юпитер).

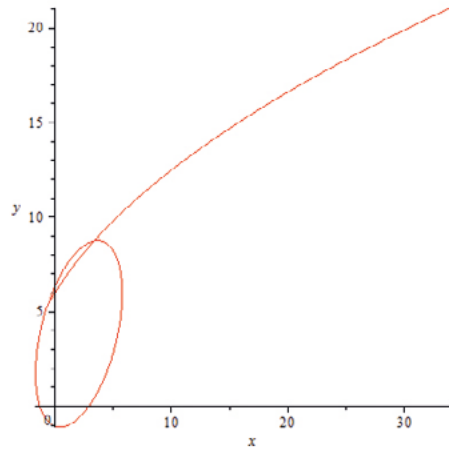


Рис. 3. Гелиоцентрическая траектория малого тела.
 $0 < v_E < 200$ рад. $\varphi = -8.7271$ рад. $r_{(Sun-c)min} = 0.98545$ а. е.
 $v_E = 132.825$ рад. $r_{(J-c)min} = 0.01631$ а. е. $> R_J$, $v_E = 123.9695$ рад.

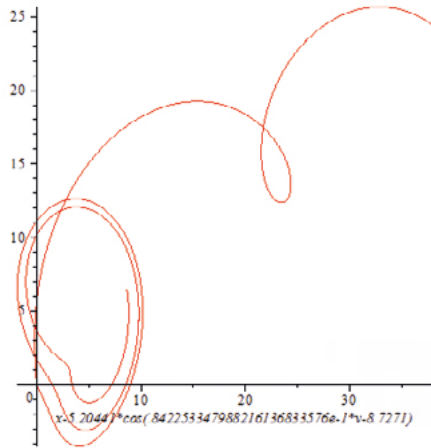


Рис. 4. Йовоцентрическая траектория малого тела.
 $\varphi = -8.7271$ рад. $0 < v_E < 300$ рад. $r_{(Sun-c)min} = 0.98545$ а. е.,
 $v_E = 132.825$ рад. $r_{(J-c)min} = 0.01631$ а. е., $v_E = 123.9695$ рад.

1. Юпитер, в данной небесномеханической модели, порождает кроссеры орбит планет земной группы при -8.7271 рад $< \varphi < -8.72323$ рад; Сатурн — при -2.6241 рад $< \varphi < -2.62287$ рад;

Уран — при -0.187999 рад $< \varphi < -0.187995$ рад;
 Нептун — при $+0.37763$ рад $< \varphi < +0.3779115$ рад.

Если параметр φ выходит из указанных диапазонов, то малое тело либо не пересекает орбиты планет земной группы (до Земли включительно), либо испытывает столкновение с соответствующей планетой-гигантом.

2. Соответствующие «замочные скважины» для рассмотренных малых тел, сближающихся с планетами-гигантами и пересекающих орбиты планет земной группы, меньше 0.004 рад, величина, сравнимая (по порядку) с угловым диаметром Юпитера (0.00022 рад) для земного наблюдателя.
3. Для предельных случаев эллиптические орбиты кроссеров являются симметричными относительно координатных осей — в рассматриваемой модели для Юпитера (Рис. 2 и Рис. 3).
4. Возмущающие тела с массами, в десятки раз меньшими, чем масса Луны, также переводят малые тела в область планет земной группы, но соответствующие «замочные скважины» меньше указанных в тысячи раз [Perov, 2016].
5. В дальнейшем предполагается рассмотреть происхождение некоторых метеорных потоков в рамках небесномеханической модели образования кроссеров земной орбиты.

РАЗРЕЖЕННОЕ ОБЛАКО КОМЕТ ВБЛИЗИ ЮПИТЕРА

Ниже производится оценка времени пребывания малого тела на планетоцентрической и гелиоцентрической орбитах в системе «Солнце — Юпитер».

Движение частицы с ничтожно малой массой m_3 исследуется в рамках плоской круговой ограниченной задачи трёх тел [Szebehely, 1967; Маршал, 2004]. Обозначим m_1 и m_2 — массы основных тел, r_{12} — расстояние между этими телами, G — гравитационная постоянная. Найдём область движения частицы m_3 , — вектор $\mathbf{r}_3 = r_3(x_3, y_3)$, относительно центра масс системы, и численно исследуем времена нахождения частицы в этой ограниченной области её движения, используя метод численного интегрирования Рунге — Кутты. Введём параметр N — число точек на соответствующем рисунке.

В соответствии с работами [Szebehely, 1967; Маршал, 2004], дифференциальное уравнение движения частицы m_3 (в равномерно вращающейся с угловой скоростью Ω системе координат), записанное в векторной форме, имеет вид (3):

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_3}{dt^2} + Gm_1(\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1) / (|\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1|^3) + Gm_2(\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_2) / (|\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_2|^3) - 2[d\mathbf{r}_3 / dt, \Omega] - \Omega^2 \mathbf{r}_3 = 0. \quad (3)$$

Здесь \mathbf{r}_3 — радиус-вектор, определяющий положение рассматриваемой точки m_3 относительно центра масс системы; \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 — радиус-векторы основных тел (с массами m_1 и m_2 соответственно) в этой же системе отсчёта. Ω — угловая скорость равномерного обращения основных тел.

$$\mathbf{r}_1 = -(m_2 / (m_1 + m_2))\mathbf{r}_{12}, \mathbf{r}_2 = (m_1 / (m_1 + m_2))\mathbf{r}_{12}, \Omega = \sqrt{\frac{G(m_1 + m_2)}{r_{12}^3}}. \quad (4)$$

Положения эйлеровых точек либрации определялись из уравнения (3) при учёте условий [Szebehely, 1967]

$$d^2\mathbf{r}_3 / dt^2 = 0. \quad d\mathbf{r}_3 / dt = 0.$$

Для проведения численных экспериментов, с использованием уравнения (3), полагали: $G = 6,672 \times 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{с}^2 \times \text{кг})$, $m_1 = 2 \times 10^{30} \text{ кг}$ (масса Солнца), m_2 — масса планеты. При решении уравнения (1) применяли следующие единицы длины, массы и времени: r_{12} — единица длины; m_1 — единица массы; единица времени t выбиралась таким образом, чтобы $G = 1$. Кроме того, для всех рассматриваемых случаев выполнялись следующие начальные условия: $x_{10} \neq 0, dx_1 / dt = 0, y_{10} = 0, dy_1 / dt = 0, x_2 \neq 0, dx_2 / dt = 0, y_{20} = 0, dy_2 / dt = 0, x_{30} \neq 0, dx_3 / dt = 0,002, y_{30} = 0, dy_3 / dt = 0,002$. В начальный момент времени малое тело находилось в точке либрации L_2 ($x_{30} = 0,93247922945, y_{30} = 0$).

Результаты численных экспериментов, связанных с исследованием движения m_3 и произведённых на интервалах времени, соответствующих десяткам и сотням оборотов основных тел, представлены на Рис. 5 и Рис. 6.

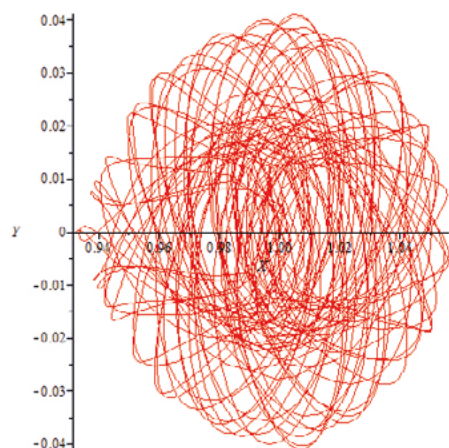


Рис. 5. Система «Юпитер — Солнце — малое тело». Интервал интегрирования $t = 0-100$ единиц времени (~16 оборотов Юпитера). Число точек $N = 2000$. Движение тела вблизи Юпитера.

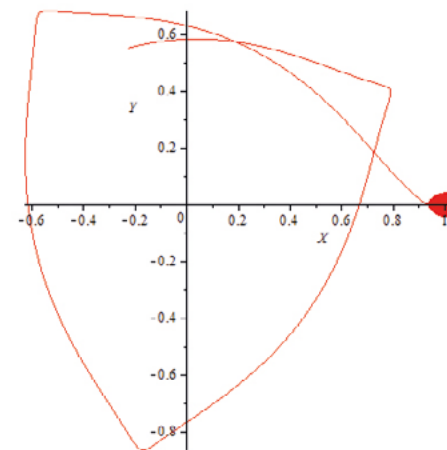


Рис. 6. Система «Юпитер — Солнце — малое тело». Интервал интегрирования $t = 0-305$ единиц времени (~49 оборотов Юпитера). Число точек $N = 200000$. Переход тела с юпитероцентрической на гелиоцентрическую орбиту.

1. Показано, что в рамках круговой ограниченной задачи трёх тел «Солнце — планета — малое тело» существуют траектории, охватывающие оба основных тела.
2. В данной модели, в отличие от работы [Szebehely, 1967], оценивается время пребывания малых тел на планетоцентрических и гелиоцентрических орбитах.
3. Рассматриваемая модель позволяет интерпретировать «неожиданные» появления и исчезновения некоторых малых тел вблизи планет.
4. Для планет земной группы области соответствующих движений малых тел являются более узкими при интегрировании уравнений движения на одном и том же интервале времени (по сравнению с соответствующими областями планет-гигантов).

ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛАКА ООРТА ЯДРАМИ МЕЖЗВЁЗДНЫХ КОМЕТ

Ниже производится оценка времени пребывания малого тела (кометы) на галактоцентрической и гелиоцентрической орбитах в системе «галактическое ядро — Солнце».

Движение частицы с ничтожно малой массой m_3 исследуется в рамках плоской круговой ограниченной задачи трёх тел [Szebehely, 1967; Маршал,

2004]. Обозначим m_1 и m_2 — массы основных тел, m_1 — масса Галактики внутри орбиты Солнца и m_2 — масса Солнца, r_{12} — расстояние между ядром Галактики и Солнцем, G — гравитационная постоянная. Найдём область движения частицы m_3 — вектор $\mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_3(x_3, y_3)$, относительно центра масс системы, и численно исследуем времена нахождения частицы в этой ограниченной области её движения, используя метод численного интегрирования Рунге — Кутты. Введём параметр N — число точек на соответствующем рисунке.

В соответствии с работами [Szebehely, 1967; Маршал, 2004], дифференциальное уравнение движения частицы m_3 (в равномерно вращающейся с угловой скоростью Ω системе координат), записанное в векторной форме, имеет вид (5):

$$\frac{d^2\mathbf{r}_3}{dt^2} + Gm_1(\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1) / (|\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1|^3) + Gm_2(\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_2) / (|\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_2|^3) - 2[d\mathbf{r}_3 / dt, \Omega] - \Omega^2\mathbf{r}_3 = 0. \quad (5)$$

Здесь \mathbf{r}_3 — радиус-вектор, определяющий положение рассматриваемой точки (кометы) m_3 относительно центра масс системы; \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 — радиус-векторы основных тел (с массами m_1 и m_2 соответственно) в этой же системе отсчёта. Ω — угловая скорость равномерного вращения основных тел.

$$\mathbf{r}_1 = -(m_2 / (m_1 + m_2))\mathbf{r}_{12}, \quad \mathbf{r}_2 = (m_1 / (m_1 + m_2))\mathbf{r}_{12},$$

$$\Omega = \sqrt{\frac{G(m_1 + m_2)}{r_{12}^3}}. \quad (6)$$

Для проведения численных экспериментов, с использованием уравнения (5), полагали: $G = 6,672 \times 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{с}^2 \times \text{кг})$, $m_1 = 400 \times 10^9 \times 2 \times 10^{30} \text{ кг}$ — масса Галактики внутри галактической орбиты Солнца, $m_2 = 2 \times 10^{30} \text{ кг}$ — масса Солнца. При решении уравнения (1) применяли следующие единицы длины, массы и времени: $r_{12} = 8,5 \text{ кпк}$ — единица длины (расстояние между Солнцем и ядром Галактики); m_1 — единица массы (масса Галактики внутри галактической орбиты Солнца); единица времени t выбиралась таким образом, чтобы $G = 1$. Кроме того, для всех рассматриваемых случаев выполнялись следующие начальные условия: $x_{10} \neq 0, dx_1 / dt = 0, y_{10} = 0, dy_1 / dt = 0, x_2 \neq 0, dx_2 / dt = 0, y_{20} = 0, dy_2 / dt = 0, x_{30} \neq 0, dx_3 / dt = 0,0000002 - 0,002, y_{30} = 0, dy_3 / dt = 0,0000002 - 0,002$. В начальный момент времени малое тело находилось в точке либрации L_2 ($x_{30} = 0,999905899346533870846807, y_{30} = 0$).

Результаты численных экспериментов, связанных с исследованием движения m_3 и произведённых на интервалах времени, соответствующих десяткам и сотням оборотов основных тел, представлены на Рис. 7—9.

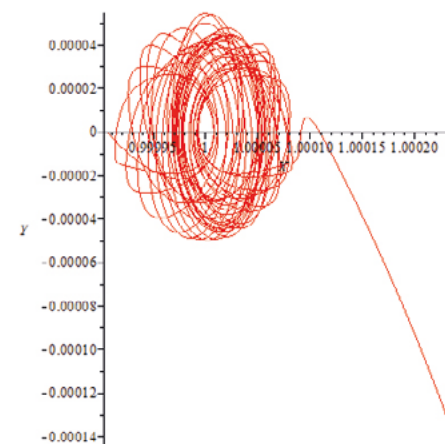


Рис. 7. Система «ядро Галактики — Солнце — комета». Движение кометы в облаке Оорта. Интервал интегрирования $t = 0-62,8$ единиц времени (~ 10 оборотов Солнца по галактической орбите). Число точек $N = 20000$. $V_{x0} = 0,0000002$ (единица длины/единица времени). $V_{y0} = 0,0000002$ (единица длины/единица времени).

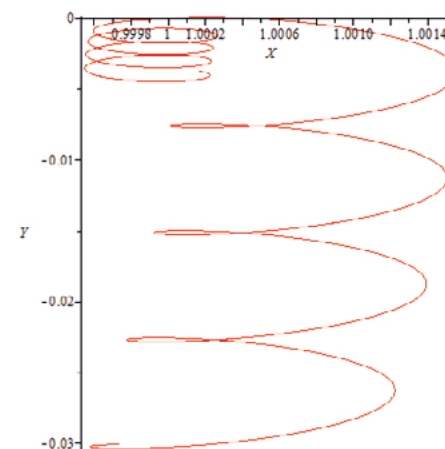


Рис. 8. Система «ядро Галактики — Солнце — комета». Интервал интегрирования $t = 18350-18400$ единиц времени (~ 7.96 оборота Солнца по галактической орбите). Число точек $N = 100000$. $V_{x0} = 0.0$ (единица длины/единица времени). $V_{y0} = +0,00005701$ (единица длины/единица времени). Движение кометы начинается от точки $x_{30} = -x_2 = -0,999999999975000000000000$ единиц длины, $y_{30} = 0$. Минимальное расстояние кометы от Солнца равно $r_{min} \approx 0,00001115$ единицы длины.

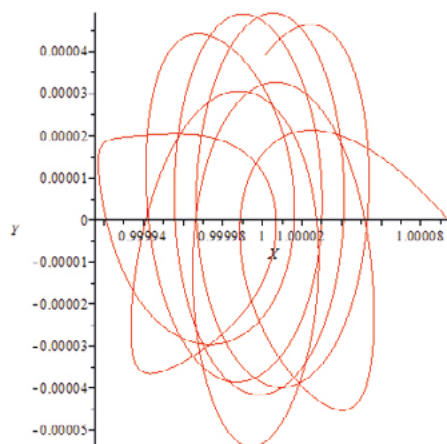


Рис. 9. Система «ядро Галактики — Солнце — комета».

Интервал интегрирования $t = 0-40$ единиц времени (~ 6.369 оборота Солнца по галактической орбите). Число точек $N = 100000$. $V_{x0} = 0,0$ (единица длины/единица времени). $V_{y0} = +0,0$ (единица длины/единица времени). Движение кометы начинается от точки $x_{30} = L_3 = 1,00009410655212483908103$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ


Рассмотренные небесномеханические модели происхождения комет позволяют сделать следующие выводы:


1. невозможно объяснить процесс миграции комет во внутренние области Солнечной системы из единственного их источника (в рамках рассматриваемой модели);
2. долгопериодические кометы и короткопериодические кометы приходят и из межзвёздной среды, и из Солнечной системы;
3. существуют удалённые от Солнца и близкие Солнцу источники комет, связанные, в частности, с точками либрации в таких ограниченных задачах трёх тел, как «центр Галактики — Солнце — комета», «Солнце — планета — комета»;
4. начальные положения и скорости небесных тел находятся в узких пределах (доли процента от «средних» значений), чтобы комета с первоначальной параболической орбитой перешла на гелиоцентрическую эллиптическую орбиту;
5. облака Оорта и Хиллса следует рассматривать не как стационарные образования, а как области, в которые ядра комет времен-


но приходят и, после нескольких оборотов (десятков оборотов), их покидают.

Список литературы

1. Емельяненко Н. Ю. Особенности сближений малых тел с планетами. [Текст] / *Астрономический вестник*. — М.: Наука, 2015. Т. 49. № 6.
2. Емельяненко Н. Ю. Сближения комет и астероидов с планетами. Тезисы научной конференции с международным участием «VII Бредихинские чтения». 24–28 мая 2021 г., Заволжск.
3. Ипатов С. И., Маров М. Я. Миграция малых тел к планетам земной группы. Тезисы научной конференции с международным участием «VI Бредихинские чтения». 4–8 сентября 2017 г., Заволжск.
4. Маршал К. Задача трёх тел. [Текст]. — Москва — Ижевск: Изд-во Института компьютерных исследований, 2004. — 640 с.
5. Мюррей К., Дермотт С. Динамика Солнечной системы / Пер. с англ. под ред. И. И. Шевченко. — М.: Физматлит, 2009. — 588 с.
6. Томанов В. П., Родин Д. А. Орбитальная эволюция почти параболических комет: Волог. гос. пед. ун-т. Вологда: Лаборатория астрономических исследований, 2013. — 271 с.
7. Chodas P. W. Keyholes and Jabbas: The Role of Pre-Impact Close Approaches in Asteroid Deflection / Conference "Asteroids, Comets, Meteors (ACM-2012)". May 16–20, 2012, Niigata, Japan. [#6471].
8. Fouchard, M., Emel'yanenko, V., Higuchi, A. Long-period comets as a tracer of the Oort cloud structure. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2020, Volume 132, Issue 8, article id. 43.
9. Perov N. I. A role of Jupiter in the process of the terrestrial type planets bombarding by the Solar system peripherals small bodies. / Conf. "Accretion: Building New Worlds". August 15–18, 2017. Lunar and Planetary Institute, Houston, Texas. USA. #2006. <http://www.hou.usra.edu/meetings/accretion2017>
10. Perov N. I. On a model of hazardous meteoroids origin. 47th Lunar and Planetary Science Conference, held March 21–25, 2016 at The Woodlands, Texas. USA. LPI Contribution No. 1903, p. 1010. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2016LPI...47.1010P>.
11. Szebehely, V. Theory of orbits. The restricted problem of three bodies, Yale University. New Haven. Connecticut. Academic Press New York and London, 1967. 668 pp.

 **Н. И. Перов, Н. Ю. Исаченков**

 ГАУК ЯО «Культурно-просветительский центр имени В. В. Терешковой»
ЯГПУ имени К. Д. Ушинского

 perov@yarplaneta.ru

ВВЕДЕНИЕ

С эпохи Ньютона и до наших дней исследуется небесномеханическая задача многих тел. Получены как теоретические результаты [Маршал, 2004; Перов Н. И. и др., 2011; Перов, 2018; Renato и др., 2020; Xiaoming Li and Shijun Liao, 2018; XiaoMing Li and Shijun Liao, 2017], так и практические приложения [Мюррей К., Дермотт С., 2009; Emel'yanenko, 2021; Ipatov, 2020; Marov, Ipatov, 2020]. Определённый интерес для проектирования орбит космических аппаратов представляют, по мнению авторов, хореографические траектории [Xiaoming Li and Shijun Liao, 2017; 2018].

Далее, в рамках плоской ограниченной круговой задачи трёх тел, исследуется движение малых тел по подковообразным и другим орбитам, заметно отличающимся от эллиптических траекторий.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Ниже производится оценка времени пребывания малого тела (кометы, космического аппарата) на орбитах в системах с различными массами основных тел (точнее, с различными отношениями масс основных тел).

Движение частицы с ничтожно малой массой m_3 исследуется в рамках плоской круговой ограниченной задачи трёх тел [Маршал, 2004]. Обозначим m_1 и m_2 — массы основных тел, r_{12} — расстояние между ними, G — гравитационная постоянная. Найдём область движения частицы m_3 — вектор $\mathbf{r}_3 = r_3(x_3, y_3)$, относительно центра масс системы, и численно исследуем времена нахождения частицы в этой ограниченной области её движения, используя метод численного интегрирования Рунге — Кутты. Введём параметр N — число точек на соответствующем рисунке.

В соответствии с работой [Маршал, 2004], дифференциальное уравнение движения частицы m_3 (в равномерно вращающейся с угловой скоростью Ω системе координат), записанное в векторной форме, имеет вид (1):

$$\frac{d^2\mathbf{r}_3}{dt^2} + Gm_1(\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1) / (|\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1|^3) + Gm_2(\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_2) / (|\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_2|^3) - 2[d\mathbf{r}_3 / dt, \Omega] - \Omega^2\mathbf{r}_3 = 0. \quad (1)$$

Здесь \mathbf{r}_3 — радиус-вектор, определяющий положение рассматриваемой точки (кометы, КА) m_3 относительно центра масс системы; \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 — радиус-векторы основных тел (с массами m_1 и m_2 соответственно) в этой же системе отсчёта; Ω — угловая скорость равномерного вращения основных тел.

$$\mathbf{r}_1 = -(m_2 / (m_1 + m_2))\mathbf{r}_{12}, \mathbf{r}_2 = (m_1 / (m_1 + m_2))\mathbf{r}_{12}, \quad (2)$$

$$\Omega = \sqrt{\frac{G(m_1 + m_2)}{r_{12}^3}}.$$

Уравнение (1) имеет интеграл Якоби (3) [Маршал, 2004]

$$C_J = \frac{\Omega^2 r_3^2}{2} + \frac{Gm_1}{(|\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1|)} + \frac{Gm_2}{(|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|)} - \frac{1}{2} \times \left(\frac{dr_3}{dt} \right)^2, \quad (3)$$

Эйлеровы точки либрации определялись из уравнения (1) при учёте условий

$$d^2\mathbf{r}_3 / dt^2 = 0. \quad d\mathbf{r}_3 / dt = 0.$$

Для проведения численных экспериментов, с использованием уравнения (1), полагали: $G = 6,672 \times 10^{-11} \text{ м}^3 / (\text{с}^2 \times \text{кг})$, $10^2 < m_1 / m_2 < 10^{11}$. При решении уравнения (1) применяли следующие единицы длины, массы и времени: r_{12} — единица длины; m_1 — единица массы; единица времени t выбиралась таким образом, чтобы $G = 1$. Кроме того, для всех рассматриваемых случаев выполнялись следующие начальные условия: $x_1 \neq 0$, $dx_1 / dt = 0$, $y_1 = 0$, $dy_1 / dt = 0$, $x_2 \neq 0$, $dx_2 / dt = 0$, $y_2 = 0$, $dy_2 / dt = 0$, $x_{30} \neq 0$, $-3.5 < (dx_3 / dt)_0 < +3.5$ (единица длины) / (единица времени), $-3.5 < (dy_3 / dt)_0 < +3.5$ (единица длины) / (единица времени), $-1 < y_{30} < +1$. Результаты численных экспериментов, связанных с исследованием движения m_3 и произведенных на интервалах времени, соответствующих десяткам и сотням оборотов основных тел, представлены на Рис. 1—11.

При этом применялись уравнения движения тела m_3 , представленные в виде

$$\frac{d^2x_3}{dt^2} = -\frac{-x_1 + x_3}{((x_1 + x_3)^2 + y_3^2)^{3/2}} - \frac{m_2}{m_1} \times \frac{-x_2 + x_3}{((x_2 + x_3)^2 + y_3^2)^{3/2}} + 2 \times \frac{dy_3}{dt} \times \Omega + \Omega^2 x_3,$$

$$\frac{d^2y_3}{dt^2} = -\frac{y_3}{((x_1 + x_3)^2 + y_3^2)^{3/2}} - \frac{m_2}{m_1} \times \frac{y_3}{((x_2 + x_3)^2 + y_3^2)^{3/2}} - 2 \times \frac{dx_3}{dt} \times \Omega + \Omega^2 y_3.$$

Положения эйлеровых точек либрации определялись из уравнения

$$\frac{-x_1 + x_3}{((-x_1 + x_3)^2)^{3/2}} - \frac{m_2}{m_1} \times \frac{-x_2 + x_3}{((-x_2 + x_3)^2)^{3/2}} + \Omega^2 x_3 = 0.$$

$$(y_3 = 0).$$

На рисунках обозначено $X = x_3$, $Y = y_3$.

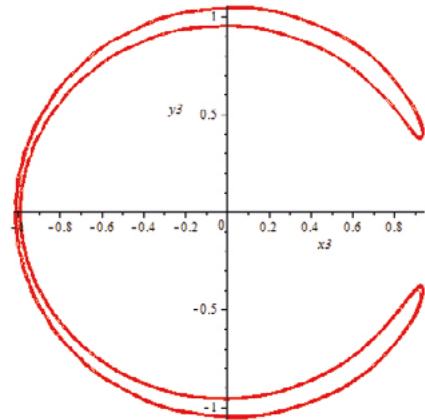


Рис. 1. Замкнутая траектория малого тела m_3 в системе «Солнце ($m_1 = 1$) и Юпитер ($m_2 = m_1 / 1048$)», относительно центра масс системы (m_1 и m_2).
 $x_1 = -1 / 1049$, $x_2 = 1048 / 1049$.
 $x_{30} = -x_2 - \varepsilon$, $\varepsilon = 10^{-11}$, $y_{30} = 0$,
 $V_{x30} = V_{y30} = 0$ (единица длины) / (единица времени).
 Единица длины — r_{12} .
 Интервал движения m_3
 $\tau = 3000$ единиц времени.
 $\Omega = 274838^{1/2} / 524$. ($\Omega \approx 1$).

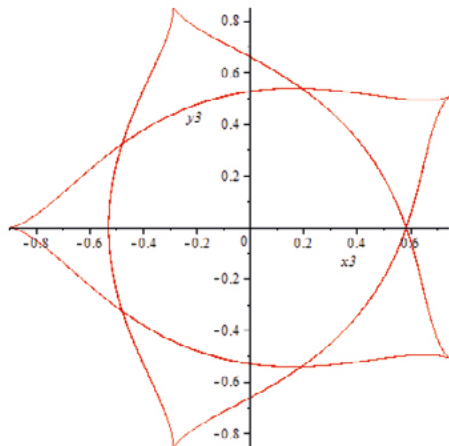


Рис. 2. Замкнутая траектория малого тела m_3 в системе «Солнце ($m_1 = 1$) и Юпитер ($m_2 = m_1 / 1048$)», относительно центра масс системы (m_1 и m_2).
 $x_1 = -1 / 1049$, $x_2 = 1048 / 1049$.
 $x_{30} = -x_2 - \varepsilon$, $\varepsilon = 0,0983$, $y_{30} = 0$,
 $V_{x30} = V_{y30} = 0$ (единица длины) / (единица времени).
 Единица длины — r_{12} .
 Интервал движения m_3
 $\tau = 2000$ единиц времени.
 $\Omega = 274838^{1/2} / 524$. ($\Omega \approx 1$).

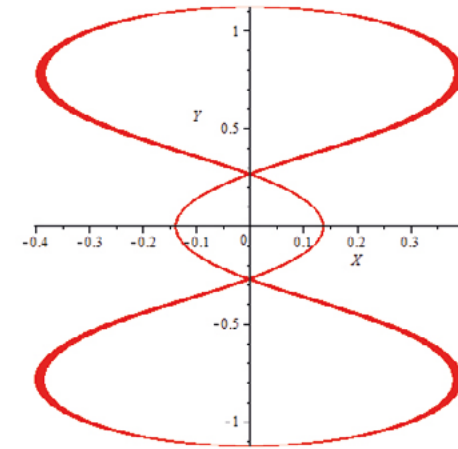


Рис. 3. Замкнутая траектория малого тела m_3 в системе «Солнце ($m_1 = 1$) и Юпитер ($m_2 = m_1 / 1000$)», относительно центра масс системы (m_1 и m_2).
 $x_1 = -1 / 1001$, $x_2 = 1000 / 1001$. $x_{30} = -0,14$, $y_{30} = 0$, $V_{x0} = 0$,
 $V_{y0} = -3,4389$ (единица длины) / (единица времени). Единица длины — r_{12} .
 Интервал движения m_3 $\tau = 3000$ единиц времени. ($\Omega \approx 1$). $\Omega = 1,00049987506246$.

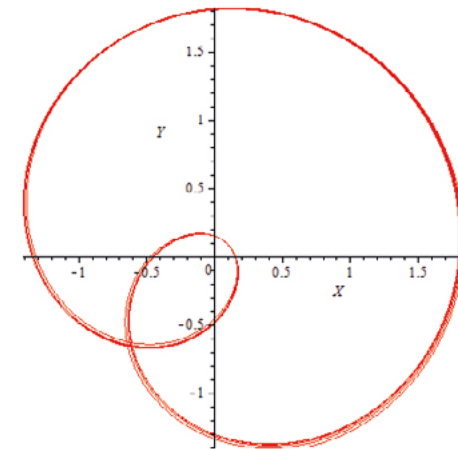


Рис. 4. Квазизамкнутая траектория малого тела m_3 в системе «Солнце ($m_1 = 1$) и Юпитер ($m_2 = m_1 / 1000$)», относительно центра масс системы (m_1 и m_2).
 $x_1 = -1 / 1001$, $x_2 = 1000 / 1001$. $x_{30} = -0,1$, $y_{30} = 0,169$, $V_{x0} = 3,20217$,
 $V_{y0} = -0,0001$ (единица длины) / (единица времени). Единица длины — r_{12} .
 Интервал движения m_3 $\tau = 30$ единиц времени. ($\Omega \approx 1$). $\Omega = 1,00049987506246$.

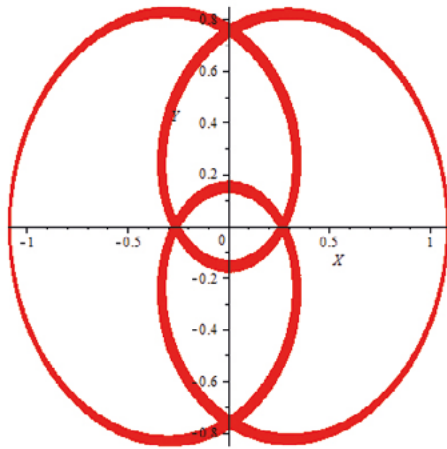


Рис. 5. Квазизамкнутая траектория малого тела t_3 в системе «Солнце ($m_1 = 1$) и Юпитер ($m_2 = m_1 / 1000$)», относительно центра масс системы (m_1 и m_2).

$$x_1 = -1 / 1001, x_2 = 1000 / 1001. x_{30} = 1,0899, y_{30} = 0, V_{x0} = 0,$$

$$V_{y0} = -1,6 \text{ (единица длины) / (единица времени). Единица длины — } r_{12}.$$

Интервал движения t_3 $\tau = 3000$ единиц времени. ($\Omega \approx 1$). $\Omega = 1,00049987506246$.

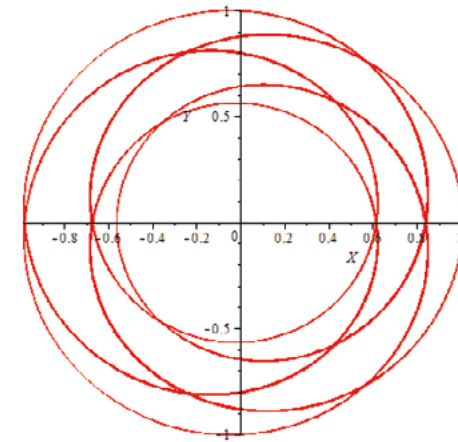


Рис. 7. Замкнутая траектория малого тела t_3 в системе «Солнце ($m_1 = 1$) и Юпитер ($m_2 = m_1 / 1000$)», относительно центра масс системы (m_1 и m_2).

$$x_1 = -1 / 1001, x_2 = 1000 / 1001. x_{30} = 1,01, y_{30} = 0, V_{x30} = 0,$$

$$V_{y30} = -1,9 \text{ (единица длины) / (единица времени). Единица длины — } r_{12}.$$

Интервал движения t_3 $\tau = 3000$ единиц времени. ($\Omega \approx 1$). $\Omega = 1,00049987506246$.

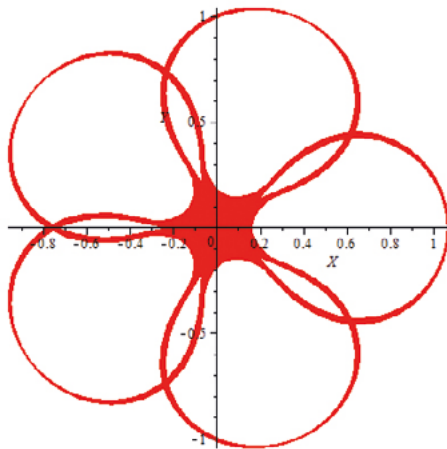


Рис. 6. Квазизамкнутая траектория малого тела t_3 в системе «Солнце ($m_1 = 1$) и Юпитер ($m_2 = m_1 / 1000$)», относительно центра масс системы (m_1 и m_2).

$$x_1 = -1 / 1001, x_2 = 1000 / 1001. x_{30} = 1,064, y_{30} = 0, V_{x0} = 0,$$

$$V_{y0} = -0,89 \text{ (единица длины) / (единица времени). Единица длины — } r_{12}.$$

Интервал движения t_3 $\tau = 3000$ единиц времени. ($\Omega \approx 1$). $\Omega = 1,00049987506246$.

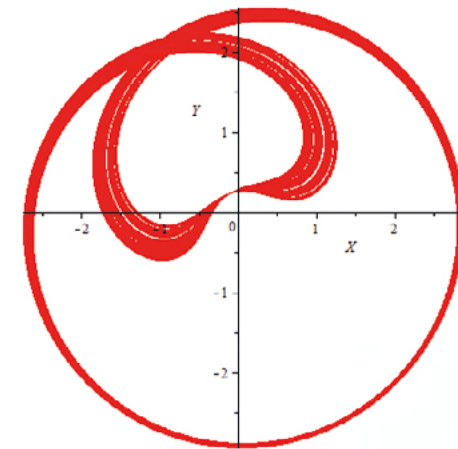


Рис. 8. Квазизамкнутая траектория малого тела t_3 в системе «Солнце ($m_1 = 1$) и Юпитер ($m_2 = m_1 / 1000$)», относительно центра масс системы (m_1 и m_2).

$$x_1 = -1 / 1001, x_2 = 1000 / 1001. x_{30} = 0,931309988540969560264890, y_{30} = 0,26,$$

$$V_{x30} = -0,86, V_{y30} = -0,5 \text{ (единица длины) / (единица времени). Единица длины — } r_{12}.$$

Интервал движения t_3 $\tau = 3000$ единиц времени. ($\Omega \approx 1$). $\Omega = 1,00049987506246$.

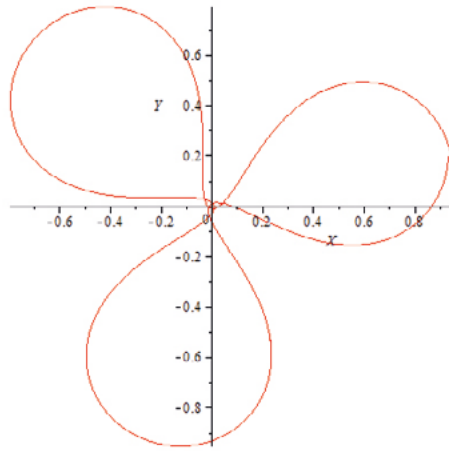


Рис. 9. Квазизамкнутая траектория малого тела m_3 в системе «Солнце ($m_1 = 1$) и Юпитер ($m_2 = m_1 / 1000$)», относительно центра масс системы (m_1 и m_2).
 $x_1 = -1 / 1001$, $x_2 = 1000 / 1001$. $x_{30} = 0,931309988540969560264890$, $y_{30} = 0,2$, $V_{x30} = -0,03$,
 $V_{y30} = -0,82$ (единица длины) / (единица времени). Единица длины — r_{12} .
 Интервал движения m_3 $\tau = 6,24$ единиц времени. ($\Omega \approx 1$). $\Omega = 1,00049987506246$.

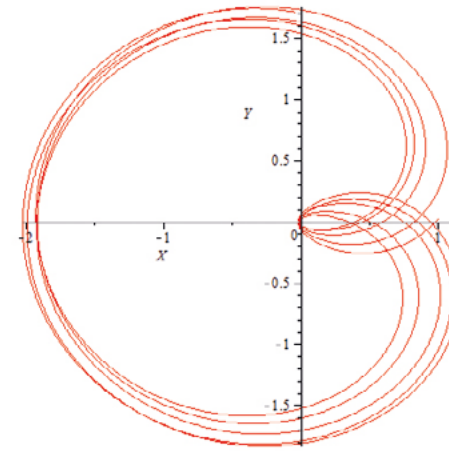


Рис. 11. Квазизамкнутая траектория малого тела m_3 в системе «Солнце ($m_1 = 1$) и Юпитер ($m_2 = m_1 / 1000$)», относительно центра масс системы (m_1 и m_2).
 $x_1 = -1 / 1001$, $x_2 = 1000 / 1001$. $x_{30} = 0,9999$, $y_{30} = 0,03$, $V_{x30} = -0,99$,
 $V_{y30} = -1,22$ (единица длины) / (единица времени). Единица длины — r_{12} .
 Интервал движения m_3 $\tau = 30$ единиц времени. ($\Omega \approx 1$). $\Omega = 1,00049987506246$.

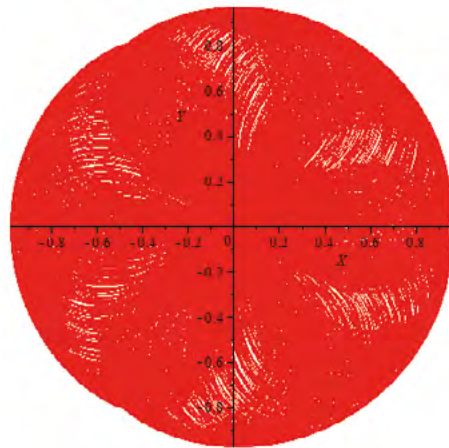


Рис. 10. Квазизамкнутая траектория малого тела m_3 в системе «Солнце ($m_1 = 1$) и Юпитер ($m_2 = m_1 / 1000$)», относительно центра масс системы (m_1 и m_2).
 $x_1 = -1 / 1001$, $x_2 = 1000 / 1001$. $x_{30} = 0,931309988540969560264890$, $y_{30} = 0,2$, $V_{x30} = -0,03$,
 $V_{y30} = -0,82$ (единица длины) / (единица времени). Единица длины — r_{12} .
 Интервал движения m_3 $\tau = 3000$ единиц времени. ($\Omega \approx 1$). $\Omega = 1,00049987506246$.

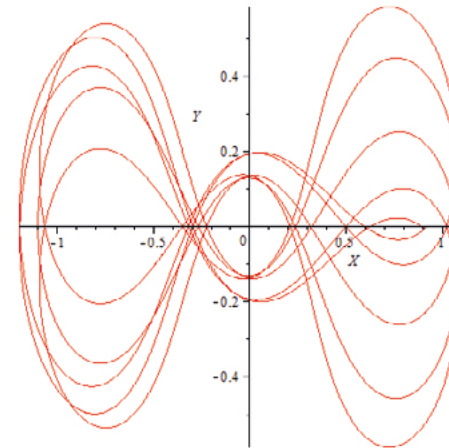


Рис. 12. Квазизамкнутая траектория малого тела m_3 в системе «Солнце ($m_1 = 1$) и Юпитер ($m_2 = m_1 / 1000$)», относительно центра масс системы (m_1 и m_2).
 $x_1 = -1 / 1001$, $x_2 = 1000 / 1001$. $x_{30} = 0,92$, $y_{30} = -0,0003$, $V_{x30} = -0,59967$,
 $V_{y30} = -0,3$ (единица длины) / (единица времени). Единица длины — r_{12} .
 Интервал движения m_3 $\tau = 30$ единиц времени. ($\Omega \approx 1$). $\Omega = 1,00049987506246$.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ МАЛОГО ТЕЛА ПО ПОДКОВООБРАЗНЫМ ОРБИТАМ

Движение малого тела по подковообразным траекториям — в рассматриваемой модели — становится устойчивым при отношении масс основных тел, удовлетворяющем условию $m_1 / m_2 > 1\,000$ (Рис. 1 и Рис. 12), а ширина траектории m_3 максимальна там, где расположены точки либрации L_4 и L_5 (при некоторых дополнительных условиях). С увеличением величины отношения m_1 / m_2 толщина подковообразной траектории уменьшается [Мюррей К., Дермотт С., 2009. С. 115].

Подковообразные траектории малого тела при $m_1 / m_2 = 10\,000$ сохраняются при нулевых начальных условиях, причём начальное положение малого тела по оси абсцисс должно быть заключено в интервале $-1,006793 < x_3 < -0,9936$ (Рис. 12—16).

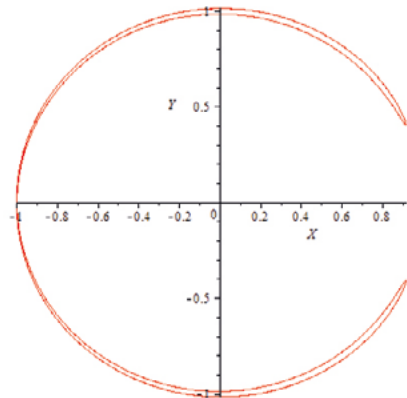


Рис. 13. Замкнутая траектория малого тела m_3 в системе «Солнце ($m_1 = 1$) — планета ($m_2 = m_1 / 10\,000$)», относительно центра масс системы (m_1 и m_2). $x_1 = -1 / 10\,001$, $x_2 = 10\,000 / 10\,001$. $x_{30} = -x_2$, $y_{30} = 0$, $v_{x30} = v_{y30} = 0$ (единица длины) / (единица времени). Единица длины — r_{12} . Интервал движения m_3 $\tau = 3\,000$ единиц времени. $\Omega = 1,000049998750062496$. ($\Omega \approx 1$).

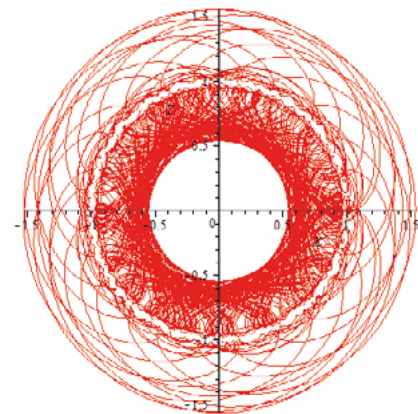


Рис. 14. Незамкнутая траектория малого тела m_3 во вращающейся системе «Солнце ($m_1 = 1$) — планета ($m_2 = m_1 / 10\,000$)», относительно центра масс системы (m_1 и m_2). $x_1 = -1 / 10\,001$, $x_2 = 10\,000 / 10\,001$. $x_{30} = -1,006794$. $y_{30} = 0$. $v_{x30} = v_{y30} = 0$ (единица длины) / (единица времени). Единица длины — r_{12} . Интервал движения m_3 $\tau = 3\,000$ единиц времени. $\Omega = 1,000049998750062496$. ($\Omega \approx 1$).

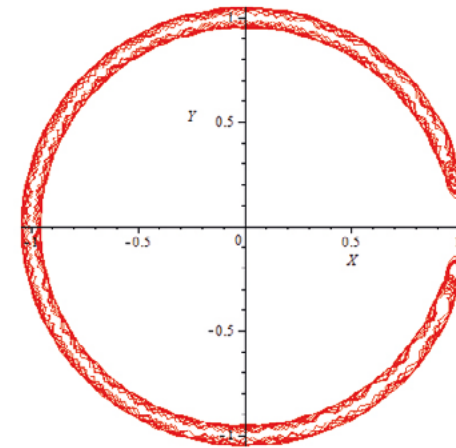


Рис. 15. Квазизамкнутая траектория малого тела m_3 во вращающейся системе «Солнце ($m_1 = 1$) — планета ($m_2 = m_1 / 10\,000$)», относительно центра масс системы (m_1 и m_2). $x_1 = -1 / 10\,001$, $x_2 = 10\,000 / 10\,001$. $x_{30} = -1,006793$. $y_{30} = 0$. $v_{x30} = v_{y30} = 0$ (единица длины) / (единица времени). Единица длины — r_{12} . Интервал движения m_3 $\tau = 3\,000$ единиц времени. $\Omega = 1,000049998750062496$. ($\Omega \approx 1$).

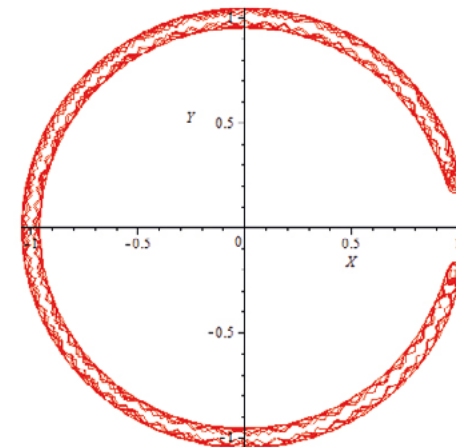


Рис. 16. Квазизамкнутая траектория малого тела m_3 во вращающейся системе «Солнце ($m_1 = 1$) — планета ($m_2 = m_1 / 10\,000$)», относительно центра масс системы (m_1 и m_2). $x_1 = -1 / 10\,001$, $x_2 = 10\,000 / 10\,001$. $x_{30} = -0,9936$, $y_{30} = 0$. $v_{x30} = v_{y30} = 0$ (единица длины) / (единица времени). Единица длины — r_{12} . Интервал движения m_3 $\tau = 3\,000$ единиц времени. $\Omega = 1,000049998750062496$. ($\Omega \approx 1$).

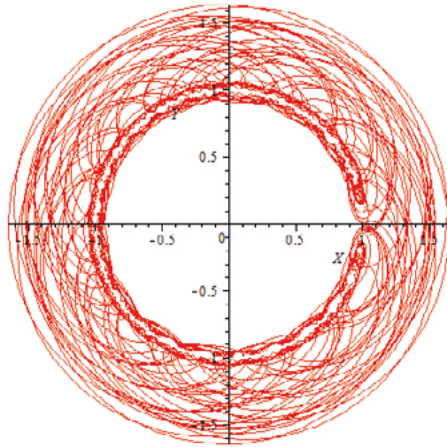


Рис. 17. Незамкнутая траектория малого тела m_3 во вращающейся системе «Солнце ($m_1 = 1$) — планета ($m_2 = m_1 / 10\,000$)», относительно центра масс системы (m_1 и m_2). $x_1 = -1 / 10\,001$, $x_2 = 10\,000 / 10\,001$. $x_{30} = -0,9935$, $y_{30} = 0$. $V_{x30} = V_{y30} = 0$ (единица длины) / (единица времени). Единица длины — r_{12} . Интервал движения m_3 $\tau = 3\,000$ единиц времени. $\Omega = 1,000049998750062496$. ($\Omega \approx 1$).

Найдём в аналитическом виде период T движения малого тела m_3 по подковообразной траектории в зависимости от отношения m_1 / m_2 . Для этого воспользуемся данными Табл. 1.

Таблица 1

Период $n = T / (2 \times \pi)$ движения тела с малой массой m_3 по подковообразной орбите в ограниченной круговой задаче трёх тел в зависимости от отношения масс m_1 / m_2 , выраженный через число оборотов n основных тел

m_1 / m_2	$lg(m_1 / m_2)$	T , единиц времени	$n = T / (2 \times \pi)$, число оборотов m_2	$lg(n)$
800	2,90309	281,1265	44,242672	1,650722
900	2,954242	281,3416	44,776906	1,651054
10^3	3	293,8707	46,770974	1,669976
4×10^3	3,60206	725,5877	115,480869	2,062510
4×10^5	5,60206	10033,39175	1596,863893	3,2032268
4×10^7	7,60206	110250	17546,83247	4,244199
4×10^9	9,60206	$9,33963404 \times 10^5$	$1,489632 \times 10^5$	5,173079

Рассмотрим следующую модель для оценки $n(m_1 / m_2)$.

$$lg(n) = a_0 + a_1 \times lg(m_1 / m_2) + a_2 \times [lg(m_1 / m_2)]^2. \quad (4)$$

С помощью метода наименьших квадратов получим

$$a_0 = -0,2902078693, a_1 = 0,700754946, a_2 = -0,0137246231.$$

Величина максимального отклонения $\Delta lg(n)$ — разность (по модулю) между результатами численных экспериментов и значениями $lg(n)$, вычисленными по формуле (4), не превосходит значения 0,023. Последняя строка в таблице (1) определена только с использованием формулы (4).

При больших значениях величины $lg(m_1 / m_2) \approx 50$ значение величины $lg(n)$ стремится к «0» — формула (4), что следует учитывать при оценке n . (Величина m_1 / m_2 не должна превосходить 10^{11} .)

Примечание. Формулу (4) можно представить в виде

$$n = 10^{a_0} \times \left(\frac{m_1}{m_2}\right)^{a_1 + a_2 \times lg\left(\frac{m_1}{m_2}\right)}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ограниченной круговой плоской задаче трёх тел существуют хореографические и «квазихореографические» траектории малых тел, которые могут быть полезными для расчётных траекторий запусков космических аппаратов к планетам Солнечной системы.

Движение малого тела по подковообразным траекториям — в рассматриваемой модели — становится устойчивым при отношении масс основных тел, удовлетворяющем условию $m_1 / m_2 > 1000$.

Ширина траектории m_3 максимальна там, где расположены точки либрации L_4 и L_5 (при некоторых дополнительных условиях).

Подковообразные траектории малого тела при $m_1 / m_2 = 10\,000$ сохраняются при нулевых начальных условиях, причём начальное положение малого тела по оси абсцисс должно быть заключено в интервале

$$-1,006793 < x_{30} < -0,9936 \text{ при } m_1 / m_2 = 10\,000;$$

и в интервале

$$-1,0095 < x_{30} < -0,987 \text{ при } m_1 / m_2 = 1\,000.$$

Приведённые интервалы отличаются в два раза.

Период движения тела с массой m_3 по подковообразной траектории (при $10^2 < m_1 / m_2 < 10^{11}$) оценивается с помощью соотношения

$$\lg(n) = a_0 + a_1 \times \lg(m_1 / m_2) + a_2 \times [\lg(m_1 / m_2)]^2.$$


Здесь $a_0 = -0,2902078693$, $a_1 = 0,700754946$, $a_2 = -0,0137246231$. n — число оборотов основных тел за данный интервал времени.


Список литературы

1. *Маршал К.* Задача трёх тел. — Ижевск: РХД, 2004. — 640 с.
2. *Мюррей К., Дермотт С.* Динамика Солнечной системы / Пер. с англ. под ред. И. И. Шевченко. — М.: Физматлит, 2009. — 588 с.
3. *Перов Н. И.* и др. Теоретические методы локализации в пространстве-времени неоткрытых небесных тел [Текст]: под научн. ред. Н. И. Перова. — Ярославль: Изд-во ЯГПУ имени К. Д. Ушинского, 2011. — 208 с.
4. *Emel'yanenko V. V.* Features of the Dynamical Evolution of a Massive Disk of Trans-Neptunian Objects / *Solar System Research*. 2021. Volume 55. Issue 4. P. 341—347.
5. *Ipatov S. I.* Migration of planetesimals from beyond Mars' orbit to the Earth / *Europlanet Science Congress*. 21 September — 9 October 2020. <https://www.epsc2020.eu/>, id. EPSC2020-71.
6. *Marov M. Ya., Ipatov S. I.* Migration of planetesimals from the feeding zone of the giant planets to the terrestrial planets and the Moon / *Moscow: INASAN Science Reports*, 2020. Volume 5(3). P. 94—96.
7. *Perov N. I.* Horseshoe Trajectories of Small Bodies in the Systems of "A Star and a Planet" / *Modern Star Astronomy*. Vol. 1. Astronomy-2018 (XIII Congress of the International Public Organization "Astronomical Society"). Conference Abstracts, Moscow: IZMIRAN, 2018. P. 259—262.
8. *Renato Calleja, Carlos Garc'ia-Azpeitia, Jean-Philippe Lessard, J. D. Mireles James.* Torus knot choreographies in the n-body problem. arXiv:1901.03738v2 [math. DS] 20 Oct 2020 <https://arxiv.org/pdf/1901.03738.pdf>.
9. *Xiaoming Li and Shijun Liao.* Collisionless periodic orbits in the free-fall three-body problem. *Centre of Advanced Computing, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, China Ministry-of-Education Key Laboratory in Scientific and Engineering Computing, Shanghai 200240, China* (Dated: May 22, 2018). <https://www.researchgate.net/publication/325282757>.
10. *XiaoMing Li and Shijun Liao.* More than six hundred new families of Newtonian periodic planar collisionless three-body orbits / *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*. Volume 60. Article number: 129511 (2017).

МОДЕЛИ ПОЛИТРОПНЫХ ЗВЁЗД

 **Н. И. Перов**

 ГАУК ЯО «Культурно-просветительский центр имени В. В. Терешковой»
ЯГПУ имени К. Д. Ушинского

 perov@yarplaneta.ru

 **С. А. Трофимова**

 ЯГПУ имени К. Д. Ушинского

ВВЕДЕНИЕ

При исследовании внутреннего строения звёзд в некоторых случаях применяется уравнение Лейна — Эмдена и подобные ему уравнения [1, 2, 3].

Ниже рассматриваются модели звёзд со сферически симметричным распределением плотности $\rho(r)$. При этом используются уравнения неразрывности (1) и равновесия (2), а показатель политропы (3) $n = n(r)$ полагается зависящим от радиуса r сферического слоя толщиной dr при радиусе звезды R .

$$dm / dr = 4\pi r^2 \rho. \quad (1)$$

$$dp / dr = -\rho Gm / r^2. \quad (2)$$

$$(\rho / \rho_c) = (\rho / \rho_c)^{n(r)}. \quad (3)$$

Здесь ρ_c — плотность в центре звезды, p_c — давление в центре звезды, G — гравитационная постоянная, $m(r)$ — масса звезды внутри сферы с радиусом r .

Определим законы для плотностей звёзд различных типов при изменяющихся показателях политроп $n(r)$, зависящих от расстояний от центров звёзд.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Дифференциальное уравнение для распределения плотности $\rho(r)$ внутри звезды, с произвольным показателем политропы n , с учётом рабо-

ты [1] и с использованием пакета прикладных программ для компьютерной алгебры MAPLE'15, представим в виде

$$\frac{d}{dx} \left\{ \frac{x^2}{y} \times \frac{d}{dx} [y^n] \right\} + \frac{4\pi G \rho_c^2 R^2}{\rho_c} y x^2 = 0.$$

Выразим вторую производную плотности y звезды по координате x .

$$\begin{aligned} d^2y / dx^2 = & - (1 / (xy^n ny)) \times (2y^n y^2 \times dn / dx \times \ln(y) + 2y^n yn \times dy / dx - \\ & xy^n \times dy / dx \times dn / dx \times \ln(y) \times y - \\ & 2xy^n \times (dy / dx)^2 \times n + xy^n \times (dn / dy)^2 \times (\ln(y))^2 y^2 + \\ & 2xy^n \times (dn / dx) \times \ln(y) \times y \times n \times dy / dx + \\ & xy^n \times n^2 \times (dy / dx)^2 + xy^n \times (d^2n / dx^2) \times \ln(y) \times y^2 + \\ & 2xy^n \times (dn / dx) \times (dy / dx) \times y + Cy^4). \end{aligned} \quad (4)$$

Граничные условия для уравнения (1) полагаем следующими: при $x = 0$, $y = 1$, $dy / dx = 0$. На границе звезды, при $x = 1$, должно выполняться условие $y(1) = 0$.

$$\text{Здесь } y = \rho / \rho_c, x = r / R. C = 4\pi R^2 G \rho_c^2 / \rho_c.$$

Обратим внимание: при $\rho_c = M / ((4/3)\pi R^3)$, $\rho_c = GM^2 / R^4$, имеем $C = 9 / (4\pi)$. В дальнейшем решение уравнения (4) будем искать, используя метод Рунге — Кутты (и пакеты прикладных программ MAPLE'15).

ПРИМЕР

Выберем для показателя политропы звезды следующую модель.

Таблица 1
Изменяющийся показатель политропы $n(x)$

x	0	0.1	0.2	0.3	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
n	4/3	4/3	4/3	4/3	5/3	5/3	5/3	5/3	5/3

Представим $n = n(x)$ в аналитическом виде, используя метод наименьших квадратов (Рис. 1), соотношение (5).

$$n(x) = 1,324575 + 374,311464x^{6,5} - 1561,523419x^{7,5} + 2469,554016x^{8,5} - 1748,6648678x^{9,5} + 466,664755x^{10,5}. \quad (5)$$

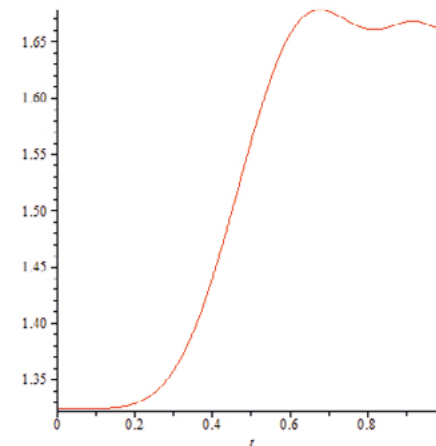


Рис. 1. Звезда с изменяющимся показателем политропы $n(x)$.
Формула (5). $n \approx 4/3$ ($0 < x < 0,3 R$); $4/3 < n < 5/3$ ($0,3 < x < 0,6$); $n \approx 5/3$ ($0,6R < x < R$).

Приведём некоторые решения уравнения (4) для плотности звезды y , при показателе политропы $n(x)$ (5), в виде графиков при различных значениях C .

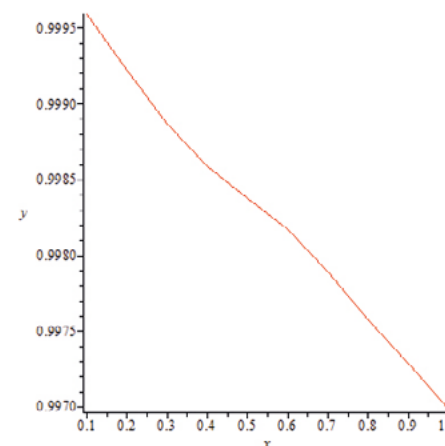


Рис. 2. Зависимость плотности (y) звезды от расстояния x слоя до её центра при показателе политропы (5). $C = 0,01$.

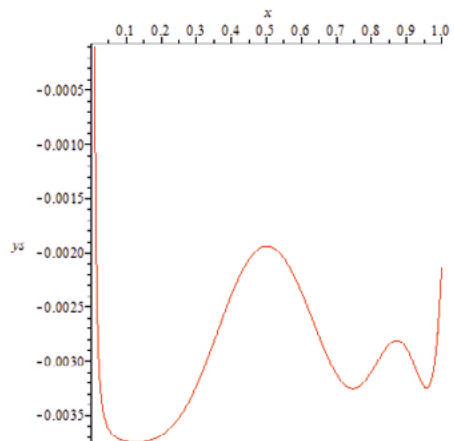


Рис. 3. Зависимость производной dy/dx плотности звезды от расстояния x слоя до её центра при показателе политропы $n(x)$ (5). $C = 0,01$.

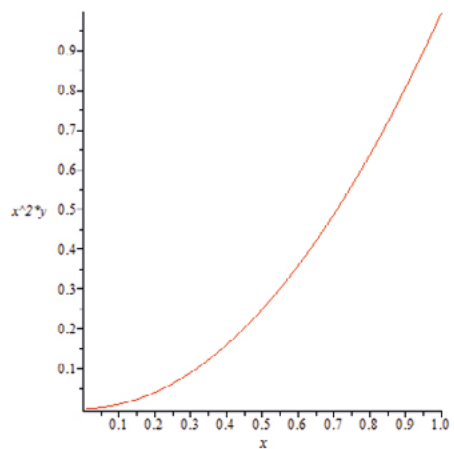


Рис. 4. Зависимость произведения плотности y звезды на квадрат расстояния x слоя от центра политропной звезды (с показателем политропы $n(x)$ (5)) (Рис. 1). $C = 0,01$.

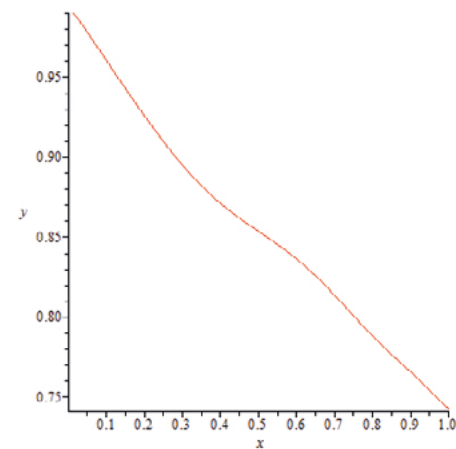


Рис. 5. Зависимость плотности y звезды от расстояния x слоя до её центра при показателе политропы $n(x)$ (5) (Рис. 1). $C = 1$.

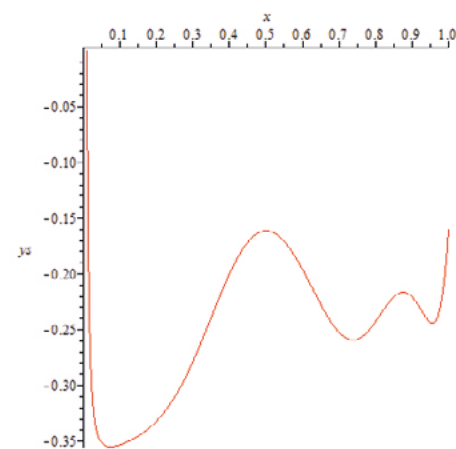


Рис. 6. Зависимость производной dy / dx плотности звезды y от расстояния x слоя до её центра при показателе политропы $n(x)$ (5) (Рис. 1, 2). $C = 1$.

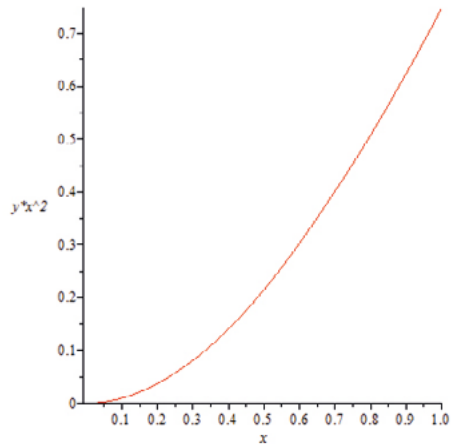


Рис. 7. Зависимость произведения плотности y звезды на квадрат расстояния x слоя от центра политропной звезды (с переменным показателем политропы $n(x)$ (5)) (Рис. 1). $C = 1$.

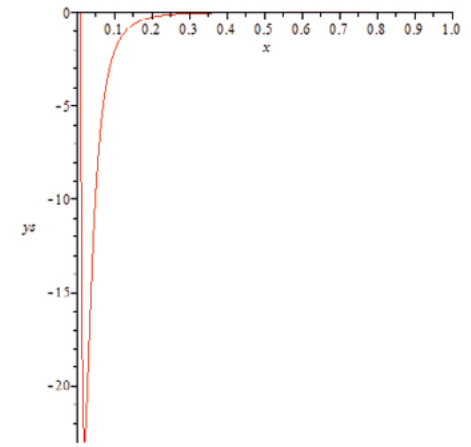


Рис. 9. Зависимость производной dy / dx плотности звезды y от расстояния x слоя до её центра при показателе политропы $n(x)$ (5) (Рис. 1, 2). $C = 100$.

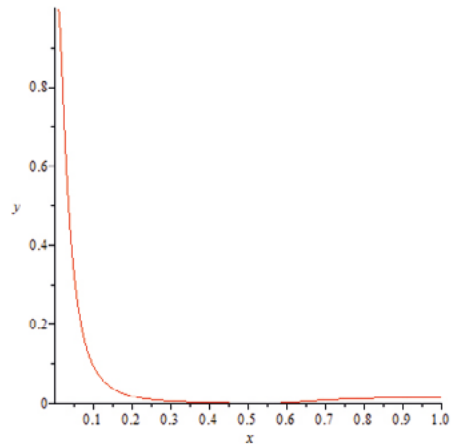


Рис. 8. Зависимость плотности y звезды от расстояния x слоя до её центра при показателе политропы $n(x)$ (5) (Рис. 1). $C = 100$.

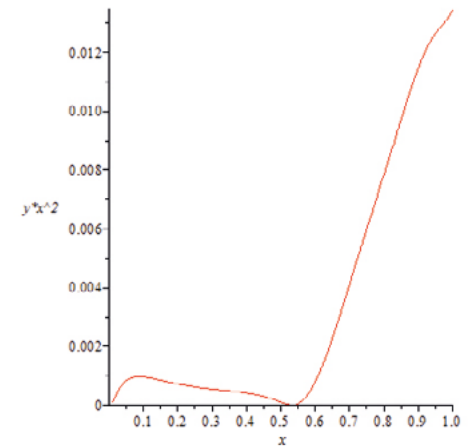


Рис. 10. Зависимость произведения плотности звезды на квадрат расстояния x слоя от центра политропной звезды (с переменным показателем политропы $n(x)$ (5)) (Рис. 1). $C = 100$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численные эксперименты, с учётом (4) и (5), показали:

$$\text{при } C \rightarrow 0 \text{ интеграл } \int_0^1 yx^2 dx \rightarrow \frac{1}{3},$$

$$\text{при } C \rightarrow \infty \text{ интеграл } \int_0^1 yx^2 dx \rightarrow \varepsilon.$$

$\varepsilon \ll 1$. C варьировали в пределах от $C = 10^{-26}$ до $C = 10^3$. (Рис. 4, 7, 10).

$$\text{Масса звезды } M = 4\pi R^3 \rho_c \int_0^1 yx^2 dx.$$

Производная dy/dx (в данной модели) позволяет определить значения x , соответствующие точкам перегиба функции y — плотности звезды. Например, при $C = 1$ (Рис. 6) имеем $d^2y/dx^2 = 0$, если dy/dx , в частности, в данной точке имеет экстремум:

$$1\text{-я точка перегиба функции } y = y(x). \quad x = 0,0746. \quad dy/dx = -0,36035929;$$

$$2\text{-я точка перегиба функции } y = y(x). \quad x = 0,5035. \quad dy/dx = -0,1680141;$$

$$3\text{-я точка перегиба функции } y = y(x). \quad x = 0,73835. \quad dy/dx = -0,260961970;$$

$$4\text{-я точка перегиба функции } y = y(x). \quad x = 0,8759. \quad dy/dx = -0,2185312;$$

$$5\text{-я точка перегиба функции } y = y(x). \quad x = 0,955525. \quad dy/dx = -0,245595694.$$


Для качественных исследований решение уравнение Эмдена является полезным: например, с его помощью можно показать невозможность существования сверхмассивных звёзд и произвести оценку предельных масс звёзд различных типов.


Список литературы

1. Перов Н. И., Фролова Н. Ф. Об одном уравнении равновесия звёзд. [Текст] / *Астрономический журнал РАН*. 1994. Том 71. № 2.
2. Тихомирова Е. Н., Голдовский В. С. Верхние границы масс звёзд. [Текст] // *Астрономия и образование. Материалы Всероссийской научно-практической конференции.* / Под ред. Н. И. Перова. — Ярославль: Индиго, 2018. — 192 с.
3. Самовол В. С. О решениях уравнений типа Эмдена — Фаулера. / *Математические заметки*. 2014. Т. 95. Вып. 5, май.

РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЗАТМЕНИЙ

 **В. Г. Нагнибеда, Н. А. Топчило**

 Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ)

 v.nagnibeda@spbu.ru

СОЛНЕЧНЫЕ ЗАТМЕНИЯ И ФИЗИКА СОЛНЦА

Солнечные затмения привлекали человека с древних времён, но до совсем недавнего времени они воспринимались в основном как некое грозное предзнаменование грядущих событий. И лишь в начале XIX века, когда в физике появился спектральный анализ, началось научное изучение природы Солнца и солнечного излучения. Был открыт и исследован фраунгоферов спектр Солнца — большое число линий поглощения различных атомов на фоне непрерывного спектра излучения фотосферы (некоторой условной поверхности Солнца, нагретой до температуры около 6 000 К). Линии спектра были классифицированы и отождествлены, наиболее сильные из них обозначили заглавными буквами алфавита. Этот спектр образуется над фотосферой в солнечной атмосфере, где температура вещества должна быть ниже. Солнечную атмосферу в то время можно было видеть только во время полного солнечного затмения, когда в течение нескольких минут яркий диск Солнца закрыт диском Луны и вокруг него вспыхивает солнечная корона. Такой возможностью воспользовался Пьер Жансен, французский астроном, впервые использовавший во время затмения 18 августа 1868 года бесщелевой спектрограф. Оказалось, что сразу же после второго контакта затмения, когда исчезает свечение яркой фотосферы с фраунгоферовым спектром, вспыхивает разложенное в эмиссионный спектр изображение тонкой полоски основания солнечной атмосферы вокруг закрытого диска. Эта часть атмосферы получила название хромосферы, и её эмиссионный спектр почти точно воспроизводил фраунгоферов спектр поглощения фотосферы. Внимательный Жансен обнаружил различие: совсем рядом с сильным дублетом натрия $D_1 D_2$ в спектре хромосферы светила жёлтая линия, обозначенная D_3 . Отождествить эту линию с каким-либо известным элементом ни Жансену, ни английскому астроному Норману Локьеру, который обнаружил неизвестную линию, изучая спектр протуберанцев, не удалось. Локьер предположил, что линия принадлежит неизвестному на Земле элементу, который назвал гелием. Лишь в конце XIX века солнечный элемент был обнаружен на Земле. Но лабораторное изучение

гелия породило новую проблему для хромосферы: оказалось, что для того, чтобы гелий «светился», он должен быть нагрет до существенно более высокой температуры, чем в хромосфере. Надо отметить, что проблема свечения гелия в хромосфере до конца не решена до сих пор.

Многочисленные астрофизические наблюдения последующих затмений привели к обнаружению корональных эмиссионных спектральных линий, наиболее яркие из которых — красная, зелёная и жёлтая. Эти линии стали наблюдать и вне затмений на специальных телескопах — коронографах — на высокогорных солнечных корональных обсерваториях. Эти линии долгое время не удавалось отождествить, и до середины XX века была популярна гипотеза о существовании ещё одного неизвестного элемента — корония. У них существует особенность — очень широкий профиль, что в астрофизике обычно связано с высокой энергией (температурой) излучающих атомов, по оценкам, на два порядка выше, чем в фотосфере. Существование таких температур в короне на высоте в сотни тысяч километров над фотосферой казалось невероятным.

Во время Второй мировой войны было обнаружено радиоизлучение Солнца на метровых волнах. В 1942 году это сделал лейтенант английского радиолокационного подразделения, принявший вначале мощные помехи на экранах радиолокаторов за контрдействия со стороны немцев, но потом убедившийся, что они имеют солнечное происхождение. Подобное радиоизлучение зарегистрировал в 1944 году американский радиоастроном-любитель Грот Ребер, опубликовавший свои результаты. В Советском Союзе ещё до окончания войны академики Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси в Физическом институте АН СССР (ФИАН) обсуждали возможность организации наблюдений космического радиоизлучения на базе опыта работ в области радиолокации. Поэтому, когда в АН СССР запланировали первую после войны крупную экспедицию в Бразилию по наблюдению полного солнечного затмения 20 мая 1947 года, в неё по предложению Н. Д. Папалекси были включены первые советские радиоастрономы С. Э. Хайкин и Б. М. Чихачев. Они провели успешное радиоастрономическое наблюдение затмения, конкретные результаты которого показали, что радиоразмер Солнца заметно больше оптического и во время полной фазы остается 40% потока излучения. Это было прямым доказательством того, что солнечное радиоизлучение генерируется в короне, а температура корональной плазмы составляет около двух миллионов градусов. Этот выдающийся результат был признан открытием. В дипломе на него, выданном Н. Д. Папалекси, С. Э. Хайкину и Б. М. Чихачеву, сформулировано: «Экспериментально установлено неизвестное ранее явление, заключающееся в том, что источником излучаемых Солнцем радиоволн во внешнее пространство является солнечная корона...». Так что дата 20 мая 1947 года по праву считается днём рождения отечественной (советской) радиоастрономии.

Цели использования наблюдений солнечных затмений в оптическом и радиодиапазонах различны. В оптике до середины прошлого века затмения служили единственной возможностью изучения хромосферы (и важной для короны). С развитием космонавтики и появлением космических обсерваторий научная значимость оптических наблюдений солнечных затмений практически исчезла. В радиодиапазоне на Земле регистрируется только излучение короны (метровый диапазон) и хромосферы (сантиметровый и миллиметровый диапазоны). Но большой проблемой является невысокое угловое разрешение радиотелескопов. Затмения и дают возможность получить лучшее разрешение даже при использовании небольших радиотелескопов. В ходе затмения наземный радиотелескоп, наведённый на затмевающую область, совместно с резким тёмным краем лунного диска может рассматриваться как некоторая «оптическая» система теоретически с высоким (малые доли сек. дуги на см-волнах), но одномерным (вдоль направления движения лунного края) разрешением. Конечно, в реальных наблюдениях такого разрешения не получить из-за шумов, поэтому практически используется простое приближение (геометрическая оптика), когда изменение сигнала в ходе затмения прямо связывается с перемещением лунного края, закрывающего (или открывающего) поверхность солнечного диска, попадающую в диаграмму направленности радиотелескопа.

Из вышесказанного следует, что радиоастрономам важно не только — и не столько — наблюдать полную фазу затмения, но и регистрировать изменение сигнала в ходе всего затмения — от первого до четвёртого контакта, при этом можно наблюдать не только в полосе полного затмения, но и в зоне частных фаз. Это значительно увеличивает возможности радиоастрономических наблюдений затмений. При этом в зону затмения нередко попадают обсерватории, где работают крупные современные радиотелескопы. Их использование для затменных наблюдений существенно повышает качество результатов за счёт узкой диаграммы направленности и тем самым позволяет реализовать более высокое угловое разрешение.

Многолетняя практика радиоастрономических наблюдений солнечных затмений определила две группы задач, которые при определённых допущениях позволяют получать во многих случаях замечательные, а иногда и уникальные результаты. Одна группа задач связана с исследованием структуры локальных источников в хромосфере и короне (источники над активными областями, пятнами, волокнами и т. п.). Другая группа связана с изучением распределения радиояркости на солнечном лимбе, которое определяется высотным профилем температуры плазмы в хромосфере и нижней короне. В данной статье в качестве иллюстрации вышесказанного приводятся результаты наблюдений ряда затмений, которые проводились по инициативе и при участии авторов.

СТРУКТУРА РАДИОИСТОЧНИКОВ НА ДИСКЕ СОЛНЦА

Как отмечалось выше, использование затмения позволяет измерять структуры с размерами много меньше размеров диаграммы направленности радиотелескопа. Пример этого представлен на Рис. 1, где приведено наблюдение и обработка затмения 29 марта 2006 года на радиотелескопе диаметром 2.5 м (РТ-2.5) Санкт-Петербургского государственного университета.

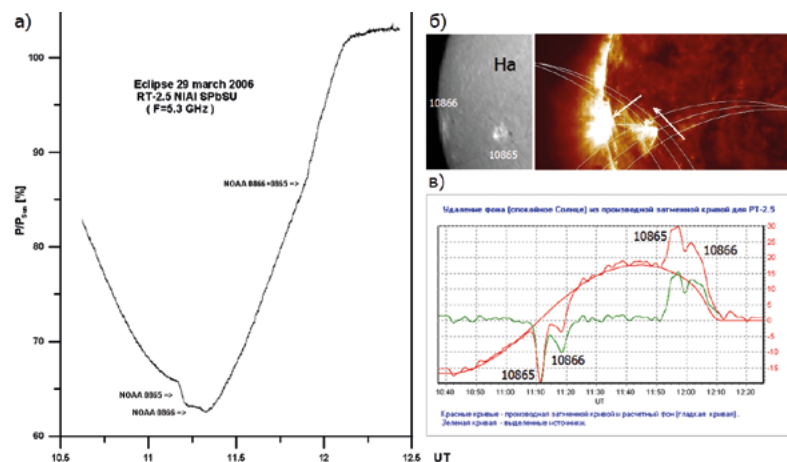


Рис. 1. Пример выделения источников при наблюдении затмения на малых зеркалах: а) изменение потока Солнца во время затмения (затменная кривая), б) положение края Луны при покрытии/открытии активных областей (стрелки указывают направление движения края Луны), в) производная от затменной кривой и её коррекция за спокойное Солнце.

В обычных наблюдениях на небольшом РТ-2.5 Солнце рассматривается как квазиточечный бесструктурный источник, поток от которого почти постоянен и сильно, непредсказуемо изменяется только во время солнечных вспышек или иных активных процессов на Солнце. В процессе же затмения поток от Солнца также достаточно быстро изменяется, но уже предсказуемым образом (определяется путем расчёта хода покрытия Луной равномерно яркого солнечного диска). Появляющиеся на его фоне изломы (Рис. 1а) однозначно связываются с покрытием или открытием соответствующих активных областей (Рис. 1б). В дальнейшем, после вычисления производной от затменной кривой и удаления фона, связанного с покрытием спокойного Солнца, выделяются отдельные яркие детали активных областей и других источников (Рис. 1в), для которых можно измерить по-

токи, размеры и яркостные температуры и сопоставить их с активными областями и их компонентами, видимыми в других диапазонах (Рис. 1б). Минимально измеряемый размер деталей определяется только уровнем шума на записи.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОЯРКОСТИ НА ЛИМБЕ И РАДИОРАДИУС СОЛНЦА

В настоящее время уже общепринятой является точка зрения, что тепловое миллиметровое и субмиллиметровое излучение Солнца оказывается наиболее удобным средством диагностики хромосферной плазмы [1, 2]. В большинстве случаев методом такой диагностики служит исследование распределения яркости по диску Солнца: в оптическом диапазоне — это классическая задача о потемнении к краю диска, которая, начиная с пионерских работ И. С. Шкловского, обратилась в радиодиапазоне в задачу об уярчении к краю диска и существовании яркого узкого кольца вокруг солнечного лимба, обусловленного вкладом более горячей верхней хромосферы. Однако такие наблюдения требуют достаточно высокого углового разрешения и много лет выполнялись во время солнечных затмений или на крупных радиотелескопах и интерферометрах. К сожалению, получаемые результаты сильно зависят от реального углового разрешения, метода обработки наблюдений, так что сводка результатов демонстрирует значительный разброс данных (см. обзор [3]).

В таких условиях большой интерес представляет величина радиорадуса Солнца, который характеризует высотную протяжённость хромосферы и получение которого гораздо слабее зависит от углового разрешения. Он измеряется определённым способом: на радиальных сканах — по положению точки, соответствующей половинной яркости центральной области диска, либо по максимуму производной в лимбовой части скана, а во время затмений — по разности моментов оптических и радиоконтактов.

Подобные измерения проводились нами во время ряда затмений с помощью малого экспедиционного радиотелескопа миллиметрового диапазона, созданного в МГТУ имени Н. Э. Баумана под руководством профессора Б. А. Розанова. В нём использовалась система конического сканирования диаграммой направленности, что существенно улучшает чувствительность наблюдений за счёт подавления флуктуаций атмосферного поглощения.

Наиболее интересные результаты были получены в затмении 11 июля 1991 года, которое было выдающимся по длительности полной фазы (более 7 минут). Запись сигнала в районе второго-третьего контактов (Рис. 2) использовалась для определения распределения радиояркости на лимбе с использованием модифицированного метода Юлиуса. По нашим оценкам, реализованное угловое разрешение составляет 1-2 угл. сек. [4].

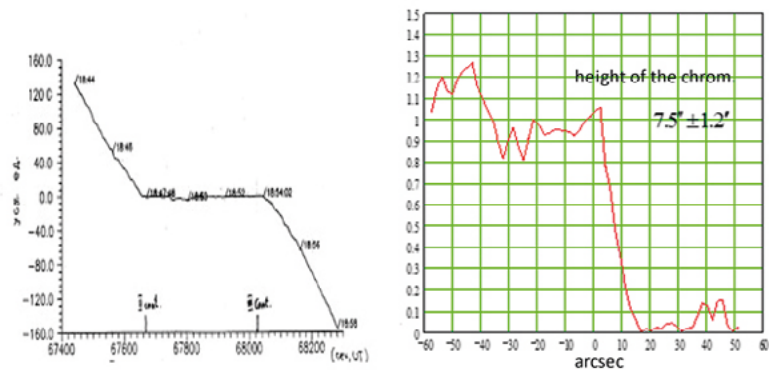


Рис. 2. Полное солнечное затмение 11 июля 1991 г. (La-Paz, Mexico). РТ-0.6 λ 3.4мм, центральная фаза (АО СПбГУ, МГТУ). Слева: участок затменной кривой в районе второго и третьего контактов; справа: распределения радиояркости на лимбе с использованием модифицированного метода Юлиуса.

Этот результат хорошо соответствует результатам других наблюдений [5–8]. Совокупность наблюдательных данных показывает, что радиорadius даже на субмиллиметровых волнах превышает оптический radius на 3–4 угл. сек. (Рис. 4) и значительно возрастает с длиной волны во всём миллиметровом диапазоне.

Наблюдения частного затмения на крупном радиотелескопе РТ-22 ФИАН были проведены 10 июня 2021 года, их первые результаты по измерению радиорadiusа на волне 1.4 см представлены в настоящем докладе. Основная наблюдательная задача состояла в получении затменной кривой от избранных участков солнечного диска, куда последовательно наводился радиотелескоп при покрытии/открытии их краем Луны в пределах узкой (относительно размеров Солнца) диаграммы направленности радиотелескопа, шириной 2.5 угл. мин. Для измерения радиорadiusа главными объектами являлись области первого и четвёртого контактов затмения (Рис. 3).

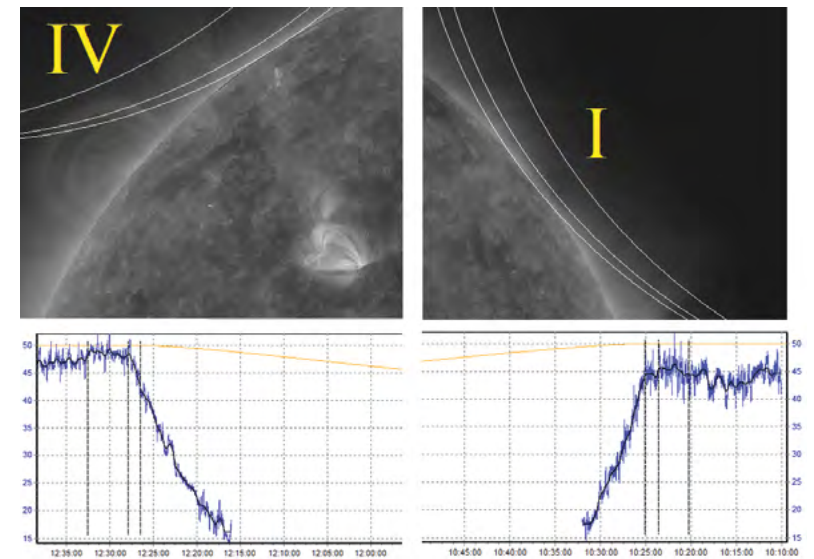


Рис. 3. Кривая покрытия Луной лимбов Солнца в районе I и IV контактов.

Затменные кривые для этих областей приведены на этом же Рис. 3: оригинальная запись, на неё наложена та же запись, но сглаженная фильтром так, чтобы было возможно получить угловое разрешение не хуже одной угл. сек. Там же приведены положения лунного края относительно солнечного диска для моментов оптических контактов и радиоконтактов, которые определяются по изломам на затменных кривых. Измеренное по ним значение превышения радиорadiusа над оптическим (среднее по обоим контактам) составляет ≈ 18 угл. сек., что значительно превышает модельные значения, но близко к данным, полученным разными авторами в предыдущие годы.

Главной острой астрофизической проблемой остаётся явное противоречие между результатами радиоастрономических исследований хромосферы (в частности, значением радиорadiusа) и модельными расчётами тех же величин, сделанными на основе классических стандартных моделей атмосферы (VAL – FAL) – высота хромосферы по радиоданным (радиорadius) значительно больше модельных расчётов, несмотря на сильный разброс наблюдательных значений. Это хорошо видно на Рис. 4, взятом из нашей работы [9] и дополненное новым значением радиорadiusа. Это во многом связано с тем, что широко используемые модели построены на основе УФ-наблюдений, являются одномерными и не учитывающими сильной структурной неоднородности хромосферы. Многочисленные по-

пытки «улучшить» модели введением различных элементов неоднородности и «подогнать» их под радиоданные делаются чисто эмпирически и ни физически, ни теоретически не обоснованы.

В такой ситуации важно получать более точные и достоверные данные радионаблюдений. Перспективным в этом направлении является возможность использования современного уникального инструмента ALMA [10]. Это тем более важно, что в последнее время разработаны и доступны современные реалистичные неоднородные численные 3D-модели атмосферы, тестированием которых с использованием радионаблюдений в коротковолновом радиодиапазоне уже несколько лет занимается наша группа в СПбГУ [11].

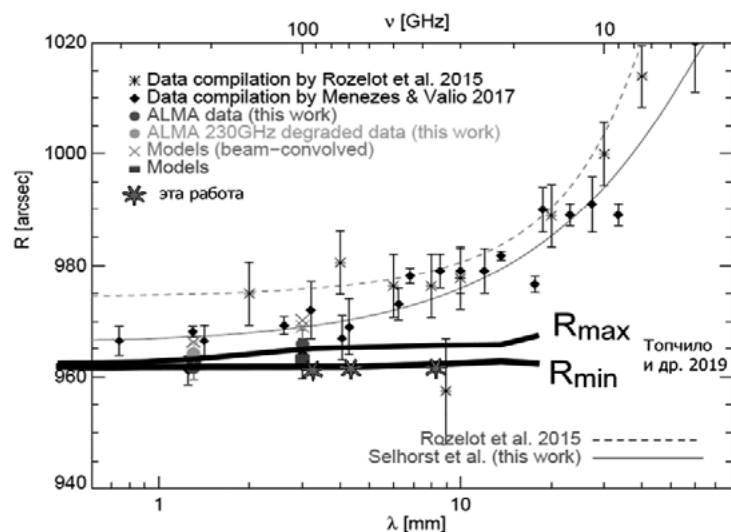



Рис. 4. Сопоставление измеренных значений радиорadiusа с результатами модельных расчётов.


Список литературы


1. Loukitcheva M. A., Nagnibeda V. G. Radio Emission of Solar Chromosphere at Millimeter Wavelengths. // 2000, ESASP-463, 363-366.
2. Loukitcheva M., Solanki S., Carlsson M., Stein R. Millimeter observations and chromospheric dynamics. // 2004, A&A, v. 419, 747.

3. Nagnibeda V. G., Пуотрович В. В. Радиоизлучение Солнца в миллиметровом диапазоне волн // 1987. Труды Астр. обс. ЛГУ, Т. 41.
4. Nagnibeda V. G., Rozanov B. A. Solar Eclipse Observations at Short Millimeter Wavelengths. // 1998, Advances in Solar Physics, 2nd Euro conf; ASP Conf. Series, v. 155, 416.
5. White S. N., Kundu M. Observations of the 1991 eclipse at 3.5 mm wavelength. // 1994, IAU Symp. 154, Infrared Solar Physics, p. 167.
6. Belkora L., Hudford G., Gary D., Woody D. Measurement of the solar limb brightness profile at 3 mm during the total solar eclipse of 1991 July 11. // 1992, ApJ, v. 400, 692.
7. Bastian T. S., Ewell M. W. Jr., Zirin H. The center-to-limb brightness variation of the Sun at 850 microns. // 1993, ApJ, v. 415, 364.
8. Ewell M. W., Zirin H., Jensen J. B., Bastian T. S. Submillimeter observations of the 1991 July 11 total solar eclipse. // 1993, ApJ, v. 403, 426.
9. Топчило Н. А., Лукичева М. А., Нагнибеда В. Г., Рыжов В. С. Радиорadius Солнца в мм-диапазоне и современные модели хромосферы // Труды XXIII Всеросс. конф. по физике Солнца «ССЗФ — 2019». ГАО РАН. С.-Петербург. 2019.
10. C. E. Alissandrakis, S. Patsourakos, A. Nindos, and T. S. Bastian. Center-to-limb observations of the Sun with ALMA. Implications for solar atmospheric models // Astron. and Astrophys., 2017, Vol. 605, id. A78, 6 pp.
11. V. G. Nagnibeda, N. A. Topchilo, M. A. Loukitcheva, and I. A. Rakhimov. Features of Radio-Brightness Distribution over the Solar Disk at Millimeter Waves: Models and Observations // Geomagn. Aeron., 2021, Vol. 61, No. 8. P. 1150–1158.

ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ЗОНДОВОЙ МЁССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В ПРИМЕНЕНИИ К НЕКОТОРЫМ ЗАДАЧАМ КОСМИЧЕСКОГО ГРУНТОВЕДЕНИЯ

 **А. А. Залуцкий**

 Ярославский государственный технический университет

 zalutskii@mail.ru

Руководящая идея используемого в настоящей работе методического подхода подобна той, которая часто применяется при исследовании физических явлений в конденсированных средах. Суть методики заключается в том, что с целью понимания поведения и устройства многочастичных объектов на первом этапе выбирают очень простую систему (ПС), поведение которой качественно напоминает поведение сложной системы (СС). На следующем этапе в подробных деталях и на количественном уровне изучают свойства такой упрощённой системы. В результате устанавливаются такие «универсальные» характеристики поведения ПС, которые не зависят от конкретных деталей применяемой модели. На окончательном этапе полученные количественные параметры и общие выводы для ПС применяются для анализа поведения гораздо более сложной системы.

Описанный выше подход был впервые нами апробирован на чисто природных или почвенно-минеральных системах планеты Земля [1], а также частично на промышленных объектах химического производства [2]. В своё время применение широкого арсенала физических методов, в основном базирующихся на методике мёссбауэровской спектроскопии (МС), позволило внести существенный вклад в понимание того, как устроены СС. Именно в подавляющем большинстве случаев человек имеет дело с подобными системами на планете Земля.

Однако, благодаря последним миссиям на Марс (см., например, [3], и особенно ссылки) и имеющимся ранее данным относительно спутника Земли [4], горизонт дальнейших мёссбауэровских исследований существенно расширился. При этом автоматически возникла прямая потребность в дополнительной разработке методик, кардинально отличающихся от ранее применяемых в ограниченных рамках исключительно только для почвенно-минеральных систем Земли. Начальная стадия процедуры по созданию новых подходов МС [5] была подкреплена дальнейшими раз-

работками в этом направлении, и количественные результаты детально представлены в работе [6].

Цель настоящей статьи — продемонстрировать вновь созданный на базе зондовой МС подход и параллельно проиллюстрировать продолжение «непрерывной» работы разработанных ранее методик МС применительно к природным объектам на конкретных примерах почв Земли и некоторых грунтов Марса.

Необходимость предлагаемой ниже методики диктуется не только спецификой изучаемых объектов (почвы Земли и грунты Марса далеко не эквивалентные системы), но и поиском возможных решений для более фундаментальных задач (например, наличие «свободной» воды на планетах земной группы или/и наличие на них форм жизни).

ПРИМЕНЕНИЕ МС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ПРОЦЕССОВ ВЫВЕТРИВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ПОЧВ ЗЕМЛИ И ГРУНТОВ МАРСА

Многokrратно упоминаемый в научной литературе термин «марсианские почвы» для грунтов Марса, по-видимому, не совсем правилен, поскольку реголит Красной планеты корректнее отнести не к докучаевским почвам, а к рыхлым субстратам. Поэтому к поверхностным образованиям Марса более применима концепция планетарных оболочек — экзонов. Классификация экзонов Марса (не исключая при этом и др. планеты) и ближайшие земные аналоги подробно рассмотрены в работе [7].

С учётом отмеченной выше специфики природных объектов и с целью получения эффективного решения поставленной задачи процедура получения необходимой информации была разбита на два этапа. Первый этап по своему содержанию носил чисто накопительный характер. Нами на протяжении двух с половиной десятков лет (1980—2005 годы) были изучены объекты различных почвенно-биоклиматических поясов (полярный, бореальный, тропический и т. д.) и различного генезиса (подзолистые, лесные, пеплово-вулканические, погребённые почвы, глубоководные глины Тихого и Индийского океанов) планеты Земля. Было получено и проанализировано более 7 000 экспериментальных мёссбауэровских спектров с помощью различных подходов для получения количественной информации специально для земного почвоведения. Второй этап обязан автоматически возникшей необходимости разумной систематизации полученного экспериментального материала. Для чего автором настоящей статьи был создан банк данных по мёссбауэровской спектроскопии планеты Земля (МСПЗ) [8], позволяющий оперативно выполнять поиск и просмотр мёссбауэровских спектров для почвенно-минеральных систем Земли.

Для диагностики процессов выветривания служила мёссбауэровская зондовая метка в форме соединения ильменита ($FeTiO_3$), характерные об-

ласти экспериментальных параметров спектров для объектов земного (почвы Земли (1, 3), модельные системы (2)) и неземного (грунты Марса (4) и реголит Луны (5)) происхождения представлены на Рис. 1. Мы предполагаем, что породы в изучаемых системах могут быть подвергнуты процессам, тесно связанным с механизмами физического выветривания горных пород. В пользу этого предположения говорит факт, полученный на основе введенного нами параметра R (детали см., например, в работе [6]) для оксида железа ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), обнаруженного в грунтах Марса. Поведение и значение величины параметра R можно объяснить результатом наличия песчаных или пылевых бурь на поверхности Красной планеты.

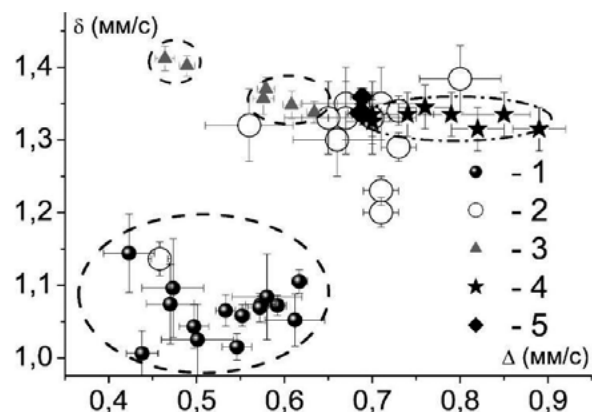


Рис. 1. Области значений параметров сверхтонкой структуры мёсбауэровских спектров для зондовой метки в форме соединения ильменита (FeTiO_3), находящегося в системах различной природы: 1 и 3 — почвы Земли; 2 — модельные системы из базы данных MERD; 4 — грунты Марса; 5 — реголит Луны.

Для прямого подтверждения наличия механохимических процессов были изучены почвенные объекты земного происхождения, с одной стороны, примерно схожие по климатической обстановке с Марсом, а с другой — с возможностью исследовать образцы в более широком глубинном диапазоне, а также различные по размерам фракций.

В частности, полученные экспериментальные результаты для самого верхнего горизонта (глубина 4 см (Рис. 2а)) удовлетворительно согласуются с математическим подходом, разработанным в 40-х годах прошлого столетия академиком А. Н. Колмогоровым [9]. Он предложил математическую модель процесса дробления частиц, которая аналитически объясняет возникновение логнормального распределения размеров частиц. Однако начиная с горизонта глубиной 13 см обнаружена тенденция отступления

в поведении функции распределения от логнормальности (Рис. 2б, 2с), а в самом нижнем горизонте она практически полностью «расплывается». Подобную ситуацию по трансформации формы распределения частиц при дроблении можно объяснить подходом [10], учитывающим непостоянство или случайный характер интенсивности потока соударений. При этом в нашем случае изменчивость скорости интенсивности потока соударений в случайной форме возможна по причине периодической смены времен года, погоды или других природных процессов.

Альтернативной возможностью объяснения аномального поведения функции распределения для нижнего горизонта (Рис. 2д) могут служить процессы, связанные с химическим выветриванием пород. В пользу подобных процессов наглядно говорят введенные нами ранее значения параметров (см., например, [6]), показывающие доминирующую (по сравнению с механохимией) роль влияния «свободной» воды на процессы формирования оксидогидроксидов железа в почвах Земли.

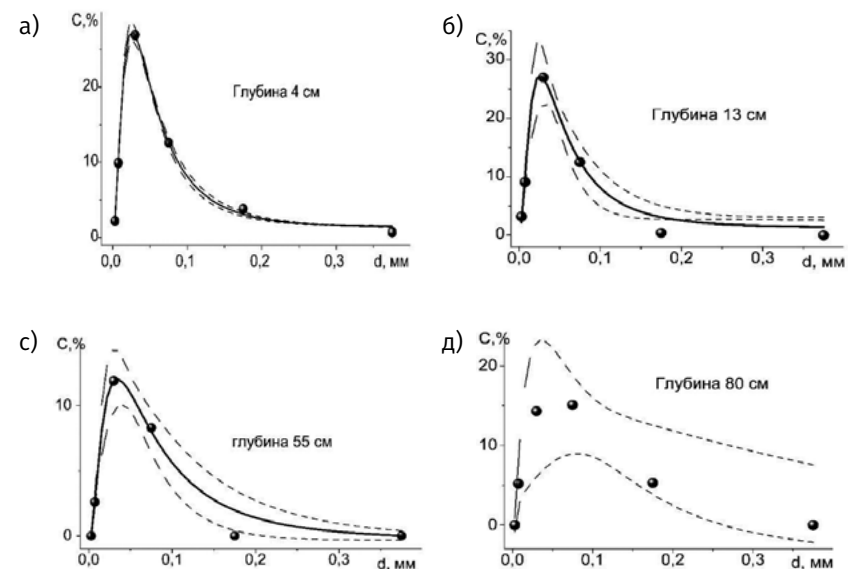


Рис. 2. Содержание FeTiO_3 в почвах на туфогенных породах в бассейне реки Подкаменной Тунгуски с различным гранулированным составом: а) гор. A_0A_1 , глубина 4 см; б) гор. A_2 , глубина 13 см; в) гор. A_2 , глубина 55 см; д) гор. B_2 , глубина 80 см.

Таким образом, методика МС позволяет не только подтвердить предложенную в работе [7] концепцию планетарных оболочек для планет земной группы, но и наметить корректный путь дальнейших исследований поверхностных образований Марса в количественном формате.

ХАРАКТЕРИСТИКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ МС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ «ЖИДКОЙ» ВОДЫ В ГРУНТАХ МАРСА, РЕГОЛИТАХ ЛУНЫ И ПОЧВАХ ЗЕМЛИ

В космическом грунтоведении (КГ), как новом научном направлении в земном грунтоведении, вопрос обнаружения и наличия «жидкой» воды на планетах земной группы до сих пор решается. Разработанный нами подход, реализованный на методике МС, позволит в будущем прояснить вопрос о вероятном происхождении воды на Земле, который в настоящее время носит неопределённый и в основном дискуссионный характер. Однако для спутника Земли наш подход, по-видимому, малоприменим, в то время как с его помощью всё же можно диагностировать присутствие (или следы) «жидкой» фазы воды на современном Марсе.

а) Методика, основанная на анализе изотопного отношения дейтерия к водороду (D/H).

В качестве удобного физического параметра или уникального индикатора для поиска происхождения воды в разнообразных «резервуарах» Солнечной системы можно предложить изотопное отношение дейтерия к водороду (D/H). Это связано с тем, что, согласно истории Вселенной, после Большого взрыва образовались только четыре элемента: водород, гелий и малое вкрапление лития и бериллия, а также один из изотопов водорода — дейтерий. Поэтому анализ соотношения изотопов в объектах Солнечной системы позволяет выяснить наиболее вероятное происхождение воды в них. В частности, это поможет дать ключ к разгадке вклада комет в доставку воды и других летучих веществ на Землю.

Разработанная нами методика зондовой МС позволяет потенциально дать положительный, по нашему мнению, вклад в решение имеющихся проблем в этом направлении. Действительно, имеется в наличии целый арсенал количественных подходов, базирующихся на методике МС: (1) статические и динамические параметры, применительно к обычным и дейтерированным модельным системам (аналог отношений D/H или $^{16}O/^{18}O$); (2) возможности контроля методом МС квантовых свойств воды на поверхности твёрдого тела.

Таким образом, способ установления природы воды (вне- и/или земного происхождения) по значению величины отношения D/H может принципиально быть связан с параметрами, полученными с помощью метода МС. Это позволит в дальнейшем разработать количественные параметры для

эффективного сравнения воды Земли с объектами (кометами, астероидами и т. п.), доставляющими её к нам из других частей Солнечной системы.

б) Методика, основанная на анализе физики фазовых переходов (ФП).

Современный Марс в целом представляет собой сухую, пыльную и холодную планету с некоторым количеством замёрзшей воды, которая в основном локализована на её полюсах. Несмотря на то что все марсоходы имеют, как правило, собственное оборудование для анализа грунта Марса, вопрос по доставке образцов с Красной планеты, необходимых для прецизионных исследований в земных лабораторных условиях, остаётся открытым. Поэтому нами был проведен мёссбауэровский эксперимент с модельной системой, представляющей собой аналог поверхностного марсианского грунта. Методика зондовой МС способна исследовать ФП в замороженных разбавленных растворах солей двух- и трёхвалентного железа в воде. Так на заре становления МС был зафиксирован экспериментальный факт [11], подтверждающий способность мёссбауэровских зондов удовлетворительно отражать не только динамические свойства «объёмного» льда, но и потенциальную возможность изучать ФП (кубический лёд → гексагональный лёд). Мы провели трудоёмкий отбор мёссбауэровских зондов, который оказался эффективным для исследования поверхностного льда в системе «замороженная вода — глина». В частности, отметим, что поведение замороженных нанослоёв «чистой» и «солёной» воды в системе «хлориды Fe^{3+} — или Fe^{2+} — глина» удовлетворительно подтвердило теоретическое предположение о плавлении льда при пониженных температурах. Действительно, экспериментально методом зондовой МС был установлен набор особых (или квантовых) точек температур, который удовлетворительно согласуется с современной физической теорией воды ($h\Omega_{kl} \approx kT_m$) (см., например, сноска в работе [12]). При этом мы целенаправленно предполагаем, что, несмотря на специфику марсианского климата, на современном Марсе всё же нет препятствий для присутствия следов «жидкой» фазы воды.

Особо заметим, что методика позволяет наряду с фиксацией особых точек поведения воды определить возможные сценарии процессов плавления 2D-льда (Рис. 3). Согласно таковому, система плавится посредством двух непрерывных переходов Березинского — Костерлица — Таулеса с наличием в ней промежуточной гексатической фазы, характеризующейся квазидальним ориентационным порядком. При этом первый непрерывный переход обусловлен сегнетоэлектрическим фазовым переходом (СФП), а причина второго перехода носит квантовый характер и требует, по-видимому, дополнительных исследований в этом направлении. С другой стороны, обнаруженные резкие изменения мёссбауэровских параметров ($f' \approx S(T)$, $\Delta = 2\varepsilon$) вблизи температуры 250 К можно объяснить образова-

нием или деструкцией сегнетоэлектрического льда «0». Дополнительно в пользу нашего предположения говорит оценка величин плотности льда и фрактальной размерности КЖС, которые можно рассматривать как продукты «деятельности» СФП. Таким образом, по мёссбауэровским данным, возможно образование сегнетоэлектрического льда «0» в глинистых средах, что экспериментально подтверждает теоретическое предположение, основанное на компьютерном моделировании свойств переохлаждённой воды при температурах ниже 250 К [13]. Заслуживает особого внимания факт, что применение зондовой МС позволило нам также экспериментально зафиксировать другую метастабильную форму льда (предположительно лёд «i»). Таким образом, разработанная методика МС открывает новые возможности изучения, наряду с классическими видами льда (I_c , I_h и т. п.), его особого типа, который представляет собой метастабильные формы льда низкой плотности. Подобные льды широко реализуются в двумерных системах, не исключая при этом и внеземное происхождение.

Нельзя не сделать замечания относительно проблем, связанных с физикой переходов и (особенно) для ФП второго рода. Проблема, говоря словами академика В. Л. Гинзбурга, «несомненно, остаётся одним из магистральных направлений в физике». Выше достаточно убедительно было продемонстрировано применение метода МС для получения новой информации, которая поможет частично продвинуться по снятию проблем ФП. Однако дальнейшее обсуждение в этом направлении выходит за формат настоящей статьи.

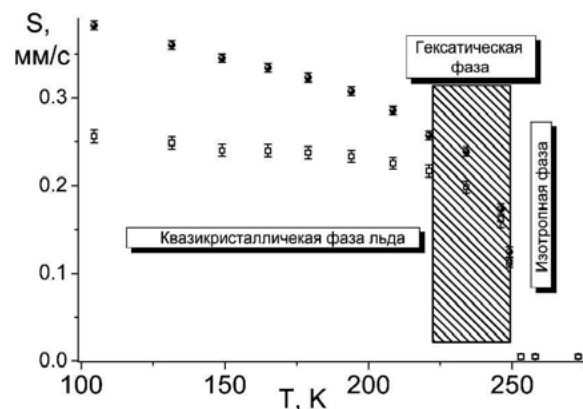


Рис. 3. Сценарий плавления для двумерного поверхностного льда, реализуемый в рамках теории Березинского — Костерлица — Таулесса — Хальперина — Нельсона — Янга (БКТХНЯ) и базирующийся на температурной зависимости поведения вероятности эффекта Мёссбауэра ($f' \propto S$).

в) Диагностика основных типов шума с помощью метода МС.

Хаотическое поведение является следствием отражения глубоких закономерностей динамической организации СС и, что для нас актуально, может найти своё проявление для установления наличия «жидкой» воды в изучаемых объектах.

Особо следует сказать, что экспериментальные данные по применению методики МС для исследования стохастических процессов (СП) или динамического хаоса (ДХ) практически отсутствуют. Одно приятное исключение может составлять только серия мёссбауэровских экспериментов, которая базировалась на модели броуновского осциллятора с сильным затуханием и формально описывалась в рамках «белого» шума (БШ). Поэтому нами была реализована попытка изучения СП в модельной системе «замороженный раствор-монтмориллонит». При этом полученный с помощью МС фактический материал можно разбить на две группы. Первая группа обязана тому факту, что при описании равновесных флуктуаций в исследованных средах применялась модель, предполагающая воздействие на частицы среды случайных сил, имеющих в низкочастотной части спектр БШ. Для второй группы характерен другой тип флуктуаций (который описывался фликкер-шумом (ФШ) (или $1/f$ -шумом)), наблюдающийся обычно в локально-неравновесных средах и характеризующийся очень сильными временными корреляциями. Возможные области шума, реализуемые в системе «замороженный раствор-монтмориллонит», были диагностированы методом МС и для наглядности представлены на Рис. 4. Дополнительно установлено, что структура поверхностного льда удовлетворительно описывалась в рамках фрактальной геометрии и с уменьшением толщины слоя зарегистрирован переход «Губка Менгера» → «Пыль Канторова» [12]. Здесь существенно то, что наиболее наглядно шум $1/f$ проявляет себя в тех слоях замороженной жидкости, которые по своей «структуре» соответствуют «Пыли Канторова».

Интерес может представлять не только сам по себе хаос, но и путь его установления в детерминированной системе. Количественное решение задачи по выяснению сценария развития хаоса требует проведения численных исследований или наукоёмких в математическом аспекте экспериментов (см. строки № 1—4 в Табл. 1). Поэтому с целью проведения наиболее эффективного решения поставленной задачи и одновременно получения из неё «быстрого» ответа была разработана специальная методика, апробированная данными из мёссбауэровского эксперимента (см. строку № 5 в Табл. 1).

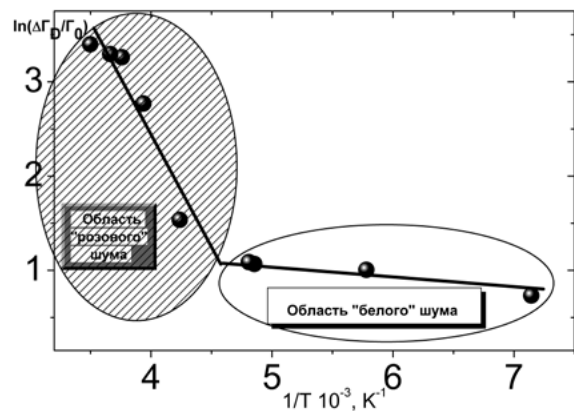


Рис. 4. Схема, иллюстрирующая возможные области шума, реализуемые в системе «замороженный раствор-монтмориллонит», и базирующаяся на температурной зависимости поведения мёссбауэровского параметра $\Delta\Gamma(T)$. Точка перегиба соответствует значению $T \approx 220$ К и является пограничной между областью «белого» и «розового» шума. Во вставке температурное поведение мёссбауэровского параметра $\Gamma(T)$ для димеров или кластеров Fe^{2+} .

г) Диагностика «экзотических» типов вещества с помощью метода МС.

С помощью методики зондовой МС нами проведены количественные оценки толщины, плотности, вязкости для квазижидкого слоя воды и набор ряда упругих параметров (модуль сдвига, коэффициент Пуассона, параметр Грюнайзена) для двумерного гексагонального льда. Впервые на основании полученных упругих характеристик установлено, что 2D-лёд ведёт себя как ауксетик [12, 14], и такое поведение может служить отправной точкой для дальнейшего построения модельного объяснения механизма возникновения природных нанотрубок.

Несмотря на то что потенциальные способности природных глин образовывать нанотрубки носят чисто прикладной характер, в наличии имеются экспериментальные данные, которые по своему содержанию можно не без основания отнести к области фундаментальных вопросов. Показательным примером может служить новый аспект, предложенный для решения общей проблемы «старения» дисперсных систем. Конкретно нами (пока ещё на качественном уровне) установлена перспективность использования методики зондовой МС для изучения процессов эволюции в молекулярных структурах. Действительно, ранее экспериментально зафиксированный переход «димеры» → «кластеры» [2] на формальном языке, используемом в рамках модели пятнистых коллоидов (*patchy colloids*) [15],

можно интерпретировать как переход «пустая жидкость» (*empty liquids*) → «равновесный гель» (*equilibrium gel*).

Таблица 1

Значения универсального параметра (δ) при различных сценариях перехода к хаосу

№	δ	Вид сценария	Методика получения
1	4,6692016...	Удвоение периода	Математический эксперимент (одномерное отображение)
2	4,19244418	Удвоение периода	Математический эксперимент (двумерное отображение)
3	2,83361...	Квазипериодический	Математический эксперимент (отображение окружности на себя)
4	2,8	Квазипериодический	Физический эксперимент (система Рэля — Бенара)
5	2,833(3)	Квазипериодический	Физический эксперимент (метод МС)

В заключение отметим, что представленная в настоящей работе методика зондовой МС позволяет частично снять дискуссионные моменты или, лучше сказать, дополнить актуальной информацией разделы земного грунтоведения, не исключая при этом космического грунтоведения. Это потенциально позволит в будущем приступить к разработке подходов с помощью метода МС по решению проблемы поиска и возникновения жизни на планетах земной группы.


Список литературы


1. Бабанин В. Ф., Трухин В. И., Карпачевский Л. О., Иванов А. В., Морозов В. В. Магнетизм почв. — Ярославль: ЯГТУ, 1995. — 223 с.
2. Залуцкий А. А., Степанов Е. Г. Физические методы исследования твердофазных реагентов и катализаторов. Монография. — Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2005. — 312 с.
3. Родионов Д. С. Мёссбауэровский спектрометр для анализа минералогии железа на поверхности Марса / Автореф. дисс. ... канд-та физ.-мат. наук. — М.: ИКИ РАН, 2006. — 14 с.
4. Малышева Т. В. Эффект Мёссбауэра в геохимии и космохимии. — М.: Наука, 1975. — 168 с.

5. Залуцкий А. А., Иванов А. В., Морозов В. В., Седьмов Н. А., Шоба С. А. Мёссбауэровский анализ соединений железа в почвах Земли и некоторых грунтах Марса // ДАН, 2011. Т. 441. № 1.
6. Залуцкий А. А., Залуцкая А. А., Седьмов Н. А., Кузьмин Р. Н. Мёссбауэровский анализ оксигидроксидов железа в почвах Земли и грунтах Марса // Литология и полезные ископаемые. 2015. № 4.
7. Таргульян В. О., Мергелов Н. С., Горячкин С. В. Почвоподобные тела на Марсе // Почвоведение, 2017. № 2.
8. Залуцкий А. А., Седьмов Н. А., Моргунов Е. Г. Физико-математические аспекты мёссбауэровской спектроскопии в применении к некоторым задачам почвоведения // Математика и естественные науки. Теория и практика: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 12. — Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2017.
9. Колмогоров А. Н. О логарифмически нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении // ДАН СССР, 1941. Т. 31.
10. Королёв В. Ю. О распределении размеров частиц при дроблении // Информатика и её применения. 2009. Т. 3. Вып. 3.
11. Dézsi, I., Keszthelyi, L., Molnár, B., Pócs, L. Mössbauer effect study of phase transition in ice. // Physics Letters, 1965, vol. 18(1), p. 28–29.
12. Залуцкий А. А., Седьмов Н. А., Соколов А. Ю., Школьников Е. Н. Мёссбауэровские исследования квазжидкого слоя на алюмосиликатной поверхности природного происхождения // Математика и естественные науки. Теория и практика: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 13. — Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2018.
13. Russo J., Romano F., Tanaka H. New metastable form of ice and its role in the homogeneous crystallization of water. // Nature Materials, 2014. Vol. 13(7), p. 733-739.
14. Залуцкий А. А. Зондовая мёссбауэровская диагностика свойств квазжидкого слоя воды на алюмосиликатной поверхности природного происхождения // Кристаллография, 2020. Т. 65, № 3.
15. Bianchi, E., Largo, J., Tartaglia, P., Zaccarelli, E., Sciortino, F. Phase Diagram of Patchy Colloids: Towards Empty Liquids. // Physical Review Letters, 2006, vol. 97, p. 168301-1-168301-4.

МЕТОД ГРАВИТАЦИОННОГО ЛИНЗИРОВАНИЯ: ВОЗМОЖНО ЛИ ПРЯМОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ МАССИВНОГО ТЁМНОГО ТЕЛА НА ПЕРИФЕРИИ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ?

 **Ю. П. Филиппов, М. В. Щепалова**

 ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва»

 yuphil@mail.ru, 6carjennfax9@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

Масштабные исследования физической природы звёзд главной последовательности (диаграммы Герцшпрунга — Рессела, которой принадлежит и наше Солнце) нашей Галактики, выполненные астрофизиками в XX—XXI веках, указали на то, что не менее 50% от их общего количества входят в двойные и кратные системы [1]. Приведённый факт естественным образом порождает следующие вопросы: Солнце — это единственная звезда в Солнечной системе? Есть ли у Солнца компаньон?

В настоящее время существует ряд убедительных фактов [2], косвенно свидетельствующих о существовании неизвестного массивного тела (МТ) на периферии Солнечной системы. Эти факты оказались столь значимыми, что Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) в качестве одной из главных задач миссии New Horizons с миллиардным бюджетом (запущена в 2005 году) предложила поиск МТ за орбитой Нептуна [3].

Специалисты NASA питают большие надежды на обнаружение прямых доказательств существования МТ в результате детального анализа более пяти миллионов снимков, полученных инфракрасным космическим телескопом WISE [4]. Уже более 11 лет прошло с момента завершения миссии, однако и сегодня общий доступ к снимкам закрыт, их анализ продолжается лишь специалистами миссии.

Новое исследование [5], выполненное британским астрофизиком М. Роуэн-Робинсоном с использованием снимков, полученных инфракрасной орбитальной обсерваторией IRAS ещё в 80-х годах XX века, указало на возможное существование в пределах Солнечной системы (в направлении созвездия Цефея) холодного массивного тела с массой, равной $(3-5) \times M_{\oplus}$ (здесь и далее M_{\oplus} — масса Земли) и расположенного на рас-

стоянии 210—240 а. е. от Солнца. Однако данный результат не нашел пока подтверждения в независимых исследованиях других учёных.

Согласно работе [6], в роли МТ может быть, в принципе:

I) маломассивная звезда (масса которой $0,07 M_{\odot} \leq M_{MT} \leq 0,15 \times M_{\odot}$, здесь и далее M_{\odot} — масса Солнца);

II) коричневый карлик (масса которого $13 M_J \leq M_{MT} \leq 0,07 \times M_{\odot}$, здесь и далее M_J — масса Юпитера);

III) массивная планета, подобная Юпитеру (масса которой $0,1 M_J \leq M_{MT} \leq 13 \times M_J$);

IV) планета, подобная Нептуну, с массой $(10-20) \times M_{\oplus}$;

V) планета-суперземля с массой $(1-10) \times M_{\oplus}$.

Авторы настоящей работы предлагают дополнить представленный выше список возможных вариантов ещё одним:

VI) маломассивная землеподобная планета с массой, не меньшей массы Марса (для определённости $0,1 M_{\oplus} \leq M_{MT} \leq M_{\oplus}$).

Сценарий I сегодня видится нереалистичным, поскольку относительная близость к Земле любой маломассивной звезды (хотя и обладающей светимостью, в 102—105 раз меньшей, чем светимость Солнца) позволила бы быстро её обнаружить в телескопических исследованиях. Однако оптические телескопические исследования ведутся уже более 400 лет, но ничего подобного не зафиксировано в наблюдениях.

Сценарии II—VI имеют ненулевую вероятность реализации в действительности. Ведь эти типы астрофизических объектов могут быть:

- холодными тёмными телами, и потому не только не видны в оптическом диапазоне, но должны быть достаточно тусклыми телами даже в ИК-диапазоне;
- движущимися на окраинах Солнечной системы телами с огромными периодами обращения, и потому гравитационные возмущения, наводимые ими в движениях наблюдаемых тел, должны проявляться крайне редко и медленно;
- обнаружены по их гравитационному действию не только на известные тела Солнечной системы, но и на свет, идущий от далёких звёзд фона.

Последний аргумент лежит в основе принципиально нового подхода к поиску массивного тёмного тела на окраинах Солнечной системы — применения метода гравитационного линзирования (МГЛ).

Заметим, что предположение о том, что свет может отклоняться в поле тяготения массивного объекта, впервые было высказано ещё Исааком Ньютоном в 1704 году в книге «Оптика». Немецкий астроном Иоганн фон Зольднер стал первым, кто выполнил корректный численный расчёт (1804 год) угла отклонения массивной частицы света в поле тяготения

Солнца (в рамках ньютоновской теории тяготения). В 1912 году Альберт Эйнштейн получил первую корректную оценку для угла отклонения светового луча в гравитационном поле Солнца в рамках Общей теории относительности (с учётом кривизны самого пространства-времени). Впоследствии его прогноз был блестяще подтверждён Артуром Эддингтоном в наблюдательном эксперименте во время полного солнечного затмения в мае 1919 года. Идею применения гравитационного линзирования как метода исследования в астрофизике впервые высказал в научной литературе в 1924 году советский учёный Орест Данилович Хвольсон. Первая точная количественная теория применения данного метода для изучения физических свойств гравитирующего тела была представлена А. Эйнштейном в 1936 году.

Главной целью настоящей работы является количественный анализ возможности прямого обнаружения тёмного МТ на периферии Солнечной системы с использованием МГЛ. Суть последнего заключается в том, что сферическое массивное тело (гравитационная линза, ГЛ) своим гравитационным полем искажает ход световых лучей, пришедших от далёкого фонового источника света, и вызывает кратковременное увеличение его яркости, а при определённых условиях — удвоение его образа во время прохождения между ним и наблюдателем. Этот феномен не только позволит подтвердить гипотезу о существовании МТ на периферии Солнечной системы, но и даст возможность астрофизикам получить ценную информацию о физических свойствах ГЛ. Под прямым обнаружением тёмного МТ с помощью МГЛ понимается фиксация двух образов одного фонового источника света в телескопических наблюдениях (сильное линзирование).

УГОЛ ОТКЛОНЕНИЯ СВЕТОВОГО ЛУЧА В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ ЛИНЗЫ

В работе рассмотрен случай слабого гравитационного поля линзы. Этот выбор обусловлен тем, что масса и радиус МТ малы (данные параметры могут принимать значения, соответствующие Марсу), чтобы вызвать сильные искажения изображения фонового источника. В рамках ньютоновской теории тяготения выполнен расчёт угла отклонения светового луча в слабом гравитационном поле линзы-МТ. Учтён вклад в итоговый результат, обусловленный кривизной самого пространства [7].

Итоговый результат представляется в виде:

$$\theta'' = \frac{4GM}{bc^2} \times 206265'' = \frac{2R_{Sh}}{b} \times 206265'', \quad (1)$$

здесь M — масса ГЛ, b — прицельный параметр для светового луча, c — скорость света. Последний результат представлен в удобной оригинальной форме, в терминах радиуса Шварцшильда (R_{Sh}).

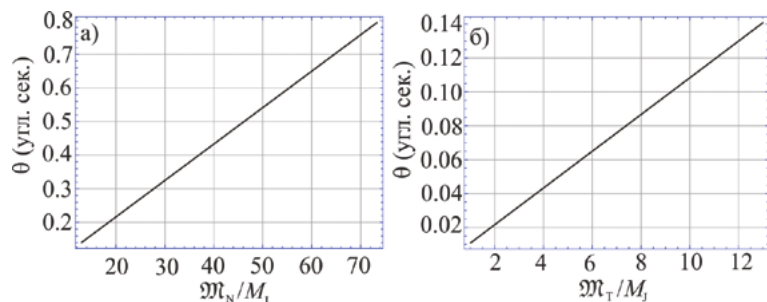


Рис. 1. Кривые зависимости угла отклонения светового луча в гравитационном поле ГЛ от а) массы Немезиды, выраженной в массах Юпитера M_J , с прицельным параметром $b = 1,5 R_J$; б) массы Тюхе, выраженной в массах Юпитера M_J , с прицельным параметром $b = 1,5 R_J$.

Выполнен численный анализ полученного результата в случае пяти альтернативных сценариев (II–VI). На Рис. 1а и 1б представлены кривые зависимости угла отклонения θ'' светового луча в гравитационном поле: а) коричневого карлика (Немезиды, II) и б) массивной планеты (Тюхе, III), подобной Юпитеру, от массы данных тел. Из графиков видно, что для всех допустимых значений масс данных тел угол отклонения светового луча всегда не меньше угловой разрешающей способности (УРС) будущих телескопов James Webb Space Telescope ($0,018''$) и European Extremely Large Telescope ($0,003''$), что указывает на принципиальную возможность регистрации данного феномена в телескопических наблюдениях. В случае сценариев IV–VI искомая величина не превосходит УРС этих телескопов и потому не сможет быть зафиксирована экспериментально в ближайшем будущем.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ И ПОЛНОЕ СЕЧЕНИЕ РАССЕЯНИЯ ФОТОНОВ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ ЛИНЗЫ

В работе получены аналитические результаты для безразмерных дифференциального и полного сечений рассеяния фотонов в гравитационном поле исследуемых объектов в терминах радиуса Шварцшильда:

$$S_{\Omega} = \frac{1}{S_G} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) = \frac{4}{\pi} \times x^2 \times \frac{4 \times \cos\theta \times x^2}{\sin^4\theta}, \text{ где } \theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max}, \quad (2)$$

$$S_{\text{tot}} = \left(\frac{\sigma_{\text{tot}}}{S_G} \right) = \frac{4 \times x^2}{\theta_{\min}^2} - 1, \text{ где } x = \frac{R_{Sh}}{R}, \quad (3)$$

здесь R — радиус небесного тела, $S_G = \pi R^2$ — площадь поперечного сечения тела, θ — угол рассеяния светового луча относительно первоначального направления. На Рис. 2а и 2б представлены графики зависимостей (в логарифмическом масштабе) от угла отклонения дифференциальных сечений (S_{Ω}) рассеяния электромагнитного излучения в гравитационном поле Немезиды (II, см. Рис. 2а) для трёх значений её массы и Тюхе (III, см. Рис. 2б) для четырёх различных значений её массы. Очевидно, что данная зависимость является линейной. С уменьшением массы ГЛ сокращается диапазон возможных значений параметра x . На Рис. 2в и 2г представлены кривые зависимостей (в логарифмическом масштабе) от значения параметра x полных сечений рассеяния (S_{tot}) для Немезиды и Тюхе. Очевидно, что данные зависимости являются монотонно возрастающими с ростом x . В случае сценариев IV–VI угол θ'' меньше УРС лучших телескопов Земли, и потому сечения S_{Ω} по-прежнему принимают большие значения, а вот полные сечения становятся отрицательными.

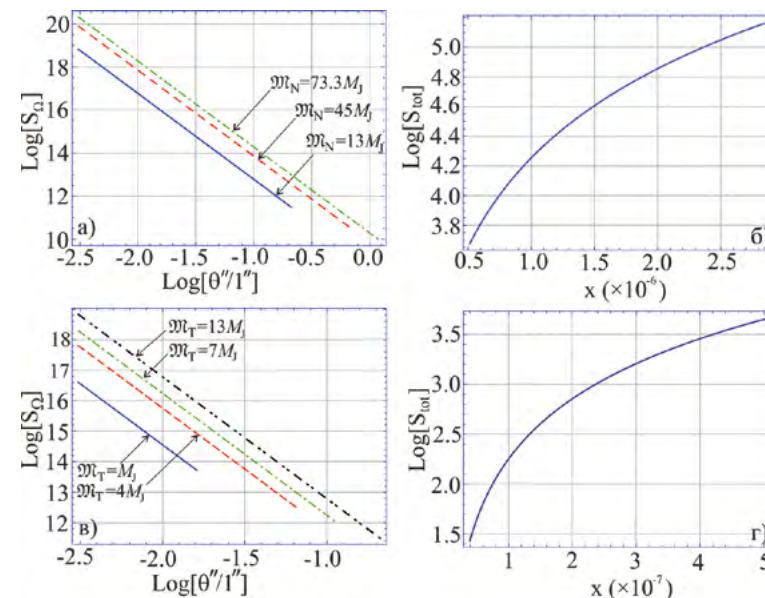


Рис. 2. Зависимости дифференциальных сечений S_{Ω} рассеяния электромагнитного излучения в гравитационном поле ГЛ от угла рассеяния θ'' в логарифмической шкале для а) трех значений массы Немезиды, б) четырех значений массы Тюхе; полного сечения S_{tot} рассеяния от величины параметра x в случае в) Немезиды, г) Тюхе.

ЗАДАЧА О ФОРМИРОВАНИИ «ДУХОВ»

В работе решена задача о формировании изображений («духов») первичного точечного фонового источника света ГЛ. Пусть в точке D (Рис. 3а) находится точечная гравитационная линза, в точке S — источник света (звезда фона), в точке O — наблюдатель. Поскольку вдали от тела D фотон движется практически по прямой линии, то его траекторию можно аппроксимировать двумя прямыми линиями, изломанными вблизи тела D (в точках A и B). Угол α между ними показывает, насколько отклонился фотон, пройдя гравитационное поле тела D . Угол между направлением на дефлектор и истинное положение источника S обозначим через θ . Два луча света (изображены двумя жирными линиями), прошедшие по разные стороны тяготеющего тела, будут отклонены от первоначальных направлений в сторону этого тела. Если источник света S находится достаточно далеко от тела D , то лучи начнут сходиться и пересекутся в некоторой удалённой точке [3]. При этом углы между направлениями на ГЛ и на изображения источника фона составляют $\theta_1^{(1)}$ и $\theta_1^{(2)}$ (являются решением уравнения для гравитационной линзы):

$$\theta_1^{(1,2)} = \frac{1}{2} \left(\theta \pm \sqrt{\theta^2 + 4\theta_0^2} \right), \text{ где } \theta_0 = 9,025'' \times 10^{-2} \sqrt{\pi_d'' \frac{M}{M_\odot}}, \quad (4)$$

здесь M_\odot — масса Солнца, π_d'' — годичный параллакс ГЛ. На Рис. 3б представлены кривые полученных зависимостей от значений угла θ . Из рисунка видно, что при тесном сближении источника и ГЛ ($\theta \rightarrow 0$), что отвечает ярко выраженному феномену микролинзирования, угловые расстояния между дефлектором и «духами» стремятся к угловому радиусу конуса Эйнштейна (θ_0), а расстояние между духами — к $2\theta_0$. По сути, «духи» перемещаются по конусу Эйнштейна.

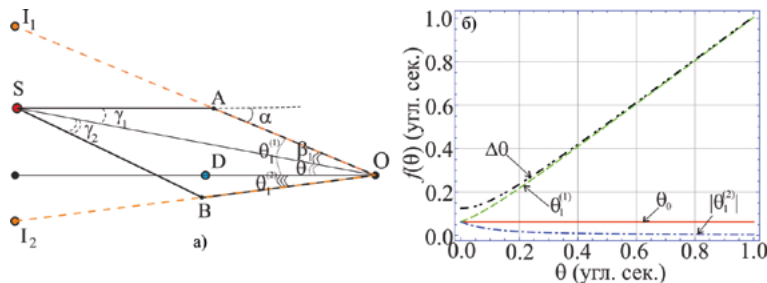


Рис. 3. К определению а) положения «духов», порождаемых ГЛ; б) кривых зависимостей решений уравнения ГЛ $\theta_1^{(1)}$ и $\theta_1^{(2)}$, их разности $\Delta\theta = \theta_1^{(1)} - \theta_1^{(2)}$, углового радиуса конуса Эйнштейна θ_0 от угла отклонения θ в случае Немезиды с параметрами массы $M_N = 0,07M_\odot$ и гелиоцентрическим расстоянием $D_d = 30$ тыс. а. е.

На Рис. 4 представлены кривые зависимостей углового радиуса ГЛ, её минимального и максимального значений углового радиуса конуса Эйнштейна от расстояния до ГЛ для сценариев II—III. Из графиков видно, что оба «духа», порождаемых Немезидой (Рис. 4а), всегда видны и, в принципе, могут быть разрешены в телескопических наблюдениях [6]. В случае сценария III на большей части интервала допустимых значений гелиоцентрического расстояния планеты, оба «духа» видны и могут быть разрешены непосредственно (Рис. 4а). В случае моделей 3—4 угловой радиус ГЛ оказывается большим по значению, чем радиус конуса Эйнштейна, поэтому один «дух» всегда затмевается телом линзы, здесь невозможен эффект сильного линзирования, но возможно фотометрическое проявление эффекта гравитационного микролинзирования. Изучение данного вопроса требует дополнительных исследований, выходящих за рамки данной работы.

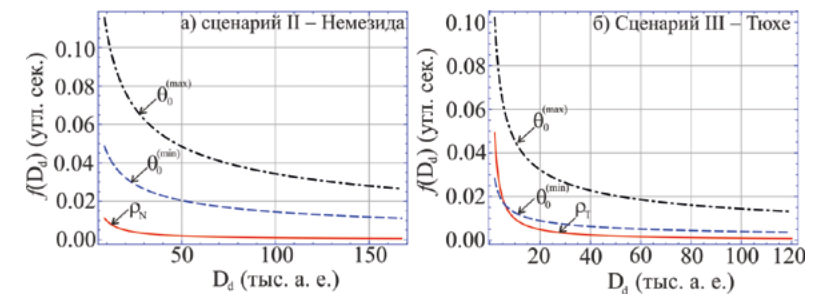



Рис. 4. Кривые зависимостей минимального и максимального значений радиусов конуса Эйнштейна ($\theta_{min}(0)$ и $\theta_{max}(0)$) и углового радиуса ГЛ r от гелиоцентрического расстояния до линзы D_d для случаев а) Немезиды, б) Тяхе.


Список литературы

1. Кононович Э. В., Мороз В. И. Общий курс астрономии. — М.: УРСС, 2004. — 544 с.
2. Филиппов Ю. П., Чобану М. И. Гипотеза о существовании Немезиды и Тяхе. I. Основные физические свойства тел // Вестник молодых учёных и специалистов Самарского государственного университета. — 2015. № 2(7).
3. New Horizons: The First Mission to the Pluto System and the Kuiper Belt. — Official Page of the mission. — URL: https://www.nasa.gov/mis-sion_pages/newhorizons/overview/index.html (дата обращения: 16. 01. 2022).
4. Can WISE Find the Hypothetical «Tyche»? — URL: http://www.nasa.gov/mis-sion_pages/WISE/news/wise20110218.html. (дата обращения: 16. 01. 2022).

5. Rowan-Robinson M. A search for Planet 9 in the IRAS data. URL: <https://arxiv.org/abs/2111.03831> (дата обращения: 16. 01. 2022).
6. Philippov J. P., Chobanu M. I. Nemesis, Tyche, Planet nine hypotheses. I. Can we detect the bodies using gravitational lensing? // Publications of the Astronomical Society of Australia. — 2016. — E033, 13 pages.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. 2003. — М.: ФИЗМАТЛИТ. — Т. 2. — 531 с.
8. Захаров А. Ф., Сажин М. В. Гравитационное микролинзирование. 1998. — Успехи физических наук. Т. 16810.

АКСИАЛЬНО СИММЕТРИЧНАЯ МОДЕЛЬ ВНУТРЕННЕЙ КОМЫ КОМЕТЫ 67P/CHURYUMOV – GERASIMENKO: АЛГОРИТМ И ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

 **Ю. П. Филиппов**

 ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва»

 yuphil@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует объективная необходимость в изучении природы комет, поскольку данные объекты участвовали во многих космических процессах, определивших формирование Солнца, планет и других тел Солнечной системы. Большая часть информации об этих процессах сохранилась в ядрах комет.

К сожалению, наземные исследования комет позволяют получить лишь малую информацию о них. Именно поэтому уже несколько космических миссий прямого исследования структуры комет и их вещества были реализованы, а ещё несколько миссий находятся на стадии активной подготовки и ждут своей реализации.

Во многих космических экспериментах газовые и пылевые потоки собираются и анализируются инструментами космических аппаратов для определения химического состава кометного вещества, оценки его средней массовой плотности и других свойств.

Любой газовый (пылевой) датчик космического эксперимента имеет свою разрешающую способность. Следовательно, космический аппарат не может пройти слишком далеко от ядра кометы, где потоки газа и пыли являются ультраразреженными. С другой стороны, космический аппарат не может подойти слишком близко к ядру, поскольку он может столкнуться с последним и сорвать всю миссию. Таким образом, возникает принципиальная необходимость в предварительном теоретическом моделировании комы кометы для прецизионного расчёта орбиты космического аппарата.

В связи со сказанным главной целью настоящей работы является построение аксиально симметричной модели внутренней комы кометы. Численный анализ работоспособности модели будет выполнен на примере короткопериодической кометы 67P/Churyumov – Gerasimenko в окрестно-

сти её перигелия. Выбор данной кометы не случаен, поскольку именно её успешно исследовал в 2014-2015 годах космический аппарат (КА) Rosetta. Аппарат был оснащён как пылевыми, так и газовыми анализаторами. Кроме того, 2 ноября 2021 года комета прошла свой перигелий, а конец этого года отметился весьма комфортными условиями её наблюдений. Их новые данные и данные КА Rosetta позволят уточнить новую модель и применить её к изучению свойств комы комет будущих космических миссий.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДЕЛИ

Ядро, газовую и пылевую фракцию комы будем моделировать следующим образом.

1. Ядро кометы и пылевую частицу будем представлять однородными шарами с радиусами R_N и R_P , массовой плотностью ρ_N и ρ_P , геометрическим альбедо A_G^N и A_G^P , сферическим альбедо A_S^N и A_S^P соответственно. Будем полагать, что данные объекты являются серыми телами с коэффициентами черноты ϵ_N и ϵ_P .

2. Газовая фракция комы кометы имеет только две компоненты: водяной пар (H_2O) и моноксид углерода (CO). Согласно работам [1] полные потоки для данных компонент в окрестности перигелия равны

$$Q(CO) = 10^{26}(1 / c), Q(H_2O) = 10^{28}(1 / c). \quad (1)$$

Поскольку моноксид углерода характеризуется меньшим значением минимальной температуры сублимации (~ 25 К), чем пары воды, то логично предположить, что поверхность ядра и приповерхностный слой комы не содержат источников CO -молекул, поскольку последние полностью сублимировали на ранней стадии эволюции кометы. Источниками CO -молекул являются глубоко залегающие слои ядра, где температура почти постоянна. В силу сказанного будем полагать, что плотность потока CO -молекул является постоянной по поверхности ядра [2, 3].

3. Эффективная молекулярная масса газа и постоянная адиабаты газа будут определяться выражениями:

$$m_{gas} = \eta_{CO} m_{CO} + \eta_{H_2O} m_{H_2O}, \quad \gamma_{gas} = \frac{\bar{i} + 2}{\bar{i}}, \quad (2)$$

$$\bar{i} = i_{CO} \eta_{CO} + i_{H_2O} \eta_{H_2O}, \quad \eta_{CO} = \frac{Q(CO)}{Q(CO) + Q(H_2O)}, \quad \eta_{H_2O} = \frac{Q(H_2O)}{Q(CO) + Q(H_2O)}, \quad (3)$$

где $i_{CO} = 5$, $i_{H_2O} = 6$ — число степеней свободы CO и H_2O молекул соответ-

ственно. Смесь газов не является однородной, так как относительное число молекул H_2O , CO на ночной и дневной стороне ядра является различным (в силу разных температур и темпов сублимации данных компонент). Тем не менее мы будем полагать, что m_{gas} , γ_{gas} являются константами, не зависящими от точки наблюдения.

4. Температура поверхности ядра определяется уравнением теплового баланса:

$$(1 - \alpha_N) I_0 \cos \theta = \frac{L}{N_A} Z_{HK}(T_N) \theta_H(T_N - T_{Sub}) + \epsilon_N \sigma T_N^4, \quad (4)$$

где α_N — коэффициент отражения, определяемый формулами Френеля [4] и зависящий от угла падения θ и коэффициента преломления вещества n поверхности ядра, I_0 — интенсивность падающего излучения определяется выражением:

$$I_0 = \frac{f_{sun}}{(r_N / a_0)^2}, \quad (5)$$

$f_{sun} = 1361 \text{ Вт/м}^2$ — солнечная постоянная, r_N — гелиоцентрическое расстояние ядра.

В выражении (4) θ — угол падения, $L = 36 \text{ кДж/моль}$ — скрытая теплота сублимации водяного льда, N_A — постоянная Авогадро, $Z_{HK}(T_N)$ — коэффициент сублимации Герца — Кнудсена для водяного льда, определяемый формулой вида:

$$Z_{HK}(T_N) = \frac{p(T_N)}{\sqrt{2\pi m_{H_2O} k T_N}}, \quad (6)$$

где $p(T_N) = A e^{\frac{-B}{T_N}}$ — давление газа у поверхности ядра, $A = 3,56 \times 10^{12} \text{ Па}$, $B = 6141 \text{ К}$ — параметры аппроксимации [5], k — постоянная Больцмана. В выражении (4) $\theta_H(x)$ — ступенчатая функция Хевисайда, $T_{Sub} = 152 \text{ К}$ — температура сублимации водяного льда.

С использованием модели вращающегося сферического ядра [6], адаптированной к 67P/Churyumov — Gerasimenko на расстоянии $r_N = 1,29 \times a_0$, температура на ночной стороне поверхности ядра составляет 136 К. В данной работе мы принимаем это значение как минимальное значение температуры ночной поверхности ядра кометы, вблизи перигелия.

5. Мы также принимаем во внимание, что начальная температура газа $T_{initial}$ меньше температуры поверхности ядра T_N , поскольку газ су-

блимирует с ледяной поверхности ядра в вакуум. Молекулы газа, сублимируемые с поверхности, не имеют отрицательных проекций скорости на внешнюю нормаль к поверхности. Следовательно, любой молекуле, сублимируемой с поверхности ядра, отвечает точка, лежащая всегда в одном и том же полупространстве скоростей Максвелла. В силу столкновений молекул сублимируемого газа полупространство скоростей Максвелла эволюционирует в полное пространство, сопровождающееся сохранением потоков массы, импульса и энергии. Полное пространство Максвелла характеризуется ненулевыми средними значениями скорости, кинетической энергии молекул, последняя из которых определяется температурой, меньшей, чем температура сублимируемого льда. Выражение, связывающее начальную температуру газа и температуру поверхности ядра, было получено в работе [7] и представляется в виде:

$$\sqrt{\frac{T_{initial}}{T_N}} = \sqrt{1 + \left(\frac{Y_{gas} - 1}{Y_{gas} + 1} \frac{S\sqrt{\pi}}{2}\right)^2} + \frac{Y_{gas} - 1}{Y_{gas} + 1} \frac{S\sqrt{\pi}}{2}, \quad (7)$$

где $S = \sqrt{\frac{Y_{gas}}{2}} M$, $0 \leq M \leq 1$ — число Маха.

6. Будем полагать, что массы всех пылевых частиц заключены в интервале $[10^{-20}, 10^4]$ кг. Данный интервал разделим на 24 логарифмических интервала $[m_{i-1}, m_i]$, $m_i = 10^{-20+i}$ кг, $i = 0, \dots, 24$. Для каждого логарифмического интервала определим среднюю массу частицы $\bar{m}_{p,i}$, долю от общего числа частиц p_i , отношение массы всех частиц i -ого интервала к массе всех пылевых частиц ξ_i :

$$\bar{m}_{p,i} = \frac{m_{i-1} F(m_{i-1}) - m_i F(m_i) + \int_{m_{i-1}}^{m_i} F(m) dm}{F(m_{i-1}) - F(m_i)},$$

$$p_i = \frac{F(m_{i-1}) - F(m_i)}{F(m_{min}) - F(m_{max})}, \quad (8)$$

$$\xi_i = \frac{\bar{m}_{p,i} \times p_i}{\sum_j \bar{m}_{p,j} \times p_j},$$

где $F(m)$ — кумулятивное массовое распределение пылевых частиц, определяемое четырёхпараметрической функцией вида [8]:

$$F(m) = \left[\frac{(1+x)^{b-1}}{x^b} \right]^{ac}, \quad \text{где } x = \left[\frac{m}{m_t} \right]^{\frac{1}{c}}, \quad (9)$$

$$a = 0,90, b = 0,29, c = 2,16, m_t = 1,6 \times 10^{-13} \text{ кг.}$$

7. Будем полагать, что потоки газа и пыли характеризуются аксиальной симметрией относительно направления «Солнце — ядро».

РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОЙ ФРАКЦИИ ВНУТРЕННЕЙ КОМЫ

Внутренней комой называется область вокруг ядра (её размер — несколько радиусов ядра), где пылевые частицы ещё ускоряются потоками газа, сублимированного с поверхности ядра. Согласно работе [9], в этой области средняя длина свободного пробега молекул газа составляет $10^{-2} / 1$ м. Так как средняя длина свободного пробега много меньше радиуса ядра R_N , а следовательно, и масштабов внутренней комы, то в данной области распределение молекул по скоростям является максвелловским, а данная газовая среда является непрерывной. Таким образом, для расчёта газового потока в области внутренней комы могут быть применены основные уравнения динамики сплошной среды. С использованием полярных координат (r — расстояние от центра ядра до точки наблюдения, θ — фазовый угол) данную систему уравнений можно представить в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t} r^2 \rho_{gas} + \frac{\partial}{\partial t} r^2 \rho_{gas} V_r + \frac{\partial}{\partial \theta} r \rho_{gas} V_\theta = - \text{ctg} \theta \times \rho_{gas} \times V_\theta \times r,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} r^2 \rho_{gas} V_r + \frac{\partial}{\partial r} r^2 \rho_{gas} (V_r^2 + RT) + \frac{\partial}{\partial \theta} r \rho_{gas} V_r V_\theta = - \text{ctg} \theta r \rho_{gas} V_r V_\theta + 2r \rho_{gas} RT + r \rho_{gas} V_\theta^2,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} r^2 \rho_{gas} V_\theta + \frac{\partial}{\partial r} r^2 \rho_{gas} V_r V_\theta + \frac{\partial}{\partial \theta} r \rho_{gas} (V_\theta^2 + RT) = - \text{ctg} \theta r \rho_{gas} V_\theta^2 - r \rho_{gas} V_r V_\theta,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} r^2 \rho_{gas} \varepsilon + \frac{\partial}{\partial r} r^2 \rho_{gas} V_r (\varepsilon + RT) + \frac{\partial}{\partial \theta} r^2 \rho_{gas} V_\theta (\varepsilon + RT) = - \text{ctg} \theta r \rho_{gas} V_\theta (\varepsilon + RT),$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} (V_r^2 + V_\theta^2) + \frac{1}{Y_{gas} - 1} RT. \quad (10)$$

В (10) ε — энергия, приходящаяся на единицу массы газа, ρ_{gas} — массовая плотность газа, V_r и V_θ — радиальная и тангенциальная составляющие скорости газа соответственно, $p = \rho_{gas} RT_N$ — давление газа, T — температура газа; все указанные выше параметры являются функциями полярных координат, (r, θ) , $R = k/m_{gas}$.

Для решения системы (10) необходимо задать граничные условия:

1. Плотность газа у поверхности ядра определяется следующим выражением:

$$\rho(R_N) = \frac{p(T_N)}{R \times T_N}. \quad (11)$$

2. Радиальная и тангенциальная проекции начальной скорости частиц у поверхности ядра есть

$$V_r(R_N) = \sqrt{\frac{8}{\pi} RT_N}, \quad V_\theta(R_N) = 0. \quad (12)$$

3. Температура поверхности ядра $T(R_N)$ определяется выражением (7).

ПАРАМЕТРЫ ПЫЛЕВОЙ ФРАКЦИИ ВНУТРЕННЕЙ КОМЫ

Плотность потока частиц i -ого массового интервала у поверхности ядра можно определить с использованием плотности потока газа и результатов (2), (8), (9):

$$j_{P,i}(R_N, \theta) = \xi_i \times \bar{\chi} \times \frac{m_{gas}}{m_{P,i}} \times j_{gas}(R_N, \theta), \quad j_{gas}(R_N, \theta) = j_{H_2O}(R_N, \theta) + j_{CO}(R_N, \theta), \quad (13)$$

где $\bar{\chi} = 0,5$, согласно результатам работы [10], $j_{gas}(R_N, \theta)$ — плотность потока молекул газовой фракции у поверхности ядра;

$$j_{H_2O}(R_N, \theta) = \frac{Q_{H_2O}}{Q_{HK}} \times Z_{HK}(T_N(\theta)), \quad (14)$$

$$Q_{HK} = 2\pi R_N^2 \int_{-1}^1 Z_{HK}(\theta) d\cos\theta.$$

Согласно п. 2 определения модели будем полагать, что концентрация CO в приповерхностном слое комы и поверхностном слое ядра является постоянной, а скорость его молекул определяется их средней скоростью:

$$j_{CO}(R_N, \theta) = n_{CO} \times \bar{V}_{CO} = n_{CO} \times \sqrt{\frac{8 \times k \times T_N(\theta)}{\pi \times m_{CO}}}, \quad (15)$$

$$n_{CO} = Q_{CO} / 2\pi R_N^2 \times \int_0^\pi \sqrt{\frac{8 \times k \times T_N(\theta)}{\pi \times m_{CO}}} \sin\theta d\theta.$$

В работе [10] было показано, что пылевые частицы большинства рассматриваемых классов имеют радиальный характер распространения. Предполагая, что данный характер движения имеет место для частиц всех классов, которые ещё могут быть подняты с поверхности ядра, мы можем построить плотность потока частиц i -ого класса в произвольной точке комы (r, θ) в виде:

$$j_{P,i}(R_N, \theta) = \left(\frac{R_N}{r}\right)^2 \times j_{P,i}(R_N, \theta). \quad (16)$$

Полный поток (производство) массы пылевых частиц i -ого класса определяется выражением вида:

$$Q_{P,i} = 2\pi R_N^2 \int_0^\pi m_{P,i} \times j_{P,i}(R_N, \theta) \times \sin\theta d\theta. \quad (17)$$

Полный поток массы пыли представляется в виде:

$$Q_{P,tot} = \sum_{i=1}^{i_{max}} Q_{P,i}, \quad (18)$$

где i_{max} — номер массового интервала пылевых частиц, которые ещё могут быть подняты с поверхности ядра.

Расчёт пылевого потока, так же как и газового, проводится в области внутренней комы радиусом $r = r_{max} = 25 \times R_N$. На данном расстоянии плотность газа слишком мала для того, чтобы передать существенное ускорение пылевым частицам. Следовательно, на этом расстоянии последние достигают своих пограничных скоростей, с которыми впоследствии вылетают из внутренней комы.

ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

На Рис. 1 представлен трёхмерный плот, определяющий распределение концентрации газа в области внутренней комы. Наибольшие концентрации газа достигаются с дневной стороны, вблизи поверхности ядра. Характерной особенностью данного распределения является резкое падение концентрации газа в малой окрестности угла $\theta = 90^\circ$. Такое поведение можно объяснить быстрым падением температуры поверхности ядра T_N вблизи терминатора и сильной экспоненциальной зависимостью давления H_2O — газа в поверхностном слое ядра от T_N .

На Рис. 2 представлен трёхмерный плот, определяющий распределение радиальной компоненты скорости газа в области внутренней комы. Как и в случае распределения концентрации, в окрестности угла $\theta = 90^\circ$

наблюдается существенное уменьшение скорости газа, обусловленное уменьшением температуры поверхности ядра. Наибольшее значение радиальная скорость достигает на внешней границе внутренней комы, в подсолнечной точке, и составляет 652 м/с.

На Рис. 3 представлен трёхмерный плот распределения плотности потоков массы пылевой фракции комы. На внешней границе внутренней комы плотность потоков меняется в пределах от 10^{-8} кг/(м² × с) при $\theta = 0^\circ$ до 10^{-11} кг/(м² × с) при $\theta = 180^\circ$. Таким образом, представленная модель может быть использована для построения детальной картины внутренней комы других короткопериодических комет, в том числе и для тех, к которым планируются отправить КА.

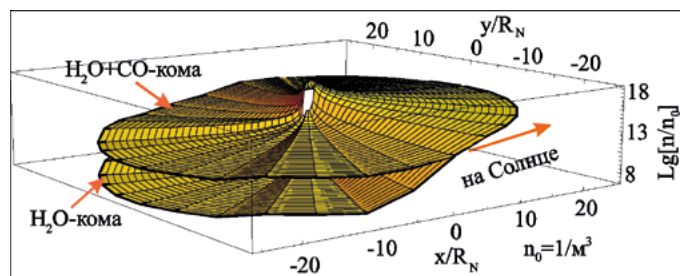


Рис. 1. Распределение концентрации газа в области внутренней комы кометы с внешним радиусом, равным $25 R_N$, в случае монокомпонентной H_2O и двухкомпонентной $H_2O + CO$ – газовой комы.

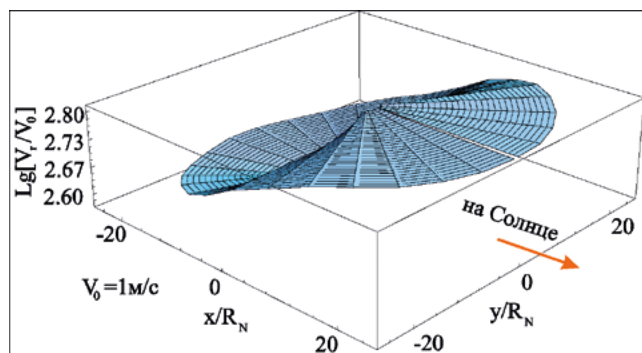


Рис. 2. Распределение радиальной скорости газа в области внутренней комы кометы с внешним радиусом, равным $25 R_N$.

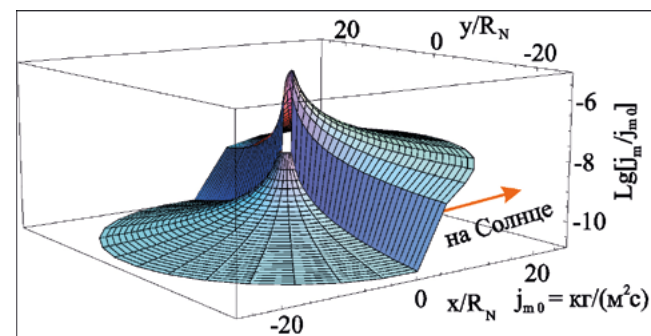



Рис. 3. Распределение плотности потока массы пыли в области внутренней комы кометы с внешним радиусом, равным $25 R_N$.


Список литературы

1. Biver N., Bockelée-Morvan D., Hofstadter M., Lellouch E. et al Long-term monitoring of the outgassing and composition of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko with the Rosetta/MIRO instrument. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2019. — V. 630. — A19.
2. Von Oertzen J. Global modeling of comets: Nucleus, neutral and ionized coma of comets 67P/Churyumov-Gerasimenko and 46P/Wirtanen // *Inaugural dissertation zur irlangung des doktorgrades*. — Köln. — 2003. — 96 p.
3. A'Hearn M. F., Millis R. L., Schleicher D. G., Osip D. J., Birch P. V. The ensemble Properties of Comets: Results from Narrowband Photometry of 85 Comets, 1976-1992 // *Icarus*. — 1995. — V. 118. — P. 223–270.
4. Калитеевский Н. И. Волновая оптика. — М.: Лань, 2006. — 466 с.
5. Fanale F. P., Salvail J. R. An idealized short-period comet model: surface insolation, H₂O flux, dust flux, and mantle evolution // *Icarus*. — 1984. — V. 60. — P. 476–511.
6. Enzian A., Klinger J., Schwehm G. Temperature and gas production distribution on the surface of a spherical model comet in the orbit of 46P/Wirtanen // *Icarus*. — 1999. — V. 155. — P. 386–396.
7. Crifo J. F., Rodionov A. V. The Dependence of the Circumnuclear Coma Structure on the Properties of the Nucleus, II. First investigation of the coma Surrounding a Homogeneous Aspherical Nucleus // *Icarus*. — 1997b. — V. 129. — P. 72–87.
8. Divine N. Dust flux models for CRAF at P/Tempel 2 // *Jet Propulsion Laboratory, interoffice memorandum*. — 1987. — 5137-87-53.
9. Probst R. F. The Dusty Gasdynamics of Comet Heads in "Problems of Hydrodynamics and Continuum Mechanics" // *SIAM*. — 1968. — P. — 568–583.
10. Muller M. A model of the Inner coma of comets with applications to the comets P/Wirtanen and P/Wild 2 // *Dissertation for the degree of Doctor of Natural Sciences*. Heidelberg. — Germany. — 1999. — 97 p.

АППРОКСИМАЦИЯ ЭВОЛЮЦИИ ОРБИТ ЮПИТЕРА И МАРСА ЗА МИЛЛИОН ЛЕТ С ПОМОЩЬЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ

 **А. Е. Розаев**

 Региональный научно-образовательный математический центр «Центр интегрируемых систем»

 hegem@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

Роль эволюции орбит больших планет трудно переоценить, поскольку она влияет на движение всех тел в Солнечной системе. В первую очередь это важно при изучении различных резонансов среднего движения. Общий вид резонансного аргумента следующий:

$$\phi_{p_1, p_2, p} = j_1 \lambda_j + j_p \lambda_p + j_2 \lambda + j_3 \varpi_j + j_{p1} \varpi_p + j_4 \varpi + j_5 \Omega_j + j_{p2} \Omega_p + j_6 \Omega.$$

где $\lambda_j, \lambda_{p2}, \lambda$ — долготы Юпитера, Марса и астероида, ϖ_i, Ω_i — соответствующие долготы перигелиев и узлов. Очевидно, если долготы будут изменяться во времени с непостоянной скоростью, это вызовет изменения в условии резонанса. В этой статье мы рассмотрим эволюцию орбит Юпитера и Марса, потому что эти две планеты генерируют ряд важных резонансов среднего движения в Главном поясе.

Для аппроксимации уравнения движения орбиты восьми больших планет были численно интегрированы с использованием интегратора Меркури и метода интегрирования Эверхарта.

Мы изучали временной интервал более 800 тыс. лет в прошлом: в этом интервале возникли около десяти компактных скоплений астероидов [1] и множество близких пар астероидов [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ АППРОКСИМАЦИИ

Мы получили следующие результаты. Для Юпитера (Рис. 1 и Рис. 2):

$$\Omega_j = 107,50 + 12\cos(0,000128t + 4,5) - 2\cos(0,000012t + 3),$$

$$\varpi_j = 293 + 0,0012t - 16\cos(0,0001149t + 5,93).$$

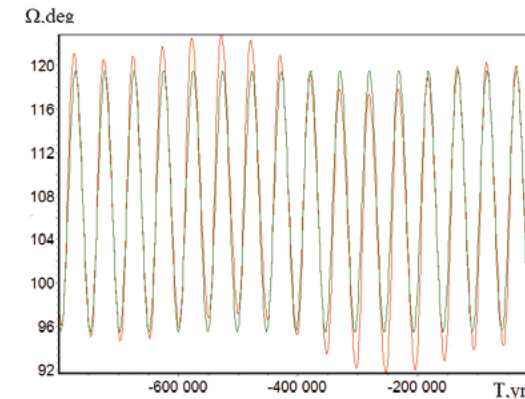


Рис. 1. Эволюция долготы узла Юпитера.

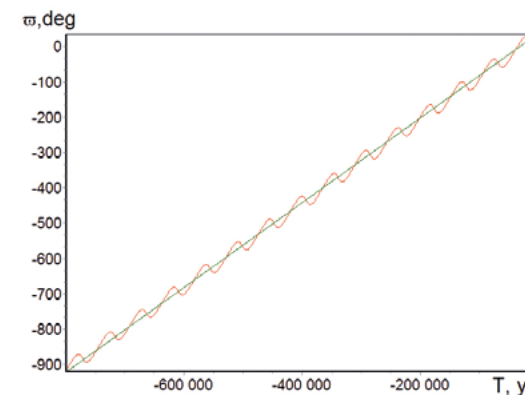


Рис. 2. Эволюция долготы перигелия Юпитера.

С приближением долготы перигелия Марса также проблем нет (Рис. 3):

$$\varpi_M = 330,0 + 0,00505t - 12\cos(0,0000712t + 4).$$

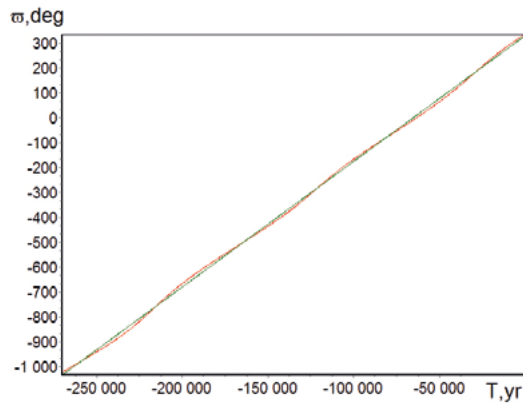


Рис. 3. Эволюция долготы перигелия Марса.

Однако, как мы отмечали в предыдущей статье [4], долгота узла Марса демонстрирует сложное поведение, когда периоды классической регрессии узла сменяются прецессией узла.

Эта ситуация имеет место в последние 310 тыс. лет. Она может быть объяснена малым наклоном марсианской орбиты в рассматриваемую эпоху [4]. Для долготы узла Марса ранее 300 тыс. лет назад мы имеем классическую регрессию узлов орбиты Марса (Рис. 4):

$$\Omega_M = 210 - 0,00504t - 20,5\cos(0,0000861t + 5,05).$$

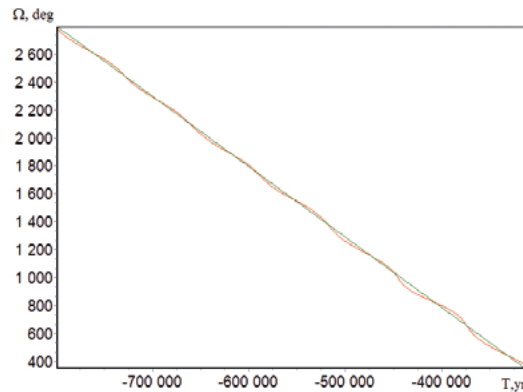


Рис. 4. Эволюция долготы узла Марса ранее 300 тыс. лет назад.

Но для долготы узла Марса после 300 тыс. лет назад мы имеем (Рис. 5):

$$\Omega_M = 107 + 30,4\cos(0,0001127t + 5,06) - 20\cos(0,000078t + 0,5).$$

Как хорошо известно, долгота узла Юпитера не обнаруживает вековых изменений (Рис. 1) и колеблется около 107 градусов. Здесь мы показываем, что на интервале 0–300 тыс. лет в прошлое долгота узла Марса также изменяется в ограниченных пределах вокруг того же самого значения.

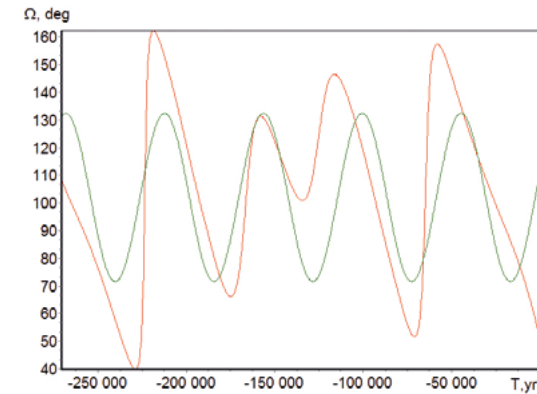


Рис. 5. Эволюция долготы узла Марса начиная с 300 тыс. лет назад по настоящее время.

ЭВОЛЮЦИЯ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА ЮПИТЕРА

Эволюция эксцентриситета и наклона Юпитера может быть важна при изучении собственных частот. Как мы можем видеть выше в случае орбиты Марса, малый наклон может изменить скорость прецессии узлов. Скорость прецессии перигелия g зависит от эксцентриситета Юпитера согласно выражению:

$$\varpi = \varpi_0 + n\alpha(m_p / m_s) \left[2C_1 t + \frac{e_p}{e\varpi} C_3 (\sin\varpi - \sin\varpi_0) \right].$$

Как мы показали в работе [3], долгота узла зависит от наклонов:

$$\Omega_{sec} = n\alpha(m_p / m_c) \left[(C_2 / 2)t + \frac{C_4 \sin^2 i_p / 2}{4\Omega \sin i} \sin(\dot{\Omega}t) \right].$$

где $\dot{\Omega} = n\alpha(m_p / m_s)C_2 / 2$. По этой причине мы приводим приблизительное значение эксцентриситета и наклона Юпитера в соответствии с работой [3]:

$$e_J = 0,046 + 0,015 \cos(0,0001159t + 4,65) - 0,002 \cos(0,000005t + 1,5),$$

$$i_J = 1,663 + 0,38 \cos(0,000128t + 3) - 0,05 \cos(0,000013t + 2).$$

ВЫВОДЫ

В настоящей статье мы дали приблизительное описание временной эволюции перигелия и долготы узлов Юпитера и Марса, действительное на интервале времени до 1 млн лет в прошлом. Эти приближения могут быть полезны при изучении многочисленных резонансов среднего движения в Главном поясе астероидов. Дополнительно мы приводим приближение эволюции эксцентриситета и наклона Юпитера.


Приближения получены по результатам численного интегрирования с учётом возмущений от восьми планет.

Список литературы

1. Pravec P., et al. Asteroid pairs: a complex picture., Icarus. 2019, 333, 429–463.
2. Pravec P. et al. Asteroid clusters similar to asteroid pairs. Icarus, 2018, 304, 110–126.
3. Rosaev A., Plavalova E. The Fourier approximation for orbital elements for the members of very young asteroid families, Planetary and Space Science, 2021, 202, 105233.
4. Rosaev A., Plavalova E. The dynamical effect of the 9/16 resonance with Mars on some Datura asteroids, including the pair Balam/312497, A&A, 2021, 653, id A4, 9 pp.

ПРЕЦЕССИЯ ОРБИТЫ В КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИКЕ

 **А. В. Сергиенко**

 Ярославский государственный институт качества сырьё
и пищевых продуктов

 qrtwfd@gmail.com

Как известно, прецессирующие эллипсы появляются как решения уравнений общей теории относительности. В то же время принято считать, что в классической механике существуют только следующие уравнения орбит: окружности, эллипсы, параболы и гиперболы. Однако прецессирующие эллипсы появляются и в классической механике.

Как известно, прецессия орбиты наблюдается не только при движении планет в Солнечной системе. Прецессия периастра орбиты также наблюдается в тесных двойных системах, компоненты которых проэволюционировали в пульсары ([1], [2], [3], [4], [5]). В таких системах массы компонентов — нейтронных звёзд — одного порядка. Следовательно, они будут двигаться по подобным равномерно прецессирующим эллипсам вокруг центра масс.

Прежде чем получить выражение для силы, действующей между двумя телами, движущимися по прецессирующим орбитам, необходимо записать уравнение самой орбиты в полярных координатах. Уравнение прецессирующего эллипса будет отличаться от уравнения обычного эллипса. Чтобы описать прецессию, необходимо в уравнении обычного эллипса под косинус полярного угла внести коэффициент.

Рассмотрим движение двух тел по подобным равномерно прецессирующим в направлении движения тел эллипсам. Уравнение относительной траектории тел:

$$\rho = \frac{p}{1 + e \cos k\varphi}, \quad p = a(1 - e^2), \quad k < 1.$$

Здесь ρ — расстояние между телами, φ — полярный угол, отсчитываемый от периастра, p — фокальный параметр эллипса, a — большая полуось эллипса, e — эксцентриситет, k — параметр прецессии. Здесь параметр прецессии $k < 1$, что соответствует смещению периастра в направлении движения тел. Согласно второму закону Кеплера, произведение квадрата расстояния между телами на угловую скорость есть постоянная. Исходя из этого, в периастре можем написать:

$$\rho^2 \dot{\varphi} = v_p a(1 - e) = h,$$

где h — постоянная, v_p — относительная скорость тел в периастре. Вычислим относительное ускорение тел. Оно равно:

$$-w_p = \rho \dot{\varphi}^2 - \ddot{\rho} = \frac{h^2 k^2}{\rho^2} + \frac{h^2(1 - k^2)}{\rho^3}, \quad w_\varphi = \frac{1}{\rho} \frac{d}{dt}(\rho^2 \dot{\varphi}) = 0.$$

Для силы можно написать:

$$F(\rho) = -\frac{w_p}{1/m_1 + 1/m_2} = -\frac{A}{\rho^2} + \frac{B}{\rho^3},$$

$$A = \frac{\mu h^2 k^2}{\rho}, \quad B = \mu h^2(1 - k^2), \quad \mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}.$$

где $\mu = (m_1 m_2) / (m_1 + m_2)$ — приведённая масса двух тел. Таким образом, мы получили, что сила притяжения между двумя телами, движущимися по прецессирующим орбитам, состоит из двух членов. Первый член — это ньютоновская сила, обратно пропорциональная ρ^2 , а второй член обратно пропорционален ρ^3 . Учитывая, что

$$A = \frac{\mu h^2 k^2}{\rho} = G m_1 m_2,$$

получим:

$$B = \frac{1 - k^2}{k^2} \rho A = \frac{1 - k^2}{k^2} G m_1 m_2,$$

$$h^2 k^2 = G \rho (m_1 + m_2) = G a(1 - e^2)(m_1 + m_2).$$

Выведем третий закон Кеплера для прецессирующих орбит. Интеграл

$$\int_0^{2\pi} \frac{d\varphi}{(1 + e \cos \varphi)^2}$$

можно вычислить методами комплексного анализа. Однако мы для его вычисления рассмотрим обычный эллипс. Запишем для него:

$$\int_0^{2\pi} \rho^2 d\varphi = 2\pi ab.$$

Подставляя сюда выражения:

$$\rho = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \varphi}, \quad b = a\sqrt{1 - e^2},$$

получим:

$$\int_0^{2\pi} \frac{d\varphi}{(1 + e \cos \varphi)^2} = \frac{2\pi}{(1 - e^2)^{3/2}}.$$

Применим полученный интеграл к задаче:

$$\int_0^{2\pi/k} \rho^2 d\varphi = \frac{2\pi a^2 \sqrt{1 - e^2}}{k} = hT.$$

Таким образом,

$$T = \frac{2\pi a^2 \sqrt{1 - e^2}}{hk} = \frac{2\pi a^2 \sqrt{1 - e^2}}{\sqrt{Ga(1 - e^2)(m_1 + m_2)}} = \frac{2\pi a^{3/2}}{\sqrt{G(m_1 + m_2)}}.$$

Следовательно,

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)}.$$

Таким образом, мы получили третий закон Кеплера, который, как видно, справедлив и в случае прецессирующих орбит. Следует, однако, отметить, что под периодом T в этой формуле подразумевается время, прошедшее между двумя периастрами, т. е. время, за которое полярный угол меняется на

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{k}.$$

Учитывая, что

$$\Delta\varphi = 2\pi + \dot{\omega}T,$$

где $\dot{\omega}$ — скорость изменения долготы периастра орбиты, найдём связь между параметром прецессии k и $\dot{\omega}$:

$$k = \left(1 + \frac{\dot{\omega}T}{2\pi}\right)^{-1}.$$

В заключение получим выражение для интеграла энергии. Уравнения движения двух взаимодействующих тел под действием силы притяжения имеют вид:

$$m_1 \vec{w}_1 = -\vec{F}, \quad m_2 \vec{w}_2 = \vec{F}.$$

Здесь m_1 и m_2 — массы тел, \vec{w}_1 и \vec{w}_2 — их ускорения, \vec{F} — сила, с которой первое тело действует на второе. Будем считать для определённости, что $m_1 \geq m_2$. Умножим скалярно первое уравнение на $d\vec{\rho}_1$, а второе — на $d\vec{\rho}_2$, где $\vec{\rho}_1$ и $\vec{\rho}_2$ — радиус-векторы тел. Затем сложим почленно полученные уравнения. В результате получим:

$$m_1 (\vec{w}_1 d\vec{\rho}_1) + m_2 (\vec{w}_2 d\vec{\rho}_2) = (\vec{F} d(\vec{\rho}_2 - \vec{\rho}_1)) = (\vec{F} d\vec{\rho}),$$

где $\vec{\rho} = \vec{\rho}_2 - \vec{\rho}_1$ — относительный радиус-вектор (радиус-вектор второго тела относительно первого). Так как

$$m_1 (\vec{w}_1 d\vec{\rho}_1) + m_2 (\vec{w}_2 d\vec{\rho}_2) = m_1 (\vec{v}_1 d\vec{v}_1) + m_2 (\vec{v}_2 d\vec{v}_2) = d\left(\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2}\right) = d\frac{\mu v^2}{2},$$

где $\vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$ — относительная скорость двух тел, а

$$\vec{F} = -\left(\frac{A}{\rho^2} + \frac{B}{\rho^3}\right) \vec{e}_\rho,$$

где $\vec{e}_\rho = \vec{\rho} / |\vec{\rho}|$ — единичный вектор, проведённый по направлению от первого тела ко второму, то

$$d\frac{\mu v^2}{2} = -\left(\frac{A}{\rho^2} + \frac{B}{\rho^3}\right) d\rho = d\left(\frac{A}{\rho} + \frac{B}{2\rho^2}\right).$$

Следовательно:

$$\frac{\mu v^2}{2} - \frac{A}{\rho} - \frac{B}{2\rho^2} = C,$$

где C — постоянная. Таким образом, $T = (\mu v^2) / 2$ — кинетическая энергия тел, $U = - (A / \rho) - (B / 2\rho^2)$ — потенциальная энергия их взаимодействия. Найдём константу C . Для этого подставим в выражение для квадрата относительной скорости тел:

$$v^2 = \dot{\rho}^2 + \rho^2 \dot{\varphi}^2$$

уравнение относительной орбиты:

$$\rho = \frac{p}{1 + e \cos k\varphi}, \quad \rho^2 \dot{\varphi} = h.$$

После преобразований получим:

$$\frac{\mu v^2}{2} - \frac{A}{\rho} - \frac{B}{2\rho^2} = -\frac{A}{2a}.$$

Таким образом, полная энергия системы:


$$E = T + U = -\frac{A}{2a}.$$


Список литературы

1. M. Burgay et al. Nature 426, 531 (2003).
2. A. G. Lyne et al. Science 303, 1153 (2004).
3. S. Johnston et al. Nature 361, 613 (1993).
4. R. A. Hulse and J. H. Taylor. ApJ 195, L51 (1975).
5. J. H. Taylor, L. A. Fowler and P. M. McCulloch. Nature 277, 437 (1979).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ И МИНИМАЛЬНОЙ СТАРТОВОЙ СКОРОСТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ОДНОИМПУЛЬСНОМ ПОЛЁТЕ ПО ТРАЕКТОРИИ «ЗЕМЛЯ – ЛУНА – ВЕНЕРА»

 **Н. Ю. Исаченков**

 ЯГПУ имени К. Д. Ушинского,
МОУ «Средняя школа № 91 «ИнТех»

 isnickjust@gmail.com

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе исследуется движение космического аппарата, стартующего с поверхности Земли, в рамках задачи пяти тел «Солнце — Земля — Луна — Венера — тело с ничтожно малой массой» с тесным сближением с поверхностью Луны, а также достижением планеты Венера.

Цель: подбор начальных условий положения Земли, Луны, Венеры и минимальной начальной скорости космического аппарата для полёта космического аппарата с Земли к Венере.

Актуальность: всё чаще с нашей планеты запускаются космические аппараты для различных целей. Целью полёта на Венеру могут служить изучение планеты, добыча ресурсов с помощью роботов или даже захоронение радиоактивных или химических отходов. Одноимпульсный полёт со сближением с поверхностью Луны позволит увеличить скорость космического аппарата относительно Солнца и долететь до Венеры с минимальной стартовой скоростью относительно Земли, а также снизить расходы топлива и, как следствие, финансовые затраты на перелёт.

Используемые методы: компьютерная алгебра (система MAPLE 17); проведение численных экспериментов; численное интегрирование дифференциальных уравнений методом Рунге — Кутты.

Новизна: определение минимальной начальной скорости и начальных положений Земли, Луны и Венеры при одноимпульсном полёте космического аппарата с Земли до Венеры.

Научно-практическое значение: результаты работы могут быть использованы в практике межпланетных перелётов, а также в научно-исследовательской, учебной и методической работе преподавателей астрономии.

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ

Представим векторное дифференциальное уравнение движения тела с ничтожно малой массой в форме (1) — с одной независимой переменной v_E [1].

$$\left(\frac{d^2\mathbf{r}}{dv_E^2}\right)\omega_E^2 = -\frac{Gm_s\mathbf{r}}{r^3} - \frac{Gm_E(\mathbf{r}-\mathbf{r}_E)}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_E|^3} - \frac{Gm_M(\mathbf{r}-\mathbf{r}_E-\mathbf{r}_{EM})}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_E-\mathbf{r}_{EM}|^3} - \frac{Gm_V(\mathbf{r}-\mathbf{r}_V)}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_V|^3}. \quad (1)$$

Здесь \mathbf{r} , \mathbf{r}_E , \mathbf{r}_V — гелиоцентрические радиус-векторы космического аппарата, Земли и Венеры соответственно. \mathbf{r}_{EM} — геоцентрический радиус-вектор Луны. m_s , m_E , m_M и m_V — массы Солнца, Земли, Луны и Венеры соответственно. v_E — средняя долгота Земли, ω_E — угловая скорость орбитального движения Земли, равномерно вращающейся по круговой орбите вокруг Солнца [2]. Орбиты Луны и Венеры также считаем круговыми, а их средние долготы пропорциональны v_E . В данной небесномеханической модели v_M , v_V — средние долготы Луны и Венеры соответственно. G — гравитационная постоянная. Радиусы Земли, Луны и Венеры равны соответственно:

$$R_E = r_E = 6371 / (149597888,999) \text{ а. е.} = 0,00004258749935 \text{ а. е.},$$

$$R_M = r_M = (1737,4) / (149597888,999) \text{ а. е.} = 0,00001161380025 \text{ а. е.},$$

$$R_V = r_V = (6051,8) / (149597888,999) \text{ а. е.} = 0,00004045377939 \text{ а. е.} [3].$$

НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ, РАСЧЁТЫ

Начало отсчёта средних долгот рассматриваемых тел совпадает с начальным положением этих тел. Используется следующая система единиц измерений: единица длины соответствует 1 астрономической единице, единица массы равна массе Солнца, единица времени равна 1 звёздному году, v_E , v_M , v_V измеряются в радианах [2]. dV_{KE} — начальная скорость космического аппарата относительно Земли.

Подберём такие начальные условия средних долгот Земли, Луны и Венеры, при которых космический аппарат, стартующий с Земли, будет иметь минимальную начальную скорость и долетит до Венеры. Тогда для начальных условий, равных: $v_{E0} = 0$ рад, $v_{M0} = 2,230985$ рад, $v_{V0} = 1,002$ рад, $x_0 = 1$ а. е., $y_0 = -R_E$ а. е., $dV_{KE} = 11\,401$ м/с, траектория космического аппарата представлена на Рис. 1 [3]. Изменение расстояния между Солнцем и космическим аппаратом (в зависимости от v_E) показано на Рис. 2. Минимальное расстояние между Луной и космическим аппаратом (в зависимости от v_E) показано на Рис. 3. Минимальное расстояние между Венерой и космическим аппаратом (в зависимости от v_E) показано на Рис. 4.

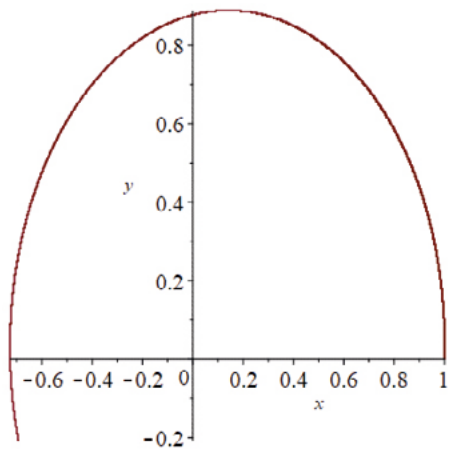


Рис. 1. Траектория движения космического аппарата относительно Солнца.
 $v_{Emax} = 2.82526$ рад — максимальное значение средней долготы Земли.

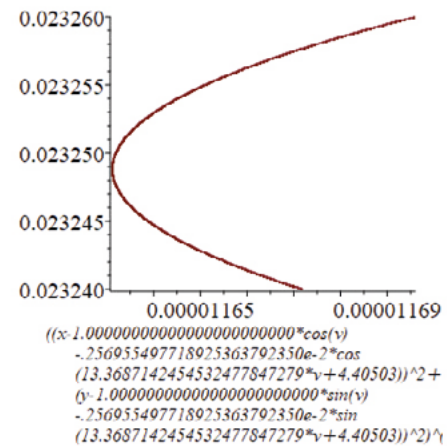


Рис. 3. Расстояние между Луной и космическим аппаратом.
 Минимальное расстояние равно 0.00001163 а. е. ($>> R_M$) при $v_{E1} \approx 0,023249$ рад.

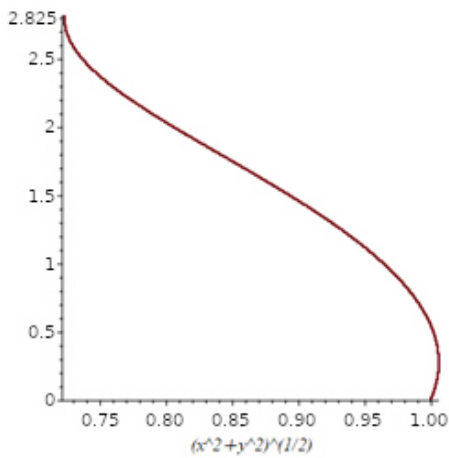


Рис. 2. Расстояние между Солнцем и космическим аппаратом в астрономических единицах. $v_{Emax} = 2,82526$ рад — максимальное значение средней долготы Земли.

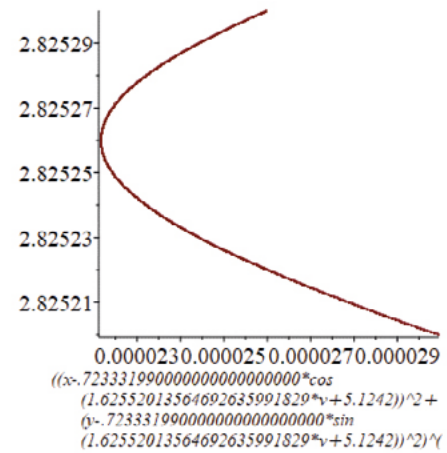


Рис. 4. Расстояние между Венерой и космическим аппаратом.
 Космический аппарат долетит до Венеры через $v_{E2} \approx 2,82526$ рад.

Зная угол, на который повернулась Земля относительно старта космического аппарата с поверхности Земли, можно посчитать: время, за которое космический аппарат, стартующий с минимальной скоростью, приблизится к поверхности Луны ($v_{E1} = 0,023249$ рад = $(0,023249$ рад $\times 365,2564$ суток) / $2\pi = 1,35151927$ суток ≈ 1 день 8 часов 26 минут 11 секунд); время,

за которое космический аппарат, стартующий с минимальной скоростью, долетит до Венеры после сближения с поверхностью Луны ($v_{E2} - v_{E1} = 2,82526 \text{ рад} - 0,023249 \text{ рад} = 2,802011 \text{ рад} = (2,802011 \text{ рад} \times 365,2564 \text{ суток}) / 2\pi = 162,887517 \text{ суток} \approx 5 \text{ месяцев } 16 \text{ суток } 21 \text{ час } 18 \text{ минут } 37 \text{ секунд}$); общее время полёта космического аппарата, стартующего с минимальной скоростью, от поверхности Земли до Венеры составит $v_{E2} = 2,82526 \text{ рад} = (2,82526 \text{ рад} \times 365,2564 \text{ суток}) / 2\pi = 164,239036 \text{ суток} \approx 5 \text{ месяцев } 14 \text{ суток } 5 \text{ часов } 44 \text{ минуты } 13 \text{ секунд}$ [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ


1. Уравнение (1) представляет собой векторное нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка, но с одной неизвестной функцией r , зависящей от одной независимой переменной v_E .
2. При сближении космического аппарата с поверхностью Луны (гравитационный манёвр, или гравитационная праща) происходит увеличение скорости космического аппарата относительно Солнца, которое позволяет долететь до Венеры с минимальной скоростью старта.
3. Минимальное время одноимпульсного полёта космического аппарата при минимальной скорости старта (11 401 м/с) от Земли до Венеры составляет $v_{E2} = 164,239036 \text{ суток} \approx 5 \text{ месяцев } 14 \text{ суток } 5 \text{ часов } 44 \text{ минуты } 13 \text{ секунд}$.


Список литературы

1. Рой А. Движение по орбитам [Текст]. — М.: Мир, 1981. — 544 с.
2. Перов Н. И. О небесных телах, пересекающих орбиты Марса, Земли и Луны / Н. И. Перов // Материалы Международной конференции «Чтения Ушинского» физико-математического факультета. — Ярославль: РИО ЯГПУ, 2017. — 280 с.
3. Параметры планет // National Aeronautics and Space Administration. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/> (дата обращения: 22.12.2021).
4. Шупляк В. И. Астрономия / В. И. Шупляк, М. Б. Шундалов, А. П. Клищенко, В. В. Малышиц. — Минск: Вышэйшая школа, 2016. — 310 с.
5. Период вращения планет // Солнечно-земная физика. Справочник МГУ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://space.msu.ru/spravka/sinodic.htm> (дата обращения: 29.12.2021).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ И СКОРОСТЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПО ТРАЕКТОРИИ «ЗЕМЛЯ — ЛУНА — МАРС»

 **Н. Ю. Исаченков**

 ЯГПУ имени К. Д. Ушинского,
МОУ «Средняя школа № 91 «ИнТех»

 isnickjust@gmail.com

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе исследуется движение космического аппарата, стартующего с поверхности Земли с разными скоростями, в рамках задачи пяти тел «Солнце — Земля — Луна — Марс — тело с ничтожно малой массой» с тесным сближением с поверхностью Луны, а также достижением планеты Марс.

Цель: подбор начальных условий положений Земли, Луны, Марса и возможных начальных скоростей космического аппарата для перелёта космического аппарата с Земли к Марсу за определённое время.

Актуальность: Марс — одна из близлежащих планет. Всё чаще с нашей планеты запускаются космические аппараты для различных целей, в том числе и на Марс. Длительность перелёта на Марс имеет важное значение. Например, длительное нахождение человека в космическом пространстве нанесёт серьёзный урон здоровью. Поэтому необходимо разрабатывать различные способы перелёта на Марс, как быстрые (для человека), так и минимально затратные (для доставки полезного груза). Одноимпульсный полёт со сближением с поверхностью Луны позволит увеличить скорость космического аппарата относительно Солнца и быстрее достичь Марса, а также снизить расходы топлива, а значит, снизить и финансовые расходы на перелёт.

Используемые методы: компьютерная алгебра (система MAPLE 17); проведение численных экспериментов; численное интегрирование дифференциальных уравнений методом Рунге — Кутты.

Новизна: определение начальной скорости и начальных положений планет для достижения космическим аппаратом, стартующим с Земли, планеты Марс за определённое время.

Научно-практическое значение: результаты работы могут быть использованы в практике межпланетных перелётов, а также в научно-исследованиях

тельской, учебной и методической работе преподавателей астрономии.

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ

Представим векторное дифференциальное уравнение движения тела с ничтожно малой массой в форме (1) — с одной независимой переменной v_E [1].

$$\left(\frac{d^2\mathbf{r}}{dv_E^2}\right)\omega_E^2 = -\frac{Gm_S\mathbf{r}}{r^3} - \frac{Gm_E(\mathbf{r}-\mathbf{r}_E)}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_E|^3} - \frac{Gm_M(\mathbf{r}-\mathbf{r}_E-\mathbf{r}_{EM})}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_E-\mathbf{r}_{EM}|^3} - \frac{Gm_A(\mathbf{r}-\mathbf{r}_A)}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_A|^3}. \quad (1)$$

Здесь \mathbf{r} , \mathbf{r}_E , \mathbf{r}_A — гелиоцентрические радиус-векторы космического аппарата, Земли и Марса соответственно. \mathbf{r}_{EM} — геоцентрический радиус-вектор Луны. m_S , m_E , m_M и m_A — массы Солнца, Земли, Луны и Марса соответственно. v_E — средняя долгота Земли, ω_E — угловая скорость орбитального движения Земли, равномерно вращающейся по круговой орбите вокруг Солнца [2]. Орбиты Луны и Марса также считаем круговыми, а их средние долготы пропорциональны v_E . В данной небесномеханической модели v_M , v_A — средние долготы Земли, Луны и Марса соответственно. G — гравитационная постоянная. Радиусы Земли, Луны и Марса равны соответственно:

$$R_E = r_E = 6371 / (149597888,999) \text{ а. е.} = 0,00004258749935 \text{ а. е.},$$

$$R_M = r_M = (1737.4) / (149597888,999) \text{ а. е.} = 0,00001161380025 \text{ а. е.},$$

$$R_A = r_A = (3389.5) / (149597888,999) \text{ а. е.} = 0,00002265740528 \text{ а. е.} [3].$$

НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ, РАСЧЁТЫ

Начало отсчёта средних долгот рассматриваемых тел совпадает с начальным положением этих тел. Используется следующая система единиц измерений: единица длины соответствует 1 астрономической единице, единица массы равна массе Солнца, единица времени равна 1 звёздному году, v_E , v_M , v_A измеряются в радианах [2].

dV_{ESKE} — начальная скорость космического аппарата с поверхности Земли относительно Солнца, представляет из себя сложение скоростей Земли относительно Солнца и космического аппарата относительно Земли. $dV_{ESKE} = dV_{ES} + dV_{KE}$, где dV_{ES} — скорость Земли относительно Солнца, dV_{KE} — начальная скорость космического аппарата относительно Земли.

Подберём такие начальные условия средних долгот Луны и Марса, при которых космический аппарат, стартующий с Земли, будет иметь минимальную начальную скорость и долетит до Марса. Тогда для начальных условий, равных: $v_{E0} = 0$ рад, $v_{M0} = 2,230985$ рад, $v_{A0} = 1,002$ рад, $x_0 = 1 + R_E$ а. е., $y_0 = 0$ а. е., $dV_{ES} = 29780$ м/с, $dV_K = 11\,847$ м/с, траектория космического аппарата представлена на Рис. 1 [3]. Изменение расстояния между Солнцем и космическим аппаратом (в зависимости от v_E) показано на Рис. 2. Ми-

нимальное расстояние между Луной и космическим аппаратом (в зависимости от v_E) показано на Рис. 3. Минимальное расстояние между Марсом и космическим аппаратом (в зависимости от v_E) показано на Рис. 4.

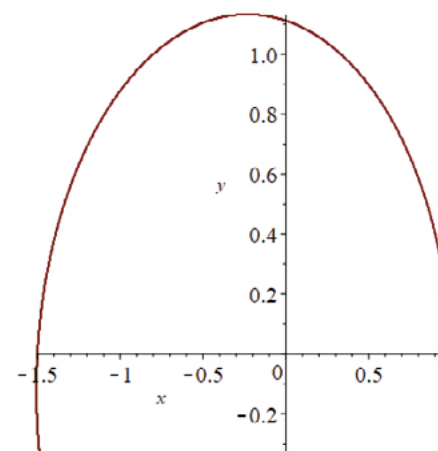


Рис. 1. Траектория движения космического аппарата относительно Солнца. $v_{E\max} = 4,43747$ рад — максимальное значение средней долготы Земли.

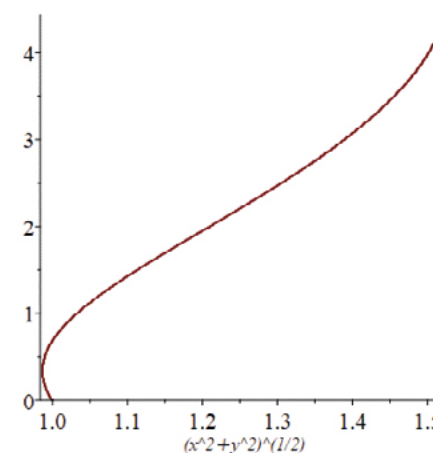


Рис. 2. Расстояние между Солнцем и космическим аппаратом в астрономических единицах. $v_{E\max} = 4,43747$ рад — максимальное значение средней долготы Земли.

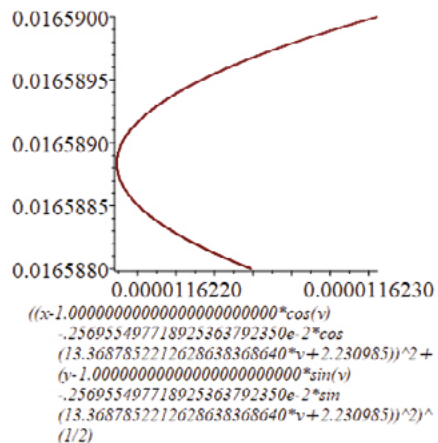


Рис. 3. Расстояние между Луной и космическим аппаратом. Минимальное расстояние равно 0,0000116217 а. е. ($\gg R_M$) при $v_{E11} \approx 0,0165888$ рад.

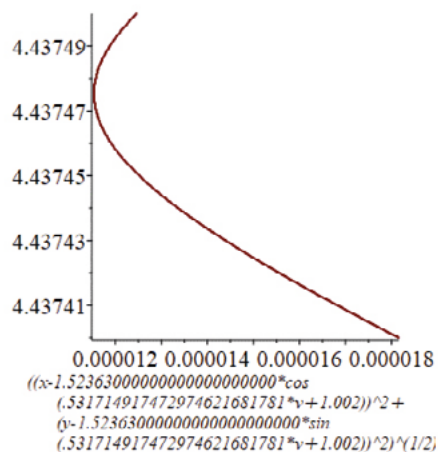


Рис. 4. Расстояние между Марсом и космическим аппаратом. Космический аппарат долетит до Марса через $v_{E21} \approx 4,43747$ рад.

Вычислим последовательно вторую и третью космическую скорости для тел, находящихся вблизи поверхности Земли.

$$u_2 = \sqrt{\frac{2Gm_E}{R_E}}$$

где u_2 — вторая космическая скорость, G — гравитационная постоянная.

$$u_2 = \sqrt{\frac{2 \times 6,6743 \times 10^{-11} \times 5,9722 \times 10^{24}}{6371 \times 10^3}} = 11186,16519734622 \frac{M}{c}$$

$$u_3 = \sqrt{(\sqrt{2} - 1) \times u^2 + u_2^2}$$

где u_3 — третья космическая скорость, u — скорость Земли относительно Солнца.

$$u_3 = \sqrt{(\sqrt{2} - 1) \times 29780^2 + 11186,16519734622^2} \approx 16652,01 \frac{M}{c}$$

Подберём такие начальные условия средних долгот Луны и Марса, при которых космический аппарат, стартующий с Земли с третьей космической скоростью, сблизится с поверхностью Луны и долетит до Марса. Для начальных условий, равных: $v_{E0} = 0$ рад, $v_{M0} = 1,75876$ рад, $v_{A0} = 0,71663$ рад, $x_0 = 1 + R_E$ а. е., $y_0 = 0$ а. е., $dV_{ES} = 29780$ м/с, $dV_{KE} = 16652,01$ м/с, траектория космического аппарата представлена на Рис. 5 [3]. Изменение расстояния между Солнцем и космическим аппаратом (в зависимости от v_E) показано на Рис. 6. Минимальное расстояние между Луной и космическим аппаратом (в зависимости от v_E) показано на Рис. 7. Минимальное расстояние между Марсом и космическим аппаратом (в зависимости от v_E) показано на Рис. 8.

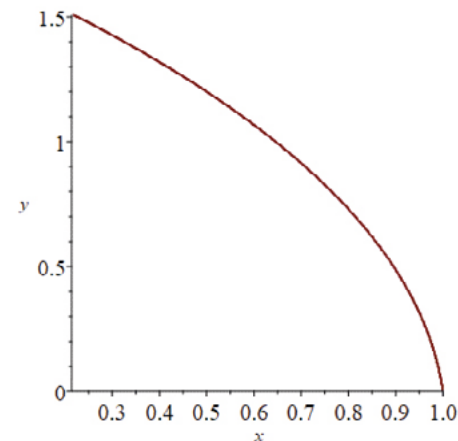


Рис. 5. Траектория движения космического аппарата относительно Солнца. $v_{Emax} = 1.335415$ рад — максимальное значение средней долготы Земли.

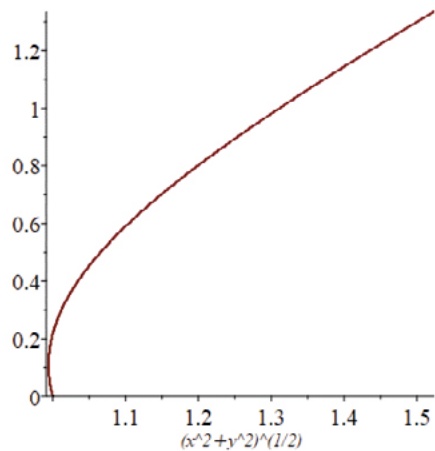


Рис. 6. Расстояние между Солнцем и космическим аппаратом в астрономических единицах. $v_{E_{max}} = 1.335415$ рад — максимальное значение средней долготы Земли.

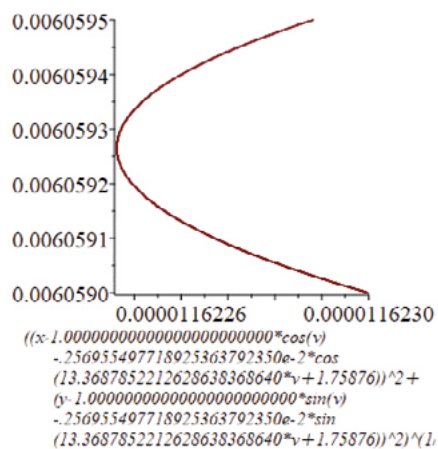


Рис. 7. Расстояние между Луной и космическим аппаратом. Минимальное расстояние равно 0.00001162245 а. е. ($\gg R_M$) при $v_{E12} \approx 0.00605925$ рад.

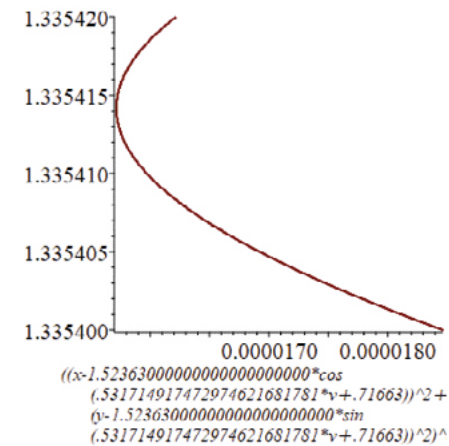


Рис. 8. Расстояние между Марсом и космическим аппаратом. Космический аппарат долетит до Марса через $v_{E22} \approx 1.335415$ рад.

Теперь подберём такие начальные условия средних долгот Луны и Марса, а также начальную скорость космического аппарата, при которых космический аппарат, стартующий с Земли, сблизится с поверхностью Луны и долетит до Марса примерно за месяц. Для начальных условий, равных: $v_{E0} = 0$ рад, $v_{M0} = 1,56065$ рад, $v_{A0} = 0,68039$ рад, $x_0 = 1 + R_E$ а. е., $y_0 = 0$ а. е., $dV_{ES} = 29\,780$ м/с, $dV_{KE} = 42\,000$ м/с, траектория космического аппарата представлена на Рис. 9 [3]. Изменение расстояния между Солнцем и космическим аппаратом (в зависимости от v_E) показано на Рис. 10. Минимальное расстояние между Луной и космическим аппаратом (в зависимости от v_E) показано на Рис. 11. Минимальное расстояние между Марсом и космическим аппаратом (в зависимости от v_E) показано на Рис. 12.

Зная угол, на который повернулась Земля относительно старта космического аппарата с поверхности Земли, можно посчитать: время, за которое космический аппарат, стартующий с минимальной скоростью, приблизится к поверхности Луны ($v_{E1} = 0,0165888$ рад = $(0,0165888$ рад $\times 365,2564$ суток) / $2\pi = 0,964346119$ суток ≈ 23 часа 8 минут 39.5 секунды); время, за которое космический аппарат, стартующий с минимальной скоростью, долетит до Марса после сближения с поверхностью Луны ($v_{E21} - v_{E11} = 4,43747$ рад - $0,0165888$ рад = $4,4208812$ рад = $(4,4208812$ рад $\times 365,2564$ суток) / $2\pi = 256,996264$ суток ≈ 8 месяцев 16 суток 23 часа 54 минуты 37 секунд); общее время полёта космического аппарата, стартующего с минимальной скоростью, от поверхности Земли до Марса составит $v_{E21} = 4,43747$ рад = $(4,43747$ рад $\times 365,2564$ суток) / $2\pi = 257,96061$ суток ≈ 8 месяцев 17 суток 23 часа 3 минуты 17 секунд; время, за которое космический аппа-

рат, стартующий с третьей космической скоростью, приблизится к поверхности Луны ($v_{E12} = 0,00605925 \text{ рад} = (0,00605925 \text{ рад} \times 365,2564 \text{ суток}) / 2\pi = 0,352238512 \text{ суток} \approx 8 \text{ часов } 27 \text{ минут } 13 \text{ секунд}$); время, за которое космический аппарат, стартующий с третьей космической скоростью, долетит до Марса после сближения с поверхностью Луны ($v_{E22} - v_{E12} = 1,335415 \text{ рад} - 0,00605925 \text{ рад} = 1,32935575 \text{ рад} = (1,32935575 \text{ рад} \times 365,2564 \text{ суток}) / 2\pi = 77,2785891 \text{ суток} \approx 2 \text{ месяца } 17 \text{ суток } 6 \text{ часов } 41 \text{ минута } 10 \text{ секунд}$); общее время полёта космического аппарата, стартующего с третьей космической скоростью, от поверхности Земли до Марса составит $v_{E22} = 1,335415 \text{ рад} = (1,335415 \text{ рад} \times 365,2564 \text{ суток}) / 2\pi = 77,6308276 \text{ суток} \approx 2 \text{ месяца } 17 \text{ суток } 15 \text{ часов } 8 \text{ минут } 23,5 \text{ секунды}$; время, за которое космический аппарат, стартующий со скоростью 42 км/с, приблизится к поверхности Луны ($v_{E13} = 0,001886 \text{ рад} = (0,001886 \text{ рад} \times 365,2564 \text{ суток}) / 2\pi = 0,109637634 \text{ суток} \approx 2 \text{ часа } 37 \text{ минут } 53 \text{ секунды}$); время, за которое космический аппарат, стартующий со скоростью 42 км/с, долетит до Марса после сближения с поверхностью Луны ($v_{E23} - v_{E13} = 0,553083 \text{ рад} - 0,001886 \text{ рад} = 0,551197 \text{ рад} = (0,551197 \text{ рад} \times 365,2564 \text{ суток}) / 2\pi = 32,0423833 \text{ суток} \approx 1 \text{ месяц } 2 \text{ суток } 1 \text{ часа } 1 \text{ минута } 2 \text{ секунды}$); общее время полёта космического аппарата, стартующего со скоростью 42 км/с, от поверхности Земли до Марса составит $v_{E23} = 0,553083 \text{ рад} = (0,553083 \text{ рад} \times 365,2564 \text{ суток}) / 2\pi = 32,1520209 \text{ суток} \approx 1 \text{ месяц } 2 \text{ суток } 3 \text{ часа } 38 \text{ минут } 55 \text{ секунд}$ [5].

Сравнивая эти три траектории перелёта с Земли к Марсу, можно сделать вывод о том, что они имеют свои преимущества и недостатки.

При полёте к Марсу с начальной скоростью 11 847 м/с за примерно 258 суток преимуществом будет низкий расход топлива и низкие финансовые затраты при условии, что на борту не окажется людей, иначе финансовые затраты увеличатся из-за долгого перелёта, так как придется брать на борт больше кислорода, еды, а также обеспечить длительную радиационную защиту на борту космического аппарата. Кроме того, преимуществом такого перелёта будет большая полезная нагрузка и маленькая скорость относительно Солнца при столкновении с космическим мусором. Недостатком такого полёта к Марсу является длительность в 258 суток.

При полёте к Марсу с начальной скоростью 42 км/с за примерно 32 суток преимуществом будет быстрый перелёт, что делает эту миссию более привлекательной для полёта людей на борту космического аппарата. Но при высокой начальной скорости будет меньше полезная нагрузка, а значит, удастся взять меньше полезного груза на борт космического аппарата, будут выше финансовые затраты из-за огромного расхода топлива, а также выше относительная скорость столкновения с космическим мусором, что может привести к повреждению космического аппарата и даже к нештатной разгерметизации летательного аппарата при определённых условиях.

При полёте к Марсу с начальной скоростью 16652,01 м/с за примерно 78 суток удастся сбалансировать все перечисленные ранее преимущества и недостатки перелётов.

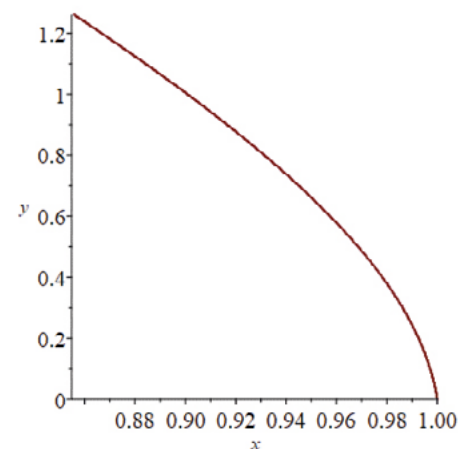


Рис. 9. Траектория движения космического аппарата относительно Солнца. $v_{E\max} = 0,553083 \text{ рад}$ — максимальное значение средней долготы Земли.

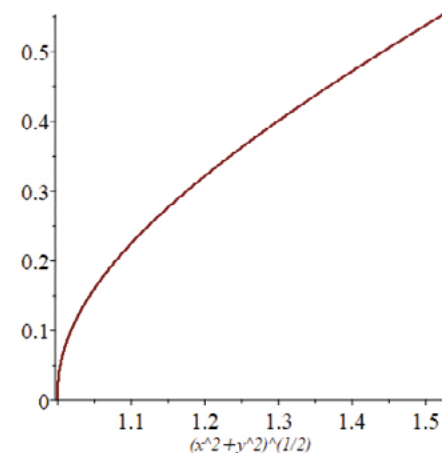


Рис. 10. Расстояние между Солнцем и космическим аппаратом в астрономических единицах. $v_{E\max} = 0,553083 \text{ рад}$ — максимальное значение средней долготы Земли.

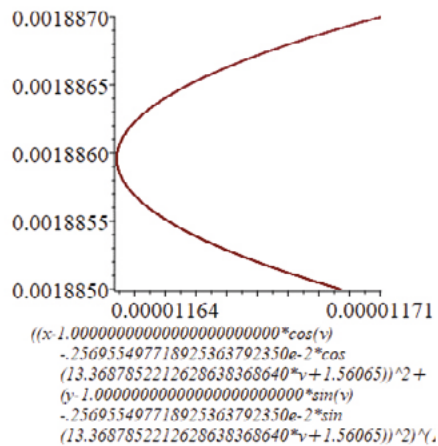


Рис. 11. Расстояние между Луной и космическим аппаратом.
Минимальное расстояние равно 0.000011625 а. е. (>> RM) при $v_{E13} \approx 0.001886$ рад.

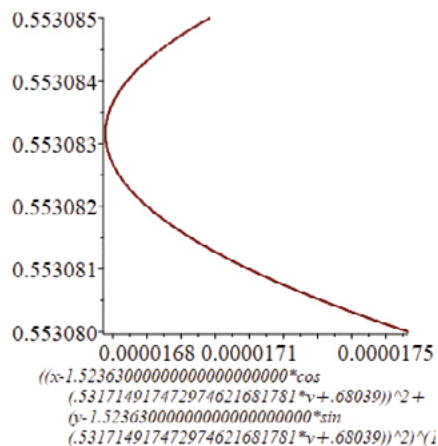


Рис. 12. Расстояние между Марсом и космическим аппаратом.
Космический аппарат долетит до Марса через $v_{E23} \approx 0.553083$ рад.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Уравнение (1) представляет собой векторное нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка, но с одной неизвестной функцией r , зависящей от одной независимой переменной v_E .


2. При сближении космического аппарата с поверхностью Луны (гравитационный манёвр, или гравитационная праща) происходит увеличение скорости космического аппарата относительно Солнца, которое позволяет достичь Марса быстрее.
3. Минимальное время одноимпульсного перелёта космического аппарата при минимальной скорости старта от Земли до планеты Марс составляет $v_{E21} = 257,96061$ суток ≈ 8 месяцев 17 суток 23 часа 3 минуты 17 секунд.
4. Время одноимпульсного перелёта космического аппарата, стартующего с третьей космической скоростью, от Земли до Марса составляет $v_{E22} = 9,0725477$ рад ≈ 1 год 5 месяцев 12 суток 3 часа 39 минут 12 секунд.
5. Начальная скорость, необходимая для одноимпульсного приближенно месячного перелёта до Марса космического аппарата, стартующего с Земли, составляет 42 км/с.


Список литературы

1. Рой А. Движение по орбитам [Текст]. — М.: Мир, 1981. — 544 с.
2. Перов Н. И. О небесных телах, пересекающих орбиты Марса, Земли и Луны / Н. И. Перов // Материалы Международной конференции «Чтения Ушинского» физико-математического факультета. — Ярославль: РИО ЯГПУ, 2017. — 280 с.
3. Параметры планет // National Aeronautics and Space Administration. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/> (дата обращения: 22.12.2021).
4. Шупляк В. И. Астрономия / В. И. Шупляк, М. Б. Шундалов, А. П. Клищенко, В. В. Малышиц. — Минск: Вышэйшая школа, 2016. — 310 с.
5. Период вращения планет // Солнечно-земная физика. Справочник МГУ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://space.msu.ru/spravka/sinodic.htm> (дата обращения: 29.12.2021).

ОБРАБОТКА ФОТОИЗОБРАЖЕНИЙ СОЛНЦА С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

 **М. А. Самадов, И. И. Хайруллин, Е. В. Мещеринов**

 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва»

 Mahdi9911@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

Солнце таит в себе много тайн и загадок. До сих пор человечеству не удалось открыть все его тайны. На Земле и в космосе происходит ежедневный мониторинг активности Солнца, т. к. человечество стало более восприимчиво к солнечной активности из-за огромного количества космических аппаратов (КА) на орбите и работы человека в МКС. Кроме того, вся современная техника зависит от космической погоды.

ОБУЧАЮЩИЕ ВЫБОРКИ

Учёные не успевают обрабатывать большой массив данных астрономических фотоизображений, которые получают из астрономических КА; чтобы решить данную задачу, был выбран метод обработки астрономических фотоизображений, например Солнца, с помощью искусственного интеллекта (ИИ), то есть нейросети.

Подготавливаются фотоизображения для обучения нейросети из базы данных орбитальной солнечной обсерватории SOHO. Эти данные служат выборкой для обучения распознавания изображения Солнца, рассчитывается количество пятен и рассчитываются числа Вольфа [1].

ПОДГОТОВКА ДАННЫХ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОСЕТИ

Использованы данные космических аппаратов NASA и ESA для прогнозирования космической погоды и обучения свёрточной нейронной сети для расчёта числа Вольфа.

Подготовка данных для обучения нейросети:

Загружается фотоизображение из BMP-файла в виде растрового изображения и нормализуется (Рис. 1а);

Далее инвертируется (Рис. 1б);

Создаются маски (Рис. 1в);

Наносятся маски на изображение (Рис. 1г);

Применяется «фильтр яркости» (Рис. 1д).

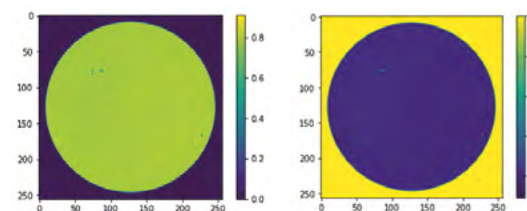


Рис. 1а

Рис. 1б

$$Image_{i,j} = 1 - Image_{i,j}$$

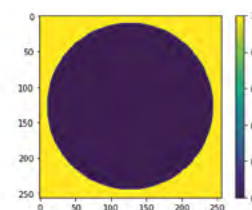


Рис. 1в

$$Mask_{i,j} = \{0, (i - 127) + (j - 127) < 120^2; 1, (i - 127) + (j - 127) \geq 120^2\}$$

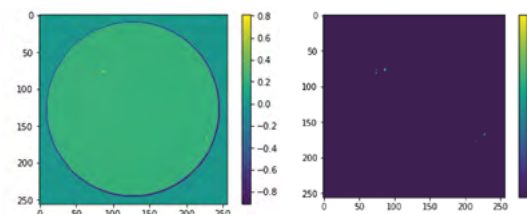


Рис. 1г

Рис. 1д

$$Image_{i,j} = Image_{i,j} - Mask_{i,j}$$

$$Image_{i,j} = \{0, Image_{i,j} < 0,4; Image_{i,j}, Image_{i,j} \geq 0,4\}$$

Правая шкала показывает «яркость».

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ

График показывает точность обработки фотоизображения Солнца.

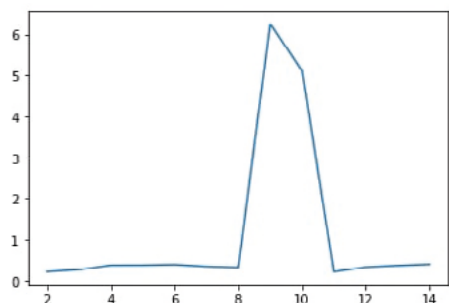


Рис. 2. Горизонтальная ось показывает номер изображения тестирующей выборки, а вертикальная ось показывает относительную погрешность (%).

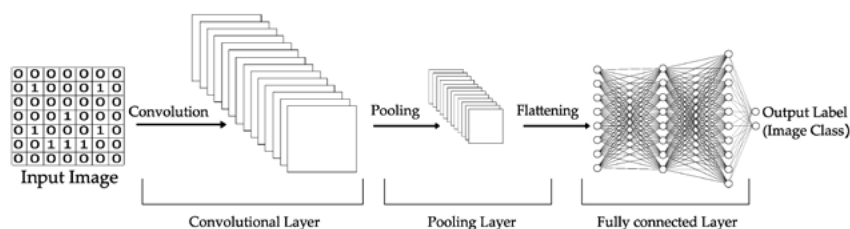


Рис. 3. Изображение работы свёрточной нейросети.

В работе используются программы Python и Tensorflow с Keras для изучения свёрточной нейронной сети и вычисления числа Вольфа (Табл. 1). Для тестирования отобрали 15 фотографий SOHO с периодом 17.09.2021 г. — 1.11.2021 г.

Таблица 1

Рассчитанные нейросетью числа Вольфа

Номер изображения	Реальное рассчитанное число Вольфа	Число Вольфа, рассчитанное нейросетью
1	0	-0,019997
2	0	0,3981531
3	22	21,934916
4	40	39,857460
5	58	57,718311
6	48	47,752430

7	58	57,681644
8	48	47,693153
9	33	32,811920
10	25	26,407005
11	28	26,407005
12	30	29,907497
13	51	50,683033
14	46	45,708675
15	46	45,733906

Код и набор данных доступны на GitHub [3].

ВЫВОД

Данный метод обработки фотоизображений Солнца с помощью нейросети позволяет сократить время на обработку данных и автоматизировать процесс обработки данных как с КА, так и с архивных данных, а также быстро оценить солнечную активность выраженная в числах Вольфа.


Работа выполнена в рамках проекта 0777-2020-0018, финансируемого из средств государственного задания победителям конкурса научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России.

Список литературы

1. SOHO [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://sohowww.nascom.nasa.gov/> (дата обращения: 14.02.2022).
2. ESA [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Technology_CubeSats (дата обращения: 14.02.2022).
3. GitHub [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://github.com/razbiralochka/SolarResearchCubeSat> (дата обращения: 14.02.2022).
4. NASA International SPACE APPS Challenge [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://2021.spaceappschallenge.org/challenges/statements/unlocking-the-secrets-of-the-sun/teams/eclipse-2/project> (дата обращения: 14.02.2022).


МОЛОДОЕ СЕМЕЙСТВО АСТЕРОИДОВ АДЕЛАИДА – ПРИМЕР ВОЗМОЖНОГО КАСКАДНОГО РАСПАДА


 **Е. Плавалова**

 **Математический институт Словацкой академии наук
Братислава, Словакия**

 plavalova@komplekt.sk

 **А. Е. Розаев**

 **Региональный научно-образовательный математический центр
«Центр интегрируемых систем»
Ярославль, Россия**

 hegem@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

Семейство астероидов Аделаида, одно из крупнейших молодых семейств, находящееся во внутренней области пояса астероидов, состоит из большого астероида (525) Аделаида диаметром около 10 километров и пятидесяти меньших астероидов с диаметрами около 0,5 километра. Уже первые результаты численного интегрирования показывают большую вероятность каскадного распада. В этой работе мы покажем начальные результаты исследования семейства Аделаида.

МЕТОД ЧИСЛЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ

Для аппроксимации уравнения движения орбиты астероидов семейства Аделаида мы использовали интегратор REBOUND [1]. Учитывая все планеты солнечной системы и Плутон, мы посчитали на временном интервале 800 тыс. лет в прошлое изменения орбит для всех (пятидесяти одного) астероидов семейства Аделаида (не учитывая их масс). В этой интеграции мы учитывали только гравитационные эффекты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ

Анализируя результаты эволюции по результатам численного интегрирования, мы нашли, что много астероидов находится в области резонан-

са (Рис. 1). Этот факт усложняет анализ возможных столкновений астероидов. Из результатов интегрирования мы эмпирически получили границы резонанса от 2,2449 а. е. до 2,2454 а. е.

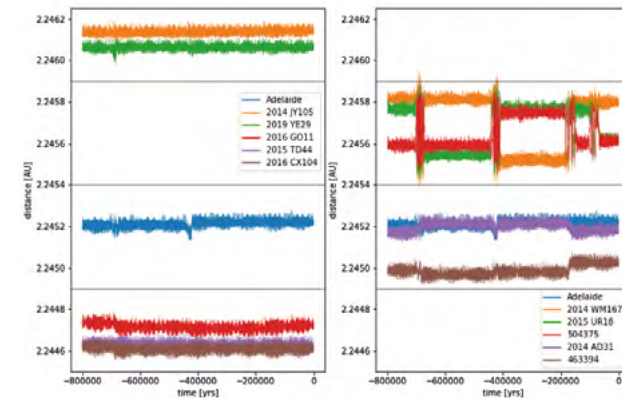


Рис. 1. Примеры эволюции большой полуоси нескольких астероидов семейства Аделаида. На левом рисунке астероиды, которые находятся вне области резонанса, и для сравнения эволюции большой полуоси Аделаиды. На правом рисунке астероиды, которые находятся внутри области резонанса.

БЛИЗКИЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ – ВОЗМОЖНЫЙ КАСКАДНЫЙ РАСПАД

Для первого анализа результаты численного интегрирования мы выводили с шагом 10 лет. Результаты показаны на Рис. 2 и Рис. 3. Очевидно, разные группы астероидов семейства сближаются с родительским телом в разные эпохи.

ВЫВОДЫ

В настоящей статье мы показали некоторые интересные детали динамики молодого семейства астероидов Аделаида. Уже первые результаты численного интегрирования показывают большую вероятность каскадного распада. Отмечается также значительное влияние резонансов на динамику этого семейства.

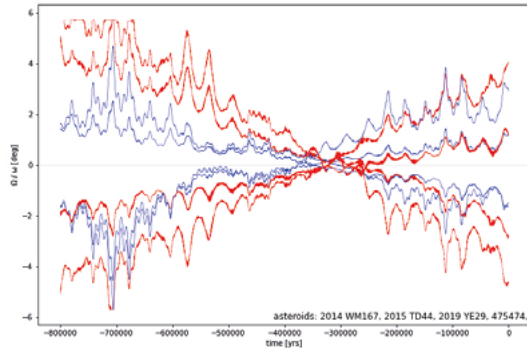


Рис. 2. Эволюция разницы долготы перигелия Аделаиды и астероида (красная линия) и эволюция разницы долготы восходящего узла Аделаиды и астероида (голубая линия) для астероидов 2014 WM167, 2015 TD44, 2019 YE29 и 2006 SZ152. Пересечение приблизительно в -320 тыс. лет указывает на возможность тесного сближения астероида Аделаиды и этих тел.

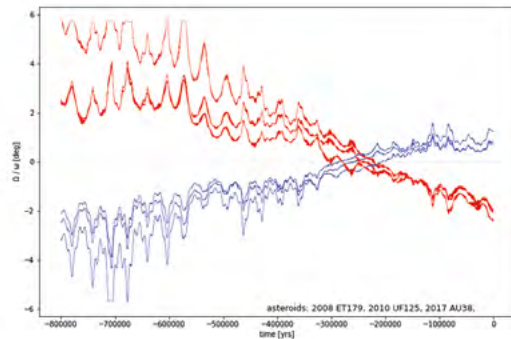


Рис. 3. Эволюция разницы долготы перигелия Аделаиды и астероида (красная линия) и эволюция разницы долготы восходящего узла Аделаиды и астероида (голубая линия) для астероидов 2008 ET179, 2010 UF125 и 2017 AU38. Пересечение приблизительно в -235 тыс. лет указывает на возможность тесного сближения Аделаиды и этих тел.


Список литературы


1. REBOUND Symplectic integrators (WHFast, SEI, LEAPFROG, EOS). Режим доступа: <https://rebound.readthedocs.io/en/latest/> (дата обращения: 14.02.2022).

АСТРОНОМИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ И ПРОСВЕЩЕНИЕ




САМАРСКАЯ ОБЛАСТНАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ШКОЛА: 20 ЛЕТ НА БЛАГО ШКОЛЬНОГО АСТРОНОМИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ И НЕ ТОЛЬКО

 **Ю. П. Филиппов**

 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва»

 **Л. Н. Белозерская**

 Муниципальное бюджетное учреждение дополнительного образования «Центр детского творчества “Ирбис”» городского округа Самара

ВВЕДЕНИЕ

Астрономия как наука, сфера человеческой деятельности и область образования имеет высокую социальную значимость в мире. Она является одной из наиболее быстро развивающихся точных наук XXI века [1].

Между тем в отношении предмета «Астрономия» в российских школах в 2008 году сложилась непростая ситуация: Министерством образования и науки РФ данный предмет был официально исключён из перечня школьных предметов, обязательных для изучения в школах [2]. Официальной причиной исключения стало банальное отсутствие в РФ учебника базового курса астрономии, отвечающего всем современным требованиям.

Однако Министерство просвещения РФ признавало и признаёт важную роль данного предмета в процессе обучения школьников и потому официально поддерживает проведение ежегодной Всероссийской предметной олимпиады по астрономии [3].

Вернуть обязательное астрономическое образование в школы попыталась министр просвещения РФ О. Ю. Васильева и её команда. Осенью 2016 года приказом Минобрнауки предмету «Астрономия» вернули статус обязательного школьного предмета начиная с сентября 2017 года.

Важно отметить, что с 2008 по 2017 год предмет «Астрономия» изучали обучающиеся лишь некоторых школ, лицеев и гимназий Самарской области, однако преимущественно эпизодически — в виде элективного курса, спецкурса, кружка.

Возвращение астрономии в школу породило новые серьёзные проблемы: отсутствие новых учебников базового курса в школе или значительные задержки с их приобретением, отсутствие задачника, соответствующего актуальным проблемам астрономии и тематическому планированию этих учебников, низкий или вовсе неудовлетворительный уровень квалификации педагогических кадров в школе, дефицит дополнительных методических материалов, демонстрационных моделей и др.

Из-за медленного процесса поэтапного решения указанных проблем многие школы и лицеи Самарской области воспользовались возможностью оттянуть начало изложения астрономии в школе вплоть до начала 2018 года. Фактически предмет «Астрономия» стал лишь полугодовым учебным курсом, загнанным в угол. С одной стороны, изучать астрономию надо, и не только потому, что это диктовалось приказом Минобрнауки РФ, но и хотя бы потому, что задача № 24 любого варианта ЕГЭ по физике в период 2018–2021 годов являлась чисто астрономической, её решение требовало обширных знаний школьников по данному предмету. Кроме того, этот предмет будет полезным для многих абитуриентов, поступающих в вузы на технические специальности.

С другой стороны, изучить астрономию за последние полгода 11 класса должным образом не представляется возможным. Деятельность каждого одиннадцатиклассника и учителя-предметника всё весеннее полугодие «заточена» главным образом на подготовку к ЕГЭ по профильным предметам, среди которых астрономии нет! И потому на изучение астрономии у ребят банально не хватает времени.

Кроме того, уроки астрономии часто «приносят в жертву» в пользу регулярных мониторингов и внеплановых проверочных работ. В итоге предмет «Астрономия» преподаётся в школах бегло, поверхностно, не развёрнуто, а его статус среди школьников и даже учителей — это буферный предмет второго эшелона важности. Кроме того, ограниченность времени занятий (как правило, 1–2 урока в неделю) не позволяет проводить планомерную подготовку учащихся к олимпиадам по астрономии в школах.

Многие эксперты в сфере астрономического образования полагают, что дополнительное (внешшкольное) астрономическое образование школьников может существенно способствовать решению большинства из выше обозначенных проблем [4].

С целью развития астрономического образования в Самарской области, по заданию Министерства образования и науки Самарской области, на базе ГБОУ ДО СО «Самарский Дворец детского и юношеского творчества» в 2002 году организована Самарская областная астрономическая школа (Астрошкола) дистанционной формы обучения для учащихся 8–11 классов, которая успешно функционирует по настоящее время.



Рис. 1. Сотрудники Самарской областной астрономической школы 2016 года и педагоги, сопровождающие детей (слева направо): Бахтинов П. И., Кулешова М. А., Филиппов Ю. П., Ананченко О. В. и Алексин А. Ю.



Рис. 2. Слева — приглашённый специалист Астрошколы — Фабрика С. Н., справа — регулярный педагог Астрошколы — Асташин В. Н.

В 2011 году Астрошкола претерпела значительные кадровые и структурные изменения. Её руководителем был назначен Андрей Юрьевич Алексин — старший методист ГБОУ ДО СО СДДЮТ. На должность научного руководителя Астрошколы был приглашен Юрий Петрович Филиппов — доцент кафедры общей и теоретической физики Самарского университета, кандидат физико-математических наук. Регулярными педагогами Астрошколы являются Павел Иванович Бахтинов — ведущий инженер кафедры лазерных и биотехнических систем Самарского университета, астроном-любитель с огромным опытом астрономических наблюдений, и Ольга Владимировна Ананченко — заместитель директора Самарско-

го авиационного лицея № 135, учитель физики и астрономии с большим стажем. Кроме того, регулярными почетными гостями Астрошколы являются Сергей Николаевич Фабрика — ведущий заведующий лабораторией Специальной астрофизической обсерватории РАН, доктор физико-математических наук, профессор, и Владимир Николаевич Асташин — учитель физики и астрономии с большим стажем Самарского авиационного лицея № 135 (с 2020 года — регулярный педагог Астрошколы). Большую поддержку коллективу Астрошколы регулярно оказывают педагоги-воспитатели, сопровождающие коллективы учащихся.

С сентября 2016 года по декабрь 2019 года руководителем Астрошколы была Ольга Геннадьевна Алексеева — старший методист ГБОУ ДО СО СДДЮТ.

В результате реформирования системы дополнительного школьного образования Самарской области, Самарская областная астрономическая школа в январе 2020 года сменила место дислокации и образовательное учреждение: с указанного момента и по настоящее время она располагается на базе ГБОУ СО «Самарский региональный центр для одарённых детей» и подчиняется непосредственно руководству центра.

Благодаря упорной и плодотворной работе этих людей и прежде всего её руководителя Самарская областная астрономическая школа к настоящему моменту сделала большой рывок в развитии. Более того, Астрошкола уже сегодня сделала значительный вклад в становление и развитие школьного астрономического образования как Самарской области, так и других регионов РФ [4].

АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОЛИМПИАДА SamRAS

С 2011 по 2019 год Самарская областная астрономическая школа проводила ежегодную заочную региональную олимпиаду (SamRAS) для учащихся 8–11 классов (представителей как Самарской области, так и других регионов РФ) по астрономии и космонавтике в два тура. Первый и второй туры олимпиады проводились для всех зарегистрированных участников с 15 октября по 15 января и с 15 февраля по 15 мая соответственно. Участникам предлагались к самостоятельному решению 18 оригинальных задач по астрономии и космонавтике. При решении задач они могли использовать любые достоверные сторонние источники информации. Все задачи каждого релиза SamRAS были представлены тремя уровнями сложности: «Новичок» (уровень А), «Знаток» (уровень В), «Профи» (уровень С). Задания, оформленные согласно общим требованиям и присланные в указанные сроки в оргкомитет школы, проверялись экспертами. Результаты тура представлялись в виде рейтингов в каждой возрастной параллели (их две: 8–9 классы, 10–11 классы). По результатам двух туров олимпиады составлялся общий рейтинг, на основании которого проводился отбор

участников и их приглашение к участию в ежегодной очной профильной смене Астрошколы. Последняя традиционно (на протяжении всего срока существования Астрошколы) проводится в одном из самых живописных мест Самарской области, на территории национального парка «Самарская Лука», на базе ГБОУ ДОД ДООЦ «Жигули».



Рис. 3. Вид на Волгу и прибрежную зону национального парка «Самарская Лука» с вершины горы Стрельная — одной из самых высоких точек Жигулевских гор.



Рис. 4. Эволюция географии участников Астрошколы в период 2012–2017 гг.

Благодаря активной работе оргкомитета Астрошколы с 2012 по 2017 год география участников Астрошколы существенно расширилась. Если в 2012 году принимали участие представители лишь трёх субъектов Самарской области, то в 2017-м участники представляли уже четыре области и одну республику. За тот же период резко увеличилось количество регулярных участников Астрошколы от Самарской области, дошедших до заключительного этапа Всероссийской олимпиады школьников по астрономии, проводимой Министерством просвещения РФ. Среди участников также выросло количество призёров и победителей этого тура.

Так, в 2015 году сборная команда Самарской области насчитывала 11 человек, среди которых двое стали победителями олимпиады, а ещё два участника стали призёрами. Все эти ребята — завсегдаита Самарской Астрошколы. По итогам ВСОШ сборная команда Самарской области заняла третье место в общем командном зачёте, уступив лишь командам Москвы и Санкт-Петербурга. Этот результат и сегодня остаётся лучшим за всю историю участия команды Самарской области по астрономии в заключительном этапе.

«СМЕНА СОСТАВА»: ОЛИМПИАДА ОМОА НА СМЕНУ SamRAS

В 2019 году олимпиада SamRAS завершила свое существование. По инициативе Министерства образования и науки Самарской области (МОиН СО) в январе 2020 года учреждена Открытая межрегиональная олимпиада по астрономии имени Ф. А. Бредихина (ОМОА). Она сразу вошла в реестр олимпиад и конкурсов, поддерживаемых МОиН СО. Кроме того, благодаря работе оргкомитета Астрошколы и аналитического отделения ГБОУ СО СРЦОД данная олимпиада в 2021 году вошла в систему Государственных информационных ресурсов о лицах, проявивших выдающиеся способности.

Подобно SamRAS, ОМОА имеет два заочных отборочных тура для зарегистрированных участников 7–11 классов (в двух параллелях: 7–9 классы и 10–11 классы), которые проводятся с 15 октября по 30 ноября и с 15 февраля по 31 марта соответственно. В каждой возрастной параллели каждого тура заочного тура предлагается комплект из 10–12 задач двух уровней сложности: «Новичок» (уровень А), «Знаток» (уровень В). По результатам участия в двух отборочных турах составляется итоговый рейтинг лучших участников сезона олимпиады, которые приглашаются в СРЦОД на заключительный очный этап олимпиады. В рамках последнего предлагается комплект из шести задач (в каждой параллели) и дается четыре часа на их решение с использованием лишь выданных справочных данных. По результатам участия в трёх турах объявляются победители и призёры олимпиады, которые награждаются дипломами МОиН СО с подписью министра. Оргкомитет планирует в будущем развивать данную олимпиаду и ввести её в состав перечневых олимпиад РФ III уровня.

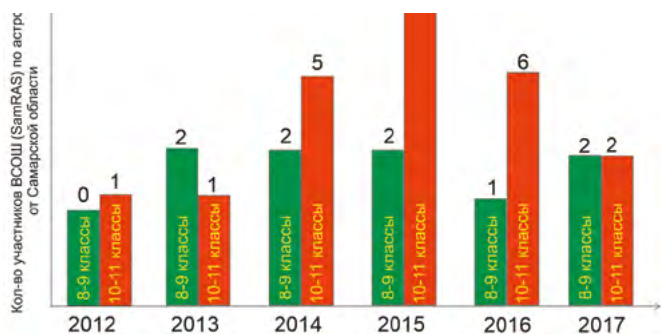


Рис. 5. Количество участников Астрошколы, принявших участие в заключительном этапе Всероссийской олимпиады школьников, проводимой Министерством образования и науки РФ.



Рис. 6. Сборная команда Самарской области 2015 года на заключительном этапе Всероссийской олимпиады по астрономии (г. Великий Новгород, Ленинградская обл.).

МЕТОДИЧЕСКАЯ РАБОТА АСТРОШКОЛЫ

С 2012 года оргкомитет Астрошколы ведет активную учебно-методическую работу. В частности, в рамках Астрошколы разработано подробное руководство участника олимпиады, рекомендации для подготовки и оформления научно-исследовательских работ, выдвигаемых на конкурс научно-исследовательских работ школьников Астрошколы по астрономии, астрофизике, космонавтике.

Здесь подготовлены и опубликованы 12 учебных пособий по астрономии, среди которых 9 задачников, один лабораторный практикум и

две книги, предназначенные для подготовки научно-практических работ школьников. Данные пособия активно используются учащимися и педагогами Самарской, Московской, Калининградской, Тамбовской, Челябинской, Новгородской областей на занятиях по астрономии и физике.

В настоящее время Астрошкола располагает официальным сайтом (<https://sites.google.com/site/samrasolimp/>) и ВК-группой (<https://vk.com/bredikhinolimp>).

Таким образом, Самарская областная астрономическая школа выполняет ключевую задачу поддержания и развития астрономического образования Самарской области; способствует подготовке учащихся к олимпиадам и конференциям по астрономии, обеспечению учащихся и педагогов специализированной литературой. Но самое главное: Астрошкола формирует адекватное действительности естественнонаучное мировоззрение школьников, прививая им интерес к астрономии, раскрывая все преимущества и особенности этой уникальной науки и предмета.





Рис. 7. Некоторые из учебных пособий Астрошколы, опубликованные в 2013–2021 гг. (автор — Филиппов Ю. П.).

Список литературы

1. Астрономия: век XXI // под ред. Сурдина В. Г. — М.: Век-2, 2015. — 608 с.
2. *Котеева М.* Почему «исчезла» астрономия. — ИА Спутник. Режим доступа: <http://sputnik-ossetia.ru/world/20150714/314627.html> (дата обращения: 26. 01.2022).
3. *Алексин А. Ю., Филиппов Ю. П.* Через тернии к звёздам. — Самарский внешкольник. — Самара: СДДЮТ, 2014. № 40.
4. *Филиппов Ю. П.* Роль Самарской областной астрономической школы в становлении школьного астрономического образования Самарской области. — Самарский внешкольник. — Самара: СДДЮТ, 2015. № 44.

АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ С УДАЛЁННЫМ ДОСТУПОМ

 **Н. И. Фомичев**

 **Ярославский государственный университет
имени П. Г. Демидова**

 **fomichev@uniyar.ac.ru**

Учебно-научная наблюдательная площадка создана в рамках проекта «Андромеда» совместно с Ярославским обществом любителей астрономии на базе физического факультета ЯрГУ имени П. Г. Демидова. Её главная задача — совершенствование работы в области преподавания астрономии и смежных дисциплин для школ, колледжей и вузов Ярославского региона и популяризация физики и астрономии.

На первом этапе площадка включает в себя купол, где установлен телескоп для проведения наблюдений, оборудование для регистрации и обработки результатов наблюдений. Все операции по взаимодействию с оборудованием выполняются в дистанционном режиме. В дальнейшем планируется её полная автоматизация. Активное участие в проекте будут принимать студенты физического и других факультетов ЯрГУ.

НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТЫ ОБСЕРВАТОРИИ

В своей деятельности площадка решает следующие задачи:

УЧЕБНЫЕ:

- выполнение практических и лабораторных работ по учебным дисциплинам бакалавриата и магистратуры факультета;
- выполнение курсовых и выпускных работы бакалавров и магистрантов. Тематика работ может быть связанной как непосредственно с проведением астрономических и астрофизических наблюдений и обработкой результатов этих наблюдений, так и с проектированием, изготовлением и испытанием различного оборудования для таких наблюдений; анализ, проектирование и разработка алгоритмов передачи данных и удалённого доступа к аппаратуре; отработка алгоритмов и методов цифровой обработки изображений;
- площадка обеспечит доступ на основе сетевых технологий, для выполнения практических работ по астрономии и другим есте-

ственнонаучным дисциплинам учеников и преподавателей системы среднего и среднего специального образования.

НАУЧНЫЕ:

- реализация проектов по изучению физики верхних слоёв атмосферы;
- реализация межфакультетских проектов и исследований, связанных с обработкой данных;
- возможность участвовать в различных проектах по распределённым автоматическим наблюдениям, слежениям за малыми телами Солнечной системы, слежение за звёздным небом.

МЕТОДИЧЕСКИЕ:

- на базе площадки планируется реализация образовательных программ школьного и дополнительного образования на основе технологий дистанционного доступа. Учителя и учащиеся получают дистанционный доступ к оборудованию для проведения практических занятий по естественнонаучным дисциплинам школьной программы и программ дополнительного обучения;
- на базе площадки планируется проведение курсов повышения квалификации работников среднего и высшего образования по вопросам методического сопровождения дисциплин физики, астрономии, астрофизики; использования сетевых технологий в процессе обучения, организации дистанционных методов обучения.

Таким образом, площадка предусматривает возможность значительному количеству пользователей решать в режиме удалённого доступа учебные и научные задачи.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКИ И ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Астрономический купол отечественного производства (ООО «Астрокупол», г. Пенза) выполнен из стеклопластика и имеет диаметр 2,15 м в комплектации Automatic. Это обеспечивает возможность управлять обсерваторией непосредственно с компьютера, а при наличии доступа в интернет — удалённо.

Всё оборудование, принимающее участие в непосредственной работе обсерватории, находится внутри купола.

На треноге с экваториальным клином располагается телескоп Meade LX-90 10" с световым диаметром 254 мм.

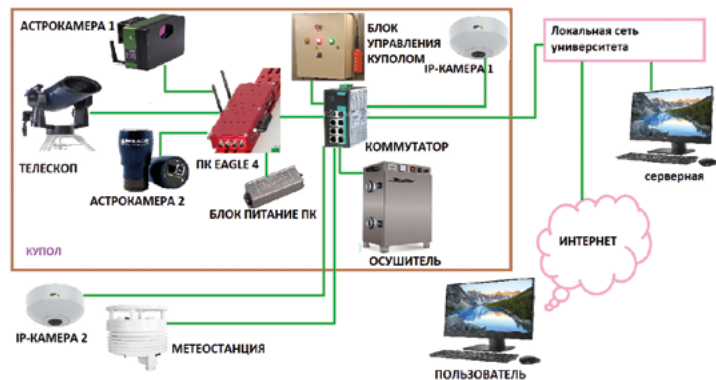


Рис. 1. Структурная схема наблюдательной площадки.

Для регистрации изображений астрономических объектов телескоп укомплектован камерой QHY16200A с колесом фильтров. В камере установлена 16 МПкс матрица формата APS-H (27,0 мм × 21,6 мм) KAF-16200 с размером пикселя 6 × 6 мкм.

Комплект фильтров позволяет получить как цветное изображение объекта (LRGB), так и композитное изображение с использованием узкополосных фильтров OIII, SII и H α (хабл-палитра). Комплект фильтров UBVRI дает возможность решать задачи фотометрии.

В качестве гидирующей применяется камера MEADE LPI-G ADVANCED. При необходимости эта камера устанавливается в качестве основной и используется для наблюдений объектов Солнечной системы.

Управление всем оборудованием и процессом наблюдений осуществляется с помощью специализированного компьютера Primaluce EAGLE 4. Компьютер оборудован большим количеством коммутируемых USB-портов и выводов (12v) для питания оборудования. EAGLE 4 установлен непосредственно на трубе телескопа. Это позволило избежать частых перегибов подводящих кабелей в процессе наблюдений.

Для визуального контроля состояния купола и ориентации телескопа установлены охранные IP-камеры. Внешняя камера позволяет контролировать состояние облачности. Купол укомплектован осушителем воздуха подкупольного пространства с гигрометром. Наличие метеостанции рядом с куполом позволит контролировать погодные условия для ведения наблюдений в зависимости от времени суток и при неблагоприятных условиях прекратить наблюдения.

Доступ наблюдателей к оборудованию осуществляется через локальную сеть университета.

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА НАБЛЮДЕНИЯ

Для работы обсерватории в режиме удалённого доступа используется программа NINA — Nighttime Imaging 'N' Astronomy. Эта программа является бесплатной, с открытым исходным кодом, и предназначена для комплексной автоматизации процесса наблюдений.

Программой поддерживается полный цикл операций для осуществления астрофотографических наблюдений: поиск объекта съёмки в удобном встроенном атласе, кадрирование, включение/выключение оборудования, выравнивание полярной оси, наведение телескопа на объект, plate solving-взаимодействие (уточнение наведения) с гидирующей программой для контроля гидирования и дизеринга, слежение купола за телескопом, перекладка трубы при прохождении меридиана, автофокусировка, охлаждение камеры, управление камерой и колесом фильтров во время съёмки объекта, автоматическая перефокусировка при изменении внешних условий, парковка телескопа по завершении наблюдений.

Все операции в NINA можно объединять в последовательности при помощи планировщиков заданий. Программа позволяет внедрять самостоятельно изготовленные скрипты для автоматического принятия решения о возможности или невозможности начала наблюдений на основе показаний датчиков метеостанции и датчика освещённости неба, установленного в ПК EAGLE 4.


ОРГАНИЗАЦИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ДОСТУПА К НАБЛЮДЕНИЯМ

Для обеспечения возможности наблюдений пользователям с различным уровнем подготовки предусмотрена дифференциация доступа к функциональным возможностям. Разграничение прав необходимо сделать для безаварийной работы всей обсерватории, чтобы пользователи, которые некомпетентны в настройке оборудования, по ошибке не испортили ничего и тем самым не помешали бы следующим наблюдателям.

Все пользователи разделены на три категории — администратор, исследователь, пользователь (гость). Это позволяет квалифицированному персоналу планировать и проводить самостоятельные исследования, а студентам и школьникам — проводить наблюдения наиболее популярных объектов, в соответствии с образовательной программой.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ АСТРОНОМИИ НА КАЖДОМ УРОКЕ ФИЗИКИ

 **Е. В. Мальцева**

 Луганский информационно-методический центр

 tofzika2016@gmail.com

Современный мир, с его высоким уровнем механизации, широкой автоматизацией контроля и управления технологическими процессами, применением электронно-вычислительных машин, всё более и более требует от рабочих инженерно-технических знаний, понимания научных принципов производства, высокого уровня развития мышления, творческих способностей. Начинать развивать эти качества нужно в период обучения в школе, когда формируется личность с её взглядами, убеждениями, знаниями, умениями и способностями. В наших учебных программах, как правило, сохраняется традиционная разобщённость предметов. Поэтому вопрос интеграции привлёк наше внимание. Группа учителей физики и информатики города Луганска, работая над проектом «Применение элементов астрономии на каждом уроке физики», создала электронный портфель, в котором для каждого урока физики подобрали материал по астрономии.

Основные направления в нашей работе:

- Определение рациональной последовательности изучения учебных дисциплин. Эта последовательность должна быть такова, чтобы изучение физики готовило почву для изучения астрономии.
- Обеспечение единства в интерпретации общих понятий, законов и теорий.
- Осуществление единого подхода к формированию общих понятий и умений. Например, таких умений у учащихся, как работа с учебной литературой, измерительных, вычислительных, графических и других умений, являющихся общими для многих учебных дисциплин.
- Показ общности методов исследования, применяемых в физике и астрономии.

Например, на первом уроке по физике в 7 классе, рассматривая природу как предмет изучения физики, предлагаем рассмотреть изучение её различными науками, в том числе и астрономией. Вводя понятие «тело»,

Функция	Администратор	Исследователь	Пользователь
Управление оборудованием и контроль доступа к началу наблюдений	+		
Анализ условий видимости объектов	+	+	
Выбор объектов наблюдения из каталога «Атлас неба NINA» или по указанным координатам	+	+	
Формирование сценария плана наблюдений (указание перечня фильтров, количества и продолжительности экспозиций)	+	+	
Проведение трансляций наблюдения в реальном времени	+	+	
Выбор объектов наблюдения из перечня «популярных» объектов	+	+	+
Выбор параметров фотографирования из перечня «популярных» объектов (выбор фильтра, продолжительность экспозиции)	+	+	+

Таким образом, имеющееся оборудование при использовании сетевых технологий позволяет привлечь к практическим занятиям по астрономии учащихся образовательных учреждений региона, в том числе сельских, и позволит создавать совместные программы обучения с другими вузами.

рассматриваем примеры различных астрономических тел: звезда, планета, астероид, комета. Вводя понятие «явление», рассматриваем смену фаз Луны, восход Солнца, затмение Солнца (без объяснения причин).

На уроке по физике «Скорость прямолинейного равномерного движения» говорим, что на Земле длительное время такого движения нет, только свет движется в вакууме именно так. Его скорость определена экспериментально при наблюдении за движением спутника Юпитера — Ио. Свет распространяется со скоростью 300 000 км/с. Свет от Солнца идёт до Земли 8 минут. Ближайшая к Солнечной системе звезда находится на расстоянии, которое свет проходит за 4,5 года. Есть звёзды, свет от которых идет сотни тысяч лет. Мы видим прошлое! А расстояние измеряют в годах, хотя и световых. Решаем задачи, в том числе и на нахождение расстояния до звёзд.

На уроке, посвящённом изучению силы трения, рассматривая проявление силы трения в природе, исследуем один из примеров — волнистые горы, которые образовались при действии ветра на песчаные породы. В этом случае ветер, дующий в одном направлении, отрывает песчинки, несёт их с собой. А песчинки трутся о мягкую горную породу, и таким образом за тысячелетия образовались волнистые горы. По тем же законам движущаяся вода образовала Большой каньон в Америке. Речка и теперь течёт по дну каньона, но она так мала, что не верится, что смогла сделать такую работу. Затем предлагаем посмотреть на фотографии каньонов на поверхности Марса. Там нет речки на дне, но на поверхности Марса вообще нет жидкости. Однако одинаковые законы приводят к одинаковым результатам.

Формируя у учащихся представление об атмосфере как о физическом теле, привожу примеры наличия атмосферы на других планетах и на некоторых спутниках планет. Говорим и об атмосфере Солнца. Что можно понимать, говоря об атмосфере газообразного тела? Рассматриваем различный состав атмосфер. Рассказываем о кометах. Далеко от Солнца они представляют собой большие куски грязного льда. Приближаясь к Солнцу, они нагреваются, испаряются и светятся. При своём движении кометы теряют часть своей атмосферы, которая простирается очень далеко, образуя хвост кометы.

На уроках решения задач, при подготовке заданий для самостоятельных, контрольных и лабораторных работ, предлагаем включать астрономические вопросы и задачи. В электронном портфеле к каждому уроку физики кроме теоретического астрономического материала прилагаются презентации, видеофрагменты, подбор задач.

Созданный учителями электронный портфель применяется как молодыми, так и опытными учителями физики города Луганска.

АБОНЕМЕНТ ПО АСТРОНОМИИ — ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ В ЦЕНТРЕ ИМЕНИ В. В. ТЕРЕШКОВОЙ

 **О. М. Роменская**

 ГАУК ЯО «Центр имени В. В. Терешковой»

 olesyaromenskaya@yandex.ru

Астрономический абонемент — 10 лекций по астрономии, охватывающих темы школьного курса, который предлагается учащимся 10—11 классов. Абонемент стабильно пользуется спросом со стороны школ города Ярославля и области: каждый учебный год абонемент посещают порядка 200 старшеклассников. Благодаря возможностям Центра лекции проводятся в «Звёздном зале» (планетарии) и обсерватории.

Программа абонемента [1]:

- Астрономия, её значение и связь с другими науками (1 уч. час).
- Практические основы астрономии (2 уч. часа).
- Звёздное небо. Небесные координаты.
- Видимое и истинное движение Луны. Основы измерения времени.
- Строение Солнечной системы. Законы движения, определение расстояний и размеров тел в Солнечной системе. (1 уч. час).
- Дневные/вечерние наблюдения в астрономической обсерватории.
- Природа тел Солнечной системы (2 уч. часа).
- Солнце и звёзды (1 уч. час).
- Строение и эволюция Вселенной (1 уч. час).
- Проблемы поиска жизни во Вселенной (1 уч. час).

Возможности «Звёздного зала» — планетария — используются для демонстрации сопроводительной визуализации лекций в полнокупольном формате. Это особенно важно для такой сложной темы, как системы небесных координат: сферические координаты наиболее выгодно демонстрируются именно на куполе, а не на плоском экране. Различия между горизонтальными и экваториальными координатами наглядно демонстрируются

лектором с применением инструментов оптико-механической системы ZEISS SKYMASTER ZKP 4, а также с помощью программного обеспечения для полнокупольной визуализации PowerDome.

Стабильная востребованность абонемента и отдельных его лекций со стороны школ стала импульсом к оформлению более сложной полнокупольной визуализации. В формате коротких полнокупольных видеолекций были записаны темы «Небесные координаты» и «Законы движения небесных тел». Затем была разработана программа «Мир звёзд».

В программе «Мир звёзд» рассматривается строение и эволюция звёзд, приводятся примеры их конечных стадий развития, описываются трудности методов определения параллаксов звёзд и расстояний до них. Программа рассказывает о происхождении химических элементов и процессах образования звёзд следующих поколений. Наглядно демонстрируются связи между массой и светимостью звезды, её температурой и цветом, представлены особенности законов излучения звёзд. Значительное внимание уделяется истории звёздной астрономии [2]. Эта программа стала частью репертуара Центра имени В. В. Терешковой и используется в абонементе вместе с сопроводительными комментариями лектора.

Также в сопровождении комментариев лектора в программе абонемента успешно используется полнокупольная программа, подготовленная Ассоциацией планетариев России при поддержке Фонда президентских грантов, — «Солнце и жизнь Земли» (ФПГ № 20-2-022239) [3]. Эта программа подробно рассматривает вопросы, связанные со строением Солнца и его влиянием на жизнь на Земле, а сопровождающие комментарии лектора и его ответы на вопросы зрителей обеспечивают контроль усвоения темы.

Абонемент развивается и меняется, появляются новые лекции, совершенствуются полнокупольные презентации. Несмотря на то что абонемент по астрономии ведется с учётом школьной программы по этому предмету, со стороны учебных заведений есть запрос на лекции не только по астрономии, но и по истории космонавтики. На данный момент Центр имени В. В. Терешковой принимает участие в грантовом проекте по созданию полнокупольной программы по истории космонавтики России (№ ПФКИ-21-1-005534) [4].

Список литературы


1. Учителю астрономии // «Культурно-просветительский центр имени В. В. Терешковой» — изучающим и преподающим астрономию в школе.


[Электронный ресурс] / ГАУК ЯО «Центр имени В. В. Терешковой». Электрон. дан. Ярославль, 2020. Режим доступа: <http://yarplaneta.ru/shkolam/Uchitelu-astronomii/>, свободный (дата обращения: 15.01.2022).

2. Мир звёзд // «Культурно-просветительский центр имени В. В. Терешковой» — изучающим и преподающим астрономию в школе [Электронный ресурс] / ГАУК ЯО «Центр имени В. В. Терешковой». Электрон. дан. Ярославль, 2020. Режим доступа: <http://yarplaneta.ru/films/film83/>, свободный (дата обращения: 15.01.2022).
3. Инновационное образовательное мультимедиа-пособие с методическими рекомендациями «Солнце и жизнь Земли» // Некоммерческая организация «Ассоциация планетариев России» [Электронный ресурс] / Ассоциация планетариев России. Электрон. дан. Москва, 2020. Режим доступа: http://www.apr.planetariums.ru/grant_2020_sun_and_earth_life.html, свободный (дата обращения: 15.01.2022).
4. Инновационное образовательное мультимедиа-пособие с методическими рекомендациями «Солнце и жизнь Земли» // Некоммерческая организация «Ассоциация планетариев России» [Электронный ресурс] / Ассоциация планетариев России. Электрон. дан. Москва, 2021. Режим доступа: <http://www.apr.planetariums.ru/pfki-21-1-005534.html>, свободный (дата обращения: 15.01.2022).

ПЕРСОНАЛЬНЫЙ САЙТ УЧИТЕЛЯ КАК СОВРЕМЕННЫЙ ИНСТРУМЕНТ ОБУЧЕНИЯ И ПРОСВЕЩЕНИЯ

 **З. И. Кравец**

 МОУ Константиновская СШ Тутаевского муниципального района

 kravets_zi@rambler.ru

*Человек не может по-настоящему
усовершенствоваться, если не помогает
усовершенствоваться другим.
Чарльз Диккенс*

В настоящее время актуальна концепция компетентного подхода в образовании. Это обусловлено глобальной информатизацией общества и тем, что всё большее значение имеет массовая коммуникация. Сегодня, без сомнения, можно сказать, что работа с персональным сайтом способствует формированию информационно-коммуникационных компетенций любого современного человека, тем более педагога. Сайт становится образом электронного портфолио учителя, визитной карточкой педагога и его педагогической деятельности.

Идея создания своего персонального сайта привлекала меня, я понимала, какие огромные возможности для работы с детьми, для общения с единомышленниками и просто для выражения собственного «Я» будут открыты мне.

И может, ещё долго это было бы просто идеей, если бы однажды я не увидела предложение Международного астрономического союза принять участие в конкурсе Astronomy@Home Awards 2020 [5]. Тогда идея срочно стала реализовываться, а сайт — набирать свой «вес».

«ЗАЧЕМ ПЕДАГОГУ НУЖЕН ПЕРСОНАЛЬНЫЙ САЙТ?» — СПРОСИТЕ ВЫ

Приведу 8 основных причин, исходя из которых мне как педагогу важно иметь и активно развивать личный интернет-ресурс:

1. Сайт — визитная карточка учителя, где можно рассказать о себе, своём образовании, профессиональных достижениях и педагогическом опыте, поделиться новостями и сделать объявления.

2. Сайт — эффективный образовательный инструмент педагога, позволяющий идти в ногу со временем, активно применять в своей работе новые технологии, использовать возможности дистанционного обучения.
3. Сайт — удобная площадка для размещения и хранения собственных материалов: рабочих программ, планов-конспектов уроков, полезных статей и ссылок, списков учебной и методической литературы. Они находятся всегда под рукой. При этом хранить данные можно в любых форматах: текст, фото, видео, презентация.
4. Сайт — важное средство коммуникации со своими учениками и их родителями. Он позволяет публиковать материалы для внеклассного изучения, домашние задания, тесты, важную информацию для родителей дидактического и предметного содержания.
5. Сайт — отличное место для общения с коллегами, для обмена опытом, обсуждения важных вопросов, повышения статуса в профессиональном сообществе, поддержания имиджа современного педагога.
6. Сайт — прекрасный способ организовать индивидуальную работу с учениками, проводить параллельно работу и с одарёнными детьми, и с теми, кто по каким-то причинам «отстаёт» от программы. Можно на нём разместить необходимые задания для разных категорий учеников.
7. Наличие персонального сайта — важная составляющая в процедуре аттестации педагога на категорию, а также при участии в педагогических конкурсах [1].
8. Сайт — место, где моё хобби (астрономия) представлено во всём многообразии: встречи с интересными людьми, поездки с учащимися в Ярославский планетарий, размещение статей о космосе, проекты детей и многое, многое другое.

«КАКИМ ДОЛЖЕН БЫТЬ ПЕРСОНАЛЬНЫЙ САЙТ, РЕШАЮЩИЙ МАКСИМУМ ЗАДАЧ?» — СПРОСИТЕ ВЫ

Думаю, что в любом конкурсе персональный сайт позиционируется как фактор повышения качества профессиональной деятельности педагога. Поэтому мною учтены общепринятые критерии оценки при разработке личного педагогического ресурса:

- Информационная насыщенность.
- Безопасность и комфортность виртуальной образовательной среды.

- Актуальность информации.
- Эффективность обратной связи.
- Оригинальность и адекватность дизайна [2].

ЧТО ТАКОЕ, С МОЕЙ ТОЧКИ ЗРЕНИЯ, ПЕРСОНАЛЬНЫЙ САЙТ УЧИТЕЛЯ МАТЕМАТИКИ И АСТРОНОМИИ?

Персональный сайт учителя — это инструмент обучения. Он позволяет обеспечить открытость, доступность и наглядность образования.

Открытость образования может быть обеспечена за счёт размещения на сайте:

- учебных программ,
- авторских разработок педагога,
- дидактического материала,
- творческих работ учеников,
- планов работы, разработок материалов для конкурсов и мероприятий.

Доступность образования заключается в размещении:

- учебных материалов, которыми ученик может воспользоваться в любое удобное для него время;
- ссылок на образовательные порталы для поиска дополнительного материала, для чтения научной литературы;
- тестов, опросов для отработки приобретённых навыков и умений,
- вопросов для подготовки к проверочным и диагностическим работам;
- домашнего задания.

Наглядность образования заключается в представлении на сайте наглядных учебных пособий (схемы, графики, рисунки) и фотографий (с уроков, внеурочных занятий и внеклассных мероприятий).

СТРАНИЦЫ МОЕГО САЙТА

А теперь я расскажу о страницах моего сайта, которые я формирую вручную по мере появляющихся идей и информации.

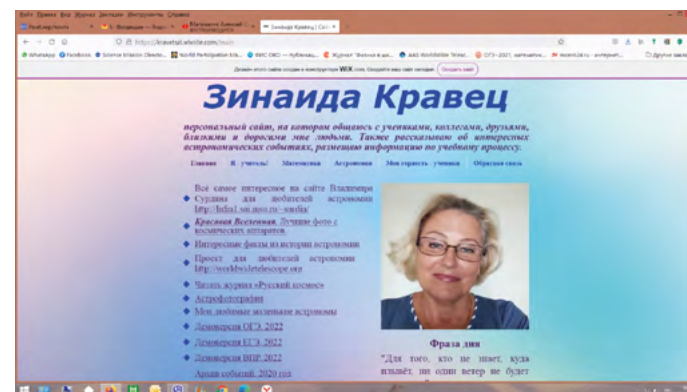


Рис. 1. Главная страница сайта З. И. Кравец.

Размещая любую информацию на страницах сайта, я прежде всего ставлю перед собой задачу: «Этот материал обязательно должен развивать, обучать, воспитывать».

Так параллельно с моим фото на главной странице появилась рубрика «Фраза дня», представляющая собой высказывания великих людей, читая которые посетитель сайта сможет задуматься о смысле жизни, замотивировать себя на добрые поступки, решительные действия, хорошие дела. Моя любимая фраза — слова Авраама Линкольна: «Не позволяйте себе падать духом и в конце концов вы обязательно добьётесь успеха». Я часто повторяю её детям на своих уроках [6].

Создавая свой сайт, я хотела сделать из него место, где я общаюсь с близкими мне людьми, обсуждаю наши общие интересы и увлечения. Так родилась рубрика «Фото дня». Посмотрите, какой большой уже архив фотографий, сколько в нём красивых рассветов и закатов. Друзья, знакомые, мои ученики и их родители — все принимают активное участие в пополнении этой странички [6].

Самой посещаемой в течение учебного года страницей, конечно же, стала «Математика». Это и не удивительно. Ведь на ней размещены материалы к урокам для сотни моих учеников. А эпиграф «Математику уже затем учить надо, что она ум в порядок приводит» от великого русского учёного Михаила Васильевича Ломоносова не нуждается в комментариях.

Слова очень нравятся родителям моих семиклассников.

Страница «Астрономия» — моя любимица. По-другому и быть не может (помните, я говорила про конкурс?). И к ней подобраны слова великого Ломоносова: «Открылась бездна, звезд полна, звездам числа нет, бездне дна». Да и «по весу» она самая тяжёлая.

Разве может учитель не иметь материалов для контроля знаний учащихся? Интерактивные компьютерные опросы я создаю сама на электронной платформе Online Test Pad. Лучшей проверки домашнего задания не придумать: за 10—15 минут можно проверить знания большого объёма изученного материала. Да и детям работать на компьютере сейчас более комфортно, чем отвечать у доски или записывать ответы в тетради [6].

Проектная деятельность с детьми широко отражена на страницах сайта. Все проекты, которые мои учащиеся защищали в школе, на ежегодной научно-практической конференции в городе Тутаеве, на Межрегиональной конференции «Дорога к звёздам» в планетарии, размещены, сопровождаются фотографиями победителей и призёров [3].

С 2018 года вместе с учащимися принимаем участие в ежегодном фотоконкурсе «Небо и Земля», организуемом в планетарии. Яркие страницы с красивыми фотографиями и не менее красивыми победителями привлекают внимание посетителей. Получить заветную статуэтку — мечта многих участников фотоконкурса [6].

Во вступлении я отметила, что сайт для учителя — это прежде всего его электронное портфолио, которое необходимо иметь для успешной аттестации. Публикации в журнале «Физика в школе», «Физика для школьников», в одном из сборников национального проекта «Образование» в рамках региональной инновационной площадки, в сборниках Ярославского планетария с докладами Международной конференции за два предыдущих года — всё это есть в моём портфолио [6].

С октября 2020 года в школе начали проводиться астрономические наблюдения с помощью школьного телескопа. Величественный Юпитер со своими четырьмя галилеевыми спутниками, властелин колец Сатурн вызвали неподдельный интерес, удивление и восхищение учащихся 10-11 классов. Фотографии мероприятия тоже представлены на моём сайте. К сожалению, в этом учебном году нас совсем не балует погода ясным звёздным небом. Все надежды на весеннее небо [6]!

У меня есть ученики, увлекающиеся астрофотографией. Их снимки звёздного неба тоже в копилке сайта. Александр Бухвалов, Иван Лапин и Никита Чекмарев принимали участие в фотоконкурсе «Небо и Земля», став его победителями. Фотографии не только учеников, но и моего друга, астронома-любителя, жителя посёлка Михаила Швайко есть на сайте [6].

С 2017 года в школы вернулся учебный предмет «Астрономия». Первые уроки показали, насколько мало знают старшеклассники об окружающем мире, о космосе, об освоении человеком космического пространства [4]. Большинство детей вообще не слышали о космических миссиях зондов, о современной астрономической картине мира. Одной из основных задач в преподавании астрономии вижу именно просвещение по всем этим вопросам, знакомство детей с научной литературой, расширяющей кругозор. На моём сайте появляются такие рубрики, как «Красивая Вселенная» [6], «Из истории астрономии» [6]. Их участники — мои учащиеся 10А класса. Именно они пишут мини-рассказы о заинтересовавших их космических снимках, сделанных зондами, или фактах из истории науки, которых нет в учебнике и о которых многие не читали и не слышали.

Конечно же, мой персональный сайт — это и инструмент просвещения. Передача и распространение знаний тоже являются одной из задач моей работы.


Благодаря рубрике «Отправь своё имя на Марс» много человек, посетивших мой сайт, узнали, что можно отправить своё имя на Марс. Я рассказала об акции космического агентства NASA: в 2026 году на Красную планету отправят имена обычных людей, напечатанные на микрочипе. Любой желающий, кто заполнит заявку, получает ваучер в виде посадочного талона, на котором указаны место отправления (мыс Канаверал, Флорида) и место прибытия (кратер Джезеро). Это будет миссия по возврату образцов грунта Марса на Землю, который соберёт марсоход Perseverance. Посмотрите, сколько людей заинтересовала, даже заинтриговала эта новость: предложение об участии в акции приняли 117 человек: мои родственники, друзья, коллеги, ученики, друзья друзей и малыши, которым не было ещё и годика на момент получения билета. Вот кому будет интересно спустя годы рассказывать о своём детском полёте на Марс [6]!


«А КАКОВ ИТОГ УЧАСТИЯ В КОНКУРСЕ МЕЖДУНАРОДНОГО АСТРОНОМИЧЕСКОГО СОЮЗА?» — СПРОСИТЕ ВЫ

С апреля по август 2020 года были отправлены три заявки на участие: рассказ о проведении межшкольного конкурса «Взгляни на небо» с презентацией фотографий детей; рассказ о просветительской работе среди общественности «Отправь своё имя на Марс» со ссылкой на такое большое количество билетов; рассказ о первых моих шагах по заполнению своего персонального сайта учителя. К сожалению, не получила даже обещанного сертификата участника, несмотря на многочисленные письма в адрес организаторов конкурса Astronomy@Home Awards 2020.

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ НАЕС: АСТРОНОМИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ И ПРОСВЕЩЕНИЕ

 **Е. Н. Тихомирова**

 ГАУК ЯО «Культурно-просветительский центр имени В. В. Терешковой»

 en_tihomirova@mail.ru

Международный астрономический союз (МАС) был основан в 1919 году. Его миссия заключается в продвижении и защите астрономической науки во всех её аспектах, включая исследования, коммуникацию, образование и развитие посредством международного сотрудничества. Члены МАС, распределённые по отделам, комиссиям и группам, являются профессиональными астрономами со всего мира. Они активно занимаются профессиональными исследованиями, образованием и распространением информации в области астрономии [1].

С 2019 года при Международном астрономическом союзе (МАС) действует Отдел астрономического образования (ОАЕ, Office of Astronomy for Education), главные офисы которого находятся в Доме астрономии и Институте астрономии общества Макса Планка (г. Гейдельберг, Германия). Деятельность Отдела посвящена дошкольному и школьному астрономическому образованию [1].

В 2020 году Отдел астрономического образования приступил к созданию групп координаторов национального астрономического образования (команды НАЕС, National Astronomy Education Coordinators). В короткий срок удалось создать сеть, объединившую команды НАЕС более чем ста стран мира. От каждой страны команда НАЕС утверждается МАС и предполагает участие пяти человек из астрономического сообщества, включая учёных, преподавателей и учителей астрономии, специалистов дополнительного астрономического образования. Команды НАЕС выступают в качестве связующего звена между МАС и астрономическими сообществами стран по линии образовательных и просветительских проектов. Для упрощения распространения информации между членами команд НАЕС, размещения анонсов о мероприятиях, конкурсах, объявлений о совместных проектах используется единая сетевая платформа. Платформа может выступать как инструмент для управления проектами, использоваться для совместной работы и постановки задач по проектам, а также в качестве удобного

Но я не расстраиваюсь. Уверена, что никакими призами, заявленными в виде премий в евро, нельзя оценить ту огромную работу, которую я сделала для себя как учитель. Совершенствование знаний в области информационно-коммуникационных технологий, расширение кругозора моих любимых учеников, организация учебного процесса с помощью личного сайта, общение с близкими и дорогими для меня людьми посредством информации, которую для них готовлю, — вот результат, который важен и нужен для меня!

Список литературы

1. Сервис проверки сайтов образовательных организаций на соответствие законодательным требованиям. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rosobrcntr.ru> (дата обращения: 14.02.2022).
2. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://teacher-of-russia.ru/> (дата обращения: 14.02.2022).
3. Учителю астрономии // «Культурно-просветительский центр имени В. В. Терешковой» — изучающим и преподающим астрономию в школе. [Электронный ресурс] / ГАУК ЯО «Центр имени В.В. Терешковой». Электрон. дан. Ярославль, 2020. Режим доступа: <http://yarplaneta.ru/shkolam/Uchitelu-astronomii/>, свободный (дата обращения: 15.01.2022).
4. Инновационное образовательное мультимедиа-пособие с методическими рекомендациями «Солнце и жизнь Земли» // Некоммерческая организация «Ассоциация планетариев России». [Электронный ресурс] / Ассоциация планетариев России. Электрон. дан. Москва, 2021. Режим доступа: <http://www.apr.planetariums.ru/pfki-21-1-005534.html>, свободный (дата обращения: 15.01.2022).
5. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www-iau-org.translate.google.com/public/iauoutreachaward/> (дата обращения: 14.02.2022).
6. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://kravetszi.wixsite.com/main> (дата обращения: 14.02.2022).

мессенджера. Таким образом, членам групп предоставляется уникальная возможность реализации новых методов и подходов в образовательной и просветительской деятельности на качественно новом уровне, не только с применением цифровых ресурсов, но и большим охватом участников.

Одним из первых ярких примеров международного сотрудничества может служить серия мероприятий, посвящённых полному солнечному затмению 14 декабря 2020 года. В рамках значимого астрономического события МАС создал веб-сайт, посвящённый этому событию, где размещались образовательные и просветительские ресурсы. Педагоги и популяризаторы науки со всего мира смогли не только использовать предлагаемые материалы (они были в свободном доступе), но и разместить свои методические разработки. Также был объявлен День астрономии, посвящённый полному солнечному затмению. Любители астрономии, учителя, преподаватели, учёные могли организовать мероприятие (например, лекцию, мастер-класс, викторину) и зарегистрировать его в официальном календаре мероприятий МАС. Главным мероприятием Иранской ассоциации учителей астрономии (ITAU) и Международного астрономического сообщества студентов (SINA) являлась Eclipse Party, проводимая совместно с преподавателем и студентами из Чили. Во время мероприятия работала дискуссионная площадка учащихся и их преподавателей на базе платформы Zoom, велась трансляция полного солнечного затмения, осуществление научной деятельности студентов онлайн, обсуждение результатов. Рабочий язык — английский. Участие в мероприятии приняли учащиеся и педагоги из многих стран мира, в том числе представители Культурно-просветительского центра имени В. В. Терешковой. Необходимо отметить, что явление солнечного затмения могут наблюдать только те жители Земли, которые находятся в узкой полосе лунной тени на поверхности Земли (14 декабря 2020 повезло лишь жителям Аргентины и Чили). Однако использование преподавателем и студентами из Чили технических средств для трансляции позволило значительно расширить аудиторию.

Впервые «День астрономии в школе» был предложен и реализован в рамках международного проекта, посвящённого 100-летию Международного астрономического союза в 2019 году, с целью более активного привлечения астрономического сообщества к организации мероприятий в школах. В сентябре 2021-го, в день осеннего равноденствия в Северном полушарии (весеннего равноденствия в Южном полушарии), или в ближайшие к нему дни МАС предложил учителям и преподавателям астрономии также провести мероприятие «День астрономии в школе». Для участия необходимо было зарегистрироваться на сайте проекта и опубликовать небольшой фотоотчёт по окончании мероприятия. Педагогам

предлагалось использовать любые виды деятельности и формы просветительской работы. По итогам предоставлялся электронный сертификат и поощрительные призы.

Помимо реализации международных мероприятий, по инициативе МАС появился журнал, посвящённый астрономическому образованию (Astronomy Education Journal). Это направление даёт дополнительную возможность не только перенимать опыт в астрономическом образовании и просвещении, но и делиться собственными методическими разработками [2].

Члены российской команды NAEC активно поддерживают инициативы МАС и участвуют в международных проектах. Состав NAEC в России [3]:

- председатель: Павел Вадимович Скрипниченко, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», Екатеринбург;
- контактное лицо: Екатерина Николаевна Тихомирова, ГАУК ЯО «Центр имени В. В. Терешковой», Ярославль;
- Ирина Александровна Феоктистова, Самарский университет, Самара;
- Александр Владимирович Ярцев, ФГБОУ ВО «МПГУ», Москва;
- Сергей Артурович Язев, ФГБОУ ВО «ИГУ», Институт солнечно-земной физики СО РАН, Большой Иркутский планетарий, Иркутск.

Помимо информирования астрономического сообщества России о международных астрономических проектах, члены российской команды NAEC выполняют работу в других направлениях. Так, автор данной статьи приняла участие в Международном спринте по созданию астрономического глоссария для педагогов непрофильного образования (начального образования, гуманитарных дисциплин). В течение нескольких недель проект поддержали более двадцати членов NAEC, создавая астрономический глоссарий на английском языке. Также автор выполнила перевод на русский язык масштабного опроса, предназначенного для планетариев (операторов планетариев, лекторов и педагогов). Многостороннее исследование планетариев мира было предложено и разработано Отделом астрономического образования совместно с Лёвенским католическим университетом и Планетарием Королевской обсерватории Бельгии. В настоящее время проводится работа по систематизации элементов астрономии в российской школе в рамках учебных предметов на разных уровнях образования: начального общего, основного и среднего (полного) общего образования.

Несомненно, международное сотрудничество открывает широкий спектр возможностей для внедрения нестандартных форм образователь-

ной и просветительской деятельности в области астрономии для различных возрастных и социокультурных кластеров населения. Поэтому члены российской команды NAEC ищут эффективные способы распространения информации об астрономических событиях и мероприятиях международного сообщества среди российских коллег. Для более успешной интеграции астрономических любительских сообществ в одно информационное поле и обмена опытом руководителям астрономических организаций, учителям астрономии, педагогам дополнительного образования необходимо заполнить анкету [4].

Список литературы


1. International Astronomical Union. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iau.org> (дата обращения: 14.02.2022).
2. Astronomy Education Journal. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.astroedjournal.org/> (дата обращения: 14.02.2022).
3. The IAU OAE National Astronomy Education Coordinator team for the Russian Federation. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.astro4edu.org/naec-network/RU/> (дата обращения: 14.02.2022).
4. Астрономические любительские сообщества. Электронная форма. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://forms.gle/AbxkmEcsxz1ff5tb6> (дата обращения: 14.02.2022).

КОСМИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ И ПРОСВЕЩЕНИЕ



ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИГРЫ ПРОЕКТА «КОСМИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ РОССИИ»

 **О. М. Роменская**

 ГАУК ЯО «Центр имени В. В. Терешковой»

 olesyaromenskaya@yandex.ru

В 2021 году Центр имени В. В. Терешковой присоединился к работе по Договору № ПФКИ-21-1-005534 (Информационно-просветительская видео-программа патриотической направленности с полнокупольной мультиформатной адаптацией «Космическая история России») [1]. Разрабатываемая полнокупольная программа будет сопровождаться методическим пособием по истории космонавтики.

Методическое пособие включает информационную часть, расширяющую материал программы, а также разработки классных часов, которые могут быть использованы педагогами. Предлагаемые тематические классные часы на космическую тематику включают в себя интеллектуальные игры для разных классов, обзоры космических юбилеев, значимые открытия. Интеллектуальные игры сопровождаются презентациями, ссылки на которые будут даны в пособии.

«Своя игра» по космонавтике предлагается к проведению в командном формате, число участников — до шести человек. Команды соревнуются друг с другом, отвечая на вопросы. Каждый вопрос ранжирован по сложности. Правильный ответ даёт соответствующее количество баллов: от 100 за самый простой вопрос до 500 за самый сложный. Каждые пять вопросов объединены общей темой, тем предлагается не менее 10. Ответы на тему сдаются в письменном виде. Неправильный ответ на вопрос приводит к уменьшению счёта команды на соответствующее количество баллов. «Своя игра» в командной форме позволяет провести её в рамках одного классного часа и задействовать большее количество обучающихся, чем привычный телевизионный формат.

«Космическая азбука» — менее затратная по времени игра, которая может быть использована на классных часах. Логика построения игры: ведущий получает комплект из 90 слов — по 3 слова, начинающихся на 30 букв русского алфавита, и презентацию, где каждый слайд соответствует определённой букве, а три картинки на нём — загаданным словам. Например: «Восход», «Восточный», Валентина.

Игроки делятся на команды до шести человек и получают бланк ответов, каждое поле которого соответствует буквам алфавита и трём загаданным словам на эти буквы. Игроки заполняют его по мере просмотра презентации.

Также методическое пособие включает «космическое ассорти» — набор небольших разнообразных заданий, одновременно предлагаемых командам учащихся. Задания необходимо распечатать перед игрой по числу команд.

Интеллектуальные игры позволят провести познавательный и развлекательный классный час, который закрепит знания учеников по космонавтике.


Список литературы

1. Информационно-просветительская видеопрограмма патриотической направленности с полнокупольной мультиформатной адаптацией «Космическая история России» // Некоммерческая организация «Ассоциация планетариев России». [Электронный ресурс] / Ассоциация планетариев России. Электрон. дан. Москва, 2021. Режим доступа: <http://www.apr.planetariums.ru/pfki-21-1-005534.html>, свободный (дата обращения: 15.01.2022).

ПОПУЛЯРИЗАЦИЯ КОСМОНАВТИКИ СРЕДИ МОЛОДЁЖИ: ОТ ПРОЕКТА К РЕАЛИЗАЦИИ

 **Н. А. Матасов**

 ГАУК ЯО «Центр имени В. В. Терешковой»

 matasov44@gmail.com

Роль космонавтики в нашей жизни сложно переоценить. Великие свершения золотой эры освоения космоса всё ещё продолжают вдохновлять поколения. Однако сейчас среди молодёжи и подрастающего поколения не так часто увидишь тот огонь в глазах, который можно было раньше заметить при словах «космос», «Гагарин», «Аполлон». В космической отрасли всё более осязателен недостаток молодых кадров.

Для решения профориентационно-образовательных проблем созданы всероссийский проект «Мы верим в космос» и проект Культурно-просветительского центра имени В. В. Терешковой «Отряд юных космонавтов».

«Мы верим в космос» создан с целью популяризации космонавтики, её достижений и инженерно-технического творчества в нашей стране, а также для улучшения кадровой ситуации в ракетно-космической отрасли.

Цель проекта: всесторонняя подготовка молодёжи к последующей работе на предприятиях ракетно-космической отрасли.

Помимо разработки методических материалов и локальной просветительской деятельности в данный момент заключено партнёрство с недавно возрождённым Российским обществом «Знание», при поддержке которого проводятся образовательные мероприятия по всей стране. Создана интерактивная карта вузов с космическими направлениями образования, ведётся работа над школьным музеем космонавтики.


«Отряд юных космонавтов» — это комплексная программа, объединяющая подрастающее поколение, заинтересованное в изучении космонавтики и астрономии, ориентированная на формирование человека, обладающего знаниями, умениями и навыками, необходимыми для будущих научных изысканий. Программа направлена на создание системы углублённой и планомерной работы по подготовке школьников к участию в разработке проектов по космической тематике и в олимпиадах по астрономии.


Целью программы является расширение знаний в области естественных наук, в частности космонавтики и астрономии, с помощью научного осмысления и понимания целостности окружающего мира.

На данный момент ведётся программа по изучению школьниками основ орбитальной механики, основ космических инженерных систем, космонавтики, её истории. Параллельно с этим участниками разрабатываются собственные проекты космической направленности для систематизации полученных знаний, применения их на практике и для дальнейшего участия в конкурсах и конференциях.

В рамках проекта разработаны уникальные материалы для эффективного изучения окружающего мира, основ науки и научного мышления, ведётся ораторская подготовка.

 **Е. Е. Сеницын**

 ГАУК ЯО «Центр имени В. В. Терешковой»

 phtsutterby_86@mail.ru

На заре космической эры каждое событие, связанное с покорением внеземного пространства, производило в обществе оглушительный эффект. Дело даже не в том, что подобное для всего человечества было в новинку; космические полёты были торжеством человеческого интеллекта, силы, воли и стремления к цели. Это напоминало героический эпос, только в отличие от мифологического Икара крыльев никто не опалял, и космонавты возвращались на Землю с триумфом.

Прошло более 60 лет. Космический прорыв привёл к ожидаемым последствиям: общество стало интересоваться темой, узнавать о ней всё больше и больше, и в какой-то момент космической отрасли как будто очень трудно стало нас удивить, и космические полёты сегодня стали уже чем-то обыденным, привычным. В информационном поле сообщения об очередном успешно выведенном на орбиту спутнике или об удачном возвращении с орбиты экипажа очередного «Союза» воспринимаются большинством людей абсолютно спокойно.

К тому, что космос стал более доступным для восприятия, вошёл в нашу повседневность, привела и стремительная тотальная цифровизация. За звёздным небом сегодня наблюдают не только учёные-астрофизики в специально оборудованных обсерваториях, но и автоматические космические телескопы (например, «Хаббл»), и совсем обычные люди, желающие ощутить свою причастность к освоению Вселенной, и даже малыши. Смартфоны, мобильные телефоны с GPS, сотни «умных вещей», бытовых электронных приборов помогают в этом, делая космос ближе. Задачи по его освоению теперь представляются вполне выполнимыми. Активно набирает обороты даже немислимая совсем недавно отрасль — космический туризм.

Правда, одновременно с этим тут же появились дискуссии об исчезновении патетики великих достижений, деромантизации космических событий. Но космические достижения нашей страны, начиная с советского периода, создают мощный образ отечественной истории космоплавания, которой можно гордиться. Россия — навсегда Родина космонавтики.

Подвиг Юрия Гагарина, Валентины Терешковой и других космических первопроходцев не меркнет и не девальвируется со временем. Увидеть тот

самый огонёк неподдельного восторга в глазах посетителей музея Ярославского планетария при словах о космосе и его героях можно и сегодня, особенно у детей.

Через наш Музей истории космонавтики в Ярославском планетарии проходит множество школьных групп, и у юных представителей «цифрового» поколения на экскурсиях неизменно возникает множество вопросов, что, безусловно, подтверждает их живой интерес к экспозиции.

Однажды девочка лет восьми спросила у меня: «А правда, что первые люди улетят на Марс навсегда и мы не сможем вернуть их назад?». Было очевидно, что она искренне переживает за судьбу будущих покорителей Марса, но здесь важно отметить другое. Уже в таком нежном возрасте девочка не просто владеет информацией о том, какие есть планеты, или о том, что в космос летают ракеты. Маленький человек знает, что на орбите Земли люди живут на станции, что в будущем человечество планирует освоить и другие планеты; более того, волнуется о некоторых грядущих проблемах.

Подростков же интересует практическая сторона вопроса: сколько стоит построить космический корабль, как человеческое тело меняется в невесомости, как организованы поставки ресурсов на МКС и многое другое.

Невозможно не заметить влияние цифровизации в нашей стране на развитие сегодняшних детей и юношества. Растущие с осознанием того, что космос — вот он, близко, только протяни руку, дети со временем привыкают к нему. Благодаря «цифровой революции» и сети Интернет школьник десяти-двенадцати лет может знать о звёздах, планетах и полётах в космос больше, чем среднестатистический гражданин шестидесятих годов.

С самых ранних лет современное «цифровое» поколение из разных источников впитывает информацию, что космос для них теперь открыт и доступен. При этом в юных сердцах по-прежнему сильна романтика космических приключений, детские глаза неизменно разгораются от историй о первых космических полётах. Для них это до сих пор — истории о Настоящих Героях.

Таким образом, сегодня для подрастающего «цифрового» поколения космонавтика — часть жизни, их культурное наследие. Сегодняшние дети уже не представляют себе мир без космоса, космических полётов, исследований Вселенной, изучения галактик, а в перспективе сами мечтают участвовать в освоении космоса. Современные космонавты, идущие по стопам героев-первопроходцев, вдохновляют детей своим примером: мечты сбываются, добиться можно всего, стоит лишь захотеть!

В поддержке стремления подрастающего поколения проложить свою собственную дорогу в космос не последнюю роль может сыграть более активное включение в экскурсию эпизодов использования интерактивных экспонатов и инсталляций. 3D-технологии, сенсорные экраны, непосред-

ственное взаимодействие с материалами, в том числе тактильное, создают реально ощутимый эффект сопричастности.

Высокие цифровые технологии всё больше проникают в культурное пространство. Если с их помощью у нас получится сохранить искры детского интереса к освоению космоса, дать им разгореться — космонавтику в нашей стране ждёт прекрасное будущее!

Чтения имени В. В. Терешковой

**МАТЕРИАЛЫ
III МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«ЧТЕНИЯ ИМЕНИ ВАЛЕНТИНЫ ВЛАДИМИРОВНЫ
ТЕРЕШКОВОЙ»**

Ярославль, 10 марта 2022 г.

Редактор *И. В. Григорьева*
Компьютерная вёрстка *Е. Н. Тихомировой*

Подписано в печать 01.03.2022
Формат 60x84/16.
Объём 8 п. л. Тираж 100 экз. Заказ №111-2022

Материалы публикуются в авторской редакции.

Издательско-полиграфический комплекс
«ИНДИГО»
г. Ярославль, ул. Свободы, 97

Отпечатано на собственном полиграфическом оборудовании