

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

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

Ярославль
2023

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

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

**Ярославль
09 марта 2023 г.**

Ярославль
2023

УДК 52:521: 620: 678

ББК 22.6 я 434

Ч 914

Ч 914 **Чтения имени В. В. Терешковой:** Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции «Чтения имени Валентины Владимировны Терешковой». Ярославль, 09 марта 2023 г. // Сост. Тихомирова Е. Н., Перов Н. И., Роменская О. М. — Ярославль, 2023. — 160 с.

В сборнике представлены статьи, доклады, тезисы докладов участников IV 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:

**Боциева М. А., Булгакова Н. И., Воронова А. А., Жаров И. О., Залуцкий А. А,
Исаева Т. С., Калиничева О. В., Крапошин П. В., Морозов В. В., Моховой В. Ю.,
Муртазов А. К., Онежко В. Н., Перов Н. И, Роменская О. М., Сеницын Е. Е.,
Смирнов А. И., Соколов А. Ю., Тихомирова Е. Н., Филиппов Ю. П.,
Ширососова Л. В, Школьников Е. Н., Щепалова М. В.**

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

ISBN 978-5-91722-498-5

© ГАУК ЯО «Центр имени В. В. Терешковой»

© Коллектив авторов, 2023

© Тихомирова Е. Н., Перов Н. И., Роменская О. М., 2023, составление

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
Обращение В. В. Терешковой	7
Приветствие М. В. Васильевой	8
ИССЛЕДОВАНИЯ ПО АСТРОНОМИИ И КОСМОНАВТИКЕ	9
<i>А. К. Муртазов</i> Околосемное космическое пространство как среда мониторинга	10
<i>Н. И. Перов</i> Определение начальной орбиты небесного тела по пяти парам угловых измерений	24
<i>Н. И. Перов, Т. С. Исаева</i> Оценка интервалов времени переходов долгопериодических комет с первоначальных круговых орбит на траектории тесных сближений с планетами в явном виде	34
<i>Н. И. Перов, А. А. Воронова</i> Х-структуры в системах экзопланет	53
<i>Н. И. Перов, И. О. Жаров</i> Траектории небесных тел в гравитационных и магнитных полях	59
<i>Н. И. Перов, А. И. Смирнов</i> Сжатие планеты и число ее спутников	68
<i>Н. И. Перов, В. Н. Онежко</i> Моделирование эволюции двойных систем переменной массы на космогонических интервалах времени	76
<i>А. А. Залуцкий, В. В. Морозов, А. Ю. Соколов, Е. Н. Школьников</i> Методические аспекты зондовой мёссбауэровской спектроскопии для поиска «жидкой» воды в объектах космического грунтоведения	82
<i>Ю. П. Филиппов</i> Количественный анализ основных свойств кометы C/2017 K2 PANSTARRS. Оценка массовых потерь водяного льда кометы и времени ее жизни	93

<i>Ю. П. Филиппов, М. В. Щепалова</i> Какие типы массивных объектов можно сегодня непосредственно обнаружить на периферии Солнечной системы с использованием метода гравитационного линзирования?	101
<i>Ю. П. Филиппов, М. В. Щепалова</i> Метод гравитационного микролинзирования как эффективный инструмент поиска и исследования свойств массивного темного тела на периферии Солнечной системы	109
<i>П. В. Крапошин</i> Участие Сухумского НИИ ЭПИТ в реализации программы медико-биологических исследований в космосе «Бион»: обзор материалов	117
АСТРОНОМИЧЕСКОЕ, КОСМИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ И ПРОСВЕЩЕНИЕ	123
<i>В. Ю. Моховой</i> Внеурочная деятельность ООО «ВОРОНЕЖСКИЙ ПЛАНЕТАРИЙ» в средних общеобразовательных учреждениях г. Воронежа и области	124
<i>Л. В. Широнова</i> Образовательный проект «Академия космонавтики» – старт в профессию	128
<i>М. А. Боциева</i> Исследовательская и проектная деятельность обучающихся в ГБУДО «Школа космонавтики имени Р. В. Комарева»	132
<i>Н. И. Булгакова</i> Космос надо открывать	136
<i>Е. Е. Синицын</i> Почему она утонула: из истории орбитальной станции «Мир»	139
<i>О. В. Калиничева</i> Моделирование движения пятен солнечного света в Софийском соборе как элемент астрономического просвещения	143
<i>Е. Н. Тихомирова</i> Юбилей космической эры в Центре имени В. В. Терешковой: презентация полнокупольной программы «Космическая история России»	149
<i>О. М. Роменская</i> Анкетирование «Космическая история России» – первые итоги	152

ПРЕДИСЛОВИЕ

IV Международная научно-практическая конференция «Чтения имени В. В. Терешковой», посвященная космическим исследованиям в России и мире и инновационным путям развития, состоялась 09 марта 2023 года. Организаторы конференции: Благотворительный фонд В. В. Терешковой, Департамент культуры Ярославской области и ГАУК ЯО «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 путем 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 ученые, педагоги, учащиеся, творческая интеллигенция, представители средств массовой информации и общественных организаций из различных городов России.

Стендовые доклады были размещены в электронных киосках центра. Среди них участники конференции обратили внимание на сообщения молодых исследователей Вселенной.

Работали 3 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 молодежь 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 молодежи через приобщение к современным техническим средствам и методам;
- конференция способствовала повышению уровня образования, культуры и просвещения молодого поколения.

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

В настоящем сборнике представлены статьи и тезисы докладов участников IV Международной научно-практической конференции «Чтения имени В. В. Терешковой».

*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 IV Международной научно-практической конференции!



Приветствую вас на Ярославской земле.

Конференция в Ярославском Планетарии в течение многих лет стала местом притяжения специалистов космической отрасли, ученых, педагогов, космонавтов и талантливой молодежи, увлеченной изучением космического пространства, представителей общественных организаций из различных городов России и зарубежных стран. На конференции представлены исследования по астрономии и космонавтике, современные направления развития космической науки и актуальные вопросы астрономического образования. Столь солидный состав участников позволяет на высоком экспертном уровне обсудить широкий круг проблем совершенствования образования и междисциплинарного диалога со смежными областями.

Уверена, что конференция будет содействовать обмену опытом и знаниями, а ее результаты найдут продолжение в новых исследованиях Вселенной.

Желаю участникам конференции продуктивной работы, успехов, доброго здоровья, благополучия и новых достижений!

Валентина Терешкова
Герой Советского Союза, летчик-космонавт СССР

Приветствие М. В. Васильевой

Дорогие гости, уважаемые коллеги!



2022-2031 годы объявлены Президентом России Владимиром Владимировичем Путиным Десятилетием науки и технологий. Одна из задач Десятилетия – рассказать, какими научными достижениями может гордиться наша страна.

В 2023 году весь прогрессивный мир отмечает знаковый юбилей: 60-летие полёта в космос первой в мире женщины-космонавта, Героя Советского Союза, нашей самой знаменитой Ярославны – Валентины Владимировны Терешковой.

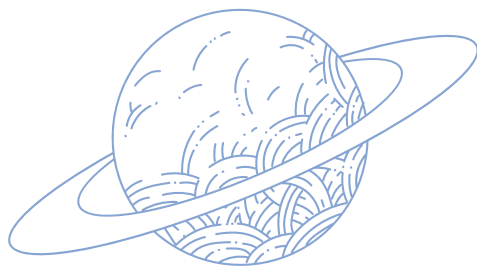
Незабываемое событие: 16 июня 1963 года впервые в мире во время одиночного управляемого полёта лётчик-космонавт Валентина Терешкова вывела на земную орбиту свой пилотируемый корабль, завоевав искреннюю любовь миллионов простых людей из самых разных стран и континентов.

Культурно-просветительский центр имени В. В. Терешковой в Ярославле с гордостью носит имя ярославской «Чайки». Учреждение эффективно решает задачу популяризации знаний в сфере астрономии и космонавтики, служит стартовой площадкой для многих значимых мероприятий. Ежегодная Международная научно-практическая конференция «Чтения имени Валентины Владимировны Терешковой», прошедшая в этом году в четвертый раз, является мощным инструментарием для стимулирования к поиску инновационных путей развития, обеспечивающих системные подходы к достижению амбициозных целей будущего и дальнейшему прогрессу нашей страны!

Желаю всем участникам вдохновения и успеха, новых свершений и открытий!


Директор департамента культуры Ярославской области
М. В. Васильева

ИССЛЕДОВАНИЯ
ПО АСТРОНОМИИ
И КОСМОНАВТИКЕ



ОКОЛОЗЕМНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО КАК СРЕДА МОНИТОРИНГА

 **А. К. Муртазов**

 *Рязанский государственный университет имени С. А. Есенина*

 *a.murtazov@365.rsu.edu.ru*

Околоземное космическое пространство (ОКП) представляет собой сложную открытую систему. Оно защищает биосферу от вредных корпускулярных и электромагнитных воздействий, препятствует проникновению в биосферу космической пыли и является важным звеном в сложной цепи солнечно-земных связей, определяющих климатические и экологические факторы окружающей среды.

В связи с этим необходим мониторинг всех процессов и объектов как в околоземном пространстве, так и в Солнечной системе с целью контроля их состояния и прогноза опасности для космической техники, биосферы и человека.

ВВЕДЕНИЕ

Околоземное космическое пространство (ОКП) представляет собой глобальную среду, окружающую биосферу нашей планеты. Согласно ГОСТ 25645.103-84 область, занимаемая ОКП, ограничена озоновым слоем (~25 км) и орбитой Луны (~ $4 \cdot 10^5$ км) общим объемом до 10^{18} км³, поскольку процессы, протекающие именно здесь, оказывают определяющее влияние на живые организмы Земли, биосферу в целом.

Как объект мониторинга ОКП может рассматриваться с различных аспектов [1] в зависимости от исследуемых компонентов околоземной среды и методов мониторинга.

Фундаментальным направлением в исследовании процессов в околоземном космическом пространстве является [17]: а) контроль физического состояния ОКП и процессов, происходящих в нем под действием различных обуславливающих это состояние факторов; б) изучение связи процессов в ОКП с процессами в биосфере.

1. Физическое состояние ОКП весьма тесно связано с воздействиями на него Солнца.

2. Немаловажную роль в процессах в ОКП и биосфере играют космические лучи высоких энергий, приходящие из галактической среды.
3. Взаимодействие ОКП с межпланетной пылью, веществом комет, метеорами, мини-кометами и т. д. оказывает как прямое, так и опосредованное влияние на состояние ОКП и биосферы. Кардинальным образом изменить состояние ОКП и биосферы может взаимодействие их с космическими телами достаточно крупных размеров.
4. Процессы, возникающие в ОКП в результате техногенных воздействий различных видов, нарушают его равновесие. К ним можно отнести различные виды техногенных излучений, искусственные космические объекты и техногенный мусор, остатки ракетного топлива и т. д.

Виды основных воздействий, определяющих процессы в ОКП, его структуру и взаимодействие с биосферой, приведены на рисунке 1 [18].

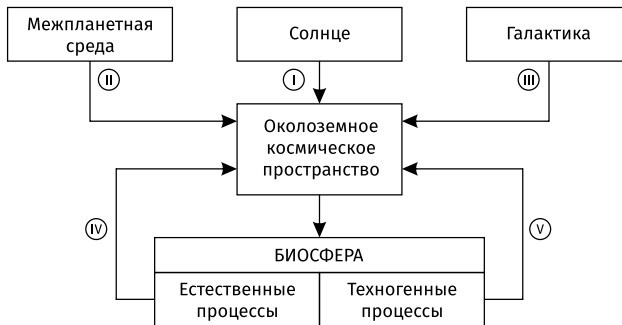


Рисунок 1. Основные связи и взаимодействия околосземного космического пространства.

Вопрос об устойчивости ОКП под влиянием естественных и техногенных воздействий тесно связан с наличием в ОКП обратных связей, способных компенсировать эти воздействия и вернуть его в состояние динамического равновесия. Биосфера имеет информационную емкость, на двадцать порядков превосходящую информационную емкость окружающей среды, и примерно на такую же величину большее количество обратных связей, обусловленных наличием биоты [9]. Следовательно, для необратимого выхода ОКП из состояния равновесия требуется значительно меньшая энергия воздействия на него.

МОДЕЛИ ФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОКП

ОКП можно представить как систему вложенных друг в друга подсистем различной сложности и свойств, взаимодействующих между собой, с системой в целом, с биосферой.

Описание этих систем проводится по многим группам параметров. Например, распределение заряженных и нейтральных частиц удобно при описании процессов в основных структурах ОКП [22]: *мезосфере* (~50-90 км), *термосфере* (~90-1000 км), *экзосфере* (>~2000 км), *ионосфере* (~70-1000 км), *плазмосфере* (~1,2-4 R_{\oplus}), *магнитосфере* (~4-100 R_{\oplus}). Три первые системы связывают с нейтральными частицами, а три последующие – с заряженными – ионами и электронами, образовавшимися в результате ионизации атомов и молекул солнечным излучением и/или высокоэнергичными частицами (рисунок 2).

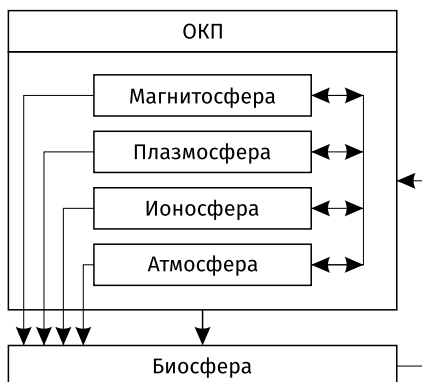


Рисунок 2. Подсистемы ОКП, описываемые взаимодействием нейтральных и заряженных частиц.

К настоящему времени создано большое количество моделей, составляющих ОКП, начиная с модели гравитационного потенциала Земли и заканчивая моделями космического мусора различного происхождения, а также моделями потоков различных электромагнитных излучений и частиц, приходящих из космоса. Кроме того, сюда входят модели взаимодействия отдельных структур в ОКП между собой и модели их воздействия на биосферу. Последние составляет основы экологии ОКП [18].

Подобный комплекс положен в основу нормативных документов ГОСТ единого группового номера 25645, содержащих расчетные модели основных факторов раздела «физические условия космического пространства» [16].

Он содержит расчетные модели по основным факторам раздела «физические условия космического пространства»:

- активность Солнца и верхняя атмосфера Земли;
- ионосфера Земли;
- магнитосфера Земли и геомагнитное поле;
- космические лучи (галактические и солнечные);
- радиационные пояса Земли;
- рентгеновское и гамма-излучение;
- солнечные излучения;
- солнечный ветер;
- межпланетное магнитное поле;
- метеорное и техногенное вещество;
- характеристики Луны и планет.

Сюда также можно добавить модели геофизических процессов, естественных потоков энергии и вещественных загрязнений, идущих со стороны Земли (вулканы, землетрясения, циклоны, тайфуны и т. д.), а также модели техногенных процессов, оказывающих влияние на ближний космос (техногенные электромагнитные излучения, мощные взрывы и т. д.). Подробно физика процессов, происходящих в ОКП, описана в целом ряде работ [16; 17; 18; 20; 24].

Исследования природы процессов, возникающих в биосфере в результате космических воздействий, связаны главным образом с изучением воздействия на всю эпигеосферу со стороны Солнца, галактического электромагнитного и корпускулярного потоков.

Построен целый ряд схем воздействия солнечной активности на биосферу через компоненты околоземного пространства [7; 8; 30]. Они показывают, что солнечная активность может оказывать влияние на биосферу как через возмущения природного геомагнитного поля, так и посредством других физических агентов.

Гамма-излучение от вспышек галактических источников различной природы может уничтожать озоновый слой, что в итоге создает угрозу прямого воздействия на биосферу жестких электромагнитных излучений [33; 34].

С другой стороны, поскольку гелиофизические факторы влияют на ход важных и широко распространенных физико-химических процессов (в частности, протекающих в водных растворах), они должны воздействовать на многие стороны биологических явлений, что находит отражение в соответствующих изменениях показателей жизнедеятельности большинства живых организмов [9].

Спорадические возмущения на Солнце и магнитосфере (вспышки, внезапные магнитные бури и т. д.) влияют на биосферу так, будто в среде обитания появляется какой-то сигнал, на который реагирует организм. Свойства этого сигнала таковы, что он сопутствует и вспышкам, и магнитным бурям, возрастает с возрастанием географической широты, имеет сезонную зависимость [7; 8].

Этот сигнал можно ассоциировать с микропульсациями магнитного поля Земли. Они подразделяются на два класса: почти синусоидальные P_c и широкополосные P_r . Спектр частот геомагнитных пульсаций заключен в пределах от нескольких мГц – 1 кГц, амплитуда – максимум несколько гамм [13].

Со стороны более высоких частот, чем у микропульсаций, ионосфера не прозрачна. Уровень напряженности геомагнитного поля в ней определяется на средних широтах атмосфериками, на высоких – УНЧ-излучением магнитосферы, которое частично приходит из ионосферы. Со стороны более низких частот к полосе микропульсаций примыкают области периодических и циклических вариаций геомагнитного поля, связанные частично с собственными колебаниями Земли, а также частично с собственными колебаниями Солнца с периодом 2 часа 40 мин.

Есть основания считать [7], что высокочастотная область биоэффективных частот (~ГГц) создается преимущественно вынужденным резонансом микромасштабных структур организма (ионы, аминокислоты, мембраны и т. п.), а низкочастотная (ОНЧ-УНЧ диапазон) – параметрическим резонансом крупномасштабных систем (сердце, мозг, кровеносная система и т. п.).

Биоэффективные частоты определяются собственными частотами соответствующих систем организма и могут быть вычислены при знании масштабных факторов и характерных скоростей в рассматриваемой системе. Сравнение вычисленных биоэффективных частот с выявленными экспериментально показывает их хорошее соответствие друг другу [26].

Частоты биоритмов человеческого организма лежат главным образом в инфразвуковой и суперинфразвуковой области [14]. Биотоки мозга имеют выделенные резонансные частоты: альфа-ритм – 8–13 Гц; бета-ритм – 14–30 Гц; гамма-ритм – более 30 Гц; тэта-ритм 4–7 Гц; дельта-ритм – 1,5–3 Гц. Период глотательных движений составляет ~4 с, цикл сердечной деятельности – 0,8 с, период вдоха-выдоха – около 6 с, период, соответствующий частоте распространения нервных импульсов, – около 0,02 с, средний период изменения биотоков в мышцах – 0,03 с.

Как известно, электромагнитное поле у поверхности Земли в области сверхнизких частот имеет четко выделенную резонансную структуру. Это шумановские резонансные полости между поверхностью Земли и нижней границей ионосферы (*D*- и *E*-области): $f_1 = 10,6$; $f_2 = 18,3$; $f_3 = 25,9$; $f_4 = 33,5$; $f_5 = 41,1$ Гц.

Параметры среды обитания с разными временными масштабами регулярно изменяются в цикле солнечной активности.

При вспышках на Солнце, сопровождающихся мощными потоками электромагнитного излучения, протонов и электронов, вызывающих магнитные и ионосферные бури, изменяются электромагнитные свойства нижней ионосферы. Это приводит к изменению резонансных частот полости и, следовательно, к нарушению равновесия связанных колебательных систем «человек – среда обитания» [7]. Люди с нарушенной системой адаптации (в основном дети и пожилые люди) могут испытывать физический и психический дискомфорт. Во время геомагнитных бурь непосредственным фактором влияния на среду обитания являются не возмущения геомагнитного поля, а высыпания в ионосферу Земли высокоэнергичных электронов, которые изменяют низкочастотные электромагнитные поля в среде обитания. Поскольку эти поля проникают во внешнюю ионосферу, то следует ожидать их влияния на организм человека дополнительно к прямому воздействию корпускулярных потоков.

В биосфере Земли последствия взаимодействия связаны с динамикой популяций животных, эпидемий, эпизоотий, количеством сердечно-сосудистых заболеваний [6].

Сейчас у гелиофизиков практически нет сомнений в том, что основным агентом-переносчиком перепадов космической погоды в биосферу являются электромагнитные поля низких и крайне низких частот. Особенно важны здесь квазипериодические вариации параметров этих полей с периодами, близкими к периодам важнейших биологических ритмов [7].

Как геофизические, так и биологические процессы с периодами колебаний менее суток могут представлять собой синхронизованные с внешними факторами автоколебания [8]. К ним Б. М. Владимирский относит собственные колебания атмосферы-ионосферы (12 часов и гармоники), гравитационные собственные колебания Солнца (существование которых, по мнению некоторых специалистов, еще окончательно не доказано) – 180 мин., 160 мин. и 120 мин., близкие к высоким гармоникам суток и собственным сейсмическим колебаниям Земли (60 мин., 44 мин. и др.). В среде обитания такие колебания часто присутствуют в микровариациях атмосферного давления и низкочастотных электромагнитных полей. Согласно современным биофизическим представлениям вариации этих экологических переменных воспринимаются организмами и могут сыграть роль «датчика времени» для некоторых биологических микроритмов. Так, период 120 мин. найден в активности мелких грызунов, наблюдаемых на обширных территориях. Некоторые биологические микроритмы, вероятно, представляют собой свободные автоколебания, никак не связан-

ные с временной структурой среды обитания. Не исключено, что близость α -ритма мозга человека к фундаментальной частоте ионосферного волновода (8 Гц) не является случайной [26].

Наиболее энергетически заметным является процесс генерации инфразвуковых колебаний в атмосфере как следствие взаимодействия солнечного ветра с плазмой ОКП и атмосферой [25]. Анализ спектров инфразвука показывает наличие частот с периодами, характерными для солнечной активности 27 суток, 24 часа, 12 часов. Энергия инфразвука возрастает при падении солнечной активности.

Сценарий связи солнечной активности с инфразвуком в атмосфере сводится здесь к следующей схеме (рисунок 3). Изменения солнечной радиации приводят к модуляции галактических космических лучей, поток которых при взаимодействии с нижней атмосферой изменяет ее прозрачность путем образования аэрозолей и вариаций малых составляющих атмосферы (NO_x , H_2O , O_3 и др.). Изменения оптической прозрачности приводят к пространственным вариациям поглощения солнечной энергии в атмосфере. Вследствие этого в различных зонах атмосферы образуются температурные градиенты и тепловые неустойчивости, порождающие инфразвуковые колебания. Образовавшийся инфразвук может оказывать влияние на флуктуации интенсивности взаимодействия космических лучей с атмосферными аэрозолями, что отображается введением обратной связи. Инфразвуковые колебания могут также усилить модуляцию прозрачности и эффект оптико-акустического преобразования в атмосфере.

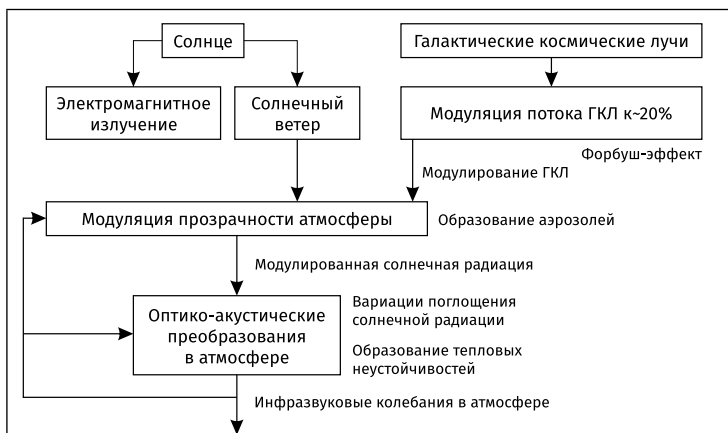


Рисунок 3. Сценарий образования инфразвука в атмосфере под действием солнечного излучения, СКЛ и ГКЛ [25].

МОДЕЛИ МУСОРА ЕСТЕСТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ОКП

Еще одной обширной и постоянно изменяющей свойства средой ОКП является среда мусора естественного (частицы космической пыли, метеороиды) и техногенного (космическая техника и ее остатки – собственно космический мусор) происхождения.

Модели распределения естественных и техногенных частиц в ОКП различаются, поскольку имеется целый ряд различий в их физических свойствах, направлениях движения и прихода к космической технике на околоземных орбитах.

В основном эти различия следующие:

1. средняя плотность частиц метеорного вещества ниже, чем техногенных частиц;
2. направления прихода метеорного вещества, если не рассматривать экранирование Землей, могут быть различными, тогда как частицы космического мусора движутся в основном в плоскости земного экватора;
3. скорость техногенного мусора зависит от наклона и ориентации космических аппаратов;
4. поток частиц техногенного мусора размерами более 1 мм превосходит поток метеороидов, для более мелких частиц поток естественных частиц больше потока техногенных.

Поток твердых частиц естественного происхождения – метеороидов – составляет, по некоторым данным, до $\sim 10^4$ тонн/год, но так как время их жизни в ближнем космосе невелико – порядка суток, то их концентрации малы и сильно варьируют во времени и в пространстве. Поток твердых частиц антропогенного происхождения значительно меньше потока метеороидов – $\sim 10^2$ - 10^3 тонн/год, но из-за большого времени жизни их концентрация в ближнем космосе, особенно на высотах преимущественных орбит космических аппаратов, во много раз превосходит концентрацию метеороидов.

В настоящее время для оценки метеорной обстановки в NASA используется Meteoroid Engineering Model (MEM) (SEE/CR-2004-400), включающая в себя (1) распределение скоростей метеороидов в функции их массы; (2) поток метеороидов с массой более 100 мк; (3) эффект от плазмы, образующейся при ударе очень маленьких частиц, имеющих очень большую скорость (4) изменения пространственной плотности метеороидов в зависимости от их скорости [19; 28].

Европейское космическое агентство использует в своей работе IMEM – Interplanetary Meteoroid Engineering Model [27]. В нашей стране используется ГОСТ 25645.128-85.

Общие данные о потоке тел естественного и техногенного происхождения в ОКП представлены на рисунке 4 [15].

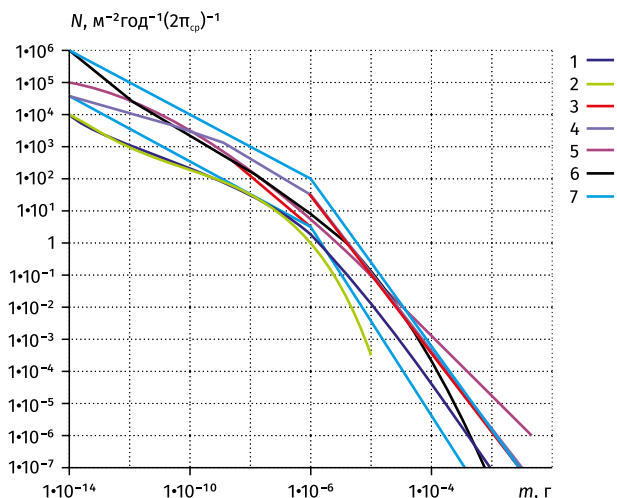


Рисунок 4. Распределение потока КМ и метеорного вещества в ОКП по размерам.

Основная зависимость потоков этих тел укладывается в полосу, в которой на рисунке 4 отсутствует координатная сетка. Все модели естественных тел попадают в эту полосу. Исключение составляют зоны для метеороидов совместно с техногенным мусором для $m > 10^{-4}$ г, в которые попадают данные радиолокационных наблюдений и оптических наблюдений ярких метеоров с низкой фотометрической точностью.

Таким образом, средняя концентрация метеорного вещества в околоземном пространстве составляет $\sim 10^{-14}$ см^{-3} , то есть близка к базовой концентрации пылевых частиц в районе земной орбиты. В период действия наиболее активных потоков она несколько увеличивается. В редких случаях во время метеорных дождей концентрация метеороидов резко возрастает еще на 2–3 порядка. Однако изменения температуры за счет поглощения метеорным потоком солнечного излучения не происходит, $\Delta T = 10^{-3} - 10^{-2}$ К [2]. То есть космическая пыль в ОКП и Солнечной системе при ее современной концентрации не оказывает влияния на климат Земли [11]. Согласно расчетам [4], даже попадание Солнечной системы в плотную газопылевую туманность типа «угольный мешок» не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на поглощение солнечного излучения и температуру Земли и не вызовет глобального оледенения.

С другой стороны, имеются некоторые соображения о том, что поступающая в атмосферу Земли материя метеорного происхождения способна оказывать влияние на климатические процессы [23]. Механизм этого влияния связан с содержащимся в атмосфере аэрозолям метеорной природы и может действовать по крайней мере двумя способами: (а) частицы метеорной дымки (ядра Айткена) способны служить ядрами конденсации в тропосфере и стратосфере; (б) заряженные метеорные частицы, находящиеся в мезосфере, могут заметно (на несколько процентов) изменять общее сопротивление атмосферы и, таким образом, влиять на глобальную токовую цепь. То есть метеорная пыль в атмосфере Земли потенциально является одним из климатообразующих факторов, заслуживающих дальнейшего исследования и последующего учета в имеющихся климатических моделях.

Есть также неподтвержденное мнение о том, что попадание пылевых частиц в ОКП и атмосферу из зодиакального облака способно заметно изменить альbedo атмосферы и таким образом повлиять на глобальную температуру Земли [11]. Причиной этого называют приливное воздействие материи галактических рукавов при пересечении Солнечной системой плоскости Галактики на кометные ядра в облаке Оорта. Это вызывает их приток в зодиакальное облако и ОКП.

Взаимодействие метеорного вещества с атмосферой способно порождать инфразвуковые колебания.

Современные исследования [12] показывают, что пылевые звуковые возмущения во время интенсивных метеорных потоков: 1) генерируют инфразвуковые колебания, мощность которых в диапазоне частот от нескольких десятых до нескольких десятков Гц у поверхности Земли может превосходить мощность инфразвуковых колебаний от других источников; 2) приводят к формированию на высотах 110–120 км акустико-гравитационных вихревых структур. В результате во время интенсивных метеорных потоков усиливается относительная интенсивность зеленого излучения ночного неба.

На рисунке 5 [12] представлено распределение инфразвуковых колебаний у поверхности Земли от различных источников: область инфразвуковых возмущений, порождаемых малыми взрывами (1); область инфразвуковых волн от больших взрывов (2); инфразвуковые колебания от волн Рэлея при землетрясениях, магнитных бурь, ураганов, смерчей, волн, ассоциируемых с горами (3); область волн, источником которых являются сверхзвуковая авиация, грозы (4); микробаромы (5); область, ограничивающая зону существования локального турбулентного шума (6); область волн, связанных с пылевой звуковой модой во время метеорных потоков (7).

Кривая 7 характеризует инфразвуковые колебания, происхождение которых связано с существованием пылевых звуковых волн в нижней ионосфере Земли во время метеорных потоков. Зависимость 7 имеет следующие параметры: высота локализации пылевого облака: $h \approx 90$ км; его характерный вертикальный размер – порядка 1 км; горизонтальный размер – 10 км; размер пылевых частиц, составляющих облако, $a \approx 25$ нм; их концентрация: $n_d \approx 10^2$ см⁻³; концентрация электронов: $n_e \approx 10^5$ см⁻³; температура нейтралов: $T_{n0} \approx 140$ К. По мнению авторов работы [12], это показывает, что в области частот от нескольких десятых до нескольких десятков Гц генерация инфразвуковых колебаний пылевыми звуковыми возмущениями во время метеорных потоков Персеиды, Леониды, Геминиды, Ориониды может быть наиболее важным источником инфразвука у поверхности Земли.

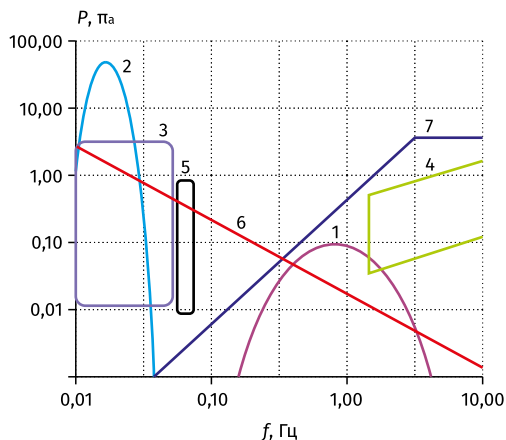


Рисунок 5. Схема распределения инфразвуковых колебаний у поверхности Земли от различных источников [12].

Исследования показали, что протекание практически всех физических процессов в околоземном пространстве порождает инфразвуковые колебания в атмосфере, оказывающие влияние на процессы в различных геосферах и на которые биота реагирует тем или иным образом.

С прикладной точки зрения, исследования содержания метеорных тел в околоземном пространстве и метеорных потоках актуальны как в связи с проблемой экологической опасности, так и с потенциальным риском для космической техники от метеороидов сравнительно небольших размеров. Принято считать, что опасными для космической техники являются метеороиды диаметром более 1 мм. Хотя их концентрация в околоземном

пространстве достаточно мала даже в сравнении с космическим мусором, энергия соударения весьма высока [21].

Проведенные исследования [3; 32] показывают, что метеороидный риск в околоземном пространстве невелик. Его величина для наиболее активных метеорных потоков не превышает $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-2}$ в периоды их пиковой активности. Однако величина индивидуального метеороидного риска достаточно близка к значению предельно допустимого риска: $R_{\text{Lim}} = 10^{-6}$.

Кроме того, общая площадь околоземной популяции ИСЗ достаточно велика, что значительно увеличивает для нее коллективный метеороидный риск. Соответственно, метеороидная опасность в околоземном пространстве требует постоянного учета.

Кроме того, что исследования метеороидного риска весьма важны для долгосрочного прогноза развития космических исследований с точки зрения безопасности космонавтов и сохранности космической техники.

Выводы

В заключение можно отметить, что воздействие процессов в околоземном пространстве на биосферу носит комплексный характер и тесно связано с его воздействием на устойчивость геосистем и безопасность жизнедеятельности человека.

В связи с этим как объект мониторинга ОКП может рассматриваться с различных точек зрения в зависимости от исследуемых компонентов околоземной среды и методов мониторинга.

Список литературы


1. Бармин И. В., Кулагин В. П., Савиных В. П., Цветков В. Я. Околоземное космическое пространство как объект глобального мониторинга // Космонавтика и ракетостроение. – 2013. № 4. – С. 4–9.
2. Бодрова И. В., Карпунина А. А., Муртазов А. К. Пыль в Солнечной системе и экология Земли // Экологические системы и приборы. – 2018. № 11. – С. 8–13.
3. Бодрова И. В., Муртазов А. К. Метеороидный риск в околоземном пространстве // Аэрокосмическое приборостроение. – 2020. № 6. – С. 14–21.
4. Бодрова И. В., Жабин В. С., Муртазов А. К., Токарева Н. Б. О влиянии космической пыли на климат Земли // Небо и Земля / Под ред. С. А. Язева. – Иркутск: Издательство ИГУ, 2021. – С. 124–131.
5. Борисевич А. Н., Границкий Л. В. Предварительные результаты исследования влияния метеорных потоков на погодные условия // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. – Иркутск: 2000.

6. Бреус Т. К. Влияние «космической погоды» на биологические объекты // Земля и Вселенная. – 2009. № 3.
7. Владимирский Б. М., Темуриянц Н. А., Мартынюк В. С. Космическая погода и наша жизнь. – Фрязино. «Век-2», 2004. – 224 с.
8. Владимирский Б. М. Солнечно-биосферные связи. Полвека спустя после А. Л. Чижевского // История и современность. – 2009. Вып. № 2 (10).
9. Горшков В. Г. Физические и биологические основы устойчивости жизни. – М: ВИНТИ, 1995. – 470 с.
10. ГОСТ 25645.128-85. Вещество метеорное. Модель пространственного распределения. М.: Издательство стандартов, 1985. 24 с.
11. Ермаков В. И., Охлопков В. П., Стожков Ю. И. Влияние космической пыли на климат Земли // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2006. № 3. – 41–51.
12. Копнин С. И., Попель С. И. Формирование нано- и микромасштабных частиц в атмосфере во время метеорных потоков и генерация инфразвуковых колебаний // Динамические процессы во взаимодействующих геосферах. – М.: ИДГ РАН, 2006. – С. 420–427.
13. Ларин И. К. Химия и алхимия озонового слоя // Наука и жизнь. – 2001. № 1.
14. Мазур И. И., Иванов О. П. Опасные природные процессы. – М.: 2004. – 702 с.
15. Миронов В. В., Толкач М. А. Модели метеороидной среды в околоземном космическом пространстве и определение плотности потока метеороидов // Космическая техника и технологии. – 2017. № 2 (17). – С. 49–62.
16. Модель космоса. Т. 1: Физические условия в космическом пространстве / Под ред. М. И. Панасюка. – М.: КДУ, 2007. – 872 с.
17. Муртазов А. К. Экология околоземного космического пространства. – М.: Физматлит, 2004. – 304 с.
18. Муртазов А. К. Физические основы экологии околоземного пространства. Учебное пособие. – Рязань: РГУ имени С. А. Есенина, 2008. – 272 с.
19. Муртазов А. К., Багров А. В. Модели естественного загрязнения околоземного пространства // Экологические системы и приборы. – 2013. № 1. – С. 28–34.
20. Муртазов А. К. Физика Земли. Космические воздействия на геосистемы: учебное пособие для вузов. 2 е изд. – М: Изд. Юрайт, 2019. – 268 с.
21. Муртазов А. К., Миронов В. В., Бодрова И. В. Физико-математическое моделирование в оптическом мониторинге космических объектов. – Рязань: Изд. Book Jet (И. П. Коняхин А. В.), 2021. – 218 с.
22. Намгаладзе А. А., Юрик Р. Ю. Математическое моделирование возмущений верхней атмосферы Земли. – М: РФФИ, 1998. – 10 с.
23. Огурцов М. Г. О возможном влиянии на климат Земли потоков межпланетной и межзвездной пыли: 31-я ВККЛ. – М: МГУ, 2010. – 5 с.
24. Плазменная гелиогеофизика. В 2 т. / Под ред. Л. М. Зеленого, И. С. Веселовского. – М.: Физматлит, 2008.

25. Сорока С. А., Негода А. А., Мезенцев В. П., Капита Б. И., Каратаева Л. М. Акустический канал влияния солнечной активности на биосферу: Материалы Международного семинара «Биологические эффекты солнечной активности». – Пущино, 2004.
26. Хабарова О. В. Влияние космофизических факторов на биосферу // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2002. № 2. С. 25–39.
27. *Dikarev V., Gruen E., Baggaley J., et al.* The new ESA meteoroid model. *Advances in Space Research*. 2005. Vol. 35, Issue 7. P. 1282–1289.
28. *Drolshagen G., Dikarev V., Landgraf M., Krag H., Kuiper W.* Comparison of Meteoroid Flux Models for Near Earth Space. In: *Trigo-Rodriguez J. M., Rietmeijer F. J. M., Llorca J., Janches D. (Eds.). Advances in Meteoroid and Meteor Science*. Springer, 2008, pp. 191–197.
29. *Granitsky L. V., Borisevich A. N.* Research of influence of the meteoric stream on the weather condition: preliminary consideration // *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering*. 2000. V. 4341. P. 563–570.
30. *Koskinen H., Tanskanen E., Pirjola R., Pulkkinen A. Dyer C., Rodgers D., Cannon P. Mandeville J.-C., Boscher D.* Space Weather Effects Catalogue // *ESA Space Weather Study*. – 2001, Issue 2.2. January 2. – 41 pp.
31. *Murtazov A.* Bright Perseids 2007-2013 and Artificial Earth Satellites Collision Risk Assessment // *WGN. The Journal of the International Meteor Organization*. – 2014. V. 42:2. P. 65–67.
32. *Murtazov A. K.* Assessing the meteoroid risk in near earth space. *Open Astronomy*. 2018. Vol. 27, issue 1. P. 144–149.
33. *Smith D. S., Scalo J., Wheeler J. C.* Importance of Biologically Active Aurora-like Ultraviolet Emission: Stochastic Irradiation of Earth and Mars by Flares and Explosions. – *Astro-ph/0307543*. – 2003. – 21 p.
34. *Thomas B. C. et al.* Gamma-Ray Bursts and the Earth: Exploration of Atmospheric, Biological, Climatic and Biogeochemical Effects // *Astro-ph/0505472*. – 2005. – 68 p.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ОРБИТЫ НЕБЕСНОГО ТЕЛА ПО ПЯТИ ПАРАМ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

 **Н. И. Перов**

 *Государственное автономное учреждение культуры
Ярославской области «Культурно-просветительский центр
имени В. В. Терешковой»*

*Ярославский государственный педагогический университет
имени К. Д. Ушинского*

 *perov@yarplaneta.ru*

ВВЕДЕНИЕ

Определение предварительных орбит небесных тел представляет интерес для наблюдательной астрономии с точки зрения открытия новых тел или идентификации с уже известными [5].

В первой половине XXI века проблема определения орбит небесных тел является актуальной как в небесной механике, так и в астродинамике, что объясняется многообразием траекторий космических объектов. Кроме того, в околоземном космическом пространстве число обломков указанных тел на несколько порядков превышает данные известных каталогов [8]. Своевременное определение их траекторий – одна из гарантий космической безопасности.

В Вашингтонском каталоге визуально-двойных звезд содержится информация более чем о 120 000 визуально-двойных звезд. Основная причина, по которой орбиты большинства звезд не определены, – низкая точность наблюдений и малая дуга, охваченная наблюдениями. В каталоге WDS имеется множество звезд с неопределенными орбитами, изучаемых более ста лет, у которых наблюдениями охвачены дуги 20° – 30° . У большинства методов при работе на малых дугах возникают проблемы со сходимостью. Перспективным направлением является разработка глобально сходящихся методов определения предварительных орбит [2].

Анализ классических методов определения предварительных орбит небесных тел [1] позволяет сделать вывод: процесс определения начальной орбиты состоит из двух частей. Вначале находятся начальные условия – положение \mathbf{r} и скорость $\dot{\mathbf{r}}$ или два вектора положения \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 на известные

моменты времени t_1 и t_2 из наблюдений, затем полученная информация преобразуется в орбитальные элементы. Обе части этого процесса с эпохи Гаусса непрерывно модернизируются [1; 6; 7; 2; 3; 4; 5]. Однако ограничения на применение соответствующих методов еще существуют даже для невозмущенного движения. Эти ограничения для различных методов различны. Одни методы эффективны на малых геоцентрических (или гелиоцентрических) дугах, другие – на больших. Одни методы работают при малых эксцентриситетах орбит, другие – при значительных эксцентриситетах. Одни методы характеризуются высокой точностью, но требуют плотных рядов наблюдений и обладают малой областью сходимости, другие требуют меньшего числа наблюдений, имеют большую область сходимости, их алгоритм отличается быстродействием, но при этом допускается заметная внутренняя погрешность.

В связи с изложенным практический интерес представляет разработка такого метода определения предварительных орбит космических тел по результатам угловых измерений ($T_k, \alpha_k, \delta_k, k = 1, 2, 3, 4, 5$), который был бы применим для малых (1°) и больших (360°) орбитальных дуг, для всех криволинейных финитных и инфинитных движений, отличался бы быстротой сходимости, начальные значения итерированных параметров находились бы в широком диапазоне, а все вычисления вычислялись бы по единому алгоритму, независимо от характера траектории и положения наблюдателя.

Исходные данные: $T_k, \alpha_k, \delta_k, k = 1, 2, 3, 4, 5$, радиус-векторы Земли $\mathbf{R}_k\{X_k, Y_k, Z_k\}$, связанные с гелиоцентрической эклиптической системой координат на некоторую эпоху T (гравитационная постоянная и масса Солнца в данном методе не используются). Искомые величины: ρ_1 и ρ_2 . Здесь T_k – моменты наблюдений по всемирному времени, α_k, δ_k – прямое восхождение и склонение небесного тела в топоцентрической экваториальной системе координат, \mathbf{p}_k – геоцентрический радиус-вектор небесного тела на моменты времени T_k, \mathbf{r}_2 и \mathbf{r}_3 – гелиоцентрические радиус-векторы небесного тела на моменты времени T_2 и T_3 . Используется прямоугольная экваториальная топоцентрическая инерциальная система координат, ось Ox которой направлена в точку весеннего равноденствия, ось Oz – в северный полюс мира, а ось Oy дополняет систему координат до правой, а также гелиоцентрическая и геоцентрическая эклиптические системы координат, оси Ox которых направлены в точку весеннего равноденствия, оси Oz – в северный полюс эклиптики, а оси Oy дополняют эти системы до правых.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Для перехода к гелиоцентрической эклиптической системе координат сначала перейдем от топоцентрической экваториальной системы (α, δ)

к топоцентрической эллиптической системе координат (λ' – эллиптическая долгота, β' – эллиптическая широта).

$$\begin{aligned}\cos\lambda' \cdot \cos\beta' &= \cos\alpha \cdot \cos\delta, \\ \sin\lambda' \cdot \cos\beta' &= \sin\alpha \cdot \cos\delta \cdot \cos\varepsilon + \sin\delta \cdot \sin\varepsilon, \\ \sin\beta' &= -\sin\alpha \cdot \cos\delta \cdot \sin\varepsilon + \sin\delta \cdot \cos\varepsilon.\end{aligned}\quad (1)$$

Произведя необходимые редукционные вычисления, перейдем к геоцентрической эллиптической системе координат (λ, β).

Очевидно,

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{R}_k + \mathbf{\rho}_k. \quad (2)$$

Обозначим

$$\begin{aligned}l_k &= \cos\lambda_k \cdot \cos\beta_k, \\ m_k &= \sin\lambda_k \cdot \cos\beta_k, \\ n_k &= \sin\beta_k.\end{aligned}\quad (3)$$

Тогда гелиоцентрические радиус-векторы небесного тела, орбита которого определяется, выразим в виде

$$\mathbf{r}_k^2 = (\rho_k \cdot l_k + X_k)^2 + (\rho_k \cdot m_k + Y_k)^2 + (\rho_k \cdot n_k + Z_k)^2. \quad (4)$$

Геоцентрические расстояния ρ_3, ρ_4, ρ_5 до небесного тела в моменты времени наблюдений T_3, T_4, T_5 выразим из уравнений плоскости движения небесного тела

$$\begin{aligned}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3) &= 0; \\ (\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_4) &= 0; \\ (\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_5) &= 0.\end{aligned}\quad (5)$$

Соответствующие выражения в явном виде находились с использованием компьютерной алгебры [10]. Очевидно, ρ_3, ρ_4, ρ_5 выражаются из соотношений (5) через $l_k, m_k, n_k, \rho_1, \rho_2$ ($k = 1, 2, 3, 4, 5$).

Уравнение конического сечения представим в виде

$$r_k = \frac{p}{1 + e \cdot \cos v_k}. \quad (6)$$

Разность углов между истинными аномалиями v_1 и v_2, v_1 и v_3, v_1 и v_4, v_1 и v_5 небесного тела найдем из соотношений

$$\cos v_{12} = (\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) / (r_1 \cdot r_2); \quad (7)$$

$$\cos v_{13} = (\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_3) / (r_1 \cdot r_3); \quad (8)$$

$$\cos v_{14} = (\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_4) / (r_1 \cdot r_4); \quad (9)$$

$$\cos v_{15} = (\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_5) / (r_1 \cdot r_5). \quad (10)$$

При этом имеем:

$$\mathbf{v}_2 = \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_{12}; \quad (11)$$

$$\mathbf{v}_3 = \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_{13}; \quad (12)$$

$$\mathbf{v}_4 = \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_{14}; \quad (13)$$

$$\mathbf{v}_5 = \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_{15}. \quad (14)$$

Из уравнений (6), записанных для моментов времени T_1 и T_2 , выразим параметр орбиты p и ее эксцентриситет e :

$$p = \frac{r_1 r_2 (\cos v_2 - \cos v_1)}{r_2 \cdot \cos v_2 - r_1 \cdot \cos v_1}; \quad (15)$$

$$e = \frac{r_1 - r_2}{r_2 \cdot \cos v_2 - r_1 \cdot \cos v_1}. \quad (16)$$

Воспользовавшись уравнениями (6), записанными для моментов времени T_3 , T_4 и T_5 , учитывая соотношения (2), (3), (4), (5), (7) – (16), приходим к системе трех уравнений с тремя неизвестными: ρ_1 , ρ_2 , v_1 . Эти уравнения сводятся к алгебраическим уравнениям, которые составляются и решаются, например, с использованием компьютерной алгебры [10] или известных программ решения алгебраических уравнений (<http://fortran-90.pvbk.html#FM28>). Истинную аномалию v_1 – для проверки – можно также найти из уравнения (17):

$$\begin{aligned} & \cos v_1 \cdot (r_1 \cdot (r_2 - r_3) - r_2 \cdot (r_1 - r_3)) \cdot \cos v_{12} - r_3 \cdot (r_2 - r_1) \cdot \cos(v_{13}) + \\ & + \sin v_1 \cdot (r_2 \cdot (r_1 - r_3)) \cdot \sin v_{12} + r_3 \cdot (r_2 - r_1) \cdot \sin v_{13}. \end{aligned} \quad (17)$$

ПРИМЕРЫ

В примерах при вычислении модельных орбит использовались следующие единицы измерений: 1 единица длины = 1 астрономическая единица = 149596888,9 км; 1 единица времени = 1 тропический год = 365,2422 средних солнечных суток (динамические параметры: гравитационная постоянная и масса Солнца в данном методе используются только для проверки истинности орбиты). В таблицах (1–10) представлены примеры определения эллиптической (таблицы 1–4), параболической (таблицы 5–7) и гиперболической (таблицы 8–10) орбит по угловым измерениям геоцентрических эклиптических координат небесных тел. Все орбиты определены по единому алгоритму. Численные эксперименты показывают наличие

трех корней при решении системы уравнений (6). Корни трех уравнений (6) относительно v_1 заключены в интервале от 0 до 2π . При произвольных значениях начальных величин ρ_2 и ρ_3 , далеких от точных решений, уравнения (1–17) могут дать и отрицательные решения, и мнимые решения, и орбиты, неудовлетворяющие исходным данным. Выбор из нескольких допустимых решений производится по разностям $(O - C)_\alpha$ и $(O - C)_\delta$. Данная процедура рекомендуется в работе В. Б. Кузнецова, посвященной разработке геометрических методов определения орбит небесных тел [5].

При вычислениях использовались методы компьютерной алгебры [10].

Таблица 1

Элементы орбиты Земли в гелиоцентрической эклиптической системе координат на момент времени t_1

Большая полуось a_e , а. е.	Эксцентриситет e_e	Наклон i_e , рад	Долгота восходящего узла Ω_e , рад	Аргумент перигелия ω_e , рад	Средняя аномалия M_{1e} , рад
1,0000010178	0,0167005087369	0,0000440104857	3,0512998383788	1,79768332923	5,185339842

Таблица 2

Геоцентрические эклиптические координаты объекта Y-1

Номер наблюдения	Момент времени t , год	Долгота λ , рад	Широта β , рад
1	0	1,4224722721	0,9255229445
2	0,1	2,1092738333	0,8640247388
3	0,2	2,6611208405	0,7175426836
4	0,3	3,0666063592	0,5756588873
5	0,4	3,3822292902	0,4702924685

Таблица 3

«Итерационный» процесс определения орбиты объекта Y-1

Номер итерации	Геоцентрическое расстояние, ρ_1 , а. е.	Геоцентрическое расстояние, ρ_2 , а. е.	Истинная аномалия, v_1 , рад
1	1,9600283688	2,1957381094	1,0605224700

Таблица 4

Элементы орбиты объекта Y-1

Элементы орбиты	Эталонная орбита	Орбита Y-1
p , а. е.	2,25	2,24999997956
e	0,5	0,49999999650
i , рад	$\pi/3$	1,0471975507
Ω , рад	$\pi/4$	0,7853981626
ω , рад	$\pi/6$	0,5235987550
v_1 , рад	$(M_1 = \pi/9)$	1,0605223115

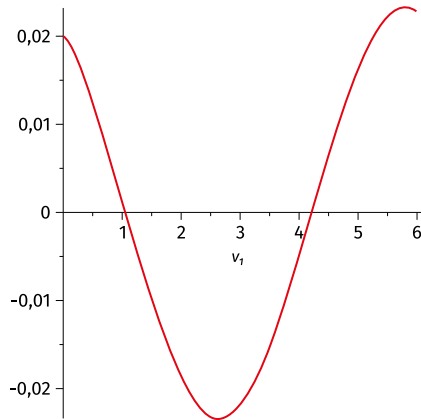
Рисунок 1. Корни уравнения (17) относительно истинной аномалии v_1 для орбиты Y-1.

Таблица 5

Геоцентрические эллиптические координаты объекта Y-2

Номер наблюдения	Момент времени t , год	Долгота λ , рад	Широта β , рад
1	0	1,3112140828	0,8713258743
2	0,1	2,1671290629	0,8594480003
3	0,2	2,7493543840	0,7042847612
4	0,3	3,1212898610	0,5738799437
5	0,4	3,3191746174	0,5371760190

Таблица 6

«Итерационный процесс» определения орбиты объекта Y-2

Номер итерации	Геоцентрическое расстояние, ρ_1 , а. е.	Геоцентрическое расстояние, ρ_2 , а. е.	Истинная аномалия, v_1 , рад
1	1,7101953860	2,0529762957	1,0599999992

Таблица 7

Элементы орбиты объекта Y-2

Элементы орбиты	Эталонная орбита	Орбита Y-2
ρ , а. е.	2,25	2,2500000002
e	1	0,9999999994
i , рад	$\pi/3$	1,0471975511
Ω , рад	$\pi/4$	0,7853981639
ω , рад	$\pi/6$	0,5235987760
v_1 , рад	1,06	1,0599999992

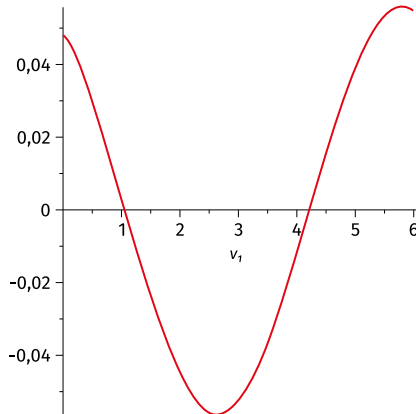
Рисунок 2. Корни уравнения (17) относительно истинной аномалии v_1 . Орбита объекта Y-2.

Таблица 8

Геоцентрические эклиптические координаты объекта X-3

Номер наблюдения	Момент времени t , год	Долгота λ , рад	Широта β , рад
1	0	1,27334607	0,84966134
2	0,1	2,19435307	0,85943453
3	0,2	2,78038428	0,70194447
4	0,3	3,1373663063	0,5774212652
5	0,4	3,3954776992	0,5045778860

Таблица 9

Итерационный процесс определения орбиты объекта X-3

Номер итерации	Геоцентрическое расстояние, ρ_1 , а. е.	Геоцентрическое расстояние, ρ_2 , а. е.	Истинная аномалия, v_1 , рад
1	1,6349895103	2,0220590679	1,0600000731

Таблица 10

Элементы орбиты объекта X-3

Элементы орбиты	Эталонная орбита	Орбита X-3
p , а. е.	2,25	2,2499997892
e	1,2	1,1999998758
i , рад	$\pi/3$	1,0471975500
Ω , рад	$\pi/4$	0,7853981723
ω , рад	$\pi/6$	0,5235987032
v_1 , рад	1,06	1,0600000731

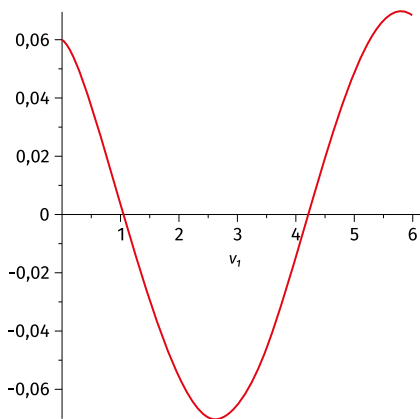


Рисунок 3. Корни уравнения (17) относительно истинной аномалии v_1 . Орбита объекта X-3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод определения кеплеровой орбиты, представленный в настоящей работе, позволяет находить элементы орбиты по пяти оптическим наблюдениям. Изложенный метод работает по единому алгоритму для произвольных криволинейных траекторий в произвольном интервале истинных аномалий (для невозмущенных орбит), независимо от положения наблюдателя. Метод позволяет уменьшить число корней (до одного) соответствующих алгебраических уравнений в отличие от работы [5].

В дальнейшем предполагается расширить область сходимости данного метода.


Список литературы

1. *Абалакин В. К., Аксенов Е. П., Гребеников Е. А., Демин В. Г., Рябов Ю. А.* Справочное руководство по небесной механике и астродинамике [Текст] / Дубошин Г. Н. – М.: Наука, 1976. – 864 с.
2. *Байдин А. Э., Перов Н. И., Романенко Л. Г.* Определение орбит визуально-двойных звезд, открытых Отто Струве в Пулково // Вестник СПбГУ. Сер. 1. Математика. Механика. Астрономия. – 2018. – Т. 5 (63). – Вып. 1. – С. 148–157.
3. *Кузнецов В. Б.* К вопросу об определении предварительной орбиты небесного тела // *Астрономический вестник РАН*, 2019. – Т. 53. – № 6. – С. 456 – 466.


4. Кузнецов В. Б. Определение параболической орбиты геометрическим методом [Текст] // СПб.: Труды Института прикладной астрономии РАН, 2020. – Вып. 55. – С. 16–23.
5. Кузнецов В. Б. Определение предварительной орбиты геометрическим методом Коши-Курышева-Перова [Текст] // СПб.: Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия, 2021. – Т.8. – № 4. – С. 716–727.
6. Курышев В. И., Перов Н. И. О нетрадиционном способе определения элементов орбит неизвестных космических объектов по данным обработки обзорных фотоснимков на ЭВМ // Астрономический журнал АН СССР. М.: Наука, 1982. – Т. 59. – Вып. 6. – С. 1212–1217.
7. Перов Н. И. Унифицированный метод определения предварительных орбит небесных тел по малому числу оптических наблюдений // Астрономический журнал АН СССР. М.: Наука, 1989. – Т. 66. – Вып. 5. – С. 1093–1099.
8. Шустов Б. М. О роли науки в изучении и парировании космических угроз // Вестник Российской академии наук. М.: ИНАСАН, 2019. – Т. 89. – № 8. – С. 777–1000 / С кафедры Президиума РАН.
9. Язык программирования FORTRAN. Сайт Потемкина В. [Электронный ресурс]. URL: <http://fortran-90.pvbk.html#FM28> (дата обращения 05.12.2020).
10. Bernardin L., Chin P., DeMarco P., Geddes K. O., Hare D. E. G., Heal K. M., Labahn G., May J. P., McCarron J., Monagan M. B., Ohashi D., Vorkoetter S. M. The Essential Tool for Mathematics and Modelling // Copyright@Maplesoft, a division of Waterloo Maple Inc., 2011. www.maplesoft.com/maple/
11. <http://math-vtch-astr-journal.spbu.ru/article/view/12576>
12. Mason B. D., Wycoff G. L., Hartkopf W. J. The Washington Visual Double Star Catalogue/ – Washington: US Naval Observatory, 2017. – Режим доступа: <http://ad.usno.navy.mil/wds/wds/.html>

ОЦЕНКА ИНТЕРВАЛОВ ВРЕМЕНИ ПЕРЕХОДОВ ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМЕТ С ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ КРУГОВЫХ ОРБИТ НА ТРАЕКТОРИИ ТЕСНЫХ СБЛИЖЕНИЙ С ПЛАНЕТАМИ В ЯВНОМ ВИДЕ

 **Н. И. Перов, Т. С. Исаева**

 *Государственное автономное учреждение культуры
Ярославской области «Культурно-просветительский центр
имени В. В. Терешковой»*

*Ярославский государственный педагогический университет
имени К. Д. Ушинского*

 perov@yarplaneta.ru

ВВЕДЕНИЕ

Обзор достижений динамики Солнечной системы к началу первого десятилетия XXI века представлен в книге [7]. В монографии [10] дана краткая история кометной космогонии. В работе [4], основанной на результатах численного моделирования эволюции орбит десятков тысяч малых тел под гравитационным влиянием планет, исследована миграция малых тел из различных областей Солнечной системы к формирующимся и современным планетам земной группы. В статье [13] исследуется связь некоторых долгопериодических комет с облаком Оорта [15]. В работах [2; 3] исследуются особенности сближений малых тел с планетами. В работах [16; 17; 18] рассматриваются небесномеханические модели происхождения опасных небесных тел.

Ниже в рамках ограниченной дважды осредненной задачи 3 тел [19; 16] определяются положения источников комет, рассматриваются процесс их формирования, интервалы начальных скоростей кометных ядер в указанных источниках, времена сближений первоначально далеких комет с Солнцем и планетами и исследуются траектории движения этих малых тел.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Определим время миграции кометы из середины сферы действия Солнца с учетом совместного влияния Солнца, обладающего сжатием, и притяжения внешнего тела – галактического ядра. В первом приближении вековая эволюция орбиты кометы описывается в кеплеровых элементах, через которые выражается возмущающая функция относительно короткопериодических переменных – средних аномалий кометы и возмущающей точки при отсутствии соизмеримостей в соответствующих периодах низшего порядка. Такое осреднение, осуществляемое независимо (в приближении Хилла – $a/a_1 \ll 1$), дает выражение для вековой части возмущающей функции [5]. В предположении, если экваториальная плоскость Солнца и орбитальная плоскость ядра Галактики совпадают (наклонение $i_1 = 0$), тогда [1]:

$$de/dt = 10e(1 - e^2)^{1/2}(\sin(i))^2 \sin(2\omega); \quad (1)$$

$$di/dt = -10e^2(1 - e^2)^{-1/2} \sin(i) \cos(i) \sin(2\omega); \quad (2)$$

$$d\omega/dt = 4\gamma(1 - e^2)^{-2}(5\cos^2 i - 1) + 2(1 - e^2)^{-1/2}[(e^2 - 1 + 5\cos^2 i - 1) + 5(\sin^2 i - e^2)\cos(2\omega)]. \quad (3)$$

Здесь i и e – наклон плоскости орбиты кометы к экваториальной плоскости Солнца и эксцентриситет эллиптической орбиты кометы соответственно, ω – аргумент перигелия кометы. Эти элементы (i , ω) оскулирующей орбиты кометы относятся, в общем случае, к плоскости орбиты возмущающего тела и точке весеннего равноденствия. Для рассматриваемой небесномеханической задачи c_1 , c_2 и a являются постоянными величинами относительно времени (интегралами системы соответствующих дифференциальных уравнений [1]), a – большая полуось орбиты кометы. Заметим [1],

$$c_1 = (1 - e^2)(\cos(i))^2; \quad (4)$$

$$c_2 = \frac{2\gamma}{(1 - e^2)^{3/2}} \left(\frac{1}{3} + \cos(2i) \right) + 2(e^2 - (\sin(i))^2) + e^2(\sin(i))^2(5\cos(2\omega) - 3). \quad (5)$$

Здесь

$$\gamma = \frac{1}{2} \frac{\alpha}{\beta}, \quad \alpha = -\frac{3}{8} c_{20} \left(\frac{a_0}{a} \right)^2, \quad \beta = \frac{3}{16} \frac{\mu_1}{\mu} \left(\frac{a}{a_1} \right)^3; \quad (6)$$

$$\tau = \beta(t - t_0) \sqrt{\frac{\mu}{a^3}}. \quad (7)$$

В соотношениях (6) и (7) использованы следующие обозначения: μ и μ_1 – произведения гравитационной постоянной на массы Солнца и ядра Галактики (массы Галактики внутри галактической орбиты Солнца) соответственно; c_{20} – коэффициент второй зональной гармоники гравитационного поля Солнца [5; 1]; a_0 – средний экваториальный радиус Солнца; t – ньютоновское равномерное время, τ – модифицированное время; a_1 – большая полуось круговой орбиты ядра Галактики.

Зависимость эксцентриситета (e) орбиты малого тела от времени (τ)

Из уравнений (1), (4), (5), (6), (7) находится, в явном виде, 1-я квадратура

$$\tau = \int \frac{dw}{\sqrt{\theta(w)}}. \quad (8)$$

Здесь:

$$\theta(w) = [8\gamma c_1 w^7 - 8/3\gamma w^5 + w^2(-2c_2 + 4 + 4c_1) - 8] \cdot [-8\gamma c_1 w^7 + 8/3\gamma w^5 - 20c_1 w^4 + w^2(16 + 16c_1 + 2c_2) - 12]. \quad (9)$$

В уравнениях (8) и (9) $w = 1/(1 - e^2)^{1/2}$, причем движение рассматриваемого малого тела происходит в интервале $w_{\min} \leq w \leq w_{\max}$, где w_{\min} и w_{\max} – положительные корни уравнения (10), при $0 < e < 1$ и $1 < w < \infty$.

$$\theta(w) = 0. \quad (10)$$

При этом $w_{\max} > w_{\min}$, w_{\max} – ближайший к w_{\min} корень уравнения (10). Интеграл (8) может применяться как для ротационного, так и для либрационного движения перигелия орбиты малого тела.

Зависимость наклона (i) плоскости орбиты малого тела от времени (τ)

Из уравнений (2), (4), (5), (6), (7) определяется, в явном виде, 2-я квадратура

$$\tau = c \frac{1}{2} \int \frac{dq}{\sqrt{\Psi(q)}}. \quad (11)$$

Здесь

$$\Psi(q) = [8\gamma q^7 - 8/3\gamma q^5 + (4c_1^{5/2} + (-2c_2 + 4)c_1^{3/2})q^2 - 8c_1^{5/2}] \cdot [-8\gamma q^7 + 8/3\gamma q^5 - 20c_1^{3/2}q^4 + (16c_1^{5/2} + 16c_1^{3/2} + 2c_2c_1^{3/2})q^2 - 12c_1^{5/2}]. \quad (12)$$

В соотношениях (11) и (12) $q = \cos(i)$, $0 < |q| < 1$, точнее, $39^\circ < i < 90^\circ$ (или $90^\circ < i < 141^\circ$). Предельно допустимые значения q (или i) определяются из уравнения (13):

$$\Psi(q) = 0. \quad (13)$$

При этом $q_{\max} > q_{\min}$, q_{\max} – ближайший к q_{\min} корень уравнения (13). Интеграл (13) может применяться как для ротационного, так и для либрационного движения перигелия орбиты малого тела.

ПРИМЕРЫ

Примем начальное значение аргумента перигелия орбиты кометного ядра равным $\omega_{in} = 0^\circ$, а его конечное значение пусть будет равно: $\omega_{fn} = \pi/2$. Положим, что в начальный момент времени комета движется по почти круговой орбите (с эксцентриситетом $e = 0,001$) с большой полуосью $a = 20044,28064$ а. е. (середина сферы действия Солнца). Для данного процесса миграции кометного ядра из указанной области в гравитационном поле Солнца учтем возмущения от галактического ядра и сжатия Солнца. Для системы Солнце – ядро Галактики – кометное ядро примем: $\mu = Gm_s$, $m_s = 2 \cdot 10^{30}$ кг, $a_1 = 8,5$ кпк, $\mu_1 = Gm_g$, $m_g = 4 \cdot 10^{11} m_s$, $a_0 = 696\,600$ км, $c_{20} = -10^{-5}$. Обозначим через $e_{in} = e_{\min}$, $i_{in} = i_{\max}$ начальные значения эксцентриситета и наклона орбиты кометы, а через $e_{fn} = e_{\max}$, $i_{fn} = i_{\min}$ – конечные значения этих величин (для минимального расстояния кометы от Солнца); P_e – время миграции кометы до расстояния от Солнца, равного большой полуоси орбиты планеты.

Из 2 уравнений (9), составленных при $e_{in} = 0,001$ и $e_{fn} = 1 - r_p/a$, найдем c_1 и c_2 (и близкие к ним значения c_1' и c_2' , также вытекающие из уравнения (9)), а затем из уравнения (12) начальные i_{in} и конечные i_{fn} значения наклонов плоскости орбиты малого тела к основной плоскости. Равенство $P_i = P_e$ используется для проверки правильности вычислений времени миграции кометы по приведенным выше формулам. Функция $\theta(w)$ – формула (9) – и функция $\Psi(q)$ – формула (12) – представлены на рисунках (рисунки 1–12). Рассматриваются сближения кометных ядер и планет: Нептун, Уран, Сатурн, Юпитер и Земля. Используются значения одних и тех же указанных выше констант [14].

Сближение кометы с Нептуном
($r_{\max} = 20044,28064$ а. е., $r_{\min} = 30$ а. е.)

$$c_1 = 0,0017946807; c_2 = -1,99640663;$$

$$c_1' = 0,0017946777; c_2' = -1,99641662.$$

$$i_{\text{in}1} = 87,57201256^\circ; i_{\text{in}2} = 87,57201459^\circ; i_{\text{in}3} = 92,42798743^\circ; i_{\text{in}4} = 92,42798541^\circ;$$

$$i_{\text{fin}1} = 39,23149702^\circ; i_{\text{fin}2} = 140,76850297^\circ.$$

$$q_{\max} = +0,77459692; q_{\min} = -0,77459692.$$

$$e_{\min} = 0,001; e_{\max} = 0,99850331.$$

$$P_e = 3,30157292 \cdot 10^9 \text{ лет.}$$

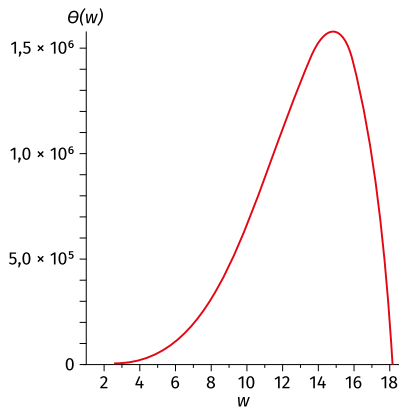


Рисунок 1. График функции $\theta(w)$ для введенных выше констант.

Экстремальные корни уравнения (9):

$$w_{\min} = 1,000000500000375;$$

$$w_{\max} = 18,28446146887619.$$

$$w_m = 14,9403599084236952601 \text{ (для максимума функции);}$$

$$w_{\text{infl}} = 11,5842972707802276 \text{ (точка перегиба функции).}$$

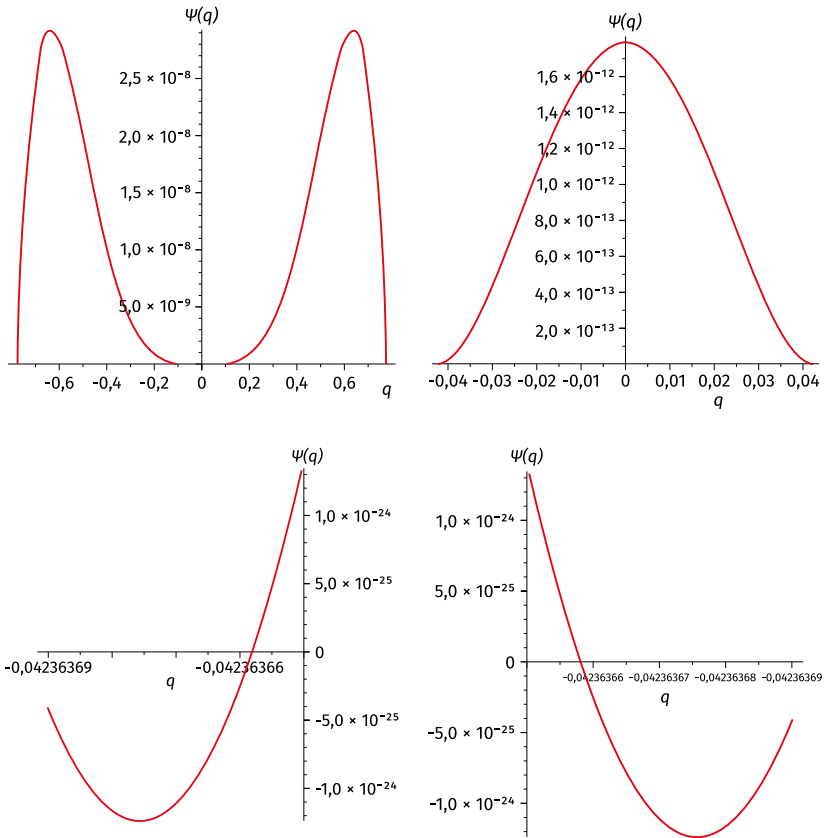


Рисунок 2. График функции $\Psi(q)$ для введенных выше констант.
 Экстремальные корни уравнения (13): $q_{\min} = -0,77459692$; $q_{\max} = +0,77459692$.

Сближение кометы с Ураном
($r_{\max} = 20044,28064$ а. е., $r_{\min} = 19$ а. е.)

$$c_1 = 0,0011369413; c_2 = -1,99773210;$$

$$c_1' = 0,0011369432; c_2' = -1,99772211.$$

$$i_{\text{in}1} = 88,06770396^\circ; i_{\text{in}2} = 88,06770154^\circ; i_{\text{in}3} = 91,93229845^\circ; i_{\text{in}4} = 91,93229603^\circ;$$

$$i_{\text{fin}1} = 39,23155557^\circ; i_{\text{fin}2} = 140,76844430^\circ.$$

$$q_{\max} = +0,77459628; q_{\min} = -0,77459628.$$

$$e_{\min} = 0,001; e_{\max} = 0,99905209.$$

$$P_e = 3,21722324 \cdot 10^9 \text{ лет.}$$

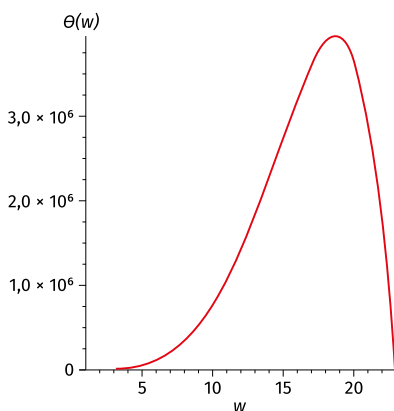


Рисунок 3. График функции $\theta(w)$ для введенных выше констант.

Экстремальные корни уравнения (9):

$$w_{\min} = 1,000000500000375;$$

$$w_{\max} = 22,9724005708461123.$$

$$w_m = 18,7657700412878810 \text{ (для максимума функции);}$$

$$w_{\text{inf}} = 14,5450872313986 \text{ (точка перегиба функции).}$$

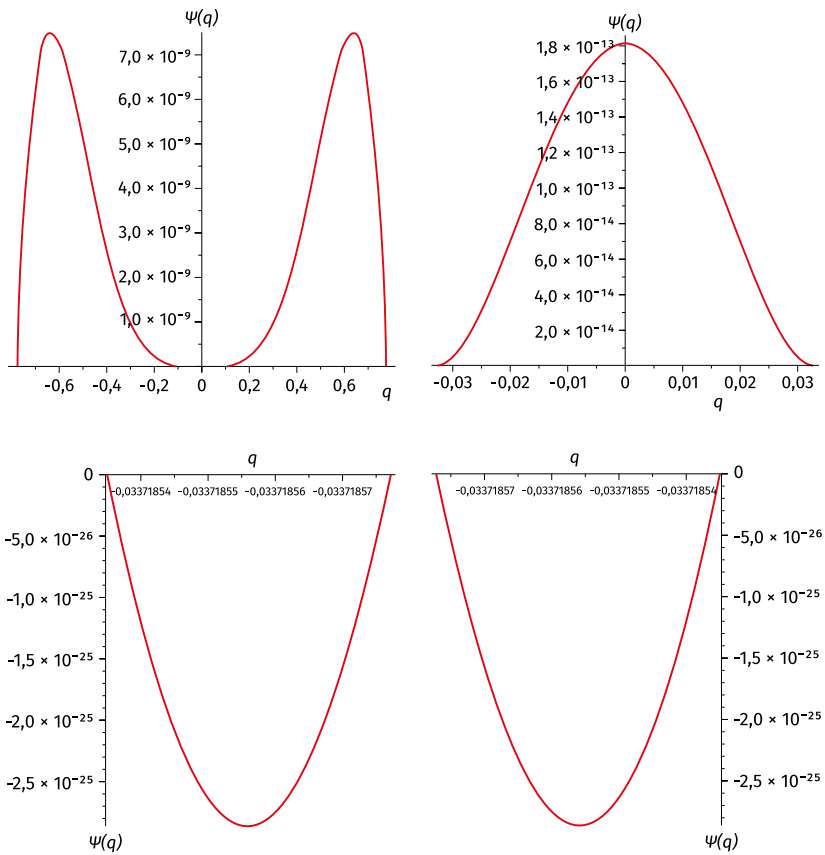


Рисунок 4. График функции $\Psi(q)$ для введенных выше констант.
 Экстремальные корни уравнения (13):
 $q_{min} = -0,77459628$; $q_{max} = +0,77459628$.

Сближение кометы с Сатурном
($r_{\max} = 20044,28064$ а. е., $r_{\min} = 9,5$ а. е.)

$$c_1 = 0,00056860639; c_2 = -1,9988587872;$$

$$c_1' = 0,00056860544; c_2' = -1,9988687834.$$

$$i_{\text{in}1} = 88,63362507^\circ; i_{\text{in}2} = 88,63362621^\circ; i_{\text{in}3} = 91,36637492^\circ; i_{\text{in}4} = 91,36637378^\circ;$$

$$i_{\text{fin}1} = 39,23149707^\circ; i_{\text{fin}2} = 140,76850292^\circ.$$

$$q_{\max} = +0,77459692; q_{\min} = -0,77459692.$$

$$e_{\min} = 0,001; e_{\max} = 0,99952605.$$

$$P_e = 3,29878308 \cdot 10^9 \text{ лет.}$$

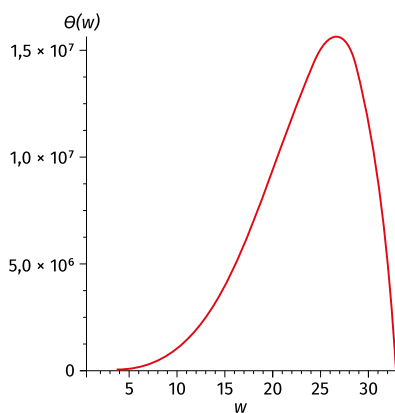


Рисунок 5. График функции $\theta(w)$ для введенных выше констант.

Экстремальные корни уравнения (9):

$$w_{\min} = 1,000000500000375;$$

$$w_{\max} = 2,4840298938570669.$$

$$w_m = 26,5293824307 \text{ (для максимума функции);}$$

$$w_{\text{inf}} = 20,55606374121604 \text{ (точка перегиба функции).}$$

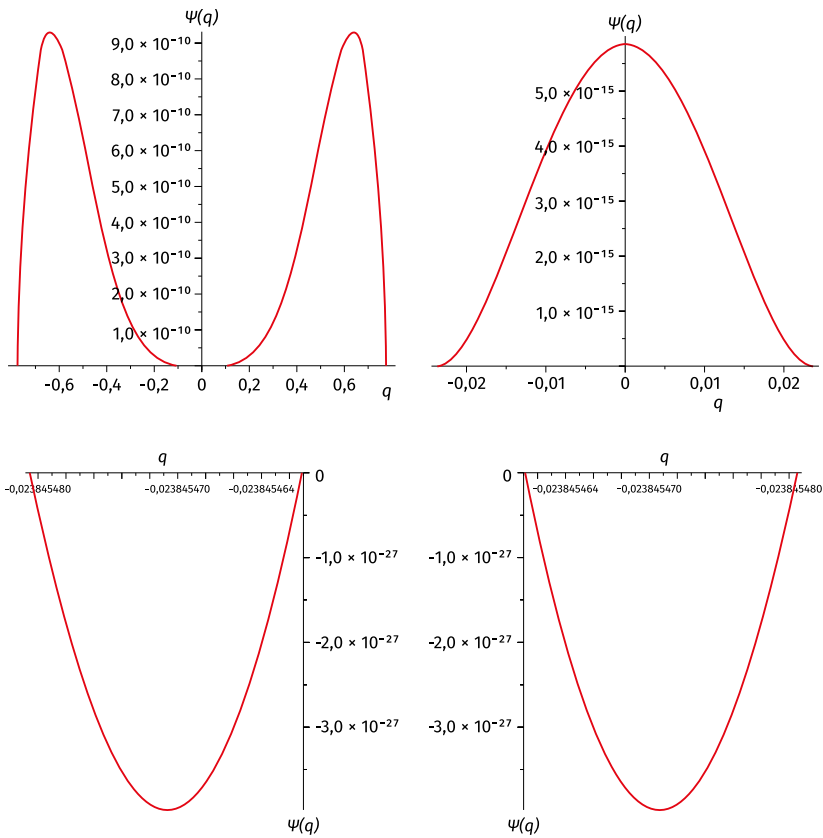


Рисунок 6. График функции $\Psi(q)$ для введенных выше констант.
Экстремальные корни уравнения (13):
 $q_{min} = -0,77459692$; $q_{max} = +0,77459692$.

Сближение кометы с Юпитером
($r_{\max} = 20044,28064$ а. е., $r_{\min} = 5,2$ а. е.)

$$c_1 = 0,0003112705768; c_2 = -1,9993734588;$$

$$c_1' = 0,0003112700558; c_2' = -1,9993834568.$$

$$i_{in1} = 88,989085522^\circ; i_{in2} = 88,989086365^\circ;$$

$$i_{in3} = 91,010914478^\circ; i_{in4} = 91,010913635^\circ;$$

$$i_{fin1} = 39,231497081^\circ; i_{fin2} = 140,7685029199^\circ.$$

$$q_{\max} = +0,774596927569; q_{\min} = -0,7745969275796.$$

$$e_{\min} = 0,001; e_{\max} = 0,999740574.$$

$$P_e = 3,2981985224 \cdot 10^9 \text{ лет.}$$

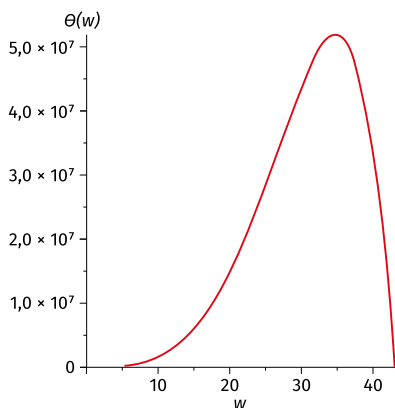


Рисунок 7. График функции $\theta(w)$ для введенных выше констант.

Экстремальные корни уравнения (9):

$$w_{\min} = 1,000000500000375;$$

$$w_{\max} = 43,9042675163358846.$$

$$w_m = 35,8523333443 \text{ (для максимума функции);}$$

$$w_{inf} = 27,77590080840917 \text{ (точка перегиба функции).}$$

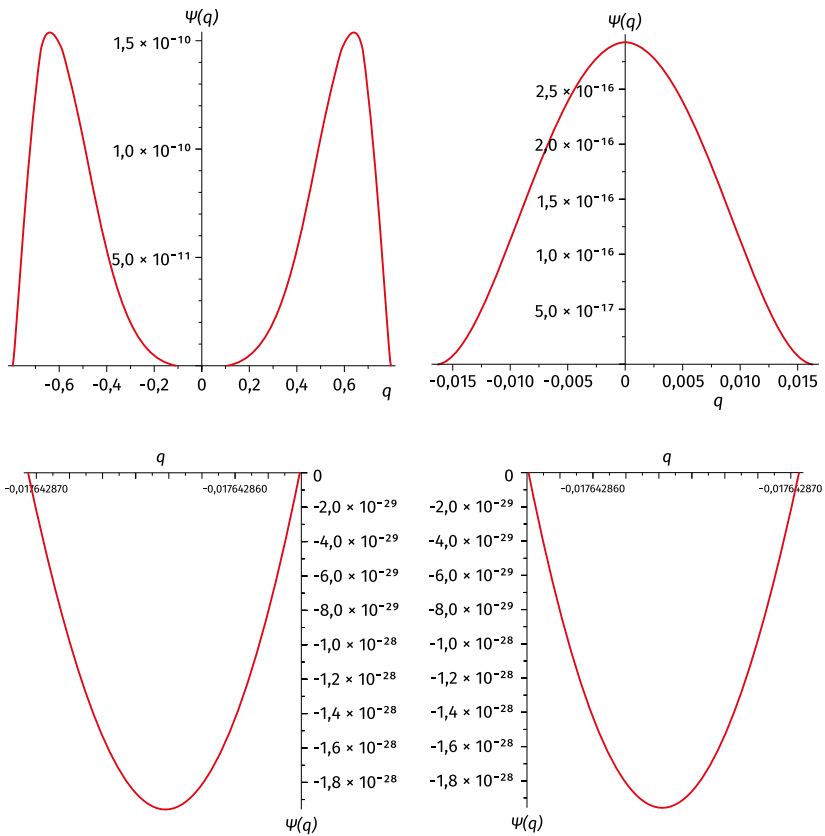


Рисунок 8. График функции $\Psi(q)$ для введенных выше констант.

Экстремальные корни уравнения (13):

$$q_{\min} = -0,7745969275796; q_{\max} = +0,7745969275796.$$

Сближение кометы с Землей
($r_{\max} = 20044,28064$ а. е., $r_{\min} = 1$ а. е.)

$$c_1 = 0,000059865998; c_2 = -1,9998762680;$$

$$c_1' = 0,000059865898; c_2' = -1,9998862676.$$

$$i_{in1} = 89,5566800285^\circ; i_{in2} = 89,556680398^\circ;$$

$$i_{in3} = 90,44331997^\circ; i_{in4} = 90,44331960^\circ;$$

$$i_{fin1} = 39,2314970960^\circ; i_{fin2} = 140,7685029153^\circ.$$

$$q_{\max} = +0,774596927404; q_{\min} = -0,774596927528.$$

$$e_{\min} = 0,001; e_{\max} = 0,9999501104.$$

$$P_e = 3,297627761 \cdot 10^9 \text{ лет.}$$

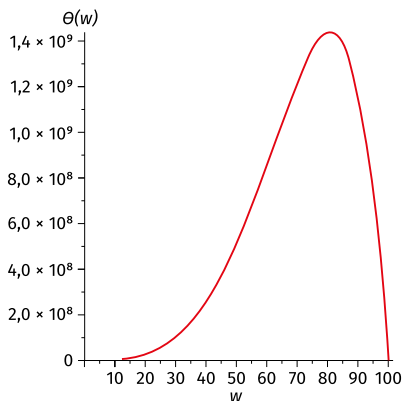


Рисунок 9. График функции $\theta(w)$ для введенных выше констант.

Экстремальные корни уравнения (9):

$$w_{\min} = 1,000000500000375;$$

$$w_{\max} = 100,1118890325421470.$$

$$w_m = 81,743054044283268 \text{ (для максимума функции);}$$

$$w_{infl} = 63,3200033152066 \text{ (точка перегиба функции).}$$

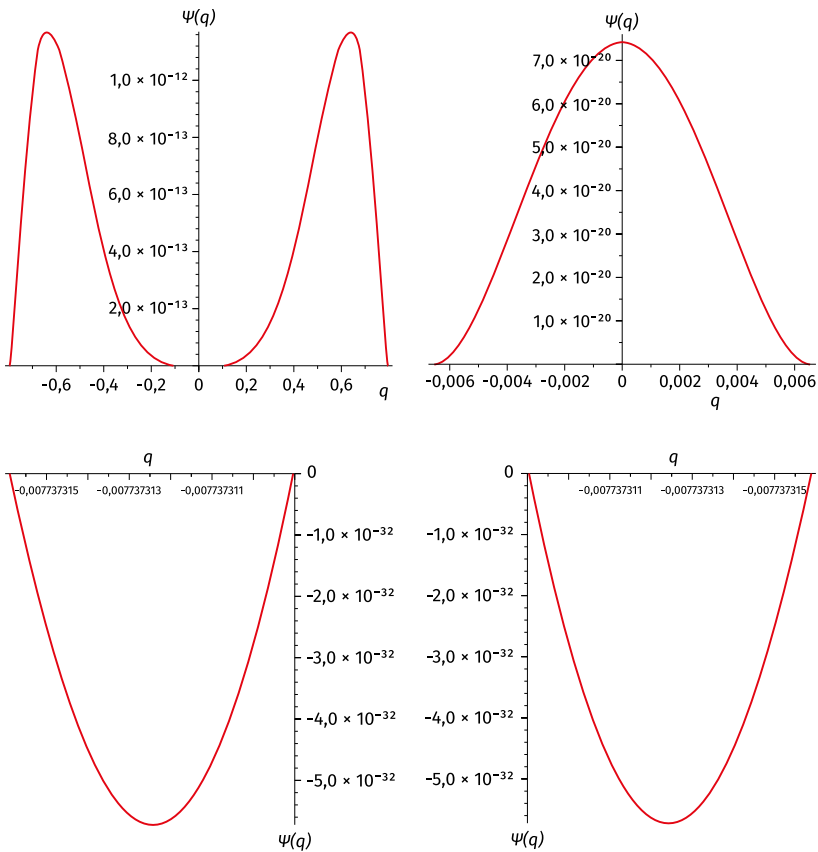


Рисунок 10. График функции $\Psi(q)$ для введенных выше констант.
 Экстремальные корни уравнения (13):
 $q_{min} = -0,7745969275285$; $q_{max} = +0,774596927404$.

Пересечение орбит кометы и Земли
($r_{\max} = 20044,28064$ а. е., $r_{\min} = 0,500006236$ а. е.)

$$c_1 = 0,00002993374571; c_2 = -1,9999361325;$$

$$c_1' = 0,00002993369582; c_2' = -1,9999461323.$$

$$i_{in1} = 89,686523096^\circ; i_{in2} = 89,686523357^\circ;$$

$$i_{in3} = 90,313476904^\circ; i_{in4} = 90,313476643^\circ;$$

$$i_{fn1} = 39,2314971075^\circ; i_{fn2} = 140,7685029244^\circ.$$

$$q_{\max} = +0,774596927277; q_{\min} = -0,774596927629.$$

$$e_{\min} = 0,001; e_{\max} = 0,9999750549.$$

$$P_e = 3,297559828 \cdot 10^9 \text{ лет.}$$

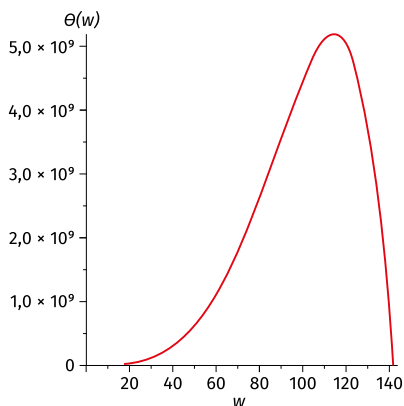


Рисунок 11. График функции $\theta(w)$ для введенных выше констант.

Экстремальные корни уравнения (9):

$$w_{\min} = 1,000000500000375;$$

$$w_{\max} = 141,577825378324583.$$

$$w_m = 115,59925214434213875 \text{ (для максимума функции);}$$

$$w_{inf} = 89,544284781793524 \text{ (точка перегиба функции).}$$

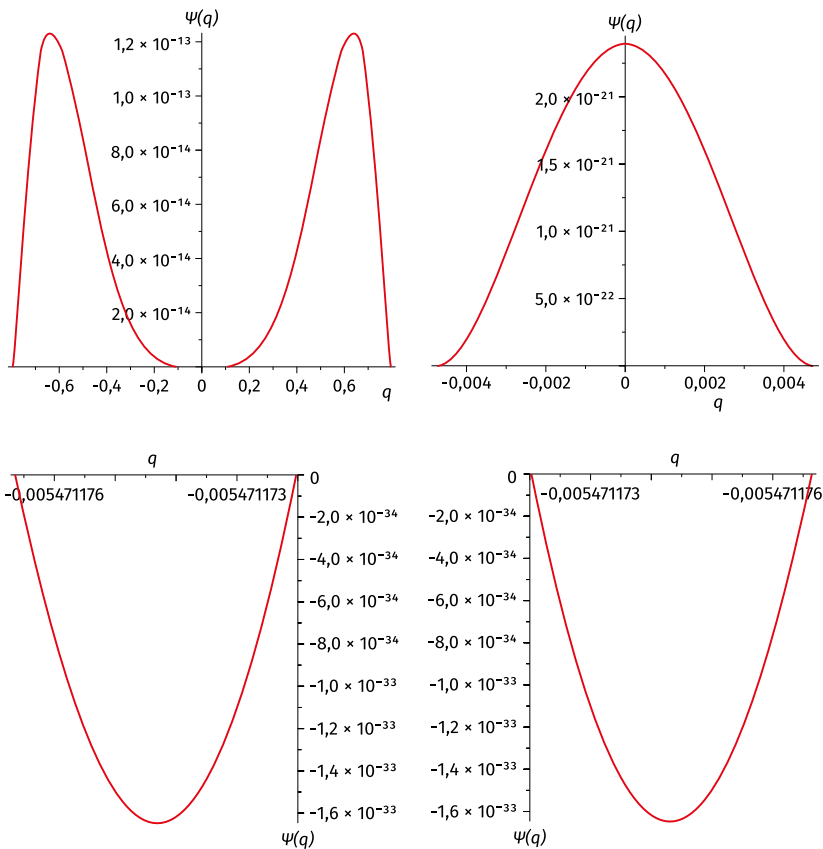


Рисунок 12. График функции $\Psi(q)$ для введенных выше констант.

Экстремальные корни уравнения (13):

$$q_{\min} = -0,7745969276296; q_{\max} = +0,77459692727678.$$

В рассмотренной небесномеханической модели интервал времени миграции комет ($3,3 \cdot 10^9$ лет) меньше возраста Солнечной системы, но при малых начальных значениях эксцентриситетов кометных орбит и малых наклонах плоскостей их орбит $e_{\text{in}} \ll 1$ и $i_{\text{in}} \ll 90^\circ$ миграция комет из облака Оорта во внутреннюю область Солнечной системы становится невозможной. Последнее обстоятельство вытекает из уравнения (9). При $e_{\text{in}} \approx 0$, $i_{\text{in}} \approx 0$ имеем: $c_1 \approx 1$, $c_2 \approx 0$, $w \approx 1$.

ПРИМЕЧАНИЕ

Интегралы типа (8) и (11) при малых знаменателях вычислялись по формуле

$$\int_{x_{min}}^{x_{max}} \frac{dx}{y(x)} = 2 \left[\frac{\sqrt{y(x)}}{\frac{dy(x)}{dx}} \right]_{x_{min}}^{x_{max}} + \int_{x_{min}}^{x_{max}} \sqrt{y(x)} \frac{dx^2}{\left(\frac{dy(x)}{dx}\right)^2} dx.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная небесномеханическая модель происхождения комет позволяет сделать следующие выводы:

1. в рамках небесной механики показано несколько возможных источников. В действительности какие-то из них могут действовать, а какие-то нет. Вполне вероятно, что на самом деле действует только один источник, а во всех остальных малые тела отсутствуют;
2. в рассмотренных моделях долгопериодические кометы и короткопериодические кометы приходят и из межзвездной среды, и из Солнечной системы (возможно, в межзвездной среде нет малых тел с нужными начальными условиями, поэтому нельзя утверждать, что оттуда приходят периодические кометы);
3. модели допускают существование удаленных от Солнца и близких к Солнцу источников комет, связанных, в частности, с точками либрации в таких ограниченных задачах трех тел, как центр Галактики – Солнце – комета, Солнце – планета – комета [9; 6; 8];
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 [11; 12];
5. облака Оорта и Хиллса следует рассматривать не как стационарные образования, а как области, в которые ядра комет временно приходят и после нескольких оборотов (десятков оборотов) их покидают.

В настоящей работе обсуждаются проблемы эволюции кометных орбит и миграции комет из околосолнечной области – возможного резервуара комет в Солнечной системе – в результате действия эффекта Кодзаи-Лидова [5; 1].

Рассмотренная небесномеханическая модель основана на дважды осредненной задаче Хилла с учетом взаимодействия кометного ядра со сжатым центральным телом (Солнцем) и возмущающим телом (ядром Галактики).

Для случая совпадения экваториальной плоскости Солнца и его орбитальной плоскости (или орбитальной плоскости галактического ядра) определение периода ($2 \cdot P$) изменения аргумента перигелия кометной орбиты сводится к простым квадратурам (8) и (11). Экстремальные значения величины w (и эксцентриситета орбиты кометы e), а также величины q (и наклона плоскости орбиты кометы i) определяются из алгебраических уравнений (10) и (13), что позволяет установить области изменения параметров орбиты кометы и найти начальные значения кеплеровских элементов орбиты кометы, приводящих к соударению кометы с центральным телом или к выходу кометы из сферы действия этого тела.

В рассмотренной модели интервал времени миграции кометы из облака Оорта [15] до поверхности Солнца меньше $3,4 \cdot 10^9$ лет, что не превосходит возраста Солнечной системы ($5 \cdot 10^9$ years). При миграции кометного ядра к орбите Земли интервал времени соответствующего перехода меньше ($3,297559828 \cdot 10^9$ лет), чем интервал времени соответствующего перехода кометного ядра к орбите Нептуна ($3,30157292 \cdot 10^9$ лет).


Список литературы

1. *Вашковьяк М. А.* О специальных частных решениях дважды осредненной задачи Хилла с учетом сжатия центрального тела [Текст] // Письма в астрономический журнал. – 1996. – Т. 22. – № 3. – С. 231–240.
2. *Емельяненко Н. Ю.* Особенности сближений малых тел с планетами [Текст] / Астрономический вестник. – М.: Наука, 2015. – Т. 49. – № 6. – С. 442–447.
3. *Емельяненко Н. Ю.* Сближения комет и астероидов с планетами. Тезисы научной конференции с международным участием «VII Бредихинские чтения». 24–28 мая 2021. – Заволжск. – С. 14–15.
4. *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. – Заволжск. – С. 26.
5. *Лидов М. Л., Ярская М. В.* Интегрируемый случай в задаче об эволюции орбиты спутника под действием внешнего тела и нецентрального поля планеты [Текст] // Космические исследования. – 1974. – Т. 12. – № 2. – С. 155–170.
6. *Маршал К.* Задача трех тел [Текст]. – Москва – Ижевск: Изд-во Институт компьютерных исследований, 2004. – 640 с. [Marchal C. The three body problem. Elsevier: Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo. 1990. – 640 p.]


7. *Мюррей К., Дермотт С.* Динамика Солнечной системы / Пер. с англ. под ред. И.И. Шевченко. – М.: Физматлит, 2009. – 588 с. [Murray C. D., Dermott S. F. Solar system dynamics. Cambridge. University Press. – 2007. – 588 p.]
8. *Себекей В.* Теория орбит. Ограниченная задача трех тел. – М.: Наука, 1982. – 668 с. [Szebehely V. Theory of orbits. The restricted problem of three bodies, Yale University. New Haven. Connecticut. Academic Press New York and London, 1967. 668 p.]
9. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике / Под ред. Г. Н. Дубошина. – М.: Наука, 1976 г. – 864 с.
10. *Томанов В. П., Родин Д. А.* Орбитальная эволюция почти параболических комет [Текст] // Вологда: Вологд. гос. пед. ун-т. Лаборатория астрономических исследований, 2013. – 271 с.
11. *Chodas P. W.* Orbit uncertainties, keyholes, and collision probabilities. / Bulletin of the American Astronomical Society – Physics. Published 10 October 1999. Corpus ID 117770074.
12. *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].
13. *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.
14. Lunar and Planetary Science. Solar System. National Aeronautics and Space Administration / <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/planets/>
15. *Oort J. H.* The structure of the cloud comets surrounding the Solar system and a hypothesis concerning its structure // Bull. Astron Int, Neth. V. 11. P. 91–110. 1950.
16. *Perov N. I.* The universal model of migration of comets // Proceedings of Asteroids, Comets, Meteors (ACM 2002), 29 July – 2 August 2002. Technical University Berlin, Berlin, Germany (ESA-SP-500), November 2002. P. 375–379.
17. *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 № 1903. – P.1010. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2016LPI...47.1010P>
18. *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>
19. *Vashkov'yak M. A.* Some Aspects of the Chronological Study and Use of the Terminology of the Restricted Circular Doubly Averaged Three-Body Problem // Solar System Research, 2021. Volume 55, Issue 5. – P. 481–482. DOI: 10.1134/S0038094621050075

X-СТРУКТУРЫ В СИСТЕМАХ ЭКЗОПЛАНЕТ

 **Н. И. Перов, А. А. Воронова**

 *Государственное автономное учреждение культуры
Ярославской области «Культурно-просветительский центр
имени В. В. Терешковой»*

*Ярославский государственный педагогический университет
имени К. Д. Ушинского*

 perov@yarplaneta.ru

ВВЕДЕНИЕ

Галактики с X-структурами исследуются во многих работах. В работе [10] исследованы 22 галактики фотометрически и в рамках задачи N тел. Установлена связь между размерами X-структур галактик и степенью их уплотненности. В работе [5] исследуется X-структура ядра M51, которая связана с выбросами высокоскоростной плазмы и аккреционным диском и, возможно, с наличием второго газопылевого диска, который пересекает струи плазмы. В работе [9] утверждается, что галактики с массой Млечного Пути и X-структурами не являются редкими. В статье [2] подчеркивается, что в центре нашей Галактики обнаружена X-структура, пересечение полос которой соответствует положению ядра Галактики. Исследования, проведенные [11] при различных потенциалах галактик с использованием численных экспериментов на интервале в 8 миллиардов лет, показали образование четких X-структур различной степени уплотненности при углах раскрытия X-структур в интервале от 20° до 43° .

Известны спицы в кольцах Сатурна, также подобные X-структурам [1].

Ниже, в модели, ограниченной дважды осредненной пространственной задачи трех тел, определяются условия существования X-структур в системе звезда – планета – малое тело.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

На основании работы [12] для интервала времени t_r сближения малого тела и планеты при изменении аргумента перицентра ω от 0 до $\pi/2$ имеем:

$$\tau_p = c_1^2 \int_{q_{\min}}^{q_{\max}} \frac{dq}{\sqrt{\Psi(q)}}, \quad (1)$$

Здесь:

$$\Psi(q) = [8\gamma q^7 - 8/3\gamma q^5 + (4c_1^{5/2} + (-2c_2 + 4)c_1^{3/2})q^2 - 8c_1^{5/2}] \cdot [-8\gamma q^7 + 8/3\gamma q^5 - 20c_1^{3/2}q^4 + (16c_1^{5/2} + 16c_1^{3/2} + 2c_2c_1^{3/2})q^2 - 12c_1^{5/2}]. \quad (2)$$

В уравнениях (1) и (2) обозначены: $q = \cos(i)$, $0 < q < 1$; q_{\min} и q_{\max} – положительные корни уравнения (3),

$$\Psi(q) = 0, \quad (3)$$

$q_{\max} > q_{\min}$, q_{\max} – ближайший корень к корню q_{\min} уравнения (3),

$$c_1 = (1 - e^2)(\cos(i))^2; \quad (4)$$

$$c_2 = \frac{2\gamma}{(1 - e^2)^{3/2}} \left(\frac{1}{3} + \cos(2i) \right) + 2(e^2 - (\sin(i))^2) + e^2(\sin(i))^2(5\cos(2\omega) - 3). \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{1}{2} \frac{\alpha}{\beta}, \alpha_1 = -\frac{3}{8} c_{20} \left(\frac{a_0}{a} \right)^2, \beta = \frac{3}{16} \frac{\mu_1}{\mu} \left(\frac{a}{a_1} \right)^3; \quad (6)$$

$$\tau = \beta(t - t_0) \sqrt{\frac{\mu}{a^3}}. \quad (7)$$

В этих соотношениях использованы следующие обозначения: μ и μ_1 – произведения гравитационной постоянной на массы планеты и звезды соответственно; c_{20} коэффициент второй зональной гармоник гравитационного поля планеты; a_0 – средний экваториальный радиус планеты; t – ньютоновское равномерное время, τ – модифицированное время; a_1 – большая полуось круговой орбиты планеты относительно звезды, a – большая полуось планетоцентрической орбиты спутника (малого тела).

В данных соотношениях также введены следующие обозначения: i – наклон плоскости орбиты спутника к экваториальной плоскости планеты; e – эксцентриситет эллиптической орбиты спутника; ω – аргумент перицентра орбиты спутника.

В модели рассматривается случай, когда плоскость движения возмущающего тела (Солнца) совпадает с экваториальной плоскостью планеты.

ПРИМЕР

Для системы модель звезда – модель Сатурна – модель спутника [7] при условии, что минимальное планетоцентрическое расстояние малого тела равно радиусу Сатурна – $r_{\min} = R_{\text{Saturn}} = 0,00040286$ а. е., – получены следующие результаты (таблица 1; рисунки 1, 2, 3).

Таблица 1

Сближения модельной планеты и модельного спутника

c_{20}	$i_{in}'^\circ$	$i_{fn}'^\circ$	e_{in}	e_{fn}
$-32 \cdot 10^{-3}$	87,057663	39,366969	0,001	0,997793
$-32 \cdot 10^{-3}$	92,942337	140,633030	0,001	0,997793

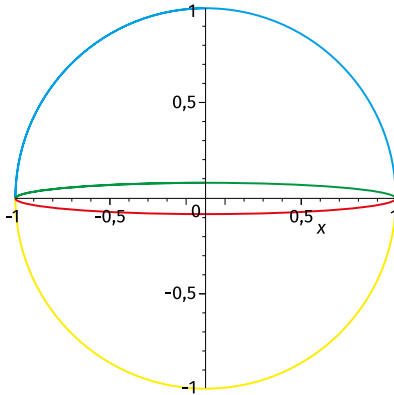


Рисунок 1. Начальные квазикруговые орбиты ($e_1 = 0,001$) и конечные эксцентрические орбиты ($e_2 = 0,997$) малых тел при $a = 1$, $0 < \omega < 90^\circ$ (система типа Солнце – Сатурн – малое тело).

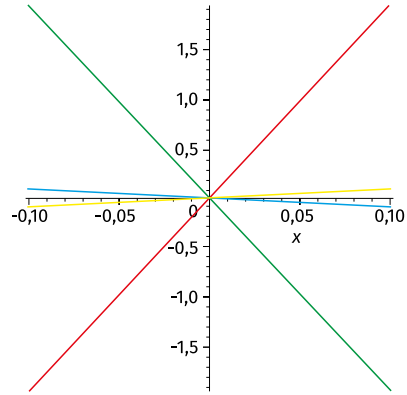


Рисунок 2. Положения начальных и конечных плоскостей орбит малых тел, образующих X-структуры, в системе экзопланет. $i_{in1} = 87,057663^\circ$, $i_{fn1} = 39,36696988^\circ$; $i_{in2} = 92,94234^\circ$, $i_{fn2} = 140,9079271^\circ$ (система типа Солнце – Сатурн – малое тело).

В рассматриваемом примере функция $\Psi(q)$ с учетом используемых величин имеет вид:

$$\begin{aligned} \Psi(q) = & (0,0000510610q^7 - 0,0000170203q^5 + 0,00108200071q^2 - \\ & - 0,00000285090871) \cdot (-0,0000510610q^7 + 0,0000170203q^5 - \\ & - 0,00270499203q^4 + 0,00163011859q^2 - 0,00000427636307). \end{aligned} \quad (8)$$

Действительные корни этого полинома 14-й степени равны (при $|q| \leq 1$):

$$q_1 = -0,776133656102;$$

$$q_2 = -0,051330972923;$$

$$q_3 = -0,051330728035;$$

$$q_4 = 0,051330836379;$$

$$q_5 = 0,051330900374;$$

$$q_6 = 0,773099357161.$$

График функции $\Psi(q)$ представлен на (рисунке 3).

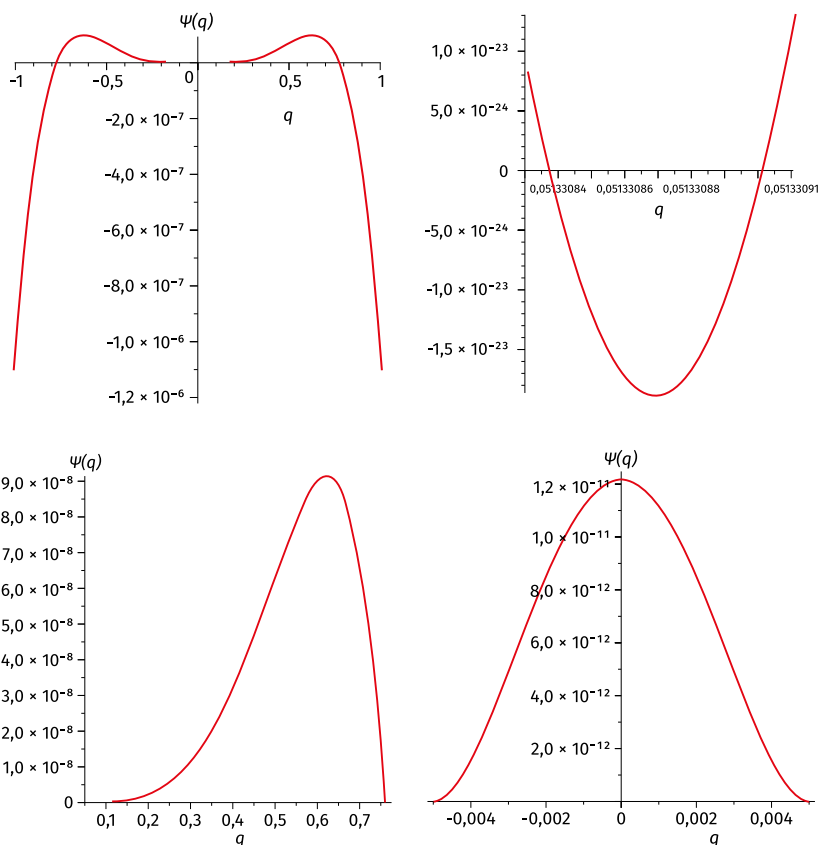


Рисунок 3. График функции $\Psi(q)$ и его представление в увеличенном виде.

Ордината $\Psi(q)$ 6 раз обращается в ноль отрезке $-1 < q < +1$.

Осцилляции происходят при значении $q \approx 0$.

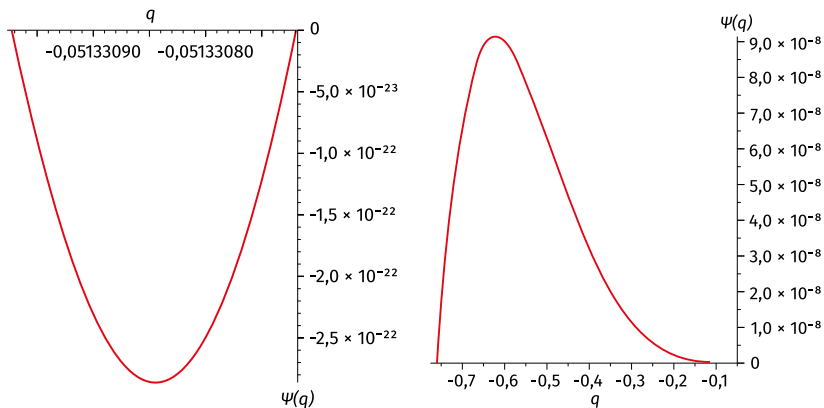


Рисунок 3. График функции $\Psi(q)$ и его представление в увеличенном виде.

Ордината $\Psi(q)$ 6 раз обращается в ноль отрезке $-1 < q < +1$.

Осцилляции происходят при значении $q \approx 0$.

На графике (рисунок 3) показано, с учетом корней полинома (7), что функция $\Psi(q)$ допускает три области движения малых тел с одними и теми же значениями c_1 , c_2 и a (при $\Psi(q) \geq 0$). В первой области наклоны малых тел заключены в интервале от $92,94234114^\circ$ до $140,9079271^\circ$; во второй области наклоны плоскостей орбит малых тел заключены в интервале от $87,05766294^\circ$ до $92,94232710^\circ$; в третьей области наклоны плоскостей орбит малых тел заключены в интервале от $39,36696988^\circ$ до $87,0576663^\circ$. Эти области движения предлагается интерпретировать в качестве X-структур в системах экзопланет [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ


С использованием модели ограниченной дважды осредненной пространственной задачи трех тел показано, что при одних и тех же значениях интегралов c_1 , c_2 и a данной небесномеханической задачи «изоинтегральные» оскулирующие орбиты небесных тел могут отличаться, в частности, наклонами от нескольких градусов (от 87° до 92°) до нескольких десятков градусов (от 39° до 140°), а эксцентриситеты этих орбит могут изменяться от 0,001 до 0,9977. Предлагается рассматривать совокупность этих возмущенных орбит как X-структуры, которые еще предстоит обнаружить в системах экзопланет.

Список литературы


1. *D'Averso* and others. IR spectra of Saturn's ring spokes and multiple shines in the Saturn-rings system / EGU General Assembly 2017. Geophysical Research Abstracts Vol. 19. – EGU2017-9140. – 2017.
2. *Genelle Weule*. X marks the spot at center of the Milky Way galaxy, indicates NASA's WISE mission. – ABC Science. – 2016.
3. <http://annesastronomynews.com/wp-content/uploads/2012/02/NGC-660-a-starburst-polar-ring-galaxy-lies-over-20-million-light-years-away-in-Pisces.-This-rare-galaxy-type-has-stars-as-and-dust-orbiting-in-rings-nearly-perpendicular-to-the-plane-of-the-galactic-disk.jpg>
4. <http://exoplanet.eu/catalog/> The Extrasolar Planet Encyclopaedia – Catalog Listing (дата обращения: 09.09.2022).
5. <https://hubblesite.org/contents/media/images/1992/17/68-Image.html>
6. <https://www.abc.net.au/news/science/2016-07-20/x-marks-the-centre-of-the-milky-way/7644944>
7. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/> Solar System Exploration (дата обращения: 07.07.2022).
8. <https://www.semanticscholar.org/paper/Milky-Way-mass-galaxies-with-X-shaped-bulges-are-in-Laurikainen-Salo/20546dc8d132adec0f0bee7a3fb7ab9d1e29f5d4>
9. *Laurikainen E., Salo H, Herrera-Endoqui M.* Milky Way mass galaxies with X-shaped bulges are not rare in the local Universe / Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – Physics. – 2014.
10. *Savchenko S. S., Sotnikova N. Y., Mosenkov A. V., Reshetnikov V. P., Bizyaev D. V.* Measuring the X-shaped structures in edge-on galaxies / arXiv:1707.04700 [astro-ph. GA]. 2018.
11. *Smirnov A. A., Sotnikova N. Ya.* What determines the flatness of X-shaped structures in edge-on galaxies? / Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. Oxford Journals, Oxford University Press, 2018. – Т. 481. – № 3. – P. 4058 – 4076.
12. *Vashkov'yak M. A.* Some Aspects of the Chronological Study and Use of the Terminology of the Restricted Circular Doubly Averaged Three-Body Problem // Solar System Research. – 2021. – Volume 55. – Issue 5. – P. 481–482. DOI: 10.1134/S0038094621050075

ТРАЕКТОРИИ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ В ГРАВИТАЦИОННЫХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

 **Н. И. Перов, И. О. Жаров**

 Государственное автономное учреждение культуры
Ярославской области «Культурно-просветительский центр
имени В. В. Терешковой»

Ярославский государственный педагогический университет
имени К. Д. Ушинского

 perov@yarplaneta.ru

ВВЕДЕНИЕ

Как правило, движение малых тел в гравитационных полях массивных тел, обладающих магнитными полями, рассматривается независимо от электрического заряда малых тел [1; 2; 7], а траектории заряженных частиц с большими отношениями заряда к массе исследуются только с учетом действия магнитных полей без учета гравитации [4; 6; 8].

Ниже моделируется движение малого тела с массой m в гравитационном и магнитном поле с индукцией $\mathbf{B}(r)$, зависящей от расстояния r от центрального тела, масса которого M .

УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ

Запишем уравнение движения малого тела в виде:

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{GM\mathbf{r}}{r^3} + \frac{q}{m}[\mathbf{v}, \mathbf{B}]. \quad (1)$$

Положим:

$$\mathbf{B} = \frac{H_0\mu_0 R_E^3}{r^3} \mathbf{k}. \quad (2)$$

Здесь H_0 – напряженность магнитного поля на экваторе планеты, μ_0 – магнитная постоянная, R_E – экваториальный радиус планеты, \mathbf{k} – единичный вектор оси Oz , G – гравитационная постоянная, q – электрический

заряд малого тела (частицы), v – скорость движения малого тела [4; 2]. Рассматривая движение малого тела в плоскости Oxy (при $z = 0, dz/dt = 0$), приходим к уравнениям:

$$\ddot{x} = -\frac{GMx}{(x^2 + y^2)^{3/2}} + \frac{\alpha \dot{y}}{(x^2 + y^2)^{3/2}}; \quad (3)$$

$$\ddot{y} = -\frac{GMy}{(x^2 + y^2)^{3/2}} - \frac{\alpha \dot{x}}{(x^2 + y^2)^{3/2}}. \quad (4)$$

Здесь:

$$\alpha = \frac{H_0 \mu_0 R_E^3 q}{m}. \quad (5)$$

Из уравнения (1) – или уравнений (3) и (4) – вытекает выражение, связывающее скорость v и радиус r круговой орбиты:

$$v^2 - \frac{\alpha v}{r^2} - \frac{GM}{r} = 0. \quad (6)$$

Тогда:

$$v(\alpha, r) = \frac{\alpha}{r^2} \pm \sqrt{\frac{\alpha^2}{r^4} + \frac{4GM}{r}}, \quad (7)$$

или:

$$r(\alpha, v) = \frac{GM \pm \sqrt{G^2 M^2 + 4v^3 \alpha}}{2v^2}. \quad (8)$$

В формулах (7) и (8) в дальнейшем будем брать знак «+».

ПРИМЕРЫ ТРАЕКТОРИЙ

При проведении численных экспериментов – уравнения (3) и (4) – примем, в системе СИ, следующие значения постоянных величин: $G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$, $H_0 = 25 \text{ А/м}$, $R_E = 6378 \cdot 10^3 \text{ м}$, $M = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$. При этом все расстояния измеряются в метрах, а все интервалы времени – в секундах.

Пример 1.1

Действует гравитационное и магнитное поле при: $\alpha = 1,304137 \cdot 10^{15} \text{ м}^3/\text{с}$.
 $v_{x0} = v_{z0} = 0$, $v_{y0} = 6327,0846 \text{ м/с}$, $x_0 = 1,002057 \cdot 10^7 \text{ м}$, $y_0 = z_0 = 0$. Траектория малого тела на интервале от 0 до 10 000 с представлена на рисунке (1).

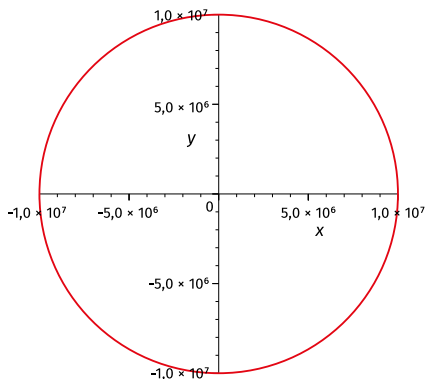


Рисунок 1. Зависимость $y = y(x)$ с учетом магнитного поля и гравитации.
Расстояния – в метрах. Малое тело движется по окружности.

Пример 1.2

Действует только гравитационное поле при: $\alpha = 1,304137 \cdot 10^{15} \text{ м}^3/\text{с}$.
 $v_{x0} = v_{z0} = 0$, $v_{y0} = 6327,0846 \text{ м/с}$, $x_0 = 1,002057 \cdot 10^7 \text{ м}$, $y_0 = z_0 = 0$. Траектория малого тела на интервале от 0 до 10 000 с представлена на рисунке (2).

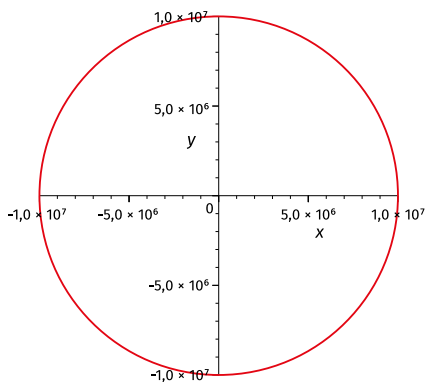


Рисунок 2. Зависимость $y = y(x)$ с учетом только гравитации.
Расстояния – в метрах. Малое тело, приближенно, движется по окружности.

Пример 1.3

Действует только магнитное поле при $\alpha = 1,304137 \cdot 10^{15} \text{ м}^3/\text{с}$. $v_{x0} = v_{z0} = 0$, $v_{y0} = 6327,0846 \text{ м/с}$, $x_0 = 1,002057 \cdot 10^7 \text{ м}$, $y_0 = z_0 = 0$. Траектория малого тела на интервале от 0 до 10 000 с представлена на рисунке (3).

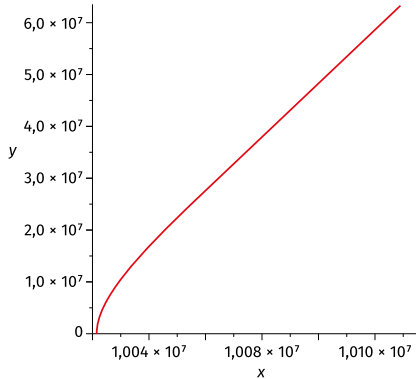


Рисунок 3. Зависимость $y = y(x)$ с учетом только магнитного поля. Расстояния выражены в метрах. Малое тело удаляется от планеты.

Пример 1.4

Действует и гравитационное поле, и магнитное поле при $\alpha = 1,304137 \cdot 10^{15} \text{ м}^3/\text{с}$. $v_{x0} = v_{z0} = 0$, $v_{y0} = 6327,0846 \text{ м/с}$, $x_0 = 1,002057 \cdot 10^7 \text{ м}$, $y_0 = z_0 = 0$. Траектория малого тела на интервале от 0 до 50 000 с представлена на рисунке (4).

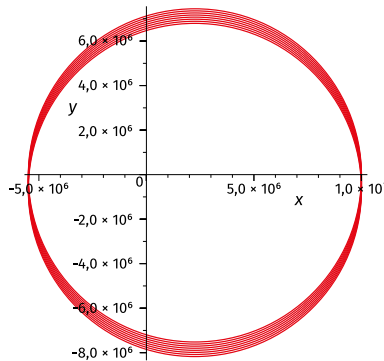


Рисунок 4. Зависимость $y = y(x)$ с учетом магнитного поля и гравитации. Расстояния выражены в метрах. Малое тело пересекает поверхность планеты.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ МАЛОГО ТЕЛА

При поиске устойчивых траекторий малых тел, движущихся в гравитационных и магнитных полях, воспользуемся теоремами А. М. Ляпунова об устойчивости (неустойчивости) движения в первом приближении [1; 3]. Введем вращающуюся с угловой скоростью ω систему координат, связанную с малым телом, равномерно движущимся (с угловой скоростью ω) по окружности радиусом $r - mXY$. Тогда связь между инерциальной системой координат Oxy и неинерциальной системой координат mXY примет вид:

$$x = (r + X) \cos \gamma - Y \sin \gamma; \quad (9)$$

$$y = (r + \sin \gamma) + Y \cos \gamma. \quad (10)$$

Здесь: γ – угол между начальным положением тела на оси Ox и его конечным положением.

Используя уравнения (3) и (4), сохраняя в них члены с X, Y, γ только первого порядка малости, приходим к соотношениям (11) и (12) для составления характеристического уравнения:

$$\ddot{X} + \left(-\omega^2 - \frac{2GM}{r^3} + \frac{3\alpha\omega}{r^3}\right)X - 2\dot{Y}\omega = 0; \quad (11)$$

$$\dot{Y} + \left(-\omega^2 + \frac{GM}{r^3}\right)Y + 2\dot{X}\omega = 0. \quad (12)$$

С учетом выражений (11) и (12) характеристическое уравнение примет вид:

$$\left(\lambda^2 - \omega^2 - \frac{2GM}{r^3} + \frac{3\alpha\omega}{r^3}\right)\left(\lambda^2 - \omega^2 + \frac{GM}{r^3}\right) + 4\lambda^2\omega^2 = 0. \quad (13)$$

Установим, при каких значениях параметров ω, α, M, r движение малого тела, описываемого уравнениями (3) и (4), будет устойчивым, а при каких значениях этих же параметров движение малого тела является неустойчивым.

С использованием пакета прикладных программ “MAPLE’15” (компьютерной алгебры) корни $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ уравнения (13) представим в явном виде:

$$\lambda_{1,2,3,4} = \pm \frac{1}{2} \frac{1}{r^2} \left(\sqrt{2} \left(r \left(GM - 2\omega^2 r^3 - 3\alpha\omega \pm \sqrt{9G^2 M^2 - 8\omega^2 r^3 GM - 18\alpha\omega GM + 24\alpha\omega^3 r^3 + 9\alpha^2 \omega^2} \right) \right)^{1/2} \right). \quad (14)$$

ПРИМЕРЫ УСТОЙЧИВОГО И НЕУСТОЙЧИВОГО ДВИЖЕНИЯ

Для устойчивости – в первом приближении – движения, описываемого уравнениями (3) и (4), корни характеристического уравнения (13) должны быть мнимыми и иметь отрицательные вещественные части [1; 3]. Найдем параметр α , при котором какое-либо значение λ соотношения (14) обращается в «0», а также установим границы устойчивого и неустойчивого движения. Примем, как и выше, когда рассматривались примеры траекторий, $G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$, $H_0 = 25 \text{ А/м}$, $R_E = 6378 \cdot 10^3 \text{ м}$, $M = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$. Кроме того, положим, $r = 1,002056967 \cdot 10^7 \text{ м}$, с учетом формулы (6) для линейной v и угловой ω скоростей имеем:

$$v = \frac{\frac{\alpha}{r^2} \pm \sqrt{\frac{\alpha^2}{r^4} + \frac{4GM}{r}}}{2}; \quad (15)$$
$$\omega = v/r.$$

Разрешив уравнение (14) при $\lambda = 0$ относительно α (все другие параметры являются известными величинами), найдем критические значения α – границы устойчивого и неустойчивого движений:

$$\alpha_1 = 6,020929147 \cdot 10^{17} \text{ м}^3/\text{с},$$

$$\alpha_2 = 0,0000031918068 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Численными методами проверим устойчивость движения – уравнения (3) и (4) – вблизи установленной аналитически границы устойчивости (неустойчивости) α_1 . (Вблизи α_2 движение малого тела является устойчивым – как движение в гравитационном поле по круговой орбите. Корни характеристического уравнения являются чисто мнимыми и имеют по модулю минимальное значение порядка $10^{-15}\sqrt{-1}$.)

Пример 2.1

Примем $G = 6.672 \cdot 10^{-11} \text{ Нм}^2 / \text{кг}^2$, $M = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$, $r = 1,002056967 \cdot 10^7 \text{ м}$, $\alpha = 10^{17} \text{ м}^3/\text{с}$, $v = 6838,121134 \text{ м/с}$, $\omega = 0,00068240842 \text{ с}^{-1}$. Из соотношения (14) найдем корни уравнения (13):

$$\lambda_1 = 0,00033976959\sqrt{-1};$$

$$\lambda_2 = -0,00033976959\sqrt{-1};$$

$$\lambda_3 = 0,000788367759\sqrt{-1};$$

$$\lambda_4 = -0,000788367759\sqrt{-1}.$$

Рассматривая выражение (13) как функцию λ , построим соответствующий график при указанных в примере параметрах (рисунок 5). Чисто мнимые корни показывают, что движение может быть как устойчивым, так и

неустойчивым. На рисунке (6) показан характер движения малого тела в инерциальной системе отсчета. Движение относится к классу устойчивых движений (рисунок 6) по Лагранжу [1].

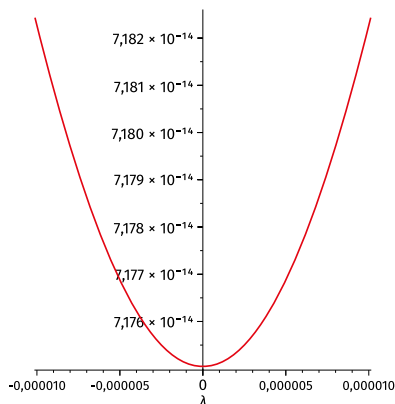


Рисунок 5. График функции (13).

Корни характеристического уравнения (13) являются чисто мнимыми.

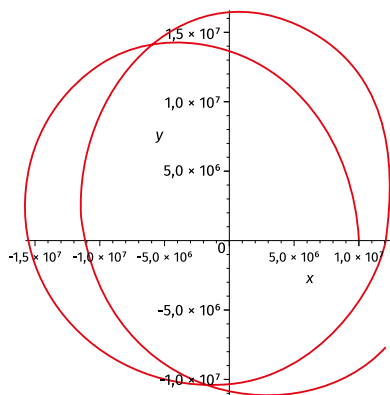


Рисунок 6. Квазиустойчивое движение в примере 2.1. Уравнения (3) и (4). Интервал времени интегрирования t от 0 секунд до 30 000 с. 50 000 точек.

Пример 2.2

Примем $G = 6.672 \cdot 10^{-11} \text{ Нм}^2/\text{кг}^2$, $M = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$, $r = 1,002056967 \cdot 10^7 \text{ м}$, $\alpha = 6,02093 \cdot 10^{17} \text{ м}^3/\text{с}$, $v = 9993,7267046 \text{ м/с}$, $\omega = 0,00099732121 \text{ с}^{-1}$. Из соотношения (14) найдем корни уравнения (13):

$$\lambda_1 = 2,06427921719 \cdot 10^{-7};$$

$$\lambda_2 = -2,06427921719 \cdot 10^{-7};$$

$$\lambda_3 = 0,0018389695\sqrt{-1};$$

$$\lambda_4 = -0,0018389695\sqrt{-1}.$$

Рассматривая выражение (13) как функцию λ , построим соответствующий график при указанных в примере параметрах (рисунок 7). Наличие действительного положительного корня показывает, что движение является неустойчивым. На рисунке 8 показан характер движения малого тела в инерциальной системе отсчета. Движение относится к классу неустойчивых движений по Лагранжу [1].

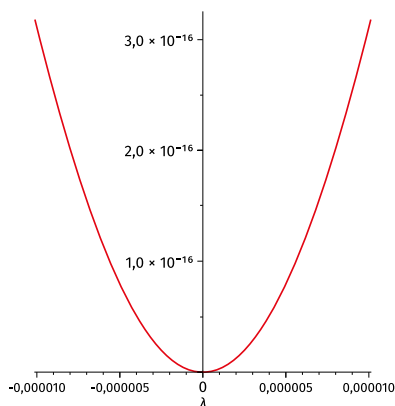


Рисунок 7. График функции (13). Среди корней характеристического уравнения (13) имеется действительный положительный корень.

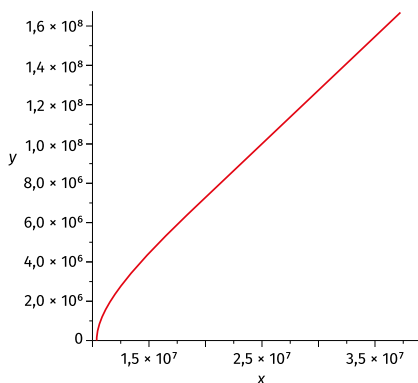


Рисунок 8. Неустойчивое движение в примере 2.2. Уравнения (3) и (4). Интервал времени интегрирования t от 0 секунд до 30 000 с. 50 000 точек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ


В рассмотренной небесномеханической модели движения малого тела в гравитационном и магнитном поле центрального тела на интервале времени, соответствующем нескольким оборотам малого тела, с использованием численного метода интегрирования (Рунге-Кутты), теорем об устойчивости А. М. Ляпунова [1; 3], с использованием методов компьютерной алгебры (и пакетов прикладных программ) [5] установлено:


- движение малых тел может быть устойчивым и неустойчивым;
- корни характеристического уравнения при устойчивости имеют только мнимые части, а при неустойчивости появляется действительный положительный корень;
- при больших значениях параметра α движение малых тел становится неустойчивым, а скорость движения малого тела по круговой орбите возрастает;
- критическое значение α – граница устойчивого и неустойчивого движений: $\alpha_1 = 6,020929147 \cdot 10^{17} \text{ м}^3/\text{с}$ (при $r = 1,002056967 \cdot 10^7 \text{ м}$, $v = 9993,7267046 \text{ м/с}$, $\omega = 0,00099732121 \text{ с}^{-1}$).

Список литературы


1. *Абалакин В. К., Аксенов Е. П., Гребеников Е. А., Демин В. Г., Рябов Ю. А.* Справочное руководство по небесной механике и астродинамике [Текст] / Дубошин Г. Н. – М.: Наука, 1976. – 864 с.
2. *Аксенов Е. П.* Теория движения искусственных спутников Земли // М.: Наука, 1977. – 360 с.
3. *Меркин Д. Р.* Введение в теорию устойчивости движения // М. Наука, 1976. 305 с.
4. *Яновский Б. М.* Земной магнетизм / Учеб. пособие. Изд. 4-е, перераб. и доп. Под ред. В. В. Металловой. – Л.: Ленингр. ун-т, 1978. – 592 с.
5. *Bernardin L., Chin P., DeMarco P., Geddes K. O., Hare D. E. G., Heal K. M., Labahn G., May J. P., McCarron J., Monagan M. B., Ohashi D., Vorkoetter S. M.* The Essential Tool for Mathematics and Modelling // Copyright@Maplesoft, a division of Waterloo Maple Inc. – 2011 / www.maplesoft.com/maple/
6. *Johar M. Ashfaque.* Particles in a Magnetic Field / <https://www.researchgate.net/publication/339293044>. – February, 2020.
7. *Marov M. Ya., Ipatov S. I.* Formation of the Earth and Moon: influence of small bodies // arXiv:2112.06047 / Geochemistry International. – 2021. – Vol. 59. – № 11. – P. 1010–1017. DOI: 10.1134/S0016702921110070
8. *Subedi P., Sonsrettee W., Blasi P., Ruffolo D., Matthaeus W. H., Montgomery D., Chuychai P., Dmitruk P., Wan M., Parashar T. N., Chhiber R.* Charged particle diffusion in isotropic random magnetic fields // arXiv:1612.09507v3 [physics.space-ph]. – 14 Feb. 2017.

СЖАТИЕ ПЛАНЕТЫ И ЧИСЛО ЕЕ СПУТНИКОВ

 **Н. И. Перов, А. И. Смирнов**

 Государственное автономное учреждение культуры
Ярославской области «Культурно-просветительский центр
имени В. В. Терешковой»

Ярославский государственный педагогический университет
имени К. Д. Ушинского

 perov@yarplaneta.ru

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время известно 3 919 внесолнечных планетных систем и 5 318 экзопланет (на февраль 2023 г.), а также 855 кратных планетных систем. Обнаружение первых экзопланет в 1995 году показало значительные различия их динамических, физических и химических свойств по сравнению со свойствами планет Солнечной системы. Но современные исследования [7] показывают существование экзопланетных систем и экзопланет со свойствами, характерными для объектов Солнечной системы [3; 7]. Обсуждается проблема поиска неоткрытых спутников (экзолун) вблизи внесолнечных планет (экзопланет) [11].

Все естественные спутники планет Солнечной системы, как правило, открыты в результате телескопических наблюдений [1; 3; 9; 8]. Известна связь сжатия планеты Солнечной системы с другими ее динамическими параметрами [13]. (Гравитационное поле и фигуру планеты можно характеризовать следующими параметрами: динамическим сжатием J_2 , сжатием эквивалентной – в смысле объема – эллипсоидальной поверхности равного потенциала α_p , экваториальным радиусом a_e , геометрическим сжатием $\alpha = (a_e - b)/a_e$. Здесь b – полярный радиус планеты.) Числовые значения сжатия α и числа n – естественных спутников планет приведены в таблице 1 [8].

Установим зависимость $n = n(\alpha)$. Наблюдаемое число n спутников больших планет Солнечной системы в зависимости от их сжатия α представлено на (рисунок 1).

Таблица 1

Геометрическое сжатие, 2-я зональная гармоника,
число n открытых естественных спутников планет на 2023 год
и «теоретическое» число n_t спутников больших планет Солнечной системы

№	Планета	α , геометрическое сжатие планеты	J_{21} , 2-я зональная гармоника	n , число известных спутников планеты	n_t , «теоретическое» число спутников планеты
1	Меркурий	0,0009	$50,3 \cdot 10^{-6}$	0	0
2	Венера	0,000	$4,458 \cdot 10^{-6}$	0	0
3	Земля	0,003353	$1082,63 \cdot 10^{-6}$	1	1
4	Марс	0,00589	$1960,45 \cdot 10^{-6}$	2	2
5	Юпитер	0,06487	$14736 \cdot 10^{-6}$	92	93
6	Сатурн	0,09796	$16298 \cdot 10^{-6}$	83	98
7	Уран	0,02293	$3343,43 \cdot 10^{-6}$	27	34
8	Нептун	0,01708	$3411 \cdot 10^{-6}$	14	21
9	Плутон	0,010192?	?	5	5?

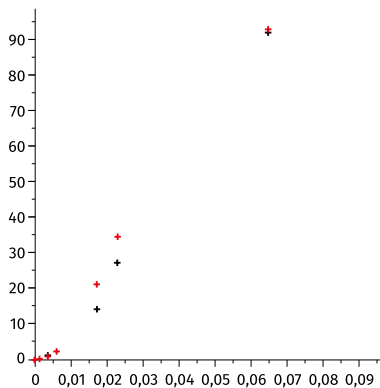


Рисунок 1. Наблюдаемые (нижние крестики) и гипотетические (1) (верхние крестики) числа n спутников планет Солнечной системы в зависимости от сжатия α этих планет.

ЗАВИСИМОСТЬ «СЖАТИЕ ПЛАНЕТЫ – ЧИСЛО ЕЕ СПУТНИКОВ»

Обозначим геометрическое сжатие планеты и «теоретическое» число ее естественных спутников через α и n_t соответственно. Искомую зависимость $n_t = n_t(\alpha)$ представим в виде:

$$n_t = a(\alpha + \alpha_0)^b (e^{c(\alpha + \alpha_0)^d} - 1)^f. \quad (1)$$

Здесь: n_t – «теоретическое» число спутников больших планет.

Для определения постоянных a, b, c, d, f воспользуемся таблицей 1, составленной для больших планет Солнечной системы. (Замечание о Плуtone содержится в заключении.) При вычислениях неизвестных величин использовались методы компьютерной алгебры [6], решая 5 уравнений с 5 неизвестными (при $\alpha_0 = 0,0033$).

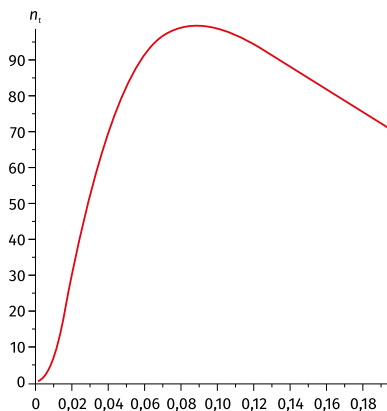


Рисунок 2. Эмпирическое число n_t спутников планеты Солнечной системы в зависимости от ее сжатия α .

Формулу (1), полученную для планет от Земли до Нептуна, применим для всех планет, включая Плутон: $a = 5,303497 \cdot 10^8$; $b = -7,391859$; $c = 1,615637$; $d = -0,201072$; $f = -13,074987$; $\alpha_0 = 0,0033$. Результаты вычислений представлены в таблице 1 и на рисунке 2.

Координаты точек экстремумов и перегибов функции (1) равны $n_{t_{\min}}(0) = 0,014466$; $n_{t_{\text{пл1}}}(0,021089) = 30,1468626$; $n_{t_{\max}}(0,089897) = 98,892$; $n_{t_{\text{пл2}}}(0,161997) = 82,3539$ (Рисунок 2).

При $n = 5$ из формулы (1) оценим сжатие Плутона: $\alpha_{\text{пл}} = 0,0086$.

РАСШИРЕНИЕ ДОПУСТИМОЙ ОБЛАСТИ ДВИЖЕНИЯ
СПУТНИКОВ ПЛАНЕТЫ С УВЕЛИЧЕНИЕМ ЕЕ СЖАТИЯ
(ЭФФЕКТ КОДЗАИ-ЛИДОВА)

Известно, что сжатие планеты препятствует выпадению неэклиптических спутников планеты на ее поверхность [2; 12; 5].

В рамках ограниченной, круговой, пространственной, дважды осредненной задачи трех тел в явном виде получена квадратура (2), связывающая эксцентриситет орбиты спутника и интервал времени τ_p его движения при изменении аргумента перицентра спутника от 0 до $\pi/2$ [5].

$$\tau_p = \int_{w_{min}}^{w_{max}} \frac{dw}{\sqrt{\theta(w)}}. \quad (2)$$

Здесь:

$$\begin{aligned} \theta(w) &= [8\gamma c_1 w^7 - 8/3\gamma w^5 + w^2(-2c_2 + 4 + 4c_1) - 8] \cdot \\ &\cdot [-8\gamma c_1 w^7 + 8/3\gamma w^5 - 20c_1 w^4 + w^2(16 + 16c_1 + 2c_2) - 12]. \\ w &= 1/(1 - e^2)^{1/2}. \\ c_1 &= (1 - e^2)(\cos(i))^2. \end{aligned} \quad (3)$$

$$c_2 = \frac{2\gamma}{(1 - e^2)^{3/2}} \left(\frac{1}{3} + \cos(2i) \right) + 2(e^2 - (\sin(i))^2) + e^2(\sin(i))^2(5 \cos(2w) - 3). \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{1}{2} \frac{\alpha}{\beta}, \quad \alpha = -\frac{3}{8} c_{20} \left(\frac{a_0}{a} \right)^2, \quad \beta = \frac{3}{16} \frac{\mu_1}{\mu} \left(\frac{a_1}{a} \right)^3; \quad (5)$$

$$\tau = \beta(t - t_0) \sqrt{\frac{\mu}{a^3}}. \quad (6)$$

В этих соотношениях использованы следующие обозначения: μ и μ_1 – произведения гравитационной постоянной на массы планеты и Солнца соответственно; c_{20} – коэффициент второй зональной гармоники гравитационного поля планеты [1]; a_0 – средний экваториальный радиус планеты; t – ньютоновское равномерное время, τ – модифицированное время; a_1 – большая полуось круговой гелиоцентрической орбиты планеты, a – большая полуось планетоцентрической орбиты спутника.

В данных соотношениях также введены следующие обозначения: i – наклон плоскости орбиты спутника к экваториальной плоскости планеты; e – эксцентриситет эллиптической орбиты спутника; w – аргумент перицентра орбиты спутника.

В модели рассматривается случай, когда плоскость движения возмущающего тела (Солнца) совпадает с экваториальной плоскостью планеты.

Обозначим через P период движения перицентра орбиты спутника, тогда величина $\tau = P/2$ характеризует интервал времени изменения эксцентриситета орбиты от минимального значения e_{\min} до максимального e_{\max} . При больших значениях эксцентриситета орбиты тело может либо выйти за пределы сферы действия центрального тела, либо столкнуться с центральным телом. В таком случае интервал времени движения малого тела принимается за время его жизни.

Причем движение рассматриваемого малого тела происходит в интервале $w_{\min} \leq w \leq w_{\max}$, где w_{\min} и w_{\max} – положительные корни уравнения (3), при $0 < e < 1$ и $1 < w < \infty$.

При этом $w_{\max} > w_{\min}$, w_{\max} – ближайший к w_{\min} корень уравнения $\theta(w) = 0$. Интеграл (2) может применяться как для ротационного, так и для либрационного движения перицентра орбиты спутника планеты.

ПРИМЕР

Оценим в рамках рассматриваемой небесномеханической модели интервал времени движения $\tau P = P/2$ перицентра орбиты спутника при изменении аргумента перицентра ω от 0 до $\pi/2$, по истечении которого спутник сблизится с планетой до минимального расстояния. Для определенности возьмем гипотетическую планету с параметрами «квази-Сатурна». Примем это минимальное расстояние равным радиусу Сатурна $R_{\text{Sat}} = 0,00040286$ а. е. Начальное значение эксцентриситета орбиты спутника положим равным $e_{\text{in}} = 0,001$, а конечное значение эксцентриситета e_{fin} этого спутника найдем из условия:

$$r_{\min} = R_{\text{Sat}} = a(1 - e_{\text{fin}}).$$

В качестве значения большой полуоси a орбиты спутника примем $a = (1/2)a_{\text{Sat}}(m_{\text{pl}}/m_{\text{Sun}})^{2/5}$ – половина радиуса сферы действия Сатурна относительно Солнца, где a_{Sat} – большая полуось орбиты Сатурна, m_{pl} и m_{Sun} – массы планеты и Солнца соответственно [1; 8].

Из уравнения (3), когда $\theta(w_{\min}) = 0$, $\theta(w_{\max}) = 0$, найдем интегралы движения задачи c_1 и c_2 , и по известным значениям c_1 , e_{in} , e_{fin} вычислим значения i_{in} и i_{fin} .

Тогда имеем следующие результаты (таблица 2).

Таблица 2

Тесные сближения спутника с планетой

c_{20}	i_{in}°	i_{fin}°	e_{fin}	$P/2$, лет
$-0,01 \cdot 10^{-3}$	87,051962	39,231598	0,9977933	128,6014
$-16,298 \cdot 10^{-3}$	87,054876	39,300835	0,9977933	128,5968
$-32 \cdot 10^{-3}$	87,057665	39,366970	0,9977933	128,5925

При $c_{20} = -0,01 \cdot 10^{-3}$ и начальном наклоне $i_{in} = 87,057663$ конечные наклон и эксцентриситет составят $i_{fn} = 39,231540^\circ$ и $e_{fn} = 0,997802$ соответственно. Интервал времени движения составит $P/2 = 131,8912$ год, а спутник подойдет к планете на расстояние от ее центра меньше, чем радиус планеты (столкнется с планетой, поскольку $r_{min} = 0,0004013 < R_{sat}$). Таким образом, сжатие планеты препятствует в некоторой мере выпадению неэклиптикальных спутников планеты на ее поверхность. С увеличением сжатия планеты возможно увеличение допустимого начального угла i_{in} наклона плоскости орбиты спутника, при котором спутник не столкнется с планетой (Таблица 2).

Примечание. При вычислении интеграла (2) с целью устранения фиктивных расходимостей на границах области интегрирования учитывалось соотношение:

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{\sqrt{y(x)}} = 2 \left[\frac{\sqrt{y(x)}}{\frac{dy(x)}{dx}} \right]_{x_1}^{x_2} + \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{y(x)} \frac{\frac{d^2 y(x)}{dx^2}}{\left(\frac{dy(x)}{dx} \right)^2} dx.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружение общих свойств экзопланет и планет Солнечной системы открывает возможность локализовать необнаруженные малые тела вблизи экзопланет. Например, использование формулы (1) для рассмотренной выше модели позволяет оценить число спутников экзопланет.

В работе [4] представлена статистическая модель, связывающая число спутников планеты и ее сжатие. Эта модель позволила предсказать существование 5 неоткрытых спутников Нептуна и оценить сжатия Меркурия и Венеры.

Косвенным подтверждением справедливости связи, установленной выше, между числом естественных спутников планеты и ее сжатием, являются результаты, представленные в публикациях [2; 1].

В работе Лидова М. Л. [2] в рамках ограниченной задачи трех тел доказано, что сильное сжатие планеты препятствует выпадению на ее поверхность неэклиптических спутников (в работе [5] соответствующие квадратуры представлены в явном виде, и на их основе показано, каким образом увеличение сжатия планеты способствует уменьшению степени проявления эффекта Лидова.)

Планеты со сжатием 0,18 не обнаружены в Солнечной системе, по-видимому, это объясняется известными теоремами Пуанкаре и Крудели, которые накладывают ограничения на угловую скорость вращения и гео-

метрическое сжатие гравитирующей жидкости, находящейся в состоянии относительного равновесия [1].

Оценка сжатия Плутона, приведенная выше, совпадает с верхним пределом оценки этой величины, представленной в работе [8], но больше на 1–2 порядка, представленной в работе [9].

Предложенная гипотеза будет проверяться и уточняться на спутниковых системах Солнечной и внесолнечных планет.

Примечание. В 2006 г. Международный астрономический союз дал определение планеты, согласно которому, в частности, вблизи орбиты планеты не должно быть других естественных тел. В 2010 г. вблизи орбиты Земли было обнаружено малое тело на подковообразной орбите. К 2019 г. подобные малые тела и пылевые пояса были обнаружены вблизи орбит Меркурия и Венеры. Периоды P движения малых тел с ничтожно малыми массами m_3 по подковообразным траекториям во вращающейся системе отсчета (в рамках плоской круговой ограниченной задачи трех тел) приближенно равны $P \approx P_{\text{пл}} (m_1/m_2)^{0,57}$. Здесь m_1 – масса Солнца, m_2 – масса планеты. $P_{\text{пл}}$ – период обращения планеты вокруг Солнца [10]. Для «устойчивых подков» должно выполняться соотношение $m_1/m_2 > 710$. Для меньших отношений масс основных тел малое тело покинет систему или траектория будет хаотической. Для больших отношений масс звезды и планеты подковообразная траектория является устойчивой на значительных интервалах времени [10].


Список литературы

1. *Абалакин В. К., Аксенов Е. П., Гребеников Е. А.* Справочное руководство по небесной механике и астродинамике / Под ред. Г. Н. Дубошина. – Москва: Наука, 1976. – 684 с.
2. *Лидов М. Л.* О приближенном анализе эволюции орбит искусственных спутников // Проблемы движения искусственных небесных тел. – М.: АН СССР, 1963.
3. *Мюррей К., Дермотт С.* Динамика Солнечной системы / Пер. с англ. под ред. И. И. Шевченко. – М.: Физматлит, 2009. – 588 с.
4. *Перов Н. И.* «Вояджер-2» откроет неизвестные спутники Нептуна! / Астрономический циркуляр Астрономического совета АН СССР. – 1989. – № 1538. – С. 33–34.
5. *Перов Н. И., Иванова Ю. Д.* К вопросу о локализации в пространстве-времени будущих падений метеоритов. С. 85–93. Математика и информатика, астрономия и физика, и совершенствование их преподавания: материалы международной конференции «Чтения Ушинского» [5–6 марта 2020 года] / научн. ред. Н. И. Заводчикова. – Ярославль: РИО ЯГПУ, 2020. – 243 с. – С. 85 – 93.

6. *Bernardin L., Chin P., DeMarco P., Geddes K. O., Hare D. E. G., Heal K. M., Labahn G., May J. P., McCarron J., Monagan M. B., Ohashi D., Vorkoetter S. M.* The Essential Tool for Mathematics and Modelling // Copyright@Maplesoft, a division of Waterloo Maple Inc., 2011, www.maplesoft.com/maple/
7. <http://exoplanet.eu/catalog/> The Extrasolar Planet Encyclopaedia – Catalog Listing (дата обращения: 16.02.2023).
8. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/> Solar System Exploration (дата обращения: 16.02.2023).
9. *Kholshevnikov K. V., Borukha M. A., Eskin B. B., Mikryukov D. V.* On the asphericity of the figures of Pluto and Charon // Planetary and Space Science, Volume 181, article id. 104777. 02/2020. DOI: 10.1016/j.pss.2019.104777. ADS: 2020P&SS.18104777K [Bibtex entry]
10. *Perov N. I.* A model of dust matter distribution in the system of «a star and a planet» / Abstr. Of the 45th Lunar – Planetary Science Conference (The Woodlands, Texas, USA, March, 17–24, 2014). Abstract #1798. URL [http:// ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014LPI...45.1798P/abstract](http://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014LPI...45.1798P/abstract) (дата обращения: 15.07.2022).
11. *Teachey Alex, David M. Kipping David M., Schmitt Allan R.* HEK VI: On the Dearth of Galilean Analogs in Kepler and the Exomoon Candidate Kepler-1625b I // Astrophysics – Earth and Planetary Astrophysics. Astro-ph>arXiv:1707.08563v2. [Submitted on 26 Jul 2017 (v1), last revised 18 Oct 2017 (this version, v2)].
12. *Vashkov'yak M. A.* Some Aspects of the Chronological Study and Use of the Terminology of the Restricted Circular Doubly Averaged Three-Body Problem // Solar System Research, 2021. – Volume 55, Issue 5. – P. 481–482. DOI: 10.1134/S0038094621050075.
13. *Wei Zhu, Chelsea X. Huang, Georg Zhou, D. N. C. Lin.* Constraining the oblateness of Kepler planet. ArXiv. 1410. 0361v1 [astro-ph-EP]. 1 Oct. 2014.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕМЕННОЙ МАССЫ НА КОСМОГОНИЧЕСКИХ ИНТЕРВАЛАХ ВРЕМЕНИ

 **Н. И. Перов, В. Н. Онежко**

 Государственное автономное учреждение культуры
Ярославской области «Культурно-просветительский центр
имени В. В. Терешковой»

Ярославский государственный педагогический университет
имени К. Д. Ушинского

 perov@yarplaneta.ru

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к движению небесных тел переменной массы насчитывает около 100 лет. Этой проблеме посвящены работы [1, 2, 3, 4, 7]. Из современных работ отметим статью [6]. Ниже рассматривается эволюция орбит тел бинарной системы на больших интервалах времени, причем масса центрального тела убывает, а масса тела меньшей массы увеличивается. Численные и аналитические исследования проводились с использованием пакетов прикладных программ “MAPLE’15” [5].

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Рассмотрим систему, состоящую из двух тел, изотропно теряющих (поглощающих) – с нулевой скоростью – материю. Представим модель их движения в инерциальной системе отсчета в виде:

$$\frac{d(m_1 \mathbf{v}_1)}{dt} = -\frac{Gm_1 m_2}{r_{12}^3} \mathbf{r}_{12}; \quad (1)$$

$$\frac{d(m_2 \mathbf{v}_2)}{dt} = \frac{Gm_1 m_2}{r_{12}^3} \mathbf{r}_{12}. \quad (2)$$

Полагаем, что первое – массивное тело – теряет массу по закону:

$$m_1 = m_{01}(1 - k_1 \cdot t), \quad (3)$$

где: m_{01} – начальная масса первого тела, $k_1 = (1/m_{01}) \cdot (dm_1/dt)_{01}$, t – интервал времени.

Второе тело поглощает массу по закону:

$$m_1 = m_{02}(1 + k_2 \cdot t), \quad (4)$$

где m_{02} – начальная масса второго тела, $k_2 = (1/m_{02}) \cdot (dm_2/dt)_{02}$, t – интервал времени. Скорость потери массы для обоих тел сохраняется. Здесь G – гравитационная постоянная.

Раскрываем скобки в уравнениях (1) и (2) с учетом соотношений (3) и (4). При переходе к невращающейся системе отсчета, связанной с телом m_1 (после умножения уравнений (1) и (2) на m_{02} и m_{01} соответственно и затем вычитания из преобразованного уравнения (2) преобразованного уравнения (1)), получим уравнение относительного движения тела с массой m_1 :

$$\frac{d^2 r_{12}}{dt^2} = -G(m_{01} + m_{02}) \frac{r_{12}}{r_{12}^3} - G(m_{01} + m_{02})(k_2 t - k_1 t - k_1 k_2 t^2) \frac{r_{12}}{r_{12}^3} - k_2 v_2 - k_1 v_1 - k_2 t \frac{dv_2}{dt} - k_1 t \frac{dv_1}{dt}.$$

Если в системе центра масс тел выполняются соотношения:

$$m_{01}(1 - k_1 t)v_1 + m_{02}(1 + k_2 t)v_2 = 0 \quad (5)$$

и

$$v_2 - v_1 = dr_{12}/dt, \quad (6)$$

то

$$\frac{d^2 r_{12}}{dt^2} + G(m_{01} + m_{02}) \frac{r_{12}}{r_{12}^3} = f; \quad (7)$$

$$f = -G(m_{01} + m_{02})(k_2 t - k_1 t - k_1 k_2 t^2) \frac{r_{12}}{r_{12}^3} - k_2 \frac{m_{01}(1 - k_1 t) \frac{dr_{12}}{dt}}{m_{01}(1 - k_1 t) + m_{02}(1 + k_2 t)} + k_1 \frac{m_{02}(1 + k_2 t) \frac{dr_{12}}{dt}}{m_{01}(1 - k_1 t) + m_{02}(1 + k_2 t)} -$$

$$k_2 t \cdot \frac{[m_{01}(1 - k_1 t) + m_{02}(1 + k_2 t)] m_{01} [-k_1 \frac{dr_{12}}{dt} + (1 - k_1 t) \frac{d^2 r_{12}}{dt^2}]}{[m_{01}(1 - k_1 t) + m_{02}(1 + k_2 t)]^2} -$$

$$k_2 t \cdot \frac{m_{01}(1 - k_1 t) \frac{dr_{12}}{dt} \cdot [-m_{01} k_1 + m_{02} k_2]}{[m_{01}(1 - k_1 t) + m_{02}(1 + k_2 t)]^2} + \quad (8)$$

$$k_1 t \cdot \frac{m_{02} [k_2 \frac{dr_{12}}{dt} + (1 - k_2 t) \frac{d^2 r_{12}}{dt^2}] [m_{01}(1 - k_1 t) + m_{02}(1 + k_2 t)]}{[m_{01}(1 - k_1 t) + m_{02}(1 + k_2 t)]^2} -$$

$$k_1 t \cdot \frac{m_{02}(1 + k_2 t) \frac{dr_{12}}{dt} \cdot [-m_{01} k_1 + m_{02} k_2]}{[m_{01}(1 - k_1 t) + m_{02}(1 + k_2 t)]^2}.$$

Поскольку для невозмущенного движения:

$$\dot{\mathbf{r}}_{12} \cdot \dot{\mathbf{r}}_{12} = G(m_1 + m_2) \left(\frac{2}{r_{12}} - \frac{1}{a} \right), \quad (9)$$

то для возмущенного движения после дифференцирования (9) имеем:

$$2\dot{\mathbf{r}}_{12} \ddot{\mathbf{r}}_{12} = G(m_1 + m_2) \left(-\frac{2r\dot{r}}{r^3} + \frac{\dot{a}}{a^2} \right). \quad (10)$$

Из выражений (7), (8) и (9) следует, с учетом

$$r_{12} \dot{r}_{12} \approx 0, \left(\frac{dr_{12}}{dt} \right)^2 = \left(\sqrt{\frac{G(m_1 + m_2)}{r^3}} \right)^2$$

(на одном обороте по круговой орбите малого тела):

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{r}}_{12} = & \left(\frac{dr_{12}}{dt} \right)^2 \cdot \left\{ \frac{2k_2 m_{01} k_1 t + 2k_1 m_{02} k_2 t - k_2 m_{01} + k_1 m_{02} +}{[m_{01}(1 - k_1 t) + m_{02}(1 + k_2 t)]} \right. \\ & \left. + \frac{[k_2 t m_{01}(1 - k_1 t) - k_1 t m_{02}(1 + k_2 t)][-m_{01} k_1 + m_{02} k_2]}{[m_{01}(1 - k_1 t) + m_{02}(1 + k_2 t)]^2} \right\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Сравнивая выражения (7) и (10) и учитывая соотношение (11), придем к дифференциальному уравнению для поиска большой полуоси a круговой орбиты малого тела как функции времени:

$$\begin{aligned} \frac{da}{dt} = & 2a \cdot \left\{ \frac{2k_2 m_{01} k_1 t + 2k_1 m_{02} k_2 t - k_2 m_{01} + k_1 m_{02} +}{[m_{01}(1 - k_1 t) + m_{02}(1 + k_2 t)]} \right. \\ & \left. + \frac{[k_2 t m_{01}(1 - k_1 t) - k_1 t m_{02}(1 + k_2 t)][-m_{01} k_1 + m_{02} k_2]}{[m_{01}(1 - k_1 t) + m_{02}(1 + k_2 t)]^2} \right\}. \end{aligned} \quad (12)$$

Разделяя переменные в этом дифференциальном уравнении (12), придем к алгебраическому уравнению для определения интервала времени τ при увеличении радиуса a_0 начальной круговой орбиты малого тела в заданное число раз (до значения a).

$$\frac{1}{2} \ln \frac{a}{a_0} = - \frac{(k_1 k_2 t m_{01} + k_1 m_{02} + k_1 k_2 t m_{02} - k_2 m_{01}) \tau}{m_{01} + m_{01} k_1 \tau - m_{02} - m_{02} k_2 \tau}. \quad (13)$$

ПРИМЕР

Рассмотрим систему типа Солнце – Земля.

Примем $m_{01} = 2 \cdot 10^{30}$ кг, $(dm_1/dt)_0 = 5 \cdot 10^9$ кг/с = $5 \cdot 10^9 \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 365,2422 = 1,577846304 \cdot 10^{17}$ кг/год, $k_1 = (1/m_{01}) \cdot (dm_1/dt)_0 = 7,889231520 \cdot 10^{-14}$ 1/год;

$$m_{02} = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}, (dm_2/dt)_0 = 100 \cdot 10^3 \text{ кг/сут} = 100 \cdot 10^3 \cdot 365,2422 =$$

$$= 3,652422 \cdot 10^7 \text{ кг/год}, k_2 = (1/m_{02}) \cdot (dm_2/dt)_0 = 6,087370 \cdot 10^{-18} \text{ 1/год};$$

$$a/a_0 = 2;$$

$$a_0 = 150 \cdot 10^6 \cdot 10^3 \text{ м}.$$

Используя эти данные, с применением пакетов прикладных программ “MAPLE’15” решим уравнение (13) относительно t :

$$t_1 = 1,267543413 \cdot 10^{13} \text{ год}, t_2 = -5,693354442 \cdot 10^{16} \text{ год}.$$

Второй корень отбрасываем, полагая, что он не имеет астрономического смысла в рамках поставленной задачи.

Определим скорость Земли V_E в будущем, после промежутка времени t_1 , при $m_{01}' = m_{01} \cdot (1 - k_1 \cdot t_1) = 2 \cdot 10^{30} \cdot (1 - 7,8892315 \cdot 10^{-14} \cdot 1,267543413 \cdot 10^{13}) = 1,131060 \cdot 10^{25} \text{ кг}.$

$$V_E = (Gm_{01}'/a)^{1/2} = (6,672 \cdot 10^{-11} \cdot 1,131060 \cdot 10^{25} / (300 \cdot 150 \cdot 10^6 \cdot 10^3))^{1/2} = 49,96527754 \text{ м/с}.$$

Заметим, что в настоящую эпоху гелиоцентрическая скорость Земли составляет около 30 000 м/с.

График функции $\ln(a/a_0) = \Phi(t)$ приведен на рисунках 1 и 2.

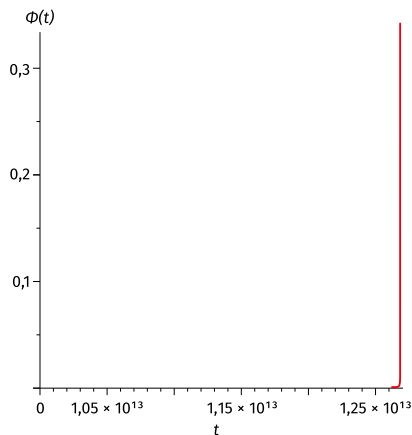


Рисунок 1. График функции $\ln(a/a_0)$ для случая, когда $\Phi(t)$ изменяется от 0 до максимума.

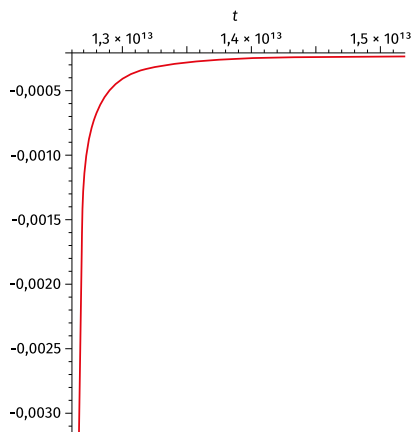


Рисунок 2. График функции $\ln(a/a_0)$ для случая, когда $\Phi(t)$ изменяется от минимума до 0.

Производная функции $\Phi(t)$ обращается в 0 в точках $t_1 = 1,017599323 \cdot 10^{13}$ год и $t_2 = 1,517509445 \cdot 10^{13}$ год. А функция $\Phi(t)$ обращается в 0 в точке $t = 1,2675435 \cdot 10^{13}$ год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модели движения небесных тел с переменной массой при практическом применении вызывают следующие трудности: необходимость определения закона изменения массы тел, поиск новых квадратур соответствующих дифференциальных уравнений движения, при рассмотрении движения тел на космогонических интервалах времени становятся значительными ошибки численного интегрирования. Решение этих проблем, несомненно, будет способствовать успешному исследованию эволюции небесномеханических систем с переменной массой, в частности Солнечной системы и Галактики.

Список литературы

1. *Курышев В. И., Перов Н. И.* Об уравнениях движения бинарных систем с переменными массами // *Астрономический журнал АН СССР.* – 1981. – Т. 58. – Вып. 4. С. 886.
2. *Мещерский И. В.* Работы по механике тел переменной массы. – М., Л.: ГИТЛ, 1949.

3. Омаров Т. Б. Динамика гравитирующих систем Метагалактики. – Алма-Ата: Наука, 1973.
4. Радзиевский В. В., Суркова Л. М. Эволюция орбитальных элементов тесных двойных систем // *Астрономический журнал АН СССР*. – 1973. – Т. 50. – С. 1200.
5. Bernardin L., Chin P., DeMarco P., Geddes K. O., Hare D. E. G., Heal K. M., Labahn G., May J. P., McCarron J., Monagan M. B., Ohashi D., Vorkoetter S. M. The Essential Tool for Mathematics and Modelling // Copyright@Maplesoft, a division of Waterloo Maple Inc., 2011. www.maplesoft.com/maple/
6. Ferdaous Bouaziz-Kellil. Motion of the Infinitesimal Variable Mass in the Generalized Circular Restricted Three-Body Problem under the Effect of Asteroids Belt. *Advances in Astronomy*. 2020. Volume 2020 | Article ID 6684728 | <https://doi.org/10.1155/2020/6684728>
7. James Sir, Jeans H.M.A.D. *Se LLD, ERS Astronomy and Cosmogony*. Cambridge, at the University Press, 1929.

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЗОНДОВОЙ МЁССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ПОИСКА «ЖИДКОЙ» ВОДЫ В ОБЪЕКТАХ КОСМИЧЕСКОГО ГРУНТОВЕДЕНИЯ

 **А. А. Залуцкий, В. В. Морозов, А. Ю. Соколов, Е. Н. Школьников**

 *Ярославский государственный технический университет*

 *zalutskii@mail.ru*

ВВЕДЕНИЕ

В космическом грунтоведении (КГ) [8], как новом научном направлении в Земном грунтоведении, вопрос обнаружения и наличия «жидкой» воды на планетах земной группы до сих пор решается. Благоприятным образом дело обстоит с нашей планетой, но одновременно остается проблема по выяснению вероятного происхождения самой воды на Земле. В настоящее время ответ на поставленный вопрос носит скорее неопределенный и в основном дискуссионный характер. Разработанный нами подход, реализованный на методике МС, позволит в будущем частично продвинуться в положительную область решения проблемы. Однако для спутника Земли наша методика, по-видимому, малопригодна, в то время как с ее помощью все же можно диагностировать присутствие (или в крайнем случае следы) «жидкой» фазы воды на современном Марсе.

Руководящая идея используемого ниже методического подхода, с одной стороны, обязана применению широкого арсенала физических инструментариив, и в настоящей работе в основном использовалась методика зондовой мёссбауэровской спектроскопии (зондовой МС). При этом благодаря последним миссиям на Марс (см., например, [11] и особенно ссылки) и имеющимся ранее данным относительно спутника Земли [9] горизонт дальнейших мёссбауэровских исследований существенно расширился. Тогда, с другой стороны, 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 [6] была подкреплена дальнейшими разработками в этом направлении (количественные результаты детально представлена в [5]).

Цель настоящей статьи – продемонстрировать вновь созданный на базе зондовой МС лабораторный подход применительно к модельным системам «замороженная вода – глина». Необходимость предлагаемой ниже методики диктуется не только спецификой изучаемых объектов (почвы Земли и грунты Марса далеко не эквивалентные системы [13]), но и поиском возможных решений для более фундаментальных задач (например, наличие «свободной» воды на планетах земной группы или/и наличие на них форм жизни).

Современный Марс в целом представляет собой сухую, пыльную и холодную планету с некоторым количеством замерзшей воды, которая в основном локализована на ее 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, остается открытым в повестке дня. Поэтому нами был проведен мёссбауэровский эксперимент с модельной системой, представляющей собой аналог поверхностного марсианского грунта. Методика зондовой МС способна исследовать фазовые переходы (ФП) в замороженных разбавленных растворах солей двух- и трехвалентного железа в воде. Так, на заре становления МС был зафиксирован экспериментальный факт [18], подтверждающий способность мёссбауэровских зондов удовлетворительно отражать не только динамические свойства «объемного» льда, но и потенциальную возможность изучать ФП (кубический лед → гексагональный лед). Нами был осуществлен трудоемкий отбор мёссбауэровских зондов, который оказался эффективным для исследования поверхностного льда в системе «замороженная вода – глина». В частности, отметим, что поведение замороженных нанослоев «чистой» и «соленой» 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, сноски в [7]). При этом мы целенаправленно предполагаем, что, несмотря на специфику марсианского климата, на современном Марсе все же нет препятствий для присутствия следов «жидкой» фазы воды.

Зондовая мёссбауэровская диагностика строения и свойств 2D-размерных слоев воды на подложке монтмориллонита

В реальном мире мы практически живем между двумя (2D) и тремя (3D) измерениями. В фактическом поведении одна и та же пленка в зависимости от внешних условий может быть как двух- так и трехмерной или даже иметь дробную размерность. При этом могут фиксироваться взаимные переходы (2D \leftrightarrow 3D), а также наблюдаться остатки или следы двумерной физики в чисто объемных на первый взгляд системах.

Ранее нами были выполнены оценки величин (толщины, плотности, вязкости) для квазижидкого слоя (КЖС) воды и/или набора ряда упругих параметров (модуль сдвига, коэффициент Пуассона, параметр Грюнайзена) для гексагонального льда [7]. Однако 2D-геометрия изучаемой системы, если и предполагалась, то без должной при этом аргументации. В пользу предположения может только косвенно говорить сама методика приготовления образцов, поскольку форма изотермы адсорбции монтмориллонита при различном диапазоне равновесных относительных давлений паров воды (P/P_0) имела вид «ступеней». Образно говоря, подобная экспериментальная зависимость, по емкому замечанию Дж. Г. Дэша, представляла собой «лестницу, ведущую в физику двух измерений».

Усилим достоверность нашего предположения (присутствие 2D-льда в нашей системе) тремя фактами: первое условно можно связать с геометрией самого объекта, а два других – непосредственно с физикой ФП. Экспериментально установленная анизотропия коэффициента диффузии ($|D_{\parallel} - D_{\perp}|/D_{\perp} \cong 25\%$) [4] для мёссбауэровского зонда Fe^{2+} в адсорбированных водных пленках на глинистой подложке может быть объяснима геометрией системы: атомы железа имеют большую свободу в своем движении в параллельной плоскости по сравнению с более сильно закрепленными атомами в перпендикулярном направлении относительно базальных плоскостей (d_{001}) подложки. Таким образом, полученный факт ограничения движения мёссбауэровской метки в замороженных пленках воды говорит в пользу наличия в системе 2D-льда.

Известно, что использование теории подобия при анализе физики ФП [10] позволяет связать температурную зависимость параметра порядка (в нашем случае его роль выполнял фактор Лэмба-Мёссбауэра ($f' \approx S(T)$) вблизи точки перехода (T_c) с последующим определением критического индекса. Найденная в мёссбауэровском эксперименте величина индекса ($\beta \cong 0,13$) практически совпадает со значением $1/8$, вытекающим из теории для двумерных систем. Поскольку экспериментально полученный критический показатель хорошо согласуется с предсказанием двумерной мо-

дели в довольно широком диапазоне температур, то это дает нам право считать пленку замороженной воды двумерной.

Наиболее ярче (лучше сказать эффективнее) разница физических свойств между 2D- и 3D-измерениями проявляется при изучении процессов плавления. Действительно, если в случае с «объемным» (или 3D) льдом плавление всегда происходит посредством ФП первого рода, то с «поверхностным» (или 2D) льдом процесс может состоять, как правило, из множества вариантов сценариев плавления. Современное физическое состояние достижений, связанных с диагностикой сценариев, сконцентрировано в обзоре [12]. С другой стороны, использование зондовой МС как эффективного поверхностного чувствительного метода при исследовании многослойных структур известно давно. Тем не менее данных по детальному обнаружению и разделению границ между 3D- и 2D-льдом методом МС просто нет.

Для устранения пробела воспользуемся разработанной 50 лет назад Березинским, Костерлицем и Таулесом теорией (БКТ-теория), за которую в 2016 г. Костерлиц и Таулес получили Нобелевскую премию. БКТ-теория до сих пор служит мощным стимулом к изучению двумерных систем самой различной природы, и наши объекты не являются каким-либо исключением.

Первым и наиболее известным сценарием плавления 2D-систем является двухступенчатый процесс, состоящий из двух непрерывных БКТ-переходов с промежуточной анизотропной жидкостью – гексатической фазой (ГФ). Реализацию подобной схемы плавления можно проиллюстрировать температурной зависимостью фактора Лэмба-Мёссбауэра ($f' \approx S(T)$) для зонда Fe^{3+} , предварительно разбитую согласно предполагаемому сценарию на соответствующие области (рисунок 1).

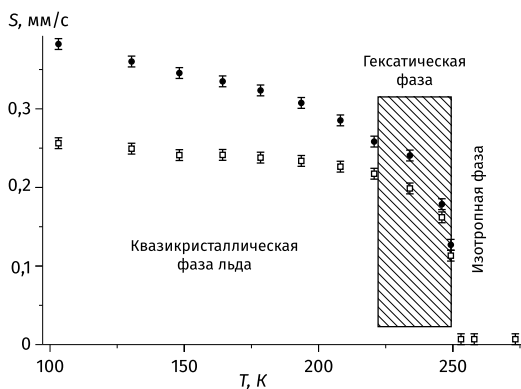


Рисунок 1. Сценарий плавления 2D-льда, базирующийся на температурном поведении вероятности эффекта Мёссбауэра ($f' \propto S$).

С другой стороны, в наличии имеется второй сценарий (по результатам компьютерного моделирования [15]), согласно которому плавление может происходить посредством двух переходов с промежуточной, но в отличие от первого сценария кристалл переходит в ГФ посредством непрерывного БКТ-перехода, а гексатик превращается в изотропную жидкость через ФП первого рода.

Попробуем согласовать данные из мёссбауэровского эксперимента с описанными выше сценариями. Постоянная конкуренция между ФП первого рода и БКТ-переходом (см., например, [16]) несложно снимается с помощью проверки энергетического соотношения ($E_c \geq 2,84k_B T$, где k_B – постоянная Больцмана, T – температура перехода). Так, механизм БКТ-перехода выполняется при этом условии, тогда как в противоположном случае процесс плавления индуцируется трансформацией границ зерен. При этом наряду со значением E_c можно дополнительно получить информацию о наличии в системе ФП первого рода (анализ поведения параметров спектра для зонда Fe^{2+} вблизи критической температуры T_c (см., например, в [3])). Но имеется первый сложный момент, который связан с не совсем резким проявлением БКТ-перехода. Анализ показал, что его «размытие» в непосредственной близости к критической температуре обусловлено паразитическим влиянием 3D-эффектов.

Второй момент носит более принципиальный характер, поскольку для «чистой» ГФ ее модуль сдвига обязан быть равен нулю. Но данные по мёссбауэровскому эксперименту говорили совсем об обратном. Возможное объяснение, которое позволит снять это противоречие, связано с другой структурой ГФ, получившей название «гексатическое стекло» (ГС) (т. е. это ГФ, модуль сдвига которой может быть не равным нулю). Существование ГС находится в удовлетворительном согласии с результатами теоретического анализа Чудновского [17], который показал, что в 2D-системах с микроскопическим беспорядком переход «кристалл – ГС» отсутствует, а наиболее упорядоченным состоянием является ГС.

На основании современных данных о формах льда в совокупности с методическими возможностями МС установлено, что в 2D-льде в зависимости от толщины водного слоя могут реализовываться оба сценария его плавления. При этом ГФ представляет собой ГС, а квазикристаллическая фаза – смесь кристаллических «объемных» (I_c, I_h) и метастабильных (аморфных) форм льда низкой плотности.

Диагностика основных типов шума с помощью метода МС

Экспериментальные данные по применению методики МС для исследования стохастических процессов (СП) или динамического хаоса (ДХ) прак-

тически отсутствуют. Одно приятное исключение может составлять только серия экспериментов, которая базировалась на модели броуновского осциллятора с сильным затуханием и формально описывалась в рамках «белого» шума (БШ).

Для проведения эффективного анализа имеющийся на настоящий момент материал целесообразно 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 рисунке 2. Здесь существенно то, что наиболее наглядно шум $1/f$ проявляет себя в тех слоях замороженной жидкости, которые по своей «структуре» соответствуют «пыли Канторова».

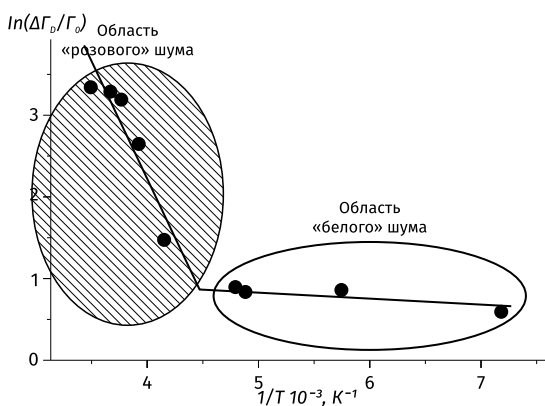


Рисунок 2. Схема возможных областей шума в системе «замороженный раствор – монтмориллонит» и базирующаяся на температурном поведении мёссбауэровского параметра $\Delta\Gamma(T)$.

В качестве количественного показателя, позволяющего контролировать присутствие в системе фликкер-шума ($1/f$ -шума), можно предложить параметр Хоуге (или соотношение Хоуге) [20]. Для чего нами были проанализированы две серии экспериментальных данных, в которых первая группа представляет собой результат «чистого» использования методики МС для системы «железо – алюмосиликатная поверхность», а вто-

рая – классический эксперимент, характерный при применении методики фликкер-шумовой спектроскопии, но только с контролем необходимых параметров опыта с использованием метода МС. В результате был определен диапазон значений параметра Хоуге ($\alpha = (1,07/1,64) \cdot 10^{-3}$), позволяющий констатировать наличие $1/f$ -шума в системе «железо – алюмосиликатная поверхность».

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 наукоемких в математическом аспекте экспериментов (см. строки № 1–4 в табл. 1). Поэтому с целью проведения наиболее эффективного решения поставленной задачи и одновременно получения из нее «быстрого» ответа была разработана специальная методика, апробированная данными из мёссбауэровского эксперимента (см. строку № 5 в табл. 1).

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)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При использовании зондовой методики, разработанной на базе мёссбауэровского изотопа ^{57}Fe в двух формах (Fe^{2+} и Fe^{3+}), можно достоверно утверждать:

1. стеклющиеся нанослои замороженной воды на поверхности глины являются незергодическими системами. В пользу говорит уста-

новленный каскад фазовых переходов в системе «замороженная вода – глинистый минерал». При этом широкий набор критических температур может быть формально систематизирован в рамках концепции «долин» [2], традиционно применяемой в физике стекольных переходов;

2. в плане физики, экспериментально зафиксированное нами аномально высокое значение вязкости (η) стеклющихся жидкостных слоев связанной воды в глине [7] требует своего рассмотрения. Один из вариантов объяснения подобной аномалии в величинах η представлен в [1], где рассматривалась специфическая роль диффузионных процессов. При этом величина активационных барьеров для них плохо согласуется с параметрами (σ и ε) эффективного потенциала межчастичного взаимодействия (типа Леннарда-Джонса (Л-Д)). Однако транспортные явления могут быть легко изучены с помощью метода МС, позволяющего учитывать тип межчастичного взаимодействия в процессе диффузионных процессов. Действительно, использование уравнения Ланжевена позволило нам процесс взаимодействия ионов Fe^{3+} с плотной окружающей средой (случай большого трения) симитировать «частотолом» из потенциальных барьеров (в рамках модели «ограниченной» диффузии). По-другому, на языке стекольной физики, энергетический ландшафт нашей системы можно представить в виде набора бассейнов, внутри каждого имеются активационные барьеры одного и того же масштаба. Но более детальное продолжение изучения энергетического аспекта в случае стеклющихся молекулярных жидкостей представляет собой отдельную задачу. Поэтому в формате настоящей статьи мы только тезисно представим точки соприкосновения с данными, полученными с помощью зондовой МС. Основная идея подхода заключалась в том, что вблизи фазового перехода или критической точки имеют место флуктуации разного масштаба. Поэтому для корректного описания подобных явлений целесообразно применять масштабнo-инвариантную теорию, которая успешно применяется в анализе фазовых переходов 2-го рода [10]. В частности, ранее для нашей системы была установлена удовлетворительная работа по использованию скейлинговых (или масштабных) соотношений для анализа температурных зависимостей параметров мёсбауэровских спектров. Более того, скейлинг термодинамических (не исключая и транспортных) характеристик для легко стеклющихся молекулярных жидкостей (или в «простых» системах – термин «простой» позаимствован из [1]) при изменении температуры хорошо коррелиру-

ет с параметрами эффективного потенциала Л-Д межчастичного взаимодействия. В нашем случае скейлинг параметров локальной динамики (τ или η) с участием межмолекулярного отталкивающего потенциала $U(r) \sim (\sigma/r)^{2\gamma}$ (методика в [21]) для кристаллического льда (I_h) позволил установить, что масштабирующий параметр гамма (γ) может быть однозначно идентифицирован постоянной Грюнейзена $\gamma_G (= V\alpha_p k_T^{-1} c_V^{-1})$. При этом данные, необходимые для анализа температурного поведения вязкости ($\eta(T) \sim S(T)$) и последующей процедуры сравнения с типичными значениями величины γ_G для молекулярных жидкостей, были взяты из проведенного нами ранее мёссбауэровского эксперимента [7]. Однако для анализа «квази»-аморфного (или 2D) льда требуется совершенно другой подход, чем тот, который применялся при скейлинге динамических величин. Такое несоответствие в масштабирующих параметрах ($\gamma_{EOS} \gg \gamma \gg \gamma_G$) удовлетворительно объясняется с помощью модифицированной модели Аврамова [14] в рамках подхода «термодинамического масштабирования» величин PVT [19] (в частности, скейлинге плотности максимального энергетического барьера с масштабным показателем γ_{EOS}). Таким образом, обнаруженное уменьшение параметра γ в переходе от переохлажденных ван-дер-ваальсовых жидкостей к сильно Н-связанным материалам (на примере трансформации 3D \rightarrow 2D-льда) обеспечивает прочную основу в будущем для правильного понимания влияния межмолекулярных сил на явление термодинамического масштабирования;

3. из множества вариантов для двумерного (2D) льда предложены два конкретных сценария его плавления, адекватный выбор которых основывался на анализе параметров экспериментальных спектров;
4. привлечение данных мёссбауэровского эксперимента позволило выяснить конкретный сценарий пути установления и развития хаоса в детерминированной системе.

Авторы предполагают, что представленная в настоящей работе методика зондовой МС поможет 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. Бражкин В. В. Могут ли стеклообразующие жидкости быть «простыми»? // УФН. – 2019. – Т. 189. – № 6. – С. 665–672.
2. Доценко В. С. Физика спин-стекольного состояния // УФН. – 1993. – Т. 163. № 6. – С. 1–37.
3. Залуцкий А. А. Изучение особенностей фазовых переходов в системе «железо – поверхность наноглин» с помощью мёссбауэровской спектроскопии // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40. – Вып. 20. – С. 54–61.
4. Залуцкий А. А. Особенности механизмов диффузии и динамических свойств мёссбауэровских атомов железа на поверхности наноглин // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2016. – Т. 52. – № 1. – С. 30–40.
5. 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. – С. 305–336.
6. 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. – С. 95–97.
7. Залуцкий А. А., Седьмов Н. А., Соколов А. Ю., Школьников Е. Н. Мёссбауэровские исследования квазижидкого слоя на алюмосиликатной поверхности природного происхождения // Математика и естественные науки. Теория и практика / Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 13. – Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2018. – С. 295–323.
8. Королев В. А. Актуальные научные проблемы современного грунтоведения // Грунтоведение. – 2013. – № 1. – С. 4–10.
9. Малышева Т. В. Эффект Мёссбауэра в геохимии и космохимии. – М.: Изд-во «Наука, 1975. – 168 с.
10. Паташинский А. З., Покровский В. Л. Флуктуационная теория фазовых переходов. – М.: Наука, 1982. – 382 с.
11. 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.
12. Рыжов В. Н., Тареева Е. Е., Фомин Ю. Д., Циок Е. Н. Переход Березинского – Костерлица-Таулеса и двумерное плавление // УФН. – 2017. – Т. – 187. – № 9. – С. 921–951.
13. Таргульян В. О., Мергелов Н. С., Горячкин С. В. Почвоподобные тела на Марсе. // Почвоведение. – 2017. – № 2. – С. 205–218.
14. Avramov I. Pressure dependence of viscosity of glassforming melts // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2000. – Vol. 262. – P. 258–263.
15. Bernard E., Krauth W. Two-Step Melting in Two Dimensions: First-Order Liquid-Hexatic Transition // Physical Review Letters. – 2011. – V. 107 (15). – P. 155704–1–155704–4.
16. Binder K., Sengupta S., Nielaba P. The liquid-solid transition of hard discs: first-order transition or Kosterlitz-Thouless-Halperin-Nelson-Young scenario? // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2002. – V. 14 (9). – P. 2323–2333.

17. *Chudnovsky E. M.* Hexatic vortex glass in disordered superconductors // *Physical Review B.* – 1989. – V. 40 (16). – P. 11355–11357.
18. *Dézi I., Keszthelyi L., Molnár B., Pócs L.* Mössbauer effect study of phase transition in ice // *Physics Letters*, 1965, vol. 18 (1). – C. 28–29.
19. *Grzybowski A., Haracz S., Paluch M., Grzybowska K.* Density Scaling of Supercooled Simple Liquids Near the Glass Transition // *The Journal of Physical Chemistry B.* – 2010. – V. 114. – P. 11544–11551.
20. *Hooge F. N.* $1/f$ noise is no surface effect // *Physics Letters A.* – 1969. – V. 29 (3). – P. 139–140.
21. *Roland C. M., Feldman J. L., Casalini R.* Scaling of the local dynamics and the intermolecular potential // *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2006. – Vol. 352. – P. 4895–4899.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ КОМЕТЫ C/2017 K2 PANSTARRS. ОЦЕНКА МАССОВЫХ ПОТЕРЬ ВОДЯНОГО ЛЬДА КОМЕТЫ И ВРЕМЕНИ ЕЕ ЖИЗНИ

 **Ю. П. Филиппов**

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

 *yuphil@mail.ru*

ВВЕДЕНИЕ

Комета – это малое тело Солнечной системы, движущееся вокруг Солнца по относительно вытянутой (эллиптической, параболической или гиперболической) орбите [2]. На больших расстояниях от Солнца комета видна лишь в телескоп как светящееся точечное небесное тело (подобное астероиду), отражающее поверхностью своего ядра (твердотельного образования, являющегося основным носителем массы кометы) солнечный свет. По мере приближения кометы к Солнцу последняя приобретает разреженную газопылевую оболочку, охватывающую ядро и называемую *комой*, а также ее динамическое необратимое расширение в межпланетное космическое пространство, называемое *хвостом* кометы.

Существенное изменение видимого образа кометы (от точечного астероидоподобного до диффузно протяженного объекта) обусловлено наличием в составе ядра кометы летучих химических соединений, прежде всего космических льдов, их нагревом по мере приближения к Солнцу и последующим фазовым переходом (сублимацией) из твердой в газовую фазу. Потоки газа, исходящие из ядра, поднимают с его поверхности и уносят с собой малые пылевые частицы благодаря действию на последние значительных сил лобового сопротивления газа и малости сил их притяжения ядром кометы [1].

В зависимости от величины сидерического периода T_c обращения кометы вокруг Солнца выделяют *короткопериодические* кометы (период об-

ращения которых $T_c \leq 200$ лет) и *долгопериодические* кометы (для которых $T_c > 200$ лет). На данный момент человечеству известно чуть более 7 тысяч появлений комет вблизи Солнца, из которых более 400 таких событий относятся к короткопериодическим.

Наиболее подробно изучены короткопериодические кометы. Как показывают исследования химического состава ядер таких комет [6; 16], наиболее распространенным летучим веществом ядра является водяной лед.

Согласно работам [8; 15], при подходе кометы к своему перигелию водяной лед начинает активно сублимировать с поверхности ядра, если его температура не меньше температуры сублимации этого льда – $T_{su} b = 152$ К. При температурах меньше указанной данный процесс для водяного льда сильно подавлен. Данное значение температуры поверхности ядра достигается в окрестности орбиты Юпитера. Именно поэтому короткопериодические кометы традиционно за орбитой Юпитера выглядят как астероиды, их трудно идентифицировать как кометы. Внутри орбиты гиганта они проявляют кометную активность. В частности, на гелиоцентрических расстояниях, равных $3 \div 4$ а. е., у кометы появляется кома из водяного пара, а на меньших расстояниях формируется газопылевой хвост.

При изучении долгопериодических комет были обнаружены признаки появления комы далеко за пределами орбиты Юпитера. Ярким представителем таких комет является C/2017 K2 (PANSTARRS). Она была обнаружена в рамках проекта Pan-STARRS (Халеакале, Гавайи) 21 мая 2017 года [14], когда комета находилась на расстоянии 16,1 а. е. от Солнца (за орбитой Юпитера). И уже в этот момент она проявляла активность, обладая комой с диаметром порядка 130 тыс. км! Детальный анализ снимков этого участка неба, полученных еще в 2013 году, указал на наличие активности кометы на расстояниях 23,7 а. е., что является абсолютным рекордом среди всех известных комет на подходе к своему перигелию.

Исследования [14] орбиты данной кометы указали на то, что последняя является долгопериодической, движущейся в окрестности Солнца по гиперболической орбите с большой полуосью $a = 7\,231$ а. е., эксцентриситетом $\epsilon = 1,00034$, наклоном $i = 87,6^\circ$ и расстоянием до перигелия $q = 1,811$ а. е. Данная комета прошла свой перигелий 19 декабря 2022 года.

Сегодня принято считать, что данная комета, как и другие кометы с гиперболической орбитой, скорее всего, не имеет межзвездного происхождения. Вероятнее всего, она попала во внутреннюю часть Солнечной системы из облака Оорта. Трансформация эллиптической орбиты в гиперболическую произошла в результате планетных гравитационных возмущений или действия реактивных сил газа, покидающего ядро [7; 13]. Предположение о происхождении кометы в облаке Оорта позволяет легко объяснить раннюю активность C/2017 K2 посредством сублимации летучих низкотемпературных льдов (CO , CO_2 , N_2 , O_2 согласно [12] и CO согласно [9]).

На момент открытия кометы температура поверхности ядра составляла 60–70 К [9], что гораздо выше значений температуры сублимации данных летучих соединений, в то время как в облаке Оорта температура поверхности ядра была около 10 К, что меньше температуры сублимации любого из указанных соединений. Именно поэтому в облаке Оорта комета была неактивна и сохраняла запас летучих льдов на протяжении миллиардов лет.

Сходство C/2017 K2 и C/1995 O1 (Hale-Bopp) в их кометной активности на больших гелиоцентрических расстояниях породило предположение о гигантизме ядра этой кометы и привлекло внимание ученых к вопросу определения радиуса ядра новой кометы. Первые исследования [9] C/2017 K2 с помощью Канадско-французско-гавайского телескопа (CFHT) показали, что ядро кометы имеет радиус в диапазоне значений 14 ± 80 км, что сравнимо с масштабами ядра кометы C/1995 O1 (Hale-Bopp). Однако последующие исследования кометы с помощью Космического телескопа имени Э Хаббла (HST) указали на верхнюю границу для радиуса ядра, равную 9 км [9]. На начало 01.07.2022 комета C/2017 K2 имеет звездную величину +8^m, что позволяет получить ее изображение даже с помощью обычного фотоаппарата посредством серийной съемки. К концу 2022 года комета достигла максимума своего блеска. Этот факт породил новую волну исследований, а уже имеющиеся новые данные наблюдений позволяют повторно пересмотреть основные свойства ядра кометы. В связи со сказанным главной целью настоящей работы является: а) выполнение количественного анализа основных свойств ядра кометы C/2017 K2 (PANSTARRS) с использованием новых данных наблюдений; б) оценка массовых потерь кометы при прохождении ею перигелия своей орбиты.

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО РАДИУСА КОМЕТНОГО ЯДРА

Ядро кометы является трехмерным твердым телом неправильной формы, которое всегда можно поместить в контейнер в форме параллелепипеда, все стенки которого касаются данного тела и размеры которого ($a \cdot b \cdot c$) отождествляются с размерами ядра. Сложная поверхность реального астероида традиционно аппроксимируется гладкой поверхностью трехосного эллипсоида, оси которого равны размерам контейнера. Тогда объем эллипсоида есть:

$$V_{\text{ell}} = \frac{4}{3} \pi \cdot a \cdot b \cdot c. \quad (1)$$

Описание взаимодействия ЭМИ Солнца с поверхностью трехосного эллипсоида является сложной физической задачей, не решаемой, в принци-

пе, в терминах элементарных функций. Чтобы ее упростить, традиционно выполняется переход к модели сферического ядра, радиус которого R_N . Чтобы установить связь между реальными размерами ядра и модельным параметром, традиционно используется условие равенства объемов эллиптического и сферического ядер. Из последнего равенства получается явное выражение для эффективного радиуса ядра R_N :

$$R_N = \sqrt[3]{(a \cdot b \cdot c)}. \quad (2)$$

Определить истинные размеры ядра $(a \cdot b \cdot c)$ с поверхности Земли астрометрическими методами, как правило, не представляется возможным в силу малости этих величин, больших геоцентрических расстояний ядра, ограниченных возможностей используемого оборудования, плотной комы, окружающей ядро и не позволяющей получить четкие фотографии ядра. Лишь с использованием нескольких космических миссий (GIOTTO, Deep Impact, Contour, StarDust, Rosetta), в рамках которых космические аппараты сближались с ядрами комет, удалось надежно определить для них величины a , b , c . Именно поэтому эффективный радиус ядра является основной характеристикой, определяющей масштабы ядра, и в отличие от точных размеров может быть определен дистанционно, с поверхности Земли. С использованием основных понятий фотометрии: интенсивности солнечного света, светового потока, поверхностной светимости и яркости источника, закона Ламберта, формулы Погсона и понятия абсолютной звездной величины можно получить явное аналитическое выражение для эффективного радиуса ядра (подробный вывод результата представлен в работе [3]):

$$R_N = a_{\oplus} \sqrt{\frac{10^{-0,4(M - m_{\odot})}}{A_g}}, \text{ где } M = m + \lg \left[\frac{a_{\oplus}^2 j(\alpha)}{\Delta r_N} \right], \quad (3)$$

здесь a_{\oplus} – большая полуось земной орбиты; m_{\odot} – видимая звездная величина Солнца в рассматриваемом диапазоне электромагнитного излучения; m , M – видимая и абсолютная звездная величина ядра, A_g , $j(\alpha)$ – его геометрическое альbedo и фазовая функция, Δr_N – гео- и гелиоцентрическое расстояние ядра.

В работе [9] в результате детального анализа профиля яркости C/2017 K2 с использованием модели сжимающейся комы удалось получить видимую звездную величину для ядра кометы в полосе V, $m_V \geq 25,2^m$, что соответствовало абсолютной звездной величине $M_V \geq 12,9^m$. С использованием значения $A_g = 0,04$ и фазовой функции $j(\alpha) = 10^{-0,4 \cdot \beta \cdot \alpha}$, где $\beta = 0,035 \text{ град}^{-1}$ получаем верхнее предельное значение для радиуса ядра $R_N \leq 8,8 \text{ км}$. Последнее значение далее будем использовать в настоящей работе как опорный результат для радиуса ядра.

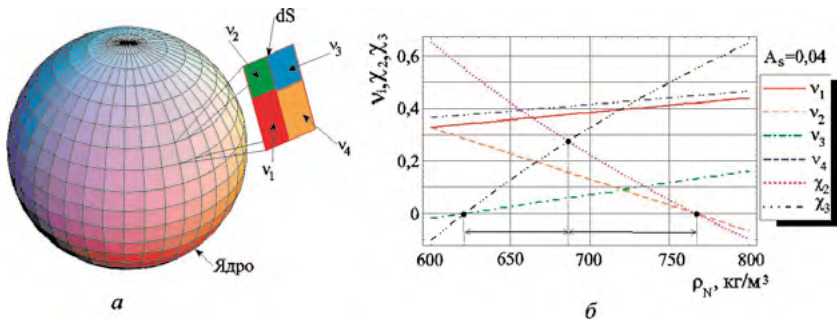


Рисунок 1. К определению а) модели мультикомпонентного ядра; б) интервала возможных значений для средней массовой плотности ядра при $A_s = 0,04$.

ОЦЕНКА СРЕДНЕЙ МАССОВОЙ ПЛОТНОСТИ, ПОРИСТОСТИ И МАССЫ ЯДРА, МАССОВЫХ ПОТЕРЬ И ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ

Для оценки средней массовой плотности воспользуемся оптико-геометрическим методом [4; 5] для модели мультикомпонентного сферического ядра. Представим кратко данную модель и суть оптико-геометрического метода.

1. Ядро кометы моделируется шаром (см. рисунок 1а) с радиусом R_N , состоящим из смеси $L - 1$ компонентов (веществ) в твердой фазе с известными значениями ρ_i средней массовой плотности, значениями $A_{s,i}$ сферического альbedo и объемными долями v_i ($i = 1, \dots, L - 1$).
2. Несферичность и пористую структуру ядра будем учитывать наличием пустот (L -я компонента с объемной долей v_L) в теле ядра. Сумма объемных долей всех компонентов, очевидно, должна удовлетворять условию:

$$\sum_{i=1}^L v_i = 1. \quad (4)$$

3. В силу малости гравитационных эффектов пространственного размежевания веществ с различной плотностью в теле ядра можно полагать, что данные типы веществ равномерно распределены по телу ядра. Поэтому будем полагать, что по всему объему шара доля v_i постоянна. Тогда для средней массовой плотности ядра справедливо уравнение вида:

$$\rho_N = \sum_{i=1}^L v_i \rho_i. \quad (5)$$

4. Любая малая площадка поверхности ядра может быть представлена в виде суперпозиции площадок dS_i , каждая из которых покрыта веществом i -го типа с показателем преломления n_i (см. рисунок 2а), при этом $i = L$ соответствует полости, заполненной слабо разреженной газовой фракцией (преимущественно водяной пар). Тогда справедливо уравнение для сферического альbedo ядра:

$$A_s = \sum_{i=1}^L v_i A_{s,i}. \quad (6)$$

5. Для получения замкнутой системы уравнений относительно v_i необходимо дополнить три уравнения (4)–(6) еще $L - 3$ уравнениями. Принимая во внимание явление сублимации кометного вещества с поверхности ядра и требуя сохранения формы ядра-шара, приходим к заключению, что кома кометы должна содержать указанные компоненты (в твердой фазе) с теми же объемными долями, что и ядро. Предполагая, что на эксперименте (при исследовании комы кометы) были получены оценки массовых долей η_i первых $L - 3$ доминирующих компонентов, для которых можно записать следующие $L - 3$ уравнения:

$$\eta_i = \rho_i \cdot v_i / \sum_{j=1}^{L-1} \rho_j \cdot v_j, \quad (7)$$

где ρ_i – средняя массовая плотность i -го вещества. По аналогии с работой [10] будем полагать далее, что значения геометрического и сферического альbedo ядра равны. Полученную замкнутую систему L линейных уравнений (4)–(7) решаем относительно $\{v_i\}$, которые являются линейными функциями лишь одного свободного параметра – ρ_N : $v_i = v_i(\rho_N)$, $i = 1, \dots, L$.

6. Интервал возможных значений ρ_N будет определяться системой L условий:

$$v_i > 0, \quad i = 1, \dots, L. \quad (8)$$

Выражение (8) есть *необходимое условие* для определения интервала допустимых значений ИДЗ параметра ρ_N (см. рисунок 16).

7. Если же из эксперимента известны оценки массовых долей для $(L - 2)$ -й, $(L - 1)$ -й компонентов, то следует потребовать выполнения следующих условий:

$$\frac{\rho_i \cdot v_i}{\sum_{j=1}^{L-1} \rho_j \cdot v_j} \geq \eta_i, \quad i = L - 2, L - 1. \quad (9)$$

Поскольку в полостях ядра могут находиться дополнительные источники данных компонентов, не подверженные сублимации (исключение составляют компоненты, которые имеют дополни-

тельные источники, например монооксид углерода, возникающий в коме кометы за счет фотодиссоциации более сложных химических соединений, в этом случае следует наложить обратное ограничение). Условие (9) следует считать *достаточным условием* для определения интервала возможных значений ρ_N . Пористостью ядра (C_N) называется отношение объема всех его пустот ($V_{cav} = v_L V_{tot}$) к его полному объему (V_{tot}), т. е.:

$$C_N = \frac{V_{cav}}{V_{tot}} = v_L. \quad (10)$$

8. Масса ядра определяется формулой:

$$M_N = \frac{4}{3} \pi \cdot \rho_N \cdot R_N^3. \quad (11)$$

9. В работе [3] с использованием элементарной термодинамической модели и законов Кеплера были получены формулы для относительных массовых потерь ядра за один период обращения и оставшегося времени жизни.

Таблица 1

Численный анализ полученных основных результатов

Значение	$\rho_{N'}$ кг/м ³	$M_{N'}$ кг	C_N	$\Delta M_{N'}$ кг	$\Delta M_N / M_N$	$\Delta R_{N'}$ м	$\Delta R_N / R_N$	τ_{life} , лет
Min	622	$1,78 \cdot 10^{15}$	0,37	$1,382 \cdot 10^{11}$	$7,05 \cdot 10^{-5}$	0,206	$2,345 \cdot 10^{-5}$	$8,2455 \cdot 10^8$
Max	767	$2,19 \cdot 10^{15}$	0,45	$1,385 \cdot 10^{11}$	$7,07 \cdot 10^{-5}$	0,207	$2,351 \cdot 10^{-5}$	$1494,7 \cdot 10^8$


Из сопоставления результатов настоящей работы и результатов предшественников [11] следует, что данная комета претерпевает бóльшие абсолютные массовые потери в течение одного оборота вокруг Солнца, нежели большинство известных долгопериодических комет, за исключением кометы Hale-Bopp 1995 O1. При этом радиус C/2017 K2 PANSTARRS в течение одного сидерического периода изменяется лишь на 21 см. Комета C/2017 K2 PANSTARRS совершит еще более 42,5 тыс. оборотов вокруг Солнца и просуществоует не менее 825 млн лет!

Список литературы

1. Добровольский О. В. Кометы. – М.: Наука. – 1966. – 288 с.
2. Кононович Э. В., Мороз В. И. Общий курс астрономии. – М.: УРСС. – 2019. – 544 с.


3. *Филиппов Ю. П.* Комета C/2017 K2 PANSTARRS: количественный анализ ее основных свойств. Оценка массовых потерь кометы при прохождении перигелия своей орбиты // Вестник молодых ученых и специалистов Самарского университета. – 2022. – № 2 (21). – С.38–49.
4. *Филиппов Ю. П.* Новый метод определения интервала допустимых значений средней массовой плотности ядра периодической кометы // Вестник молодых ученых и специалистов Самарского университета. – 2018. – №1 (12). – С. 19–31.
5. *Филиппов Ю. П.* Определение интервалов допустимых значений для средней массовой плотности ядер некоторых комет в рамках оптико-геометрического метода // V Всероссийская астрономическая конференция «Небо и Земля», посвященная 90-летию астрономической обсерватории ИГУ. – Иркутск: ИГУ. – 2021. – С. 37–43.
6. *Delsemme A. H.* The chemistry of comets. – Royal Soc. Philos. Transact. – 1988. Ser. A. – V. 325. – № 1587. – P. 509–523.
7. *Dones L., Brassier R., Kaib N., Rickman H.* Origin and Evolution of the Cometary Reservoirs. – Space Science Reviews. – 2015. – 197. – № 1. – P. 191.
8. *Horne A. J. and Goldman C. R.* Limnology. – New York: McGraw-Hill Co., 1994. – 576 p.
9. *Jewitt D., Hui M.-T., Mutchler M., et al.* A Comet Active Beyond the Crystallization Zone // The Astrophysical Journal Letters. – 2017. – 847 (2). – L 19.
10. *Jewitt D., Kalas P.* Thermal Observations of Centaur 1997 CU26 – Astrophysical Journal Letters. – 1998. – Vol. 499. – P. 103–106.
11. *Jewitt D., Matthews H.* Particulate Mass Loss From Comet Hale-Bopp. – The Astrophysical Journal. – V. 117. – 1999. – P. 1056–1062.
12. *Meech J., et al.* CO-Driven Activity in Comet C/2017 K2 (PANSTARRS) // The Astrophysical Journal Letters. – 2017. – 849 (1). – L8.
13. *Rickman H.* The Oort Cloud and long period comets. – Meteoritics & Planetary Science. – 2014. – V.49. – № 1. – P 8–20.
14. *Wainscoat R. J., Wells L., Micheli M., Sato H.* Central Bureau Electronic Telegrams. – 2017. – P. 43–93.
15. *Wickramasinghe N. C., Hoyle F. and Lloyd D.* Eruptions of comet Hale-Bopp at 6.5 AU. – Astrophysics and Space Science. – 1996. – 240. – P. 161–165.
16. *Whipple F. L.* A comet model. I. The acceleration of Comet Encke. – Astrophysical Journal. – 1950. V.111. – P. 375–394.


КАКИЕ ТИПЫ МАССИВНЫХ ОБЪЕКТОВ МОЖНО СЕГОДНЯ НЕПОСРЕДСТВЕННО ОБНАРУЖИТЬ НА ПЕРИФЕРИИ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ГРАВИТАЦИОННОГО ЛИНЗИРОВАНИЯ?

 **Ю. П. Филиппов**

 *yuphil@mail.ru*

 **М. В. Щепалова**

 *bcarjennfax9@mail.ru*

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

ВВЕДЕНИЕ

Проблема существования массивного тела на периферии Солнечной системы (ПСС) на протяжении уже почти сорока лет остается одной из самых острых фундаментальных проблем физики Солнечной системы. Актуальность этой проблемы связана с наличием серии убедительных фактов [3; 9], косвенно указывающих на существование массивного темного тела (МТТ) на окраинах Солнечной системы, однако до настоящего момента не обнаруженного в систематических наблюдениях. Учеными был предложен широкий спектр теоретических моделей, описывающих этот объект. Однако только несколько из них смогли соответствовать данным, полученным в ходе полного обзора небесной сферы с космического телескопа WISE [8]. Полученные ограничения указали на отсутствие на ПСС планеты, подобной: а) Сатурну – вплоть до 28 000 а. е. от Солнца, б) Юпитеру – до 82 000 а. е. и в) коричневого карлика размером с Юпитер – до 26 000 а. е.

В 2016 году в работе [7] была предложена гипотеза Девятой планеты (Planet Nine), авторы которой количественно обосновали, что гравитационное возмущение, вызванное МТТ (Planet Nine), движущимся по эллиптической и умеренно наклоненной орбите с большой полуосью 700 а. е.,

будет наиболее вероятным объяснением кластеризации перигелиев орбит шести далеких объектов пояса Койпера.

Сегодня наиболее жизнеспособными моделями МТТ (различаются внутренним строением и составом) на ПСС являются:

- I. Модель коричневого карлика (Немезиды);
- II. Модель массивной планеты-гиганта, подобной Юпитеру (Тюхе);
- III. Модель планеты-гиганта, подобной Нептуну (Planet Nine-1);
- IV. Модель планеты-суперземли (Planet Nine-2).

В работе [9] была предложена новая модель *альтернативной трансплутоновой планеты* (АТП, V) с диапазоном масс $M_{\oplus} \leq M_{\text{МТТ}} \leq 15 \cdot M_{\oplus}$. В связи с жесткими ограничениями, наложенными данными наблюдений телескопа WISE, в настоящее время в рассматриваемых теоретических моделях МТТ отчетливо просматривается тенденция к снижению его массы. В работах [4; 5; 6] модель АТП получила развитие на случай расширенного диапазона масс: $0,1 \cdot M_{\oplus} \leq M_{\text{МТТ}} \leq 15 \cdot M_{\oplus}$ (здесь нижний предел соответствует марсоподобной планете, верхний – нептуноподобной планете). Основные параметры моделей I–V представлены в табл. 1.

Перечисленные типы объектов имеют ненулевую вероятность обнаружения в будущем благодаря тому, что они могут иметь, *во-первых*, низкую температуру поверхности, что обуславливает трудность их детектирования даже в ИК-диапазоне; *во-вторых*, большие периоды обращения, так что наводимые ими гравитационные возмущения в движениях наблюдаемых тел происходят крайне редко и в течение длительного промежутка времени. Указанные причины сильно затрудняют поиск МТТ в видимом и ИК-диапазоне. В работе [3] было впервые предложено использовать новый подход к поиску и исследованию свойств МТТ на ПСС с использованием *метода гравитационного линзирования* (МГЛ), опираясь на тот факт, что гравитация МТТ может искривлять геодезические линии световых лучей, распространяющихся от далеких фоновых источников.

Главной целью настоящей работы является количественный анализ возможности прямого обнаружения МТТ на ПСС с использованием МГЛ в рамках моделей I–V. Под *прямым обнаружением* МТТ с помощью МГЛ (*сильное линзирование*) понимается регистрация двух изображений одного фонового источника света в телескопических наблюдениях, порождаемых сферической *гравитационной линзой* (ГЛ).

Таблица 1

Таблица 1. Основные характеристики МТТ на ПСС в рамках моделей I–V.

№	Модель	$\mathfrak{M}_{\min}/\mathfrak{M}_J$	$\mathfrak{M}_{\max}/\mathfrak{M}_J$	$\mathfrak{R}_{\min}/\mathfrak{R}_J$	$\mathfrak{R}_{\max}/\mathfrak{R}_J$	$r_{\min}/a. e.$	$r_{\max}/a. e.$	$T_{\min}/год$	$T_{\max}/год$
I	Коричневый карлик (Немезида)	13,0	73,3	≈ 1	≈ 1	8 800	167 200	$2,6 \cdot 10^7$	$2,6 \cdot 10^7$
II	Планета-гигант, по-добная Юпитеру (Тюхе)	1,0	13,0	≈ 1	≈ 1	2 000	120 000	$8,9 \cdot 10^4$	$4,2 \cdot 10^7$
№	Модель	$\mathfrak{M}_{\min}/\mathfrak{M}_{\oplus}$	$\mathfrak{M}_{\max}/\mathfrak{M}_{\oplus}$	$\mathfrak{R}_{\min}/\mathfrak{R}_{\oplus}$	$\mathfrak{R}_{\max}/\mathfrak{R}_{\oplus}$	$r_{\min}/a. e.$	$r_{\max}/a. e.$	$T_{\min}/год$	$T_{\max}/год$
III	Планета-гигант, подобная Нептуну (Planet Nine-1)	5	15	2	4	280	1 120	4 685	37 482
IV	Планета-суперземля (Planet Nine-2)	1	10	1	2	270	820	4 436	23 481
V	Альтернативная трансплутоновая пла нета	0,1	15	0,5	4,0	200	2 000	2 828	89 442

Примечание: здесь \mathfrak{M} – масса МТТ (в массах Юпитера \mathfrak{M}_J или Земли \mathfrak{M}_{\oplus}), \mathfrak{R} – радиус МТТ (в радиусах Юпитера \mathfrak{R}_J или Земли \mathfrak{R}_{\oplus}), r – гелиоцентрическое расстояние (в а. е.), T – сидерический период обращения МТТ вокруг Солнца (в годах).

УГОЛ ОТКЛОНЕНИЯ СВЕТОВОГО ЛУЧА В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ ЛИНЗЫ

Для определения угла отклонения светового луча в гравитационном поле линзы предположим, что размеры и масса МТТ малы (случай слабого гравитационного поля), чтобы вызвать существенные искажения в изображении фонового источника. Тогда в рамках потенциальной теории тяготения (с учетом вклада кривизны пространства-времени, вычисленной А. Эйнштейном [2]) в терминах радиуса Шварцшильда (R_{sh}) искомый угол отклонения (θ'') можно представить в виде:

$$\theta'' = \frac{4GM}{bc^2} \cdot 206265'' = \frac{2R_{sh}}{b} \cdot 206265''; \quad (1)$$

здесь: M – масса ГЛ, b – прицельный параметр для светового луча, G – гравитационная постоянная, c – скорость света.

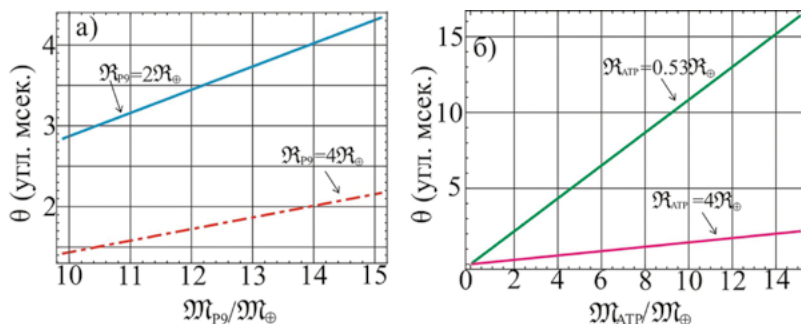


Рисунок 1. Кривые зависимости угла отклонения светового луча в гравитационном поле ГЛ от а) массы Planet Nine, выраженной в массах Земли M_{\oplus} с прицельным параметром $b = R_{P9}$; б) массы АТП, выраженной в массах Земли M_{\oplus} с прицельным параметром $b = R_{ATP}$.

В работах [4; 5; 6] уже был подробно изложен численный анализ альтернативных сценариев I и II, соответствующих случаям коричневого карлика (Немезиды) и массивной планеты (Тюхе). В данном исследовании, следуя за авторами гипотезы о Planet Nine [5] (частная модель случая III) и предложенной авторами настоящей работы сценария АТП (V), был выполнен численный анализ полученного результата для этих случаев. На рис. 1а и 1б представлены кривые зависимости угла отклонения θ'' светового луча в гравитационном поле а) непуноподобной планеты (Planet Nine) для двух значений ее радиуса и б) АТП для двух сильно различающихся значений ее радиуса от массы данных тел.

На рис. 2а и 2б изображены графики зависимости угла отклонения светового луча в гравитационном поле: а) Planet Nine для трех значений ее массы и б) АТП для двух значений массы, соответствующих марсоподобной и нептуноподобной планетам, от прицельного параметра. Видно, что зависимость угла отклонения от прицельного параметра гиперболическая; зависимость становится крайне чувствительной к b с уменьшением массы ГЛ.

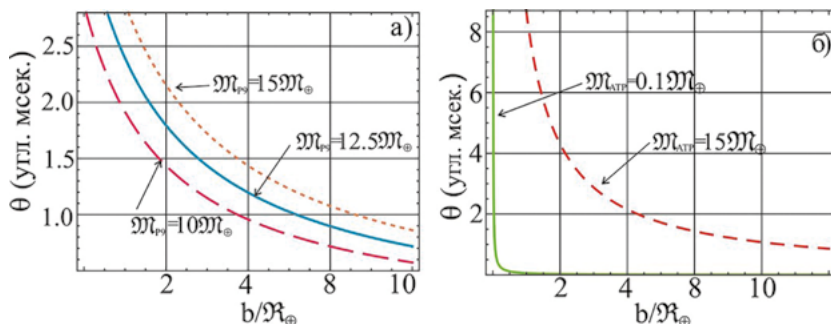


Рисунок 2. Кривые зависимости угла отклонения светового луча в гравитационном поле ГЛ от прицельного параметра b для а) Planet Nine (в радиусах Земли, R_{\oplus}); б) АТП (в радиусах Земли, R_{\oplus}).

Из представленных выше рисунков следует, что для всех допустимых значений масс данных тел угол отклонения светового луча (составляющий не более 2,9 угл. мсек.) всегда меньше угловой разрешающей способности (УРС) телескопа James Webb Space Telescope (0,018") и будущего телескопа European Extremely Large Telescope (0,003"), что указывает на отсутствие возможности зарегистрировать этот феномен в телескопических наблюдениях в ближайшем будущем в отличие от сценариев (I–II), в которых величина отклонения угла составляет не менее 0,01" [4; 5; 6].

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ И ПОЛНОЕ СЕЧЕНИЯ РАССЕЙЯНИЯ ФОТОНОВ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ ЛИНЗЫ

В работе получены аналитические результаты для дифференциального (S_{σ}) и полного (S_{tot}) сечений рассеяния фотонов в гравитационном поле линзы в удобном обезразмеренном виде в терминах радиуса Шварцшильда:

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

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

здесь: R — радиус небесного тела, $S_G = \pi R_2^2$ — площадь поперечного сечения тела, θ — угол рассеяния светового луча относительно первоначального направления.

Вычисление по формулам (2)–(3) для сценариев Planet Nine и АТП (V) показало, что при высоких значениях дифференциального сечения (S_G) в этих случаях полное сечение (S_{tot}) является отрицательным, поскольку величина максимального угла отклонения (θ_{max}) не превышает УРС самых высокоточных телескопов Земли.

ЗАДАЧА О ФОРМИРОВАНИИ «ДУХОВ» СФЕРИЧЕСКОЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ ЛИНЗОЙ

В работе решена задача о формировании изображений («духов») первичного точечного фонового источника света в приближении точечной ГЛ. Пусть в точке D (см. рисунок 3а) находится ГЛ, в точке S — источник света (звезда фона), в точке O — наблюдатель. Траекторию фотона можно изобразить двумя прямыми линиями, пересекающимися вблизи ГЛ в точках A и B , т. к. вдали от тела D он движется почти по прямой линии. Угол α показывает, насколько отклонился фотон, пройдя гравитационное поле тела D , а θ обозначает угол между направлением на дефлектор и истинное положение источника S . Изображенные жирными линиями два световых луча (исходящих от далекого источника излучения S , отклонятся от своих первоначальных траекторий в момент, когда они будут проходить с разных сторон от ГЛ, и сместятся в направлении этого тела D так, что лучи света начнут сходить и пересекутся в некоторой удаленной точке [1]. Образовавшиеся при этом углы $\theta_1^{(1)}$ и $\theta_1^{(2)}$ между направлениями на ГЛ и на ложные изображения (I_1 и I_2) источника фона показывают, насколько сместились траектории фотонов от точек A и B , и являются решением уравнения для точечной гравитационной линзы:

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

здесь: M_\oplus — масса Солнца, π_d'' — годичный параллакс ГЛ.

На рисунке 3б проиллюстрированы кривые полученных зависимостей от значений угла θ для сценария АТП (V). Аналогичные кривые были построены и для случая Немезиды (I) в работе [9]. Видно, что в случае тесного сближения ($\theta \rightarrow 0$) ГЛ и источника излучения угловые расстояния между дефлектором и «духами» стремятся к угловому радиусу конуса Эйнштейна

(θ_0), а расстояние между духами – к $2\theta_0$. При этом ложные изображения фонового источника перемещаются по конусу Эйнштейна.

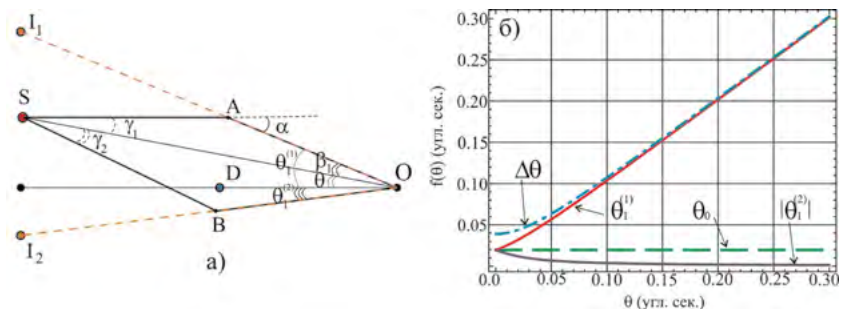


Рисунок 3. К определению: а) положения "духов", порождаемых ГЛ; б) кривых зависимостей решений уравнения ГЛ $\theta_1^{(1)} - \theta_1^{(2)}$, их разности $\Delta\theta = \theta_1^{(1)} - \theta_1^{(2)}$, углового радиуса конуса Эйнштейна θ_0 от угла отклонения θ в случае АТП с параметрами массы $M_{\text{АТП}} = 15M_{\oplus}$ и гелиоцентрическим расстоянием $D_0 = 200$ а. е.


На рисунке 3 представлены кривые зависимостей параметра Δ , являющегося разностью между величинами угловых радиусов дефлектора (ρ) и конуса Эйнштейна (θ_0), от расстояния до ГЛ для сценариев Planet Nine (см. рис. 3а) и АТП (V, см. рис. 3б). Введение параметра Δ обусловлено тем, что угловые радиусы ГЛ для случаев перечисленных гипотетических МТТ оказываются большими по значению, чем их радиусы конуса Эйнштейна. Из этого следует, что одно из ложных изображений фонового источника будет всегда затмеваться телом линзы, поэтому запечатлеть феномен сильного линзирования для сценариев Planet Nine и АТП (V) оказывается невозможным в отличие от сценариев Немезиды (I) и Тухе (II), в которых порожденные ими «духи» могут быть разрешены в телескопических наблюдениях [4; 5; 6]. Результат, полученный для случаев Planet Nine и АТП (V), однако, не исключает возможности проявления фотометрических эффектов гравитационного микролинзирования. Количественный анализ возможности использования последнего для регистрации этих объектов требует дополнительных исследований, выходящих за рамки данной работы.

Список литературы

1. Захаров А. Ф., Сажин М. В. Гравитационное микролинзирование. – 1998. – Успехи физических наук. – Т. 168. – № 10. – С. 1141–1183.

2. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теоретическая физика. – 2003. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – Т. 2. – 531 с.
3. *Филиппов Ю. П., Чобану М. И.* Гипотеза о существовании Немезиды и Тухе. I. Основные физические свойства тел // Вестник молодых ученых и специалистов Самарского государственного университета. – 2015. – № 2 (7). – С. 17–34.
4. *Филиппов Ю. П., Щепалова М. В.* Количественный анализ возможности прямого обнаружения массивного темного тела на периферии Солнечной системы с использованием метода гравитационного линзирования // V Всероссийская астрономическая конференция «Небо и Земля», посвященная 90-летию астрономической обсерватории ИГУ. – 2021. – С. 43–48.
5. *Филиппов Ю. П., Щепалова М. В.* Метод гравитационного линзирования: какие типы массивных объектов можно непосредственно обнаружить сегодня на периферии Солнечной системы? – Вестник молодых ученых и специалистов Самарского университета. – 2022. – № 2 (21) – С. 50–63.
6. *Филиппов Ю. П., Щепалова М. В.* Метод гравитационного линзирования: возможно ли прямое обнаружение массивного темного тела на периферии солнечной системы? // III Международная научно-практическая конференция «Чтения имени Валентины Владимировны Терешковой». – 2022. – С. 71–78.
7. *Batygin K., Brown M.* Evidence for a distant giant planet in the solar system. – The American Astronomical Letters. – 2016. – V. 151. – № 2.
8. *Luhman K. L.* A search for a distant companion to the Sun with the wide-field infrared survey explorer. – The Astrophysical Journal. – 2014. – 781. – P. 4.
9. *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. – V33. – e033.


МЕТОД ГРАВИТАЦИОННОГО МИКРОЛИНЗИРОВАНИЯ КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ПОИСКА И ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МАССИВНОГО ТЕМНОГО ТЕЛА НА ПЕРИФЕРИИ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

 **Ю. П. Филиппов**

 *yuphil@mail.ru*

 **М. В. Щепалова**

 *bsarjennfax9@mail.ru*

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

109

ВВЕДЕНИЕ

Гипотеза о существовании Немезиды (звезды – спутницы Солнца) впервые была сформулирована профессором университета в Беркли (США) Р. Мюллером и его коллегами в 1984 году в работах [7; 13]. Согласно современным представлениям, Немезида – массивное темное тело (МТТ) типа коричневого карлика, связанное гравитационным полем с Солнцем, движущееся вместе с ним относительно общего центра масс и таким образом образующее двойную систему.

Толчком к формулировке данной гипотезы стало для ее авторов открытие, сделанное палеонтологами Д. Ропом и Д. Сепкоским [12]. Выполнив анализ геологических пластов, отвечающих разным эпохам, охватывающим последние 250 миллионов лет, ученые обнаружили двенадцать событий, отвечающих резкому увеличению смертности живых организмов на Земле, которые повторялись примерно каждые 26 млн лет. Мюллер и его коллеги предположили, что данные события могли иметь внеземную причину, а именно – гравитационное возмущение в облаке комет Оорта, вызванное массивным космическим телом, порождавшим ливень комет

во внутренней части Солнечной системы и, как следствие, бомбардировку ими Земли. Последнее приводило к глобальной катастрофе и массовой гибели живого мира.

Многочисленные попытки обнаружить Немезиду с помощью телескопов видимого и инфракрасного диапазона электромагнитных волн, принятые учеными с конца 70-х годов XX столетия и по настоящее время, не увенчались успехом, однако специалисты продолжают получать новые факты, косвенно указывающие на существование МТТ на периферии Солнечной системы (ПСС). Это подвигло американского астронома Дж. Матиса и его коллег из университета Луизианы (США) в 2011 году к формулировке новой гипотезы о существовании МТТ в облаке Оорта – Тюхе, являющегося, газовым гигантом, подобным Юпитеру [8]. Их гипотеза подкреплялась результатами анализа данных многолетних наблюдений за орбитами комет, сближавшихся с Солнцем. Результаты указывали на то, что около 20% комет, падающих во внутреннюю часть Солнечной системы, «втягиваются» гравитационными силами массивного космического объекта, находящегося в облаке Оорта, но не являющегося звездой. В противном случае процент захваченных гравитационным полем комет был бы гораздо больше.

В работе [2] представлен обзор десяти современных наиболее значимых фактов, косвенно указывающих на существование МТТ на ПСС. Более того, здесь был впервые предложен альтернативный подход к поиску данных тел – с применением метода гравитационного линзирования (МГЛ). В работах [4; 5; 6; 11] эта идея получила развитие на примере уже четырех альтернативных моделей МТТ. Здесь было показано, что сильное линзирование МТТ с фиксацией одновременно двух «духов» источника возможно лишь в случае сценариев Немезиды и Тюхе. Однако фотометрия феномена гравитационного микролинзирования данных тел и вероятность их обнаружения данным методом здесь не были рассмотрены. Последнее является *главной целью* настоящей работы.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВОЙ БЛЕСКА ЛИНЗИРОВАННОГО ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА СВЕТА

Как известно, *эффект гравитационной линзы* заключается в искривлении лучей света от удаленного источника (звезды, галактики, квазара) в гравитационном поле МТТ, в результате чего образуется несколько изображений источника, и его интегральная яркость сильно возрастает. В случае сферически симметричного гравитационного потенциала точечной линзы количество изображений («духов») равно двум.

При тесном сближении источника и линзы угловое расстояние между двумя «духами» приблизительно равно угловому диаметру ($2\theta_0$) конуса

Эйнштейна [5]. Угловой радиус (θ_0) конуса Эйнштейна пропорционален квадратному корню из отношения массы (M) линзы к расстоянию (D_d) до нее [5]:

$$\theta_0 = \sqrt{\left(\frac{4 \cdot G \cdot M}{c^2}\right) \frac{D_s - D_d}{D_s \cdot D_d}}, \quad (1)$$

Для звезд фона, принадлежащих нашей Галактике, с учетом их характерного гелиоцентрического расстояния $D_s = 10^1 \div 10^3$ пк, угловой радиус конуса представляется в виде:

$$\theta_0 = \sqrt{\left(\frac{4 \cdot G \cdot M}{c^2}\right) \frac{1}{D_d}}, \quad (2)$$

здесь M – масса линзы, D_d – расстояние от нее до наблюдателя; G , c – универсальная гравитационная постоянная и скорость света в вакууме соответственно. Согласно [2], угловой диаметр θ_0 данного конуса для Немезиды (N) и Тухе (T) заключен в интервалах:

$$0,02'' \leq 2\theta_0^{(N)} \leq 0,23'',$$

$$0,01'' \leq 2\theta_0^{(T)} \leq 0,20''.$$

Наблюдать два изображения в оптическом диапазоне, разделенных угловым расстоянием $10^{-2}'' \div 10^{-1}''$, в настоящее время возможно лишь с помощью больших космических телескопов (например, JWST), а в будущем станет возможным с помощью высокогорных телескопов-гигантов (например, E-ELT). Исследования показывают, что эффект микролинзирования гораздо проще фиксировать по изменению потока излучения от источника [9; 10].

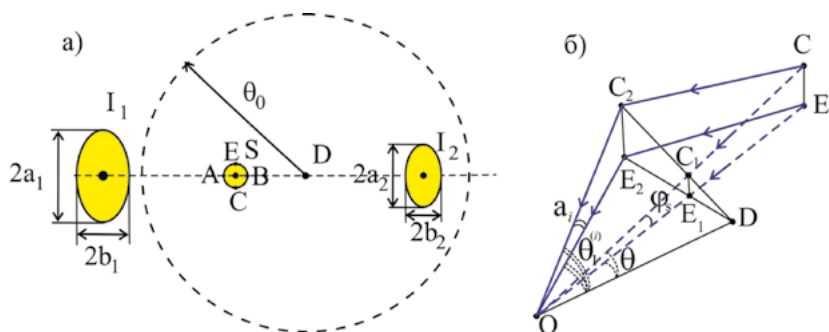


Рисунок 1. К определению а) параметров эллипсов изображений I_1 и I_2 ; б) больших полуосей a_i эллипсов изображений.

Рассмотрим задачу об определении величины потока излучения от «духов» источника как функцию времени микролинзирования. Прежде всего вычислим поток излучения от каждого из двух изображений. Для этого воспользуемся следующей упрощенной схемой [1]. Будем полагать, что форма каждого изображения («духа») есть эллипс (см. рисунок 1а), что, как правило, имеет место в случае нецентрального транзита линзы. Телесный угол эллипса представляется выражением: $\Omega = \pi \cdot a \cdot b$, где $a \cdot b$ – его большая и малая полуоси. В работе [3] был представлен подробный вывод для величин Ω_1, Ω_2 :

$$\Omega_1 = \frac{\pi\varphi_s^2}{4} \cdot \left(2 + u + \frac{1}{u}\right), \Omega_2 = \frac{\pi\varphi_s^2}{4} \cdot \left(-2 + u + \frac{1}{u}\right), u = \sqrt{1 + \frac{4\theta^2}{\theta^2}}, \quad (3)$$

здесь: φ_s – угловой радиус источника света, θ – угловое расстояние между источником и линзой для наблюдателя. Соответственно, потоки излучения, отвечающие изображениям I_1 и I_2 , будут равны $\Phi_1 = I \cdot \Omega_1$, $\Phi_2 = I \cdot \Omega_2$, а полный поток излучения будет равен:

$$\Phi_{tot} = \Phi_1 + \Phi_2 = I \frac{\pi\varphi_s^2}{2} \cdot \left(u + 1 \frac{1}{u}\right) \geq \Phi_0, \text{ где } \Phi_0 = I \cdot \pi\varphi_s^2, \quad (4)$$

здесь: Φ_0 – поток излучения нелинзированного источника излучения. В численном анализе результатов удобно использовать коэффициент усиления блеска источника, определяемый отношением суммарного потока Φ_{tot} излучения, пришедшего от всех «духов» линзы, к величине потока Φ_0 нелинзированного источника:

$$A = \frac{\Phi_{tot}}{\Phi_0} = \frac{1}{2} \left(u + \frac{1}{u}\right) \geq 1. \quad (5)$$

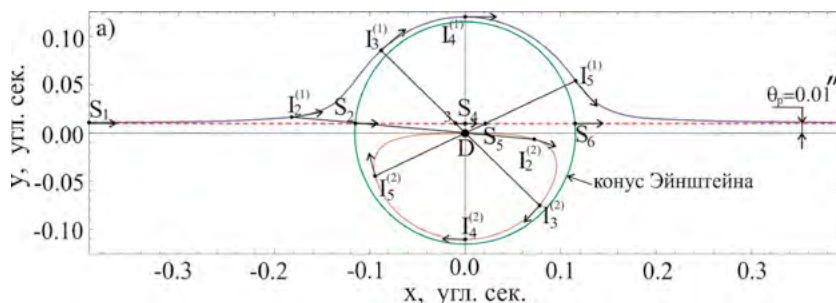


Рисунок 2. Траектории движения источника (S) и его изображений I_1 и I_2 (направление движения источника и изображений указаны стрелками), сформированные точечной гравитационной линзой (Немезидой с массой $M_N = 0,07M_\odot$, расстоянием $D_d = 8\,800$ а. е. и параметром $\theta_p = 0,01''$) согласно [11].

Векторы пространственных скоростей источника (S) света, линзы (D) и наблюдателя (O) всегда можно разложить на две компоненты, одна из которых перпендикулярна, а другая параллельна картинной плоскости линзы. Перпендикулярная компонента скорости слабо изменяет такие основные физические параметры, как, например, радиус конуса Эйнштейна [1]. Поэтому далее мы будем пренебрегать этими изменениями. Компоненты скоростей указанных тел, параллельные картинной плоскости линзы, складываются, приводя к относительному движению источника S в плоскости линзы D . Рассмотрим движение источника S в плоскости линзы (см. рисунок 2). Истинная траектория движения источника S изображена пунктирной линией, а траектории «духов» – сплошными линиями l_1 и l_2 . Концентрическая окружность по отношению к линзе D – конус Эйнштейна. Величину θ – угловое расстояние между источником света S и гравитационной линзой D можно найти согласно теореме Пифагора для углов:

$$\theta = \sqrt{(\Omega t)^2 + \theta_p^2}, \Rightarrow u = \sqrt{1 + \frac{4\theta_0^2}{(\Omega t)^2 + \theta_p^2}}, \quad (6)$$

где: θ_p – минимальное угловое расстояние между источником света S и гравитационной линзой D ; Ω – угловая скорость относительного движения линзы и источника (в картинной плоскости). В результате коэффициент усиления блеска источника есть:

$$A = \frac{1}{2} \left(\left(1 + \frac{4\theta_0^2}{(\Omega t)^2 + \theta_p^2} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(1 + \frac{4\theta_0^2}{(\Omega t)^2 + \theta_p^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \right). \quad (7)$$

Аналитическая зависимость (7) определяет кривую блеска источника – кривую зависимости потока (интенсивности) излучения источника от времени его линзирования.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ МИКРОЛИНЗИРОВАНИЯ И МАССЫ МИКРОЛИНЗЫ

Вычислим коэффициент усиления A в случае, когда источник S находится на границе конуса Эйнштейна ($\theta(t) = \theta_0$). Согласно (7), $A = 1,342$. В соответствии с этой величиной определяется полное время пересечения конуса:

$$\theta_0^2 = (\Omega T_0/2)^2 + \theta_p^2, \Rightarrow T_0 = 2 \sqrt{\frac{\theta_0^2 - \theta_p^2}{\Omega^2}}. \quad (8)$$

Последнюю величину, как правило, принимают в качестве *характерного времени микролинзирования линзы D (МТТ)*.

Далее рассмотрим важный частный случай: $\theta_p \ll \theta_0$, именно при этом условии отчетливо проявляется эффект микролинзирования. Тогда время микролинзирования есть $T_0 \approx 2\theta_0/\Omega$. Полагая далее, что источник – много более удаленный объект, чем линза, т. е. $D_d \ll D_s$, то радиус конуса Эйнштейна определяется выражением (2), а угловая скорость движения источника относительно линзы принадлежит интервалу: $\omega_d - \mu_s \leq \Omega \leq \omega_d + \mu_s$, где: ω_d , μ_s – угловая скорость движения линзы относительно Солнца (наблюдателя) и собственное движение звезды фона соответственно. Данные параметры имеют следующие области допустимых значений:

$$\sqrt{\frac{G M_{\odot}}{a^3} \frac{1 - \varepsilon}{(1 + \varepsilon)^3}} \leq \omega_d \leq \sqrt{\frac{G M_{\odot}}{a^3} \frac{1 + \varepsilon}{(1 - \varepsilon)^3}}, \quad 0.001'' \leq \mu_s \leq 10'' \quad (9)$$

Здесь: a , ε , M_{\odot} – большая полуось, эксцентриситет эллиптической орбиты линзы (МТЛ), определяемой относительно Солнца, и масса Солнца соответственно. В итоге время микролинзирования и масса линзы представляются в виде:

$$T_0 \approx \frac{4}{\Omega} \sqrt{\frac{G M}{c^2} \frac{1}{D_d}}, \Rightarrow M = \frac{(c \Omega T_0)^2}{16 G} D_d \quad (10)$$

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

Немзида							
$r_N^{(\min)} = 8800$ а.е.				$r_N^{(\max)} = 167200$ а.е.			
$\mathfrak{M}_N/\mathfrak{M}_{\odot}$	A_{\max}	μ , "/год	T_0 , сут	$\mathfrak{M}_N/\mathfrak{M}_{\odot}$	A_{\max}	μ , "/год	T_0 , сут
0.01241 (min)	4.345	0.001	16.310	0.01241 (min)	18.941	0.001	1159.3
		+1	11.182			+1	8.103
		-1	30.174			-1	8.202
0.07 (max)	10.320	0.001	37.681	0.07 (max)	44.985	0.001	2688.6
		+1	26.058			+1	19.242
		-1	68.130			-1	19.482

Тюхе							
$r_N^{(\min)} = 2000$ а.е.				$r_N^{(\max)} = 120000$ а.е.			
$\mathfrak{M}_T/\mathfrak{M}_J$	A_{\max}	μ , "/год	T_0 , сут	$\mathfrak{M}_T/\mathfrak{M}_J$	A_{\max}	μ , "/год	T_0 , сут
1 (min)	0.575	0.001	1.426	1 (min)	4.450	0.001	82.894
		+1	1.334			+1	2.588
		-1	1.531			-1	2.755
13 (max)	2.072	0.001	5.111	13 (max)	16.045	0.001	297.234
		+1	4.784			+1	9.330
		-1	5.488			-1	9.934

Из таблицы 1 очевидно, что чем ближе Немезида к Солнцу (наблюдателю), тем максимальное значение коэффициента усиления A_{max} меньше, однако при фиксированном прицельном параметре θ_p величина A существенно больше для меньших гелиоцентрических расстояний. В сценарии маломассивной Немезиды ($0,01241M_{\odot}$), находящейся в окрестности своего перигелия, коэффициент $A_{max} = 4,345$, при этом время линзирования $T_0 = 11 \div 30$ сут. Последний параметр становится весьма чувствительным к величине и направлению собственного движения быстро перемещающейся линзируемой звезды. В случае очень массивной Немезиды ($0,070M_{\odot}$) в окрестности перигелия A_{max} достигает значения 10,3, что соответствует значительному увеличению блеска звезды фона на $2,5^m$, при этом время линзирования заключено в интервале $T_0 = 26 \div 68$ сут. Величина A очень чувствительна к значению прицельного параметра θ_p . Если же Немезида находится в своем афелии, а масса звезды заключена в интервале ($M_N^{(min)}$, $M_N^{(max)}$), то коэффициент A_{max} принимает значения $18,9 \div 44,9$, что соответствует изменению блеска звезды фона на $3,2^m \div 4,1^m$.

Сценарий маломассивной Тюхе ($M_T/M_J = 1$), находящейся на внутренней границе облака Оорта (2 000 а. е.), исключает возможность обнаружения планеты с помощью МГМЛ, рассчитывая на усиление сигнала. На это указывает значение $A_{max} = 0,575 < 1$. На расстояниях вплоть до 6 060 а. е. угловой диаметр Тюхе больше углового радиуса ее конуса Эйнштейна, и потому один из двух «духов» затмевается телом линзы. В сценарии сверхмассивной Тюхе ($M_T/M_J = 13$), находящейся в окрестности перигелия, эффект микролинзирования достигим, однако сигнал не будет большим ($A_{max} < 2,1$). Время линзирования составляет $T_0 = 4,8 \div 5,4$ сут. Если же планета находится на внешней границе облака Оорта (120 000 а. е.), то возможные значения A_{max} принадлежат интервалу $4,5 \div 16,0$, что соответствует изменению блеска линзируемой звезды на $1,6^m \div 3,0^m$.

Отметим также, что в настоящей работе представлена оценка вероятности детектирования Немезиды и Тюхе: получена аналитическая формула и представлены численные результаты. Даже для телескопов с проникающей силой, не меньшей 16^m , максимальная вероятность детектирования феномена микролинзы не превосходит для Немезиды 10^{-5} , а для Тюхе – $8 \cdot 10^{-6}$.


Однако если Немезиду или Тюхе удастся наблюдать на фоне шаровых или рассеянных скоплений, то вероятность детектирования данного феномена может оказаться значительно выше. На примере шарового скопления M13 показано, что искомая величина есть $\sim 10^{-2}$. Однако само проецирование Немезиды или Тюхе на шаровое скопление характеризуется вероятностью $2,80 \cdot 10^{-6}$, что делает полную вероятность $\sim 10^{-7}$. При этом время ожидания события микролинзирования Немезиды и Тюхе составит лишь $0,5 \div 3,0$ года, что сопоставимо с временем проведения подобных экспериментов.

Список литературы

1. Захаров А. Ф., Сажин М. В. Гравитационное микролинзирование. – 1998. – Успехи физических наук. – Т. 168. – № 10. – С. 1041–1082.
2. Филиппов Ю. П., Чобану М. И. Гипотеза о существовании Немезиды и Тюхе. I. Основные физические свойства тел. – Вестник молодых ученых и специалистов Самарского государственного университета. – 2015. – № 2 (7). – С. 14–28.
3. Филиппов Ю. П., Чобану М. И. Гипотеза о существовании Немезиды и Тюхе. II. Использование метода гравитационного микролинзирования для оценки вероятности их детектирования // Вестник молодых ученых и специалистов Самарского государственного университета. – 2015. – № 2 (7). – С. 29–40.
4. Филиппов Ю. П., Щепалова М. В. Количественный анализ возможности прямого обнаружения массивного темного тела на периферии Солнечной системы с использованием метода гравитационного линзирования. – V Всероссийская астрономическая конференция «Небо и Земля», посвященная 90-летию астрономической обсерватории ИГУ. – 2021. – С. 43–48.
5. Филиппов Ю. П., Щепалова М. В. Метод гравитационного линзирования: какие типы массивных объектов можно непосредственно обнаружить сегодня на периферии Солнечной системы? – Вестник молодых ученых и специалистов Самарского университета. – 2022. – № 2 (21) – С. 50–63.
6. Филиппов Ю. П., Щепалова М. В. Метод гравитационного линзирования: возможно ли прямое обнаружение массивного темного тела на периферии Солнечной системы? – III Международная научно-практическая конференция «Чтения имени Валентины Владимировны Терешковой». – 2022. – С. 71–78.
7. Davis M., Hut P., Muller R. A. Extinction of species by periodic comet showers. – Nature. – 1984. – V. 308 (5961). – P. 715–717.
8. Matese J. J., Whitmire D. P. and Whitman P. G. Cemetery evidence of a massive body in the outer Oort cloud. – Icarus. – 2011 (2). – P. 926–938.
9. Paczynski B. Gravitational Microlensing by the Galactic Halo. – Astrophysical Journal. – 1986. – V. 304. – P. 1–5.
10. Paczynski B. Gravitational Microlensing at Large Optical Depth Astrophysical Journal. – 1986. – V. 301. – P. 503–516.
11. 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. – V33. – e033.
12. Raup D. M., Sepkoski J. J. Periodicity of extinctions in the geologic past. – Proceedings of the National Academy of Sciences. – 1984. – V81 (3). – P. 801–805.
13. Whitmire D. P., Jackson A. A. Are periodic mass extinctions driven by a distant solar companion? – Nature. – 1984. – V. 308 (5961). – P. 713–715.

УЧАСТИЕ СУХУМСКОГО НИИ ЭПИТ В РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММЫ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В КОСМОСЕ «БИОН»: ОБЗОР МАТЕРИАЛОВ

 **П. В. Крапошин**

 *ВИНИТИ РАН, референт-переводчик отдела
машиностроения,
обозреватель газеты «Воздушный транспорт ГА»,
член комиссии по воздухоплаванию Русского географического
общества*

 *Kraposhin@yandex.ru*

История Сухумского НИИ ЭПИТ берет начало в 1927 году, когда в Сухум были привезены первые обезьяны для организации обезьяньего питомника на горе Трапедия, где институт находится и по сей день. Инициаторами создания питомника обезьян были ученые Московского института экспериментальной эндокринологии.

Большую роль в практической организации питомника сыграл сотрудник института, инициировавшего создание питомника, Я. А. Тоболкин. Он тщательно исследовал все побережье и особое внимание обратил на дачу профессора А. А. Остроумова. Однако вопрос о размещении питомника в Абхазии был решен не сразу. Академик П. П. Сушкин высказывал сомнения в оптимальности выбранного места и предлагал подумать о возможности размещения питомника в районе Талыша, близ Ленкорани (Армения). Так как мнения разделились, было предложено просить Общество акклиматизации дать окончательное заключение о выборе места для обезьяньего питомника. Эта комиссия под руководством Г. А. Кожевникова постановила рекомендовать бывшую дачу Остроумова для устройства питомника. В начале 1927 г. был подписан договор между Н. А. Лакоба и Я. А. Тоболкиным о передаче участка бывшей дачи Остроумова Институту экспериментальной эндокринологии для организации питомника. В июне этого же года было начато строительство вольеры № 1 – огромной клетки из железных прутьев. И 24 августа после долгого пути прибыли первые обезьяны из Африки.

В 1944 году институт стал самостоятельным учреждением – медико-биологической станцией. В 1957 году эта станция была реорганизована в Институт экспериментальной патологии и терапии. В этом же году директором института стал И. А. Уткин, а с 1959 года – Б. А. Лапин, который руководил институтом до 1992 года, до начала войны между Абхазией и Грузией.

Именно Б. А. Лапин принимал участие в реализации космических программ. Их история начинается с подготовки космического полета Валентины Терешковой, в которой НИИ ЭПит принимал участие совместно с Институтом авиационно-космической медицины, проводившим эксперименты с обезьянами (павианами), необходимыми для подготовки к космическому полету. Со стороны Института авиационной и космической медицины программой руководил родоначальник советской космической медицины академик О. Г. Газенко, возглавлявший Институт медико-биологических проблем МЗ СССР.

НИИ ЭПит принимал участие и в реализации программы медико-биологических исследований в космосе «Бион» совместно с Институтом медико-биологических проблем. Этот институт возглавил академик О. Г. Газенко, предложивший провести эксперимент на обезьянах, запустив их на биоспутнике в космос. Исследования в космосе на обезьянах в России проводились с 1983 по 1997 год. Всего в космосе побывало 12 обезьян на 6 биоспутниках. Все эти годы основными разработчиками программ и участниками исследования влияния микрогравитации на организм обезьян были чл.-корр. И. Б. Козловская и академик Б. А. Лапин.

Решение о проведении экспериментальных исследований на обезьянах в полетах биоспутников «Бион» было принято в 1977 г. Основанием для развертывания работ в этом новом для нашей страны направлении исследований послужило создание кораблей многоразового использования «Буран» для кратковременных полетов и связанная с этим необходимость изучения так называемого космического адаптационного синдрома, т. е. «острого» (начального) периода адаптации организма к условиям невесомости. Эксперименты на обезьянах по программе «Бион» проводились с соблюдением принципов гуманности и максимального щажения животных. Обезьяны, находившиеся на борту биоспутников, были обучены выполнять двигательные задачи, аналогичные выполняемым человеком в пилотируемых полетах. Наличие у животных вживленных электродов и накладных датчиков позволило регистрировать в процессе полета активность их мозговых структур, мышц, сердца, биоритмологические и другие показатели. Взятие образцов тканей (мышечной и костной), крови и костного мозга сразу после полета позволило получить уникальный материал, необходимый для оценки и более полного понимания процессов, развивающихся в различных системах организма в условиях невесомости. Большой вклад в успешную реализацию комплексной программы

научных исследований внес Научно-исследовательский институт экспериментальной патологии и терапии АМН СССР (директор Б. А. Лапин, г. Сухуми), обеспечивший предварительный клинико-физиологический отбор и поставку в ИМБП обезьян для экспериментов в полетах биоспутников «Бион-6» (1983 г.), «Бион-7» (1985 г.), «Бион-8» (1987 г.) и «Бион-9» (1989 г.). Совместно со специалистами этого института была разработана методика тренировки обезьян к полету и методика предполетного клинико-физиологического отбора. После распада СССР подготовка и проведение экспериментов с обезьянами в полетах биоспутников «Бион-10» (1992 г.) и «Бион-11» (1996–1997 гг.) проходили при активном участии Института медицинской приматологии РАМН. Поскольку эксперименты на обезьянах в полетах биоспутников «Бион» являлись составной частью национальной программы медико-биологических исследований в космосе, головной организацией, ответственной за реализацию этой программы, был ИМБП. Результаты экспериментов, выполненных на обезьянах в полетах биоспутников «Бион» международным коллективом ученых, явились серьезным вкладом в понимание механизмов адаптации организма к невесомости, в развитие научных подходов к созданию новых перспективных средств и методов профилактики и сохранения на высоком уровне здоровья и работоспособности космонавтов в космических полетах.

В связи с подготовкой к первому полету обезьян на биоспутнике и созданием научных программ этого эксперимента сотрудники НИИЭПит совместно с учеными Института медико-биологических проблем (Москва) в середине 1970-х годов разработали модели, имитирующие такие факторы невесомости, как гипокинезия и опорная разгрузка. Были изучены механизмы длительного влияния этих факторов на различные физиологические системы животных с применением инвазивных методов и дозированных вмешательств, исключенных в исследованиях с участием человека. Разработанная в НИИЭПит методика подготовки обезьян для экспериментов в невесомости, включавшая обучение животных выполнению точностных произвольных движений (сопоставимых с операторскими задачами космонавтов), были внедрены в практику работ по программной подготовке обезьян к полетам на биоспутниках. Было доказано, что двигательная (мышечная) система – самая гравитационно-зависимая – раньше других отвечает на воздействие невесомости, и что невесомость в первую очередь «бьет» по разгибателям. Длительная опорная разгрузка сопровождается глубоким торможением активности тонической мускулатуры, атрофией тонических мышечных волокон и их трансформацией в фазные волокна. Вместе с тем было очевидно, что исследования с участием человека ограничены, с одной стороны, невозможностью применения нагрузок, нарушающих гомеостаз (вживление электродов в образования мозга, сосуды или ткани), с другой – сложностью стандартизации условий. Животному, отправляющемуся

в полет на биоспутнике, имплантировали до 50 датчиков во все жизненно важные органы: сердце, сосуды, мышцы, структуры головного мозга. Было очевидно, что параллельно и даже с опережением должны были проводиться эксперименты на животных с использованием моделей, близких к применяемым в исследованиях с участием людей. Началу эксперимента предшествовали длительные работы по моделированию эффектов невесомости (таких как гиподинамия и опорная разгрузка). Сотрудники отдела физиологии и патологии ВНД НИИЭПит совместно с учеными ИМБП приняли активное и самое прямое участие в экспериментах по разработке моделей и далее с использованием традиционных для лаборатории физиологических методов исследования и с учетом данных, полученных в модельных экспериментах, приняли непосредственное участие в выполнении программной подготовки обезьян к полетам на четырех биоспутниках серии «Космос» и «Бион» (Т. Г. Урманчеева, Г. С. Белкания, А. А. Джокуа, Н. Ф. Колпакова, А. Н. Демин, И. П. Шеремет, В. Элиава).

Изменения активности сенсорных систем, адаптированных к гравитационному полю, играют пусковую роль в развитии нарушений, характерных для космического адаптационного синдрома (КАС), являющегося одним из наиболее постоянных спутников пребывания в невесомости и существенно усложняющих жизнь космонавтов и их адаптацию к условиям космических полетов. Микрогравитация серьезно изменяет активность как вестибулярной, так и проприоцептивной систем, обеспечивающих наряду со зрительной афферентацией пространственную ориентацию, а также моторную и вегетативную регуляцию. Большинство гипотетических представлений связывают КАС с дисфункцией в невесомости вестибулярного аппарата, обуславливающей возможность нарушения парной деятельности вестибулярных структур, развитие сдвигов в каналово-отолитовом взаимодействии, подавление трансляторных возможностей отолитовой системы и пр. Однако ни одна из этих гипотез, базирующихся в основном на теоретических построениях, не была подтверждена в связи с отсутствием надежных экспериментальных данных, получение которых в условиях наземного моделирования маловероятно, а в реальных космических полетах с участием членов экипажей было крайне затруднено в связи со сложностями стандартизации экспериментальных условий и ограниченными возможностями применения необходимых экспериментальных процедур. В связи с этим при формировании программы экспериментов в космических полетах на обезьянах абсолютный приоритет был отдан вестибулярным исследованиям: 1) изучению влияний микрогравитации на характеристики реакций, опосредуемых вестибулярной чувствительностью; 2) определению основных закономерностей вестибулярной адаптации к невесомости и лежащих в ее основе изменений нейрональной организации вестибулярных ответов.

В целом результаты выполненных в рамках экспериментальной программы вестибулярных исследований на обезьянах показали, что в начальный период КП микрогравитация вызывает усиление вестибулярной возбудимости, за которым следует ее адаптивное торможение. Полученные данные существенно расширили знания об обуславливаемых невесомостью процессах в вестибулярной системе и механизмах их развития, что открыло новые возможности прогнозирования изменений в деятельности систем управления движением в условиях изменяющихся гравитационных условий среды и их профилактики.

Во время продолжительных космических полетов за пределами магнитосферы Земли радиационные воздействия галактических космических лучей (ГКЛ) на организм человека становятся основным лимитирующим фактором, который может привести к нарушениям жизненно важных функций, включая функции центральной нервной системы. Используя инструментальные задачи с вовлечением движений глаз и рук, у обезьян возможно исследовать глазодвигательные и мануальные составляющие операторской деятельности. Таким образом, в экспериментах на обезьянах при воздействии на их мозг различных ионизирующих излучений с определенными дозами могут быть оценены радиационные риски, приводящие к нарушениям операторской деятельности у человека в дальних космических экспедициях. Для моделирования воздействий ионизирующей радиации было использовано облучение протонами, составляющими около 90% всех ионизирующих частиц в дальнем космосе. Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют об устойчивости условно-рефлекторного инструментального поведения обезьян к протонам высоких энергий. Однако были выявлены ранние (acute) негативные радиационные эффекты протонов на временные характеристики зрительно вызванных саккад и мануальных реакций. Предположительно, такие эффекты могут проявиться в ухудшении временных параметров операторских действий человека.

В 1993 году, во время войны между Грузией и Абхазией, Борис Лапин переехал в Адлер, где на базе производственного филиала НИИ ЭПИТ, находящегося в поселке Веселый, основал Институт медицинской приматологии. Этот институт продолжал реализацию программы «Бион», но в 1996 году работа по организации запуска в космос обезьян была приостановлена в связи с отсутствием источников финансирования. При решении этой проблемы программа может быть возобновлена. Для ее реализации сумский НИИ ЭПИТ имеет необходимый научный задел.

Список литературы


1. Григорьев А. И., Лапин Б. А., Козловская И. Б., Ильин Е. А. Исследования на обезьянах в космических полетах // Актуальные вопросы экспериментальной биологии и медицины: материалы сухумской международной конференции «90 лет НИИ ЭПИТ АНА». Сухум, 2017.
2. Джокуа А. А., Баркая В. С. НИИ ЭПИТ в программах космических исследований // Актуальные вопросы экспериментальной биологии и медицины: материалы сухумской международной конференции «90 лет НИИ ЭПИТ АНА». Сухум, 2017.
3. Лапин Б. А. Перебирая старые фотографии. Сочи, 2016.
4. Миллер Н. В., Бадаква А. М., Козловская И. Б., Лапин Б. А. Российские исследования влияния микрогравитации на вестибулярную функцию обезьян // Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт медицинской приматологии» (ФГБНУ «НИИ МП»). IV Международная научная конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты медицинской приматологии: к 100-летию со дня рождения академика Бориса Аркадьевича Лапина» – Сочи, 2021.
5. Терещенко Л. В., Шамсиев И. Д., Бондарь И. В., Красавин Е. А., Латанов А. В. Ранние эффекты ионизирующего воздействия высокоэнергетических протонов на двигательные компоненты в модели операторской деятельности на низших приматах // Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт медицинской приматологии» (ФГБНУ «НИИ МП»). IV Международная научная конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты медицинской приматологии: к 100-летию со дня рождения академика Бориса Аркадьевича Лапина» – Сочи, 2021.
6. www.niiepit.com


АСТРОНОМИЧЕСКОЕ,
КОСМИЧЕСКОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ
И ПРОСВЕЩЕНИЕ



ВНЕУРОЧНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ООО «ВОРОНЕЖСКИЙ ПЛАНЕТАРИЙ» В СРЕДНИХ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЯХ г. ВОРОНЕЖА и ОБЛАСТИ

 **В. Ю. Моховой**

 ООО «Воронежский планетарий», научный руководитель

 planetariyvnr@mail.ru

АСТРОНОМИЯ – одна из самых увлекательных и прекрасных наук о природе, она исследует не только настоящее, но и далекое прошлое окружающего нас мира, а также позволяет нарисовать научную картину будущего Вселенной. В последнее время в астрономии было сделано множество важных открытий, существенно расширивших наши представления о Вселенной. Астрономический материал вызывает у обучающихся огромный интерес, который необходимо удовлетворить, т. к. астрономия является очень важной, неотъемлемой частью формирования естественнонаучного мировоззрения, эта наука позволяет дать целостное представление о Вселенной, сформировать знания о наблюдаемых небесных явлениях, привлечь внимание к красоте мироздания.

Важно непрерывно формировать у обучающихся основные понятия астрономии, астрофизики и космологии на протяжении всего времени обучения в школе, в курсах различных учебных предметов естественнонаучного профиля. Иным способом просто невозможно добиться того, чтобы взгляд молодых людей на окружающий мир и Вселенную в целом стал бы частью их общего мироощущения и мировосприятия, независимо от того, в какой сфере деятельности они найдут в дальнейшем применение своим силам.

Интерес к изучению науки о космосе возникает в период активного формирования мировоззрения еще в начальной школе. Причиной возникновения первичного интереса могут служить первые наблюдения в телескоп, посещение планетария, чтение книг или просмотр научно-популярных программ, однако в дальнейшем этот интерес необходимо поддерживать, иначе к периоду активной профориентации (10–11 класс) он, как правило, угасает. Обучающимся 5–11 классов для реализации своих потребностей и интересов в изучении науки о космосе нужны соответствующие

ющие условия, которые помогут им не только приобрести знания, умения и навыки, но и помочь развить способность к самообучению, сформировать целостное мировоззрение, постепенно год за годом дораста до уровня победителей олимпиад по астрономии всех уровней с возможностью в дальнейшем найти свое призвание в областях, связанных с наукой. Одним из интересных и полезных занятий обучающихся в школах разного возраста в часы досуга может стать астрономия, которая влечет молодежь глубиной и загадочностью космоса, возможностью собственными глазами наблюдать удивительный мир небесных светил и явлений. С наибольшей полнотой и эффективностью эта увлеченность может быть реализована в астрономических кружках и детских астрономических объединениях.

ЦЕЛИ ВНЕУРОЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПЛАНЕТАРИЯ В СРЕДНИХ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЯХ

1. Создание условий для развития интереса у обучающихся в школах к изучению астрономии.
2. Формирование у обучающихся естественнонаучного мировоззрения.
3. Изложение современной картины мира.
4. Поиск одаренных учеников с целью их дальнейшего профориентирования.

125

ЗАДАЧИ

Обучающие:

- познакомить обучающихся с научными сведениями об астрономических объектах и явлениях;
- донести обучающимся в средних общеобразовательных учреждениях дополнительные знания в области астрономии и физики;
- обогатить учащихся знаниями о способах исследования небесных тел и достижениях науки в освоении космического пространства;
- научить пользоваться современными оптическими приборами и аксессуарами.

Развивающие:

- развивать пространственные представления о сравнительных размерах небесных тел, расстояниях между ними, взаимном размещении и движении планет в Солнечной системе;
- повысить эрудицию и расширить кругозор учащихся;

- развивать мышление, логику, математические способности, исследовательские навыки, техническую грамотность;
- развивать умение ориентирования по звездному небу;
- развивать умение работать в коллективе, включаться в активную беседу по обсуждению увиденного, прослушанного, прочитанного.

Воспитательные:

- способствовать развитию у обучающихся интереса к научному исследованию и техническому творчеству;
- воспитывать самостоятельность, ответственность, аккуратность, умение адекватно оценить свою работу и работу сверстников, работать в команде;
- сформировать у обучающихся основы научного мировоззрения и научных убеждений;
- воспитывать эмоционально-эстетические чувства при изучении космоса.

ОПИСАНИЕ ВНЕУРОЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ООО «ВОРОНЕЖСКИЙ ПЛАНЕТАРИЙ» В СРЕДНИХ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЯХ

Внеурочная деятельность включает в себя теоретические и практические занятия с использованием современных учебно-методических пособий, а также комплекса планетария. Вариативная часть внеурочной деятельности предусматривает дополнительные мероприятия, направленные на привитие интереса обучающихся в средних общеобразовательных учреждениях к изучению астрономии и космонавтики, а также мероприятия для мотивированных учащихся и педагогов.

Особенность внеурочной деятельности планетария в школе заключается в возможности объединить теоретическое и практическое изучение астрономии на базе технологии современных цифровых планетариев, что способствует более тесному интегрированию обучения астрономии с другими смежными науками и опережающему обучению технической направленности в соответствии с современными требованиями, предъявляемыми системой образования Российской Федерации.

В ходе проведения мероприятий по внеурочной деятельности у учащихся постоянно выстраиваются логические цепочки, позволяющие систематизировать и закрепить материал, изученный не только на занятиях астрономии, но и на уроках истории, математики, биологии, поднять вопросы экологии.

Поскольку астрономия, в отличие от физики, черпает основные сведения из наблюдений, а психология детей данного возраста требует наглядно-образного представления информации, демонстрация фрагментов видеофильмов и предваряющая их компьютерная презентация позволяют погрузить учащихся в реальный физический мир, отображенный средствами документального кино, и удовлетворить их познавательные потребности.

Одним из важнейших практических приложений астрономии является космонавтика, которая обеспечивает развитие внеатмосферных методов наблюдения, исследования Земли и Солнца из космоса, освоения космического пространства с помощью космических летательных аппаратов – искусственных спутников, автоматических станций, пилотируемых космических кораблей. Исторические аспекты развития космонавтики, родиной которой стала наша страна, определяют большое воспитательное значение программы внеурочной деятельности.

Важное значение имеют и астрономические наблюдения – невооруженным глазом или с помощью телескопов, а также проведение тематических выставок и экскурсий на различную тематику.

ПЛАНИРУЕМЫЕ ИТОГИ И РЕЗУЛЬТАТЫ


Внеурочная деятельность может быть реализована как в отдельно взятом экспериментальном классе, так и в свободных объединениях учащихся как одновозрастной, так и разновозрастной группы среднего общеобразовательного учреждения, желающих посещать мероприятия.


Программа по внеурочной деятельности в средних общеобразовательных учреждениях рассчитана на проведение мероприятий с обучающимися 5–11 классов в течение 1 года (1 раз в учебную четверть по 40–60 минут). Количество мероприятий по внеурочной деятельности в каждом среднем общеобразовательном учреждении – 4 в учебный год.

На текущий момент мероприятия по внеурочной деятельности охватывают около 20 средних общеобразовательных учреждений г. Воронежа и области, являются пилотным проектом, по результатам оценки и востребованности будут дополнены количеством часов и расширены тематически.

ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ПРОЕКТ «АКАДЕМИЯ КОСМОНАВТИКИ» – СТАРТ В ПРОФЕССИЮ

 **Л. В. Широнова**

 ДЮЦ «Планетарий», педагог п. д. о., отличник просвещения,
руководитель образовательного проекта
«Академия космонавтики»

 larisa.shironosova@mail.ru

Большой новосибирский планетарий ежегодно реализует образовательный проект «Академия космонавтики» для обучающихся школ города Новосибирска.

Задачами данного проекта являются:

- формирование базовых представлений обучающихся о космической сфере;
- популяризация достижений отечественной и мировой космонавтики;
- профильная подготовка обучающихся;
- организация учебно-исследовательской деятельности школьников в сфере Космоса;
- организация экскурсий на предприятия, в музеи и вузы, связанные с изучением Земли, космоса и космонавтики;
- интеграция образования и науки посредством решения теоретических и практических задач.

Реализация проекта предполагает курсовую подготовку школьников по таким дисциплинам, как астрономия, геология, космическая биология, моделирование ракет, психология общения.

Программа проекта обычно включает темы занятий, домашние задания и мероприятия:

- знакомство с созвездиями. Ориентировка по звездному небу. Просмотр полнокупольного фильма «Путешествие по планетам Солнечной системы»;

- Новосибирск космический. Экскурсия в музей космонавтики и авиации аэрокосмического лица. Создание презентации «Космос в моем городе»;
- атмосфера Земли и других планет. Виды облаков и небесные явления. Создание слайд-шоу на основе личных фотографий небесных явлений обучающихся;
- измерение времени, часовые пояса, время на МКС. Экскурсия к солнечным часам Новосибирского планетария. Изготовление модели солнечных часов;
- телескопы, их устройство и работа. Экскурсия в оптический цех Новосибирского приборостроительного завода. Создание макета зрительной трубки;
- геология Земли и Луны. Экскурсия в музей геологии в Институт горного дела;
- история освоения космоса. Автобиография космонавтов. Перспектива развития российской и мировой космонавтики;
- психология космонавтов. Проведение игр на развитие коммуникативных навыков, командного духа и взаимовыручки;
- участие в онлайн-уроках с борта МКС, в этом году – с нашей землячкой Анной Кикиной;
- обмен новостями астрономии и космонавтики. Анонс журналов «Русский космос».

По окончании проекта все его участники получают сертификат участника.

Один обучающийся, показавший лучший результат работы в проекте (по итогам всех зачетных работ), а также выполняющий правила внутреннего распорядка обучающихся МКУ ДО ДЮЦ «Планетарий», определяется победителем проекта. Решение принимается коллегиально большинством голосов педагогических работников, занятых в проекте.

Победитель и призеры проекта получает возможность совершить поездку в Звездный городок, в Центр подготовки космонавтов имени Ю. А. Гагарина, в летний период.

За время работы проекта в нем приняли участие и стали победителями обучающиеся МБОУ «Аэрокосмический лицей имени Ю. В. Кондратюка», МБОУ «СОШ № 57», СОШ № 155, СОШ № 43, МБОУ «Технический лицей СГУГиТ», МБОУ «Гимназия № 1».

Данные о победителях и их отзывы об участии в проекте, а также поездке в Звездный городок представлены на сайте Большого новосибирского планетария: <https://nebo-nsk.ru/node/1538>.

В 2019 году руководитель проекта Широносова Лариса Валерьевна сопровождала победителей в их долгожданной поездке. Эта поездка была богата на события, впечатлениями о которых хотелось бы поделиться.

Прибыв в столицу, мы в первую очередь посетили Московский планетарий, которому в этом году исполняется 90 лет. Астроплощадка – вот, что впечатлило больше всего: разнообразие солнечных часов и других астрономических приборов, которые можно было опробовать в работе. На площадке можно было увидеть зрительные трубы, спутниковые антенны и несколько видов альтернативных источников энергии. Здесь же вспомнились некоторые идеи самих ребят по обустройству нашего новосибирского планетария. Ребята горячо обсуждали, куда удобнее разместить солнечные батареи, как запустить квадрокоптер с веб-камерой для фотографирования звездного неба и другие фантазийные предложения, которые были разработаны ими во время профильной смены при ДЮЦ «Планетарий».

Во время нашего пребывания в Звездном городке состоялась церемония проводов экипажа «Союз МС-13» и его дублеров из Звездного на Байконур. Мы присутствовали на ней и даже смогли передать космонавтам Сибирский сувенир – кедровые орешки и конфеты Новосибирской шоколадной фабрики. На Байконур для предполетной подготовки отправились три полковника: Александр Скворцов, Лука Пармитано, Эндрю Морган и дублеры экипажа: Сергей Рыжиков, Томас Маршберн, Соити Ногути.

Здесь же, на церемонии, произошла встреча с космонавтом Анной Кикиной. Она передавала большой привет родному городу Новосибирску и пожелала ребятам для достижения высоких результатов всегда верить в свои силы. Также удалось поговорить о способах получения профессии космонавт и ее особенностях.

Далее нас ждали экскурсии по центру подготовки космонавтов, там можно было увидеть настоящую космическую технику, посидеть за экзаменационном столом космонавтов, изумиться мощью советской и российской техники и технологий в области космонавтики. Ребятам удалось побывать внутри космической станции «Мир». Нам рассказали и показали, как питались, спали, занимались физическими упражнениями и как работали на станции космонавты.

Здесь же произошла встреча с давним другом новосибирского планетария, космонавтом, Героем России, Салижаном Шокировичем Шариповым. Он пожал руку победителю проекта и обратился к ребятам с просьбой: «Наша планета прекрасна, она невероятно красива. Если бы все люди увидели нашу Землю из космоса, мне кажется, у нас никогда бы не было войн. Оттуда границ не видно... Прошу вас как будущее поколение: берегите Землю!»

Закончились экскурсии, но впереди была работа на тренажере, который давал возможность почувствовать себя летчиком пилотируемого самолета, а вот инструктором был космонавт – испытатель многоразового космического корабля «Буран» Алексей Сергеевич Бородай.

За один день участники проекта получили огромное количество знаний в области космонавтики, эмоций и добрых советов. Все это останется в душах детей на всю жизнь!

Интерес участников проекта к авиации, космонавтике и астрономии не ослабевает после окончания проекта. Они выбирают профильные высшие учебные заведения и связывают свою жизнь с выбранным направлением. Многие из участников проекта работают в областях, связанных с этими науками. Приведу примеры только из числа победителей проекта:


- 2014 год – Широносова Мария. Окончила Сибирский государственный университет водного транспорта, гидротехнический факультет, так же как и космонавт Анна Кикина. На данный момент Мария работает педагогом дополнительного образования объединения «Школа бортопроводников».
- 2015 год – Стрежнева Анастасия. Окончила НГТУ, в данный момент является преподавателем в образовательном проекте «Новосибирские астрономические школы».
- 2015 год – Погиба Егор. Окончил МГТУ Н. Э. Баумана, специалитет «Проектирования авиационных и ракетных двигателей». В настоящее время работает в РКК «Энергия» имени С. П. Королева.
- 2016 год – Тарзалайнен Никита. Окончил МАИ, факультет «Проектирование авиационных и ракетных двигателей».
- 2018 год – Крашевский Анджей. Обучается в УрФУ имени Б. Н. Ельцина по специальности «Астрономия».


Участники проекта следующих лет на данный момент обучаются в школах, но принимают активное участие в Сибирском астрономическом форуме, встречах с космонавтами, с представителями Федерального космического агентства «Роскосмос», испытателями космической техники, учеными и инженерами, внесшими вклад в развитие космической отрасли.

Данные обучающиеся являются призерами и победителями Всероссийской олимпиады школьников по астрономии и научно-практические конференций школьников различных уровней. Проект «Академия космонавтики» реализует их детскую мечту о космосе и является стартом в выборе профессии, связанной с авиацией, космонавтикой и астрономией.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ И ПРОЕКТНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ОБУЧАЮЩИХСЯ В ГБУДО «ШКОЛА КОСМОНАВТИКИ ИМЕНИ Р. В. КОМАЕВА»

 **М. А. Боцьева**

 ГБУДО «Школа космонавтики имени Р. В. Комаева», методист

 mayabosieva@mail.ru

Государственное бюджетное учреждение «Школа космонавтики имени Р. В. Комаева» работает с 5 февраля 2020 года и представляет собой уникальное для Северного Кавказа учреждение дополнительного образования. По дополнительным общеразвивающим образовательным программам занимаются дети от 7 до 17 лет. Работа ведется по двум направлениям: астрономии и космонавтике. Школа космонавтики была построена на месте Владикавказского планетария, пребывавшего в плачевном состоянии, благодаря усилиям космического конструктора Руслана Владимировича Комаева и многих его соратников. Школа космонавтики имеет в своем составе музей истории космонавтики с макетами космических аппаратов и зрительный зал на 30 мест для демонстрации полнокупольных научно-популярных фильмов. Образовательное учреждение располагает астрономической площадкой, где установлены два телескопа с тысячекратным увеличением, солнечные часы, модель Солнечной системы и лундром с действующей моделью лунохода. Для проведения практических занятий в здании школы созданы невероятно интересные макеты космического корабля будущего и лунного модуля «Аполло».

Рассматривая космическое образование как целый спектр воспитательной и образовательной деятельности, школа космонавтики делит свою работу на несколько направлений. В рамках популяризации космонавтики в планетарии педагоги школы ежедневно проводят образовательные экскурсии по истории космонавтики и демонстрируют научно-популярные фильмы на куполе 360 градусов в Звездном зале. Экскурсии пользуются огромным спросом у воспитанников школ, детских садов, у жителей и гостей нашего города. Сотрудники школы космонавтики участвуют в просветительских акциях, читая лекции по астрономии. При наличии ясной погоды организуются вечерние наблюдения в телескоп.

Основная деятельность школы – это реализация дополнительных общеобразовательных программ. Воспитанники школы космонавтики приобретают знания по истории освоения космоса и ракетно-космической техники, астрономии, механике космического полета, основам проектирования и моделирования космических аппаратов, космической биологии и медицине, по управлению и программированию беспилотных летательных аппаратов. Учащиеся изучают устройство мини-спутников, космических кораблей, орбитальных станций. Обучение в школе космонавтики – это возможность получить метапредметные знания и навыки, раздвинуть узкие рамки классического школьного образования. Младшие школьники расширяют свои познания по математике, истории и окружающему миру, учатся азам проектной и исследовательской деятельности; ребята старшего возраста с удивлением обнаруживают, что, создавая и запуская модели ракет, они опираются на законы физики. Космическое моделирование требует обширных разносторонних знаний: нужно знать, как создать 3D-модель ракеты, как рассчитать ее параметры, напечатать на 3D-принтере, как запрограммировать полет. Дистанционное зондирование Земли с помощью спутников подразумевает отличное знание географии и информатики. Занятия в школе космонавтики проводятся как в классической форме лекций и семинаров, так и в форме ситуационных игр с применением IT-технологий. Поэтапно ребята знакомятся с историей пилотируемых полетов, исследованием планет, развитием ракетно-космической техники. Познают устройство Вселенной, учатся различать созвездия, решать сложные астрономические задачи, готовятся к олимпиадам по астрономии. На практике учащиеся осваивают умение обращаться с инструментами, с гордостью демонстрируют свои модели. Нарбатывая опыт, дети начинают с бумажных фигур, переходят к сборным моделям, а в финале разрабатывают свои трехмерные модели из пластика.

Наша организация сама проводит общегородские и республиканские конкурсы проектов в рамках празднования Дня космонавтики, со своими обучающимися участвует в региональных, всероссийских и международных конкурсах. Развивая сетевое взаимодействие, плотно сотрудничает с учреждениями образования и культуры, такими как Северо-Кавказский горно-металлургический институт, Северо-Осетинский государственный университет, общеобразовательные школы и учреждения дополнительного образования республики. Для вовлечения школьников в проектную работу при реализации дополнительных программ в школе нами разработана серия достаточно простых тренингов, викторин, конкурсов и ситуационных игр, чтобы заинтересовать воспитанников, дать минимальный необходимый запас знаний и навыков. Эти элементы программы пользуются большой популярностью. Педагоги-наставники с помощью старших воспитанников проводят мастер-классы и другие мероприятия для широ-

кого круга школьников. Познавательный квест «Космическое приключение» неизменно вызывает большой интерес у детей-участников.

Занимаясь в нашей образовательной организации, воспитанники постепенно знакомятся с различными направлениями космической науки, игры внутри макетов космических кораблей позволяют попробовать себя в роли инженера-конструктора, баллистика, пилота, планетолога, космического биолога. Одним из традиционных видов занятий является работа с симуляторами. Для наибольшей наглядности часть учебного класса школы выполнена в виде модуля орбитальной станции (превращается в космический 3D-корабль). Компьютеры связаны в общую сеть, что позволяет контролировать работу из «центра управления полетом». Дополнительные панели управления хоть и не являются рабочими, но позволяют познакомить ребят с различными системами жизнеобеспечения космического корабля. Для большей достоверности дети надевают символические костюмы-скафандры. На тренажерах проводятся «полетные» тренировки и разыгрываются целые сценарии экспедиций (полет на МКС, пилотируемая лунная экспедиция, полет на Венеру, высадка лунохода). Очень привлекательны для детей виртуальные прогулки по Международной космической станции, на космодромы, в музеи космической техники, которые совершаются с помощью VR-технологий. Проектная работа внутри школы также набирает обороты.

Отдельным направлением являются теоретические исследовательские работы по истории космонавтики, астрономии, механике космического полета, космобиологии. Такие работы воспитанники выполняют уже в первый год обучения и в зависимости от уровня представляют их в школе, на городские, республиканские и всероссийские конкурсы.


Как и другие наставники, педагоги школы космонавтики при вовлечении учеников в исследовательскую и проектную деятельность сталкиваются с проблемами. Сухие научные факты, сложность и большой объем изучаемого материала отпугивают детей. Зачастую темы детских исследований не соответствуют возрасту и уровню подготовки школьников. Либо нет активной деятельной позиции учащегося в процессе работы, когда ребенок не творит, не решает проблему, а является просто исполнителем, нет должного уровня познавательной активности, то есть не достигается сама цель научного поиска. Инновационное высокоточное оборудование требует создания новых образовательных методик, адаптации дополнительных программ, повышения знаний и компетенций педагогов дополнительного образования. И тут на первое место выходит личность наставника, его профессионализм и желание достигать хороших результатов. Синтез усилий наставника, администрации, родителей, нацеленность на высокие достижения дает ребенку хорошую платформу для развития. В планах школы космонавтики дальнейшее развитие, улучшение мате-


риальной базы учреждения, повышение уровня квалификации сотрудников.

Получив знания, познакомившись со сложностью космических профессий, «примерив их на себя», оценив свои качества, каждый из воспитанников сам выбирает свою дорогу во взрослую жизнь. Я надеюсь, что среди них будут и те, кто свяжет свою жизнь с космосом и пойдет учиться в профильный вуз, чтобы работать в космической отрасли.

КОСМОС НАДО ОТКРЫВАТЬ

 **Н. И. Булгакова**

 ГБОУ «Школа № 690», г. Санкт-Петербург,
заведующий музеем «Открытый космос»

 bulgakova_nataly@mail.ru

Санкт-Петербург – одна из космических столиц России, город с богатым космическим прошлым. С ним связаны имена таких великих людей, как В. П. Глушко, Я. И. Перельман, К. Э. Циолковский, Ю. А. Гагарин.

Родом из Ленинграда известные космонавты Г. М. Гречко, В. И. Рождественский, С. К. Крикалев, А. И. Борисенко. Все они внесли огромный вклад в развитие российской космонавтики и все удостоились звания Героя.

В настоящее время в Санкт-Петербурге 5 школьных музеев космонавтики, среди которых и наш – музей «Открытый космос».

Идея создать экспозицию, посвященную космонавтике, принадлежит космонавту Павлу Владимировичу Виноградову, именно он в 2016 году открывал нашу школу и подарил две картины с видами Санкт-Петербурга с МКС, землю с космодрома Восточный и свою фотографию с автографом. Затем появился объект, побывавший в космосе: платок с символикой школы слетал на МКС.

С 2016 года деятельность по внедрению элементов космического образования в образовательный процесс осуществлялась в рамках школьного центра космического образования – GRAVITY-центр КЗ. «Космос. Кругозор. Компетенции» и была завершена 01.09.2019 г.

Взаимодействие школы и музея представляет собой разнообразные векторы образовательной и воспитательной работы в урочное и внеурочное время:

- учебный вектор «Открытый космос»;
- вектор дополнительного образования «Открытый космос»;
- вектор проектной деятельности «Полеты в будущее»;
- вектор музейных занятий;
- цифровой вектор.

В экспозиции музея 7 разделов: 3 раздела находятся в закрытых помещениях – «Первые полеты в космос», «Истории для будущего», «Школа и космос», 4 – в открытом доступе:

- «История космических побед»;
- «Летопись поколений»;
- «Космический СПб.»;
- «Выставка PROкосмос».

Наша школа – уникальная, она для обычных детей с необычными мечтами о будущем!

А ключевая тема экспозиций музея – мечта о космосе – позволяет, с одной стороны, вписать материалы в широчайший контекст человеческой истории и культуры (имиджевый аспект), а с другой – увлечь практически любого посетителя, любую целевую аудиторию, вне зависимости от пола и возраста (просветительский аспект). Музей дает возможность своим посетителям пережить новый опыт, «осуществить мечту», сделать шаг в неизведанное, в космос. Поэтому наша основная задача – показать детям и подросткам перспективы, дорога к которым начинается прямо сейчас. Девиз нашей школы: «Через знания – к звездам!». Школьный музей имеет для этого большие возможности и стал реальной основой для организации профориентационной работы «От музейной экспозиции – к будущей специальности» и приобретения школьниками базовых ценностей: призвание, труд, Родина.

В деятельности по профориентации мы определяем 3 уровня:

1. музейная выставка как профориентационный ресурс;
2. музейные программы, модули рабочих программ по ВР и программы ДО космической направленности как профориентационный ресурс;
3. выбор направления школьников, сотрудничество как профориентационный ресурс.

Современный музей предполагает использование цифровых технологий. Он оборудован мультимедийной техникой, экраном. Приведем лишь некоторые примеры реализации цифровых технологий.

С помощью программного обеспечения «СТОиК-Контент» разрабатываются электронные этикетки экспонатов, обеспечивающие доступ к текстовой, аудио- и видеoinформации, а также погружение в историю экспоната и ассоциативному ряду к данному экспонату. Имея смартфон или получив планшет, посетитель может подробно узнать об экспонате, получить дополнительные сведения в аудиоформате, может виртуально ответить на вопросы об объекте.

Мобильное приложение «690.PRO» («Перспектива. Развитие. Открытие») создано с целью формирования индивидуальной траектории личностного развития обучающегося. Позволяет содействовать раскрытию

одаренности, структурировать и трансформировать воспитательный процесс в лабильных условиях современного общества.

«690.PRO» представляет собой единую цифровую воспитательную платформу, ивентплейс (от англ. event – событие), где участники копят баллы и обменивают их на призы. Синтез чата и календаря образовательных событий, также есть защита персональных данных и push-уведомления.

Тематическая экскурсия «Космический Петербург» – это виртуальная экскурсия по космическим объектам нашего города, интерактивная викторина и VR-путешествие из нашей школы прямо в космос!


Патриотическая галерея «Герои космоса» – постоянная экспозиция на стенде и в кабинете астрономии, посвященная советским и российским космонавтам. Дополняющийся стенд, дающий возможность узнать биографии космонавтов, истории полетов с помощью маркировки QR-кодами.

Согласно концепции развития музея, мы находимся на 2-м, практическом, этапе (2020–2023 гг.), большая часть которого уже выполнена:

- реализация ведущих направлений проекта, осуществление контроля их реализации;
- проведение процедуры паспортизации музея как структурного элемента школы, внесение изменений в уставные документы;
- совершенствование системы культурно-просветительской, образовательной, проектно-исследовательской и познавательно-досуговой деятельности для максимально широкого круга потребителей;
- организация и совершенствование сетевого взаимодействия с учреждениями образования, науки и культуры в целях расширения образовательных возможностей потребителей.

ПОЧЕМУ ОНА УТОНУЛА: ИЗ ИСТОРИИ ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ «МИР»

 **Е. Е. Сеницын**

 *Государственное автономное учреждение культуры
Ярославской области «Культурно-просветительский центр
имени В. В. Терешковой», методист*

 *phtsutterby_86@mail.ru*

Экспозиционно-выставочный зал «История космонавтики» в Культурно-просветительском центре имени В. В. Терешковой позволяет всем желающим познать этапы освоения космоса с научным подходом. Однако вся история освоения космического пространства на протяжении уже более 60-ти лет неизменно сопровождается далекими от научной истины самыми невероятными предположениями любителей космонавтики окончательно разгадать, наконец, тайны Вселенной. С одной стороны – такова природа человека: искать во всем скрытые смыслы. С другой стороны – тема сложная, и знакомым с ней лишь шапочно легко поверить в самые фантастические теории.

В экспозиционно-выставочном зале «История космонавтики» воочию можно увидеть модель МКС (Международной космической станции), мини-диараму с орбитальной космической станцией «Мир», серию макетов космических кораблей самых разных эпох и тематические разделы о космонавтах. Для организованных групп школьников предлагаются уникальные экскурсии: «Один день из жизни космонавта», «Жизнь в невесомости» и другие. Особо отметим, что в ходе проведения экскурсий тема орбитальной станции «Мир» неизменно вызывает активный интерес у посетителей, наглядно выявляя противоречия между реальными фактами и распространенными домыслами, упорно сопровождающими этот сравнительно недавний этап развития отечественной космонавтики.

Итак, первая в мире советская пилотируемая многомодульная орбитальная станция «Мир» была выведена на орбиту 20 февраля 1986, через 10 лет после начала разработки проекта. Она считается одним из самых прорывных проектов советской космонавтики. Пилотируемая космическая лаборатория пришла на смену станциям «Салют» и была предназначена для проведения продолжительных научно-технических экспериментов.

Станция была задумана так, чтобы к ней с помощью космического манипулятора Ляппа можно было постоянно пристыковывать все новые и новые модули, первым из которых в 1987 году стал «Квант-1». Основной целью модуля были астрофизические исследования, в первую очередь в области внеатмосферной астрономии. Однако неформально его называли также «вокзалом» станции, поскольку на нем долгое время находился самый удобный стыковочный узел ССВП (системы стыковки и внутреннего перехода). Затем последовали модули «Квант-2» (1989), «Кристалл» (1990), и каждая стыковка, каждая последующая экспедиция вызывали новую волну горячих обсуждений вопросов безопасной эксплуатации станции.

Небольшое отступление. Базовый (и одноименный) блок станции «Мир» сам по себе был самостоятельной структурой, предназначенной для обеспечения условий работы и отдыха экипажа (до шести человек), управления работой бортовых систем, снабжения электроэнергией, радиосвязи и телеметрии, управления ориентацией и корректировки орбиты станции, поддержания работы систем жизнеобеспечения, проведения научных и прикладных исследований.

Космонавты на станции не находились в постоянной зависимости от поставок воды и воздуха. Ведь существовал риск, что внезапная авария грузового корабля оставит экипаж без ресурсов на продолжительное время. Поэтому были разработаны системы их регенерации. Из выдыхаемого космонавтами углекислого газа синтезировался кислород, воду так же можно было получать прямо «из воздуха»: всю влагу от дыхания или испаряемую из растений, других источников, система «Мира» собирала, очищала, восстанавливая до 70% важнейших для космонавтов ресурсов, после чего ею можно было пользоваться заново.

В дальнейшем это позволило космонавтам находиться на орбите буквально месяцами. Так, Сергей Крикалёв провел в космосе почти 312 суток подряд, а в 1994–1995 годах этот рекорд превзошел Валерий Поляков, который непрерывно провел в космосе больше 14 месяцев – 438 суток.

Важным в истории станции стал 1995 год и программа «Мир» – «Шаттл», в рамках которой за следующие три года было осуществлено 7 кратковременных экспедиций с участием 44 астронавтов НАСА (США). Кроме того, на станции побывало 15 международных экспедиций, включавших космонавтов из Сирии, Болгарии, Афганистана, Франции, Великобритании, Японии, Австрии, Германии, Словакии и Канады.

В этом же году ракетой «Протон-К» был осуществлен вывод на орбиту нового исследовательского модуля «Спектр» с приборно-грузовым и негерметичным отсеками.

Последним обновлением инфраструктуры «Мира» стал модуль «Природа» (1996), который использовался для корректировки орбиты станции благодаря топливу, оставшемуся в баках после стыковки. Основными его

задачами были исследование атмосферы и поверхности Земли, влияния космического излучения на организм человека, а также получение в условиях невесомости особо чистых лекарственных препаратов.

Орбитальная станция «Мир» была рассчитана на 5 лет работы в космосе. Однако срок ее непрерывной эксплуатации был втрое превышен, в результате чего стали проявляться накопившиеся технические проблемы. Как известно, существовало несколько проектов по спасению станции, но все они предлагали лишь кратковременные меры по улучшению ситуации, и в итоге станцию «Мир» все же пришлось затопить.

Официальные объяснения причин, серьезные аргументы – такие, как полная выработка ресурса, повлекшая многочисленные происшествия и аварии, дорогое обслуживание (около 200 миллионов долларов в год одновременно с развивающимся новым проектом МКС), наконец, опасность неконтролируемого схода станции с орбиты и падения на Землю – все эти доводы не успокоили «широкую общественность». Так родилась одна из самых абсурдных «версий» случившегося: якобы из-за высокой влажности воздуха от «космической сауны» система на борту не справлялась с удалением излишков влаги, что привело к бесконтрольному распространению плесени по всей станции, ее мутации и эволюции под воздействием космической радиации (!!!) – и, как следствие, к необходимости затопления, с предварительным испелением плесени при спуске модулей сквозь атмосферу.

Чем не сценарий для фантастического фильма ужасов? Но ничего подобного произойти попросту не могло!

23 марта 2001 года в 5 часов 23 минуты по московскому времени двигателям орбитальной станции «Мир» был отдан приказ тормозить. Станцию свели с орбиты и затопили в Тихом океане, на так называемом «кладбище космических кораблей». 140-тонная конструкция вошла в атмосферу и, в основном, сгорела в нескольких тысячах километров к востоку от Австралии, около шести утра по Гринвичу. Обломки упали в Тихий океан где-то между Новой Зеландией и Чили, до земли долетели лишь отдельные фрагменты станции. Свидетелями падения раскаленных обломков в океанские воды стали пассажиры двух самолетов, заплатившие по 10 тысяч долларов за билеты на эти уникальные рейсы. Среди зрителей было и несколько космонавтов, побывавших до этого на «Мире».


Всего станция «Мир» провела в космосе 5511 суток, из которых была обитаема 4594 дня. На борту работали 104 космонавта и астронавта из 12 стран, было проведено более 23 тысяч научных экспериментов, совершено 70 выходов в открытый космос общей продолжительностью 330 часов. Станцию называли «великим достижением русских». Большая часть исследований затем успешно продолжилась уже в рамках проекта Международной космической станции. Так в действительности реализовалась

плодотворная идея исследований, сформулированная еще основателем практической космонавтики академиком С. П. Королевым: «Космос для науки, только для мирных целей, на благо человека, неутомимо разгадывающего сокровенные тайны природы – вот тот путь, по которому развиваются и осуществляются советские космические исследования».

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПЯТЕН СОЛНЕЧНОГО СВЕТА В СОФИЙСКОМ СОБОРЕ КАК ЭЛЕМЕНТ АСТРОНОМИЧЕСКОГО ПРОСВЕЩЕНИЯ

 **О. В. Калиничева**

 Вологодский государственный университет

 kalinichevaov@vogu35.ru

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения за движением Солнца – простейший вид астрономических наблюдений, доступных каждому. При этом наблюдать можно не непосредственно за движением Солнца, а за движением пятен солнечного света или тени. При всей простоте эти наблюдения позволяют определить ряд параметров, связанных как с местом наблюдения, так и с Землей в целом. Например, положение точек севера, юга, запада и востока, момент истинного полдня, дней равноденствий и солнцестояний, ориентацию оси вращения Земли относительно эклиптики и т. д. Изучение видимого движения Солнца по небесной сфере может осуществляться в планетариях, а также при помощи компьютерных планетариев. В статье предлагается альтернативный способ изучения движения Солнца, совмещающий в себе не только астрономическое, но и историческое, художественное, религиозно-ведческое образование.

Софийский собор в Вологде был возведен по приказу Ивана Грозного в 1568-1570 гг. Ориентация оси «главный вход – алтарные апсиды» собора (на рис. 1 изображена красным) противоречит канонической традиции, согласно которой алтарь должен находиться в восточной части православного храма. Угол λ между этой осью и полуденной линией составляет $\sim 35^\circ$. Причины этой особенности неизвестны и обсуждаются в работах [1; 2].

Ориентация собора по сторонам света позволяет наблюдать внутри здания любопытные эффекты, связанные с годичным движением Солнца. Солнечные лучи, проходя через окна в южном фасаде здания, попадают на иконостас и пол собора. Возможно, это обстоятельство могло быть использовано строителями собора, а освещение Солнцем тех или иных объектов внутри собора могло быть приурочено к определенным церковным праздникам или событиям. Положение пятен солнечного света на внутренней

поверхности собора зависит от даты и времени и определяется положением Солнца, ориентацией здания и его размерами. Цель работы состоит в вычислении положения солнечных пятен на внутренней поверхности собора, прежде всего, на его иконостасе.



Рисунок 1. Ориентация Софийского собора на местности по данным Яндекс Карты.

ПОЛОЖЕНИЕ ПЯТЕН СОЛНЕЧНОГО СВЕТА ВНУТРИ СОБОРА

Географические координаты собора следующие: долгота $\lambda_c = 39,88^\circ = 2^h 39,5^m$, широта $\varphi_c = 59,22^\circ$. Солнечный луч будет идти параллельно стенам собора тогда, когда астрономический азимут Солнца A_s будет составлять

$$A_s = \lambda. \quad (1)$$

Это обстоятельство может быть использовано для уточнения угла λ . Для этого необходимо определить моменты времени, когда луч Солнца, проходя через окно, находящееся посередине южного фасада собора, попадает на среднюю линию иконостаса. Были измерены четыре таких момента времени с точностью до минуты. Часть этих измерений описана

в работах [1; 2]. Горизонтальные координаты Солнца вычислялись при помощи программы SOLEX [3] с использованием планетной эфемериды D406. По данным измерений получено следующее значение $\lambda = 36,5^\circ \pm 0,2^\circ$.

Момент, когда будет выполняться условие (1), наступает примерно через 2 часа 25 минут после местного среднего полдня, который в Вологде наблюдается в 12 часов 20 минут. Отметим, что точное время выполнения условия (1), будет разным в разные дни года, поскольку истинное Солнце отличается от среднего. Это различие наглядно иллюстрируется при помощи солнечной аналеммы, которая представляет собой кривую, соединяющую положения Солнца для одних и тех же моментов времени. На рис. 2 приведен вид солнечной аналеммы для 13 часов 30 минут, 14 часов, 14 часов 30 минут и 15 часов по московскому времени (UTC + 3:00) в течение 2022 года в Вологде. Верхняя точка аналеммы соответствует моменту летнего солнцестояния, нижняя – зимнего солнцестояния. Из рис. 2 видно, что условие (1) выполняется примерно в 14-14,5 часов в весенне-летний период и примерно в 14,5-15 часов в зимний период. При этом в весенне-летний период солнечные лучи внутри собора попадают на нижнюю часть иконостаса либо на пол перед ним, в зимний – на верхнюю. Софийский собор открыт для туристов только в летний период, именно это время является наиболее благоприятным для проведения наблюдений внутри собора.

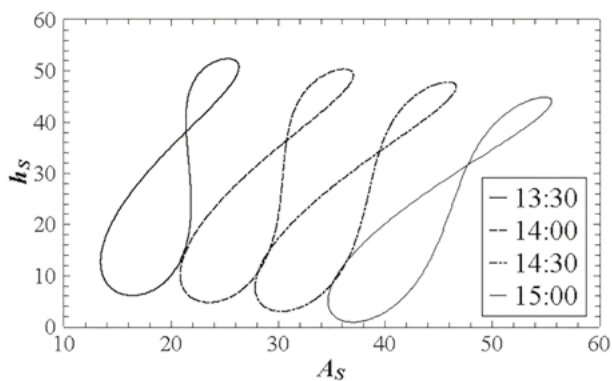


Рисунок 2. Вид солнечной аналеммы для Вологды в 2022 году, здесь A_s – астрономический азимут Солнца, h_s – высота Солнца.

Для того, чтобы определить положение солнечного луча внутри собора, необходимо знать геометрические размеры здания, а именно – план собора по полу, план южного фасада с окнами, размеры и геометрию иконостаса. На рис. 3 и 4 представлена схема иконостаса с его размерами

ми и используемой системой координат. Мы рассматривали движение луча, проходящего через окно, находящееся посередине южного фасада собора. На рис. 4 – результат моделирования движения солнечного луча по иконостасу на 01.04.2022. Ход луча здесь занимает интервал времени приблизительно с 13 до 16 часов. Серым цветом на графике изображена область возможных ошибок, связанных с неточностью имеющихся данных по геометрии собора. Выбор даты неслучаен, поскольку в этот день с помощью фото и видеофиксации были непосредственно определены координаты луча, на рис. 4 они отмечены крестиками. Отклонение движения луча от прямолинейного связано с тем, что поверхность иконостаса не является плоской, в средней части иконостаса имеется килеобразный выступ. Под координатами (X, Y) луча понимается координаты проекции нижней части луча на основную плоскость иконостаса.

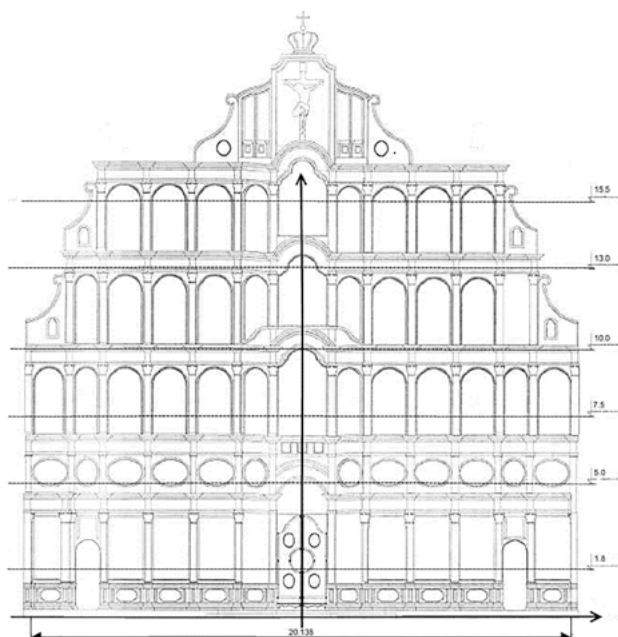


Рисунок 3. Иконостас Софийского собора с используемой далее системой координат.

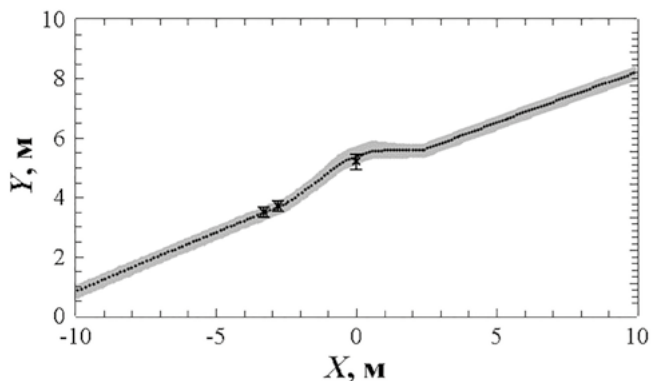


Рисунок 4. Движение средней нижней части солнечного луча по иконостасу (01.04.2022).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если модель движения солнечных лучей известна, то можно визуализировать это движение. Визуализация движения солнечных лучей внутри собора имеет историческое значение и может быть использована в исследовательских и просветительских целях. Она позволяет наглядно показать не только световые эффекты, связанные непосредственно с собором, но и провести наблюдения за движением Солнца. Можно легко проследить динамику изменения солнечных координат в течение суток и года, наглядно убедиться в существовании разницы между средним и истинным солнечным временем, получить представление о солнечной аналемме. Основное преимущество использования собора для этих целей — это большой туристический поток.

Автор благодарит И. Ф. Никитинского за предоставленные схемы Софийского собора.


Список литературы

1. *Никитинский И. Ф.* Феномен летнего солнцестояния в Софийском соборе Вологды / Никитинский И.Ф. – Текст: электронный // Исследования Русского Севера: материалы V Всероссийской научно-практической конференции (Вологда, 19-20 ноября 2020г.); под общей редакцией Н.К. Максумовой. – Вологда: ВОУНБ, 2021. – С. 69-73. – URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/2021/1/issledovaniya-russkogo-severa.pdf> (дата обращения 15.01.2023).

2. *Никитинский И. Ф.* Софийский-Успенский собор Вологды в его ориентировке по сторонам света и выявляемым солнечным эффектам. К вопросу о возможном переносе столицы государства Иваном IV в Вологду / Никитинский И. Ф. – Текст: электронный // Исследования Русского Севера: Координаты времени. Итоги и перспективы: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции (Вологда, 1-2, 19-21 октября 2021 г.); под общей редакцией Н. К. Максумовой. – Вологда: ВОУНБ, 2021. – С. 125-130. – URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/2021/i/issledovaniya-russkogo-severa-6.pdf> (дата обращения 15.01.2023).
3. *Vitagliano A.* Numerical Integration for the Real Time Production of Fundamental Ephemerides over a Wide Time Span / A. Vitagliano. – Текст: непосредственный // *Celestial Mechanics*. – 1997. – V. 66. – P. 293-308.

ЮБИЛЕЙ КОСМИЧЕСКОЙ ЭРЫ В ЦЕНТРЕ ИМЕНИ В. В. ТЕРЕШКОВОЙ: ПРЕЗЕНТАЦИЯ ПОЛНОКУПОЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ «КОСМИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ РОССИИ»

 **Е. Н. Тихомирова**

 Государственное автономное учреждение культуры Ярославской области «Культурно-просветительский центр имени В. В. Терешковой», заместитель директора

 en_tihomirova@mail.ru

Ежегодно с 4 по 10 октября на всей планете отмечается Всемирная неделя космоса, в ходе которой проводятся просветительские акции, отражающие вклад космической науки и техники в улучшение благосостояния человека.

4 октября 2022, в день 65-летнего юбилея запуска первого искусственного спутника Земли, Культурно-просветительский центр имени В. В. Терешковой представил ярославцам и гостям города комплекс праздничных мероприятий в честь этого знакового для всего мира события.

Участниками стали ученые, преподаватели и учителя астрономии, сотрудники планетариев, школьники, студенты, популяризаторы науки и любители астрономии. В звездном зале центра состоялась встреча школьников, членов отряда юных космонавтов и астрономического кружка Центра имени В. В. Терешковой с летчиком-космонавтом РФ, Героем Российской Федерации Салижаном Шакировичем Шариповым и начальником историко-образовательной службы Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю. А. Гагарина» генерал-лейтенантом запаса Александром Павловичем Павловским. Салижан Шакирович рассказал об этапах отбора в космонавты, ответил на вопросы ребят о требованиях, предъявляемых к профессии космонавт, сложностях подготовки в космонавты. Ребята также интересовались особенностями работы космонавтов в условиях невесомости и любимыми занятиями вне работы как на орбите, так и на Земле.

Сергей Артурович Язев, д.ф.-м.н., профессор, директор астрономической обсерватории ИГУ, старший научный сотрудник Института сол-

нечно-земной физики СО РАН, научный руководитель Большого иркутского планетария, представил школьникам 11-го класса МОУ «СШ № 88» г. Ярославля и членам астрономического кружка научно-популярную лекцию «Луна. Вторая атака». В ходе лекции Сергей Арктурович рассмотрел историю освоения нашего спутника: от первых этапов изучения Луны до перспектив исследования разными странами и освоения Луны в будущем. Ребята заинтересовались проблемами изучения Луны, участвовали в дискуссии и пообещали, что будут использовать эту информацию в своих исследовательских работах.

Главным событием праздничного дня стала официальная презентация полнокупольной программы «Космическая история России» и адресного методического пособия для работы с ней. Программа «Космическая история России» была создана Ассоциацией планетариев и лиц, содействующих их развитию, при активном участии Госкорпорации «Роскосмос» и Центра имени В. В. Терешковой в рамках грантового проекта при поддержке Президентского фонда культурных инициатив (заявка № ПФКИ-21-1-005534). Идейным вдохновителем и руководителем грантового проекта по созданию программы является Андрей Владимирович Лобанов, а автором сценария программы – Сергей Арктурович Язев.

Выражаем благодарность за содействие в создании программы следующим организациям: Государственному музею истории космонавтики имени К. Э. Циолковского, МБУ «Уфимский городской планетарий» г. Уфы, Центру эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры, Российскому государственному архиву научно-технической документации, Московскому государственному университету геодезии и картографии, киноконцерну «Мосфильм», Ассоциации экспертов и организаций по содействию популяризации знаний о земле и космосе «Астрогеознание», компании «Киноатис».

Полнокупольная программа переносит зрителя в будущее, где на уроке в лунном классе рассматриваются основные этапы освоения космического пространства, особое внимание уделяется отечественным достижениям в теории и практике космического полета. Наглядно представлены примеры деятельности основоположников космической отрасли: от идеи многоступенчатой ракеты и теории космического полета К. Э. Циолковского до ракеты Р-7 С.П. Королева и первого спутника. В программе также рассказывается о последующих этапах развития космических технологий: подготовке и первом полете человека в космос, посадке автоматических межпланетных станций на Луну и Венеру, отечественных луноходах, пилотируемых космических аппаратах и орбитальных космических станциях, современных космических обсерваториях, кораблях и ракетах.

Многие педагоги и преподаватели астрономии, сотрудники планетариев страны поддержали славную инициативу и приобщились к проекту


«Космическая история России» задолго до презентации программы. Став партнерами проекта, они организовали экспериментальное исследование – двухэтапное анкетирование по космонавтике групп школьников 7–11 классов и студентов в Ярославле и Ярославской области, Владимире, Воронеже, Иркутске, Калуге, Кирове, Самаре. Выражаем благодарность нашим коллегам МБУК «Владимирский планетарий», ООО «Воронежский планетарий», ГМИК имени К. Э. Циолковского, КОГБУК «Музей К. Э. Циолковского, авиации и космонавтики», МБОУ «Средняя школа № 27» г. Кирова, ФГАОУ ВО «Самарский университет», МОУ «СШ № 88» г. Ярославля, МОУ «Константиновская СШ» за активную поддержку проекта.

4 октября 2022 года по завершении мероприятия в Центре имени В. В. Терешковой педагоги, сотрудники планетариев, музеев, все те, кто занимается популяризацией космонавтики, смогли получить печатный экземпляр пособия Язева С. А., Роменской О. М. «Космическая история России. Приоритетные достижения СССР и России в области космонавтики: учебно-методическое пособие для преподавателей общеобразовательных школ и учреждений дополнительного образования», электронный вариант которого размещен в настоящее время в свободном доступе на сайте Ассоциации планетариев и лиц, содействующих их развитию: <http://www.apr.planetariums.ru/pfki-21-1-005534.html>. С торжественного момента презентации программа «Космическая история России» начала новую жизнь – теперь ее смогут увидеть в разных уголках нашей страны в стационарных и мобильных планетариях, в музеях космонавтики, в школах и Дворцах творчества.

Участники мероприятия выразили уверенность, что программа «Космическая история России» и сопроводительное учебно-методическое пособие окажут значительную поддержку педагогам и сотрудникам планетариев в организации учебного процесса.

АНКЕТИРОВАНИЕ «КОСМИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ РОССИИ» – ПЕРВЫЕ ИТОГИ

 **О. М. Роменская**

 *Государственное автономное учреждение культуры Ярославской области «Культурно-просветительский центр имени В. В. Терешковой», методист*

В 2021–2022 году Центр имени В. В. Терешковой и Ассоциация планетариев России работали над проектом «Космическая история России». Проект включал производство одноименной полнометражной программы и сопровождающего методического пособия, а также масштабное анкетирование детей и студентов по истории космонавтики. Проект «Космическая история России» осуществлялся при поддержке Президентского фонда культурных инициатив. Анкетирование проводилось до просмотра полнометражной программы по истории космонавтики, затем после просмотра.

Анкетирование проведено очно на следующих площадках:

1. Константиновская школа Тутаевского МР Ярославской области;
2. МОУ «СШ № 88», г. Ярославль;
3. Гимназия № 19, г. Калуга;
4. СОШ № 95, г. Воронеж;
5. МБОУ «СОШ № 5 «Эврика», г. Новая Усмань, Воронежская область;
6. Лицей ИГУ, г. Иркутск;
7. МБОУ «СОШ № 19», г. Иркутск;
8. ГБПОУ ВО «Владимирский педагогический колледж»;
9. Музей К. Э. Циолковского, авиации и космонавтики, г. Киров;
10. онлайн – Самарский университет.

Благодаря активной работе организаторов площадок удалось собрать данные 1158 человек на первом анкетировании и 786 человек – на втором. Первое анкетирование проводилось до просмотра фильма «Космическая история России», за месяц до его премьеры, – в сентябре. Второе анкетирование проводилось в октябре, уже после начала показов полноку-

польной программы в планетариях. Все участники второго анкетирования после просмотра прошли тест.

Анкетирование было поделено на четыре раздела:

1. некоторые значимые даты по истории космонавтики;
2. космические рекорды;
3. космонавты и основоположники космических наук;
4. ракетно-космическая техника.

Далее представлены вопросы и результаты первого анкетирования.

I. НЕКОТОРЫЕ ЗНАЧИМЫЕ ДАТЫ ПО ИСТОРИИ КОСМОНАВТИКИ

1 12 января 1955 г. — день начала грандиозной космической стройки. Где она проводилась?

- А.** *Окрестности поселка Тюратам (Торетам), Кызылординская область, Казахстан*
- Б. Капустин Яр, Астраханская область
- В. Плесецкий район, Архангельская область
- Г. Приморский край

2 Какое событие произошло 4 октября 1957 г.?

- А. Вывод на орбиту первой собаки-космонавта Лайки
- Б.** *Запуск первого искусственного спутника Земли*
- В. Полет первого космонавта — Юрия Алексеевича Гагарина
- Г. Первый запуск ракеты «Р-7» — прообраза будущих космических ракет

3 19 августа 1960 г. был осуществлен успешный запуск космического корабля «Спутник-5». Кто был на его борту?

- А.** *Собаки Белка и Стрелка*
- Б. Собака Лайка
- В. Обезьяны Забияка и Жаконя
- Г. Манекен для проверки перед запуском первого человека в космос

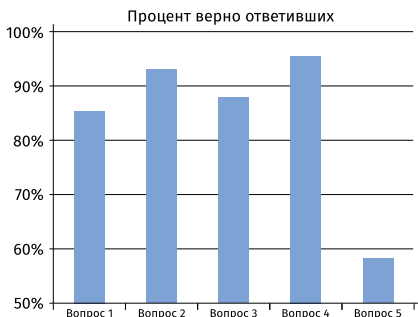
4. Какое событие произошло 12 апреля 1961 г.?

- А. Вывод на орбиту первой собаки-космонавта Лайки
- Б. Запуск первого искусственного спутника Земли
- В. *Полет первого космонавта – Юрия Алексеевича Гагарина*
- Г. Первый выход человека в открытый космос

5. 15 сентября 1968 г. был запущен «Зонд-5», он выполнил первый в мире облет Луны с возвращением на Землю. Какие живые существа были на его борту?

- А. Никаких, только научная аппаратура и манекен
- Б. Собаки как самые знаменитые советские животные-космонавты
- В. *Черепашки, так как они не нуждались в приемах пищи и воды во время полета*
- Г. Крысы, так как по ним проще исследовать влияние радиации на организм

Самый сложный вопрос раздела I связан с советской лунной программой. Если не учитывать ответы участников из Иркутска (почти 100% участников справилось с этим вопросом) и Самарского университета, то верно ответили на этот вопрос немногим более 10% участников. Это достижение – один из приоритетов СССР в истории освоения Луны, и о нем подробно рассказывается в программе «Космическая история России».



II. КОСМОНАВТИКА В ЧИСЛАХ

- 6 Сколько времени продолжался полет Юрия Алексеевича Гагарина?
- А. 108 минут
Б. 106 минут
- В. 2 часа
Г. Одни сутки

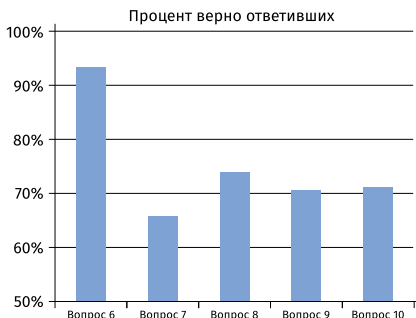
Комментарий: в большинстве источников указывается продолжительность полета 108 минут, но в ряде документов – 106. Засчитывались оба варианта.

- 7 Сколько всего человек побывало в космосе за всю историю его освоения?
- А. Менее 500
Б. Более 500
- В. Более 1 000
Г. Более 5 000

- 8 Сколько побывало в космосе девушек из СССР и России?
- А. Пять
Б. Десять
- В. Пятьдесят
Г. Одна

- 9 Венера — одна из самых сложных для изучения планет Солнечной системы. Сколько времени находились в рабочем состоянии аппараты, находящиеся на ее поверхности?
- А. Не более двух часов
Б. Всего одни сутки
- В. Трое суток
Г. Полгода

- 10 Сколько минут требуется Международной космической станции на то, чтобы сделать полный оборот вокруг Земли?
- А. Всего 30 минут: станция очень быстро вращается вокруг Земли
Б. 90 минут — получается целых 16 оборотов за сутки!
В. 125 минут — почти два часа
Г. 1440 минут — целые сутки на один оборот



III. КОСМОНАВТЫ И ОСНОВОПОЛОЖНИКИ КОСМИЧЕСКИХ НАУК

11

Кто осуществил первый суточный полет человека в космос – «17 космических зорь»?

- А. *Герман Степанович Титов*
- Б. Андриян Григорьевич Николаев
- В. Алексей Архипович Леонов
- Г. Валентина Владимировна Терешкова

12

Кто совершил первый в истории выход в открытый космос?

- А. Юрий Алексеевич Гагарин
- Б. Валентин Петрович Глушко
- В. *Алексей Архипович Леонов*
- Г. Валентина Владимировна Терешкова

13

Какой ученый в начале XX в. рассчитал оптимальную траекторию полета к Луне? Идеи позднее были использованы НАСА в лунной программе «Аполлон».

- А. *Юрий Кондратюк*
- Б. Владимир Ветчинкин
- В. Фридрих Цандер
- Г. Вальтер Гоман

14

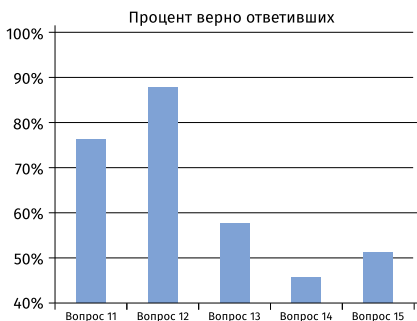
С чьим именем связано начало и развитие исследования околоземного и межпланетного космического пространства, Луны и планет Солнечной системы? Совместно с Георгием Николаевичем Бабакиным он руководил разработкой и реализацией программы исследования Венеры. Он считался главным теоретиком космонавтики и стал отцом математической школы, которая обеспечила решение многих практических задач ракетодинамики.

- А. Мстислав Всеволодович Келдыш
- Б. Василий Павлович Мишин
- В. Михаил Сергеевич Рязанский
- Г. Николай Петрович Каманин

15

Кто считался главным ракетным «радиистом»? С 1930-х гг. он занимался радиоуправлением танков, самолетов и торпедных катеров, авиационными радиостанциями. Он участвовал в разработке первого советского радиолокатора, радиосистем для баллистических ракет, а впоследствии — для космических ракет-носителей, спутников, межпланетных станций. Его внук стал космонавтом и дважды участвовал в экспедициях на МКС.

- А. Николай Алексеевич Пилюгин
- Б. Михаил Сергеевич Рязанский
- В. Мстислав Всеволодович Келдыш
- Г. Валентин Георгиевич Глушко



IV. РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

- 16 «Буран» — советский орбитальный корабль-ракетоплан многоразовой транспортной космической системы, созданный в рамках программы «Энергия — Буран». Выберите правильные утверждения о «Буране»:
- А. *Единственный космический полет «Буран» совершил 15 ноября 1988 г. в автоматическом режиме, без пассажиров*
 - Б. Первый полет «Бурана» прошел с двумя космонавтами на борту: Юрием Маленченко и Владимиром Джанибековым
 - В. *Изначально система автоматической посадки даже не предусматривала перехода на ручной режим управления. Однако пилоты-испытатели и космонавты потребовали у конструкторов включить ручной режим*
 - Г. Управление «Бураном» было сильно зависимо от мастерства пилотов — как у самолетов того времени
 - Д. Единственное оборудованное место посадки «Бурана» было только на космодроме Байконур
 - Е. *Для посадок космолана «Буран» были специально построены аэродромы на Байконуре, в Крыму и Приморском крае, а также построены или усилены ВПП еще на четырнадцать аэродромах, в том числе вне территории СССР (на Кубе, в Ливии)*

158

- 17 Догадайтесь, что объединяет эти слова, и продолжите список:

«Ангара», «Протон», «Энергия», «Молния», «Восток»...



.....
Ответ: «Союз», «Восход», «Зенит» и др. ракетносители

- 18 Какой российский модуль МКС был запущен в июле 2021 г.?

- А. «Заря»
- Б. «Рассвет»
- В. «Причал»
- Г. «Наука»

- 19 Какой космический аппарат впервые достиг поверхности Луны?

- А. «Луна-1» (СССР)
- Б. «Луна-2» (СССР)
- В. «Аполлон-11» (США)
- Г. «Рейнджер-4» (США)

Чтения имени В. В. Терешковой

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

Ярославль, 09 марта 2023 г.

Корректор *Светлана Кеньшенская*
Компьютерная верстка *А. В. Каминовой*

Подписано в печать 23.03.2023
Формат 60x84/16.
Объем 8 п. л. Тираж 100 экз. Заказ № 23-03-2023

Материалы публикуются в авторской редакции.

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

Отпечатано на собственном
полиграфическом оборудовании

