



АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Исследования Солнечной системы



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Том 58, номер 3, 2024

О влиянии неустойчивости Рэлея–Тейлора на формирование пылевых облаков в мезосфере Марса <i>Ю. С. Резниченко, А. Ю. Дубинский, С. И. Попель</i>	269
Долинный рельеф северо-восточной части Земли Киммерия на Марсе <i>А. Э. Мухамеджанова</i>	276
Радиолиз как возможный механизм синтеза перхлоратов на Марсе и Европе <i>Д. В. Белоусов, В. С. Чепцов, А. К. Павлов</i>	284
Получение плазменно-пылевых облаков из метеоритного вещества, его аналогов и имитаторов лунного реголита с помощью микроволнового разряда <i>В. Д. Борзосексов, Н. С. Ахмадулина, А. С. Соколов, Т. Э. Гаянова, А. Д. Резаева, В. Д. Степахин, Е. М. Кончиков, Д. В. Малахов, Е. В. Воронова, И. Р. Нугаев, В. П. Логвиненко, А. В. Князев, А. А. Летунов, Д. Е. Харлачев, Е. А. Образцова, Т. И. Морозова, М. А. Зайцев, А. В. Ищенко, И. А. Вайнштейн, В. И. Гроховский, О. Н. Шишилов, Н. Н. Скворцова</i>	290
Наблюдаемые спектральные признаки и вероятные механизмы образования оптически тонкой и толстой пылевой экзосферы активных астероидов <i>В. В. Бусарев, Е. В. Петрова, В. Б. Пузин, С. И. Барабанов, М. П. Щербина, С. Ю. Кузнецов</i>	317
Исследование динамики мультиплетов орбитальных резонансов астероидов с малыми перигелийными расстояниями <i>Т. Ю. Галушина, О. Н. Летнер, О. М. Сюсина</i>	329
Анализ траекторий перелета космического аппарата к Венере с пролетом астероидов <i>В. А. Зубко, Н. А. Эйсмонт, Р. Р. Назиров, К. С. Федяев, А. А. Беляев</i>	337
Особенности миграции космического мусора в системе Земля–Луна <i>Т. В. Сальникова, Е. И. Кугушев</i>	356
Gaia Data Release 3: распределение спектральных групп астероидов, сближающихся с Землей <i>М. П. Щербина, Д. А. Ковалёва, Б. М. Шустов</i>	363

УДК 523.34-36

О ВЛИЯНИИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ–ТЕЙЛОРА НА ФОРМИРОВАНИЕ ПЫЛЕВЫХ ОБЛАКОВ В МЕЗОСФЕРЕ МАРСА

© 2024 г. Ю. С. Резниченко^{a, b, *}, А. Ю. Дубинский^a, С. И. Попель^{a, **}

^a Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

^b Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),

Долгопрудный, Россия

*e-mail: dyju@yandex.ru;

**e-mail: popel@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 15.11.2023 г.

После доработки 22.12.2023 г.

Принята к публикации 17.01.2024 г.

Представлена теоретическая модель, описывающая режим оседания плазменно-пылевых облаков в мезосфере Марса. Рассчитаны значения характерных размеров пылевых частиц облака, предсказываемые моделью. Показано, что важным фактором, влияющим на процесс формирования плазменно-пылевых структур в марсианской атмосфере, является неустойчивость Рэля–Тейлора, ограничивающая (сверху) допустимые размеры пылевых частиц облака.

Ключевые слова: Марс, ионосфера, пылевые частицы, плазменно-пылевые облака, неустойчивость Рэля–Тейлора

DOI: 10.31857/S0320930X24030015, **EDN:** NEGBPG

ВВЕДЕНИЕ

В конце 1990-х — начале 2000-х годов все большее и большее внимание стало уделяться исследованиям и описанию пылевой плазмы в ионосферах планет. Связано это было, во-первых, с тем, что к этому моменту времени было изобретено достаточное количество методик описания пылевой плазмы (см., например, Barnes и др., 1992; Shukla, Mamun, 2002; Tsytovich и др., 2008; Fortov и др., 2005) и стало возможным применить наработанный аппарат к изучению природных плазменно-пылевых систем. Во-вторых, результаты, полученные в области природной комплексной плазмы, могут быть полезны для исследований в областях физики атмосферы, экологии, геофизики. Наконец, в-третьих, изучение ионосферной плазмы естественным образом началось с Земли, а в случае с Землей нельзя исключать наличие связи между плазменно-пылевыми процессами ионосферы, с одной стороны, и с разного рода климатическими изменениями (например, с процессами глобального потепления) — с другой (Popel и др., 2011).

В последние два десятилетия, кроме того, имеет место существенный рост интереса к исследованиям Марса. По результатам миссии Mars Express с использованием инфракрасного спектрометра SPICAM было доказано наличие на

Марсе на высотах около 100 км пылевых облаков с характерным размером пылевых частиц порядка 100 нм (см., например, Montmessin и др., 2006). Эти облака, по-видимому, состоят из частиц сухого льда и формируются в результате конденсации пересыщенного углекислого газа марсианской мезосферы. В марте 2021 г. аппарат Mars Science Laboratory Curiosity прислал на Землю снимки подобных облаков (см. https://www.newsru.com/hitech/30may2021/mars_clouds.html). Фотосъемка велась на закате, солнечные лучи в это время освещали поверхность пылевых частиц, в результате чего облака были подсвечены на фоне темного неба аналогично тому, как это происходит в случае с серебристыми облаками атмосферы Земли (см., например, von Zahn и др., 2004; Клумов и др., 2005a; 2005b).

На высотах около 80 км над поверхностью Марса наблюдались облака микрометровых частиц (Montmessin и др., 2007); регистрировались облака и непосредственно над поверхностью планеты, а также на высотах около 4 км (Whiteway и др., 2009). В этих областях по ночам наблюдались тонкие пылевые слои, состоящие, по экспериментальным данным установки Mars Climate Sounder (аппарат Mars Reconnaissance Orbiter), из замерзших частиц водяного льда либо углекислого газа (Hayne и др., 2012). Точные механизмы

формирования таких облаков на данный момент неизвестны.

Если земные полярные мезосферные облака изучены относительно неплохо (см., например, Klumov и др., 2000; Клумов и др., 2005а; Дубинский, Попель, 2012), то плазменно-пылевые структуры марсианской ионосферы, как отмечалось выше, исследованы не столь хорошо. В (Дубинский и др., 2019; Reznichenko и др., 2020) была представлена теоретическая модель возможного образования подобных пылевых облаков. Согласно этой модели, пылевые зародыши, находящиеся в начальный момент времени на границе раздела ненасыщенных и пересыщенных паров углекислого газа, интенсивно поглощают пересыщенные пары, существенно увеличиваются в размерах и массе и быстро седиментируют. Поскольку первоначально пылевые слои расположены неоднородно по высоте, в конечном итоге разные слои поглощают разное количество углекислого газа. Это создает предпосылки для перемешивания пылевых слоев друг с другом, что приводит к образованию слоистой структуры.

В основу модели из (Дубинский и др., 2019; Reznichenko и др., 2020) легла модель, использованная для описания земной ионосферы в (Дубинский, Попель, 2012; Клумов и др., 2005а). Таким образом, применение к марсианской атмосфере моделей, разработанных для атмосферы Земли, может оказаться весьма продуктивным. В связи с этим необходимо заметить, что, несмотря на ряд различий (так, например, основной компонентой нейтральной атмосферы на Марсе является углекислый газ, а не азот), структурно атмосферы Земли и Марса во многом схожи друг с другом. Например, общим для обеих планет является наличие ионосферы, нижняя граница которой на Марсе обычно расположена около 80–90 км, хотя может опускаться и до 65 км.

Целью настоящей работы является уточнение разработанной ранее самосогласованной модели марсианских пылевых облаков с учетом особенностей, существенных для ионосферы Марса, но не включаемых в рассмотрение при описании серебристых облаков в ионосфере Земли. В частности, в работе показывается важность для формирования марсианских мезосферных облаков развития рэлей-тейлоровской неустойчивости.

УСЛОВИЯ В МАРСИАНСКОЙ ИОНОСФЕРЕ

Температурное распределение в атмосфере Марса таково, что оказывается возможным (Извекова, Попель, 2017) выделить три характерные области: тропосферы (от поверхности планеты до высот около 50–60 км), средней атмосферы

(от верхней границы тропосферы до 110 км) и термосферы (начиная со 110 км и до границы с открытым космосом). В тропосфере температура нейтрального газа атмосферы постепенно уменьшается от среднего поверхностного значения (около 210 К) до атмосферного минимума, в области средней атмосферы температура остается приблизительно постоянной и равной минимуму, далее в термосфере имеет место температурный рост. В целом профиль температуры сильно подвержен влиянию суточно-сезонных изменений (в первую очередь, в области тропосферы), поэтому поведение углекислого газа атмосферы качественно может сильно различаться. Как было показано в (Forget и др., 2009), для шести наиболее “холодных” профилей марсианской ионосферы, измеренных спектрометром SPICAM, углекислый газ является пересыщенным.

На рис. 1 проиллюстрированы условия марсианской ионосферы, важные для физики рассматриваемых процессов. Здесь приведены высотные профили давления насыщенных паров углекислого газа и фактического давления паров углекислого газа. Экспериментальные данные по парам углекислого газа были взяты из (Forget и др., 2009; Fox и др., 2015). Давление насыщенных паров углекислого газа P_s над искривленной поверхностью пылевой частицы с размером a , обладающей электрическим зарядом $q_d = Z_d e$, где Z_d – зарядовое число, e – заряд электрона, находится из уравнения (ср. Дубинский, Попель, 2012):

$$v_d \left(P_s - \frac{N_A \mu_D q_d}{\mu_g a^2 v_d} L \left(\frac{\mu_D q_d}{T a^2} \right) - P_0 \right) - \frac{N_A T}{\mu_g} \times \\ \times \ln \frac{P_s}{P_0} + \frac{2 \sigma v_d}{a} + \frac{q_d^2 v_d}{8 \pi a^4} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 + v(\lambda, a) \right) = 0, \quad (1)$$

где

$$v(\lambda, a) = \int_a^\infty \frac{a^2 (\lambda + r)^2}{r^2} \frac{2 a \exp \{ 2(a - r) / \lambda \}}{\lambda (\lambda + a)^3} dr. \quad (2)$$

Здесь λ – характерная длина экранирования потенциала Юкавы, ε – диэлектрическая проницаемость материала частицы, v_d – удельный объем пылевой частицы, N_A – число Авогадро, μ_D – дипольный момент молекулы углекислого газа, μ_g – молярная масса паров углекислого газа, $L(x)$ – функция Ланжевена, σ – коэффициент поверхностного натяжения, T – температура. Давление насыщенных паров углекислого газа P_0 над плоской поверхностью вычислялось с помощью аппроксимационного полинома, взятого из (Алтунин, 1975). Уравнение, связывающее давление насыщенных паров углекислого газа P_0 над

плоской поверхностью с P_s , было составлено через минимизацию термодинамического потенциала рассматриваемой системы (см., например, Ландау, Лифшиц, 1976), которая состоит из внутреннего и внешнего электрических полей заряженной пылевой частицы, самой пылевой частицы, а также прилегающего к поверхности частицы слоя молекул углекислого газа. Предполагалось, что внешнее электрическое поле пылевой частицы может быть описано с помощью потенциала Юкавы (см. член, содержащий $v(\lambda, a)$), кроме того, были учтены силы поверхностного натяжения.

Видно, что в интервале высот 92–112 км углекислый газ сильно пересыщен; эта область может быть названа зоной конденсации. В зоне конденсации происходит интенсивный рост пылевых зародышей за счет бурной конденсации атмосферного углекислого газа. В процессе роста частицы взаимодействуют с ионами и электронами окружающей ионосферной плазмы, приобретая таким образом некоторый заряд. Наличие у частицы заряда, в свою очередь, в дальнейшем сказывается на ее росте.

Верхняя область ненасыщенных паров может быть названа зоной седиментации с постоянной массой, нижняя — зоной сублимации. В зоне сублимации сконденсировавшийся на поверхность микрочастицы углекислый газ испаряется. Характерное время седиментации пылевых слоев через зону конденсации, таким образом, определяет характерное время существования плазменно-

пылевых облаков аналогично серебристым облакам на Земле.

Режим оседания частиц на Марсе имеет ряд специфических особенностей, не свойственных для атмосферы Земли. Так, например, в (Дубинский и др., 2023) было показано, что в зоне конденсации основным тормозящим фактором является неупругое взаимодействие пылевой частицы с налипающим на нее углекислым газом, в связи с чем оказывается необходимым учитывать реактивную силу движения тела с переменной массой.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Эволюция функции распределения микрочастиц $f_d(h, a, v, t)$ задается кинетическим уравнением

$$\frac{\partial f_d}{\partial t} + \frac{\partial f_d}{\partial a} \frac{da}{dt} + \frac{\partial f_d}{\partial h} \frac{dh}{dt} + \frac{\partial f_d}{\partial v} \frac{dv}{dt} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{da}{dt} = \frac{\alpha_{\text{CO}_2} (n_{\text{CO}_2} - n_{\text{CO}_2}^S) m_{\text{CO}_2} v_{\text{CO}_2}^{\text{th}}}{4\rho_d}, \quad (4)$$

$$\frac{dv}{dt} = (mg - F_f + F_r) \frac{1}{m} = g - \frac{F_f}{m} + \frac{F_r}{m}, \quad (5)$$

$$F_f = \pi\rho C_s a^2 F_d v, \quad (6)$$

$$F_r = u_{\text{rel}} \frac{dm}{dt}, \quad (7)$$

где α_{CO_2} — коэффициент аккомодации молекул углекислого газа при их столкновении с поверхностью пылевой частицы (обычно в сильно пересыщенных парах $\alpha_{\text{CO}_2} \sim 1$), m и m_{CO_2} — массы микрочастицы и молекулы углекислого газа соответственно, n_{CO_2} и $n_{\text{CO}_2}^S$ — фактическая и насыщенная концентрации паров конденсирующегося углекислого газа, ρ и ρ_d — плотности газа атмосферы и материала пылевой частицы, $v_{\text{CO}_2}^{\text{th}}$ и C_s — тепловая скорость и скорость звука в атмосферном газе, u_{rel} — скорость налипающих/испаряющихся молекул относительно пылевой частицы, v — скорость микрочастицы, F_d — коэффициент порядка единицы, отражающий влияние формы пылевой частицы, g — ускорение свободного падения на Марсе. Второй член кинетического уравнения описывает рост микрочастиц в пересыщенных парах углекислого газа, четвертый — седиментацию пылевых частиц с учетом реактивного члена в уравнении Мещерского.

Полная система уравнений, описывающая взаимодействие пылевых частиц и заряженной компоненты ионосферной плазмы, состоит из уравнений непрерывности для концентраций

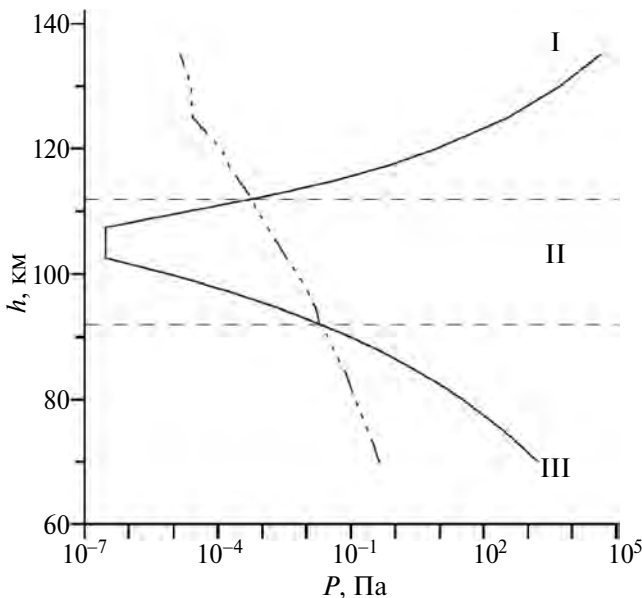


Рис. 1. Разделение атмосферы Марса на зоны: седиментации с постоянной массой (I), конденсации (II) и сублимации (III). Сплошная линия — давление насыщенных паров углекислого газа, штрихпунктирная — фактическое давление паров углекислого газа.

электронов и ионов n_e и n_i , а также для заряда пылевой частицы:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = q_e - \alpha_{\text{rec}} n_e n_i - I_e^d + I_e^{\text{photo}}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = q_e - \alpha_{\text{rec}} n_e n_i - I_i^d, \quad (9)$$

$$\frac{\partial Z_d}{\partial t} = q^{\text{photo}} + v_i - v_e. \quad (10)$$

Здесь q_e — скорость ионизации, α_{rec} — коэффициент рекомбинации, q^{photo} — скорость ионизации вследствие фотоэффекта, v_e и v_i — микроскопические токи электронов и ионов соответственно на пылевую частицу, определяемые согласно зондовой модели. Члены I_e^d и I_i^d описывают гибель электронов и ионов на поверхностях микрочастиц, слагаемое I_e^{photo} отвечает за рождение электронов за счет фотоэффекта. Коагуляцией пылевых частиц при их столкновениях друг с другом можно пренебречь: характерное время такого процесса $\tau_{\text{coag}} \sim (n_d v \pi a^2)^{-1} \geq 10^6$ значительно превышает все остальные характерные времена. Кроме того, оказывается возможным пренебречь броуновским движением частиц (см. Дубинский и др., 2023).

Если в случае с атмосферой Земли характерные значения микрочастиц, предсказываемые теоретической моделью, по порядку совпадают с экспериментальными данными (см. Klimov и др., 2000; Клунов и др., 2005а), то в случае с пылевыми облаками на Марсе результаты оказываются несколько завышенными. Так, при начальных размерах пылевых зародышей в 20 нм и в 200 нм предсказываемые моделью максимальные значения размеров и зарядов (в единицах элементарного заряда) пылевых частиц облака оказываются соответственно равными $a \sim 3.5$ мкм, $Z_d \sim -89$ и $a \sim 3.5$ мкм, $Z_d \sim -88$ (заметим, что, таким образом, от начальных размеров зародышей результат не зависит) по сравнению с экспериментальными значениями размеров порядка 100 нм.

В работе (Дубинский и др., 2023) было показано, что корректировка значения силы вязкого кнудсеновского трения для зоны конденсации, которая фактически обуславливается лишь 5% газов, примесных к углекислому газу атмосферы Марса, приводит к улучшению результатов вычислений примерно на 10% — 25%. Так, введение поправки дает при начальных размерах пылевых зародышей в 20 нм и в 200 нм значения $a \sim 2.7$ мкм, $Z_d \sim -69$ и $a \sim 2.6$ мкм, $Z_d \sim -66$. Этого, однако, оказывается недостаточно для того, чтобы прийти к полному соответствию с экспериментальными данными.

Одним из факторов, важных для процессов формирования плазменно-пылевых облаков марсианской ионосферы, не учитываемых в описанной модели, может быть неустойчивость Рэлея—Тейлора. Как показано в работе (Савельев и др., 2011), такого рода неустойчивость возникает на границе раздела в системе ‘газ + пыль’, находящейся в гравитационном поле, в случае, если верхнее полупространство заполнено смесью газа и пыли, а нижнее — чистым газом. Пылевые облака, как это следует из наблюдений, имеют резкую нижнюю границу, ниже которой концентрация пылевых частиц оказывается ничтожной по сравнению с концентрацией частиц в облаках. Динамика границы в этом случае описывается системой уравнений Навье—Стокса и неразрывности, линейаризация которой при исследовании устойчивости стационарного решения в случае малых возмущений невязкого газа приводит к дисперсионному уравнению

$$\begin{aligned} \bar{\gamma}^3 + \bar{\gamma}^2 \left[\alpha \left(1 + \frac{n_d m}{n_{\text{CO}_2} m_{\text{CO}_2}} \right) + \frac{|\mathbf{k}| g}{\alpha} \right] + \\ + \bar{\gamma} |\mathbf{k}| g - \frac{n_d m |\mathbf{k}| g \alpha}{2 n_{\text{CO}_2} m_{\text{CO}_2}} = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь $|\mathbf{k}|$ — волновое число, $\bar{\gamma}$ — инкремент неустойчивости, n_d — концентрация пылевых частиц, $\alpha = 2\sqrt{2} / \pi G n_{\text{CO}_2} T / \rho_d v_{\text{CO}_2}^{\text{th}} a$, G — коэффициент порядка единицы, описывающий особенности взаимодействия нейтральных молекул газа с поверхностью микрочастицы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Как показывает численный анализ дисперсионного уравнения (11), инкремент неустойчивости $\bar{\gamma}$ достигает при некоторых значениях $|\mathbf{k}|$ максимума γ . На рис. 2 приведены высотные профили для максимального инкремента и для величины γ^{-1} , определяющей характерное время развития неустойчивости, при разных значениях концентраций и размеров пылевых частиц. Видно, что инкремент γ растет вместе с ростом пылевых параметров и, таким образом, должен ограничивать сверху максимальный размер микрочастицы пылевого облака.

На рис. 3 представлены графики зависимости характерного времени развития рэлей—тейлоровской неустойчивости от размера пылевой частицы облака в сравнении с характерным временем седиментации для высот 80 км и 110 км. Типичные значения параметров атмосферы на этих высотах равны соответственно $T = 130.4$ К, $n_{\text{CO}_2} = 6.85 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и $T = 82.85$ К,

$n_{\text{CO}_2} = 6.85 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Поскольку, как это следует из рис. 2, поведение величин γ и γ^{-1} примерно одинаково во всем интервале рассматриваемых высот, сравнение γ^{-1} со временем седиментации для граничных параметров исследуемой области дает возможность получить качественное представление о влиянии рэлей–тейлоровской неустойчивости на формирование плазменно-пылевой структуры облака.

Из рис. 3 видно, что величина характерного времени развития неустойчивости оказывается меньшей времени седиментации лишь при

достаточно малых значениях размеров пылевых частиц. Так, при $n_d = 100 \text{ см}^{-3}$ величина γ^{-1} сравнивается со временем седиментации уже при $a \sim 500\text{--}700 \text{ нм}$, ограничивая тем самым размер микрочастицы облака, так как при больших размерах процесс разрушения слоистой структуры облака за счет развития неустойчивости оказывается эффективнее ее формирования за счет конденсации углекислого газа.

Известно, что глобальные пылевые бури на Марсе могут оказывать влияние на динамику атмосферы вплоть до высот в 100 км над

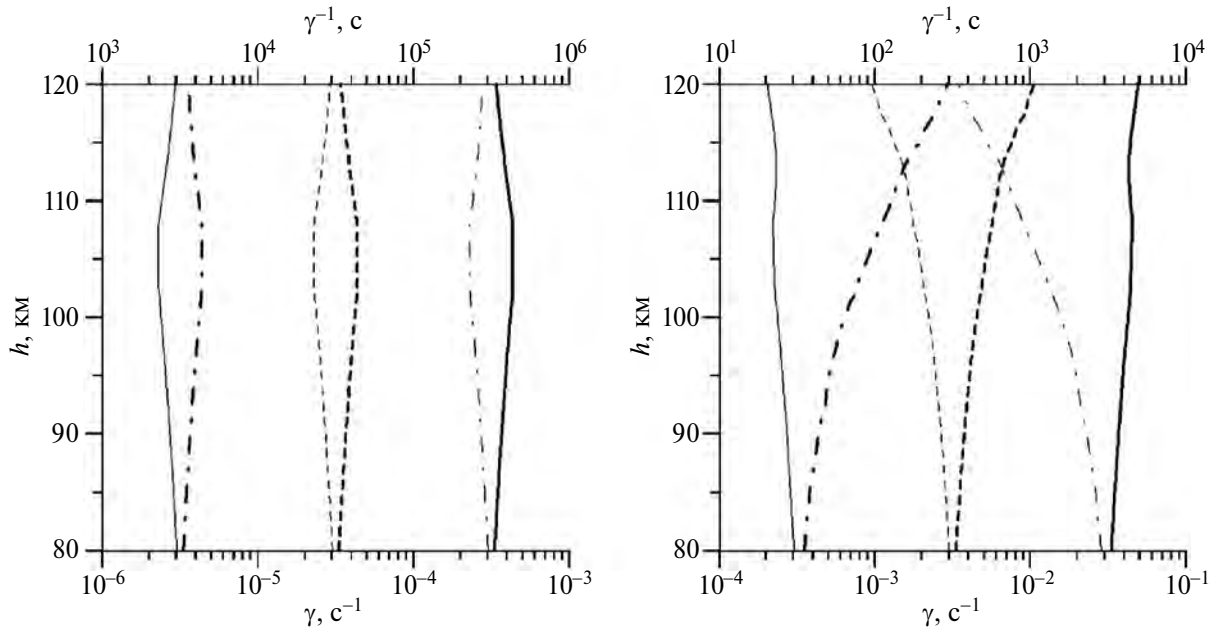


Рис. 2. Вертикальные профили максимального инкремента γ (тонкие линии) и величины γ^{-1} (жирные линии), определяющей характерное время развития неустойчивости Рэлей–Тейлора. Сплошные линии соответствуют $n_d = 1 \text{ см}^{-3}$, штриховые — $n_d = 10 \text{ см}^{-3}$, штрихпунктирные — $n_d = 100 \text{ см}^{-3}$. Левая панель соответствует размеру пылевых частиц $a = 100 \text{ нм}$, правая — величине $a = 1 \text{ мкм}$.

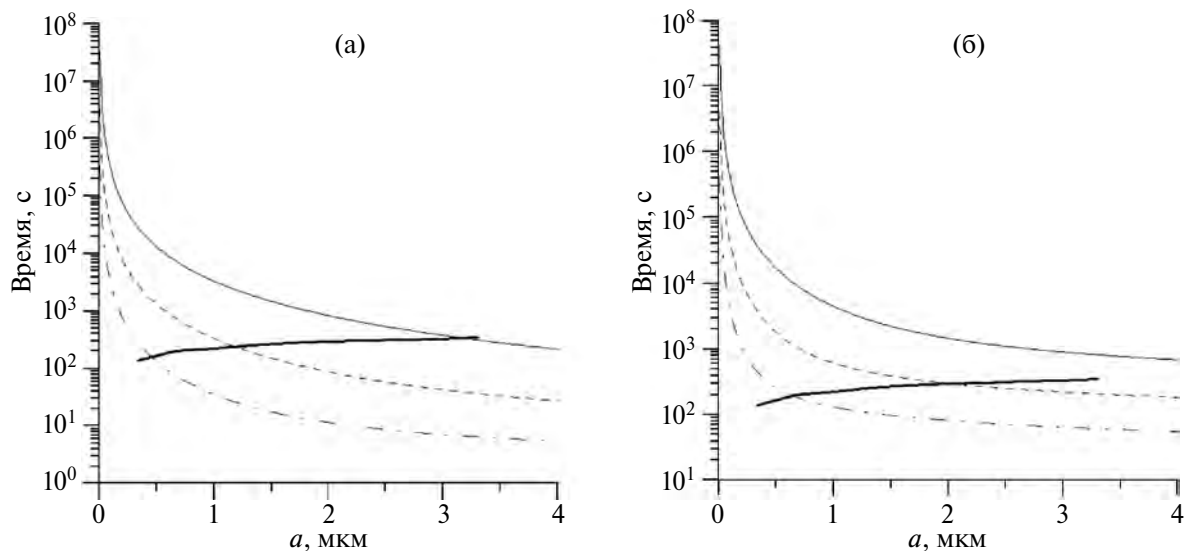


Рис. 3. Зависимость характерного времени развития неустойчивости Рэлей–Тейлора (тонкие линии) в сравнении с характерным временем седиментации (жирные линии) для высот: (а) — 80 км; (б) — 110 км. Сплошные линии соответствуют $n_d = 1 \text{ см}^{-3}$, штриховые — $n_d = 10 \text{ см}^{-3}$, штрихпунктирные — $n_d = 100 \text{ см}^{-3}$.

поверхностью планеты (см., например, Шематович и др., 2021). В связи с этим неустойчивость Рэлея–Тейлора как причина разрушения слоистой структуры облака ранее не рассматривалась, так как очевидно, что к эффективному разрушению облаков должно приводить действие атмосферных ветров. Для данной работы, однако, важен не сам факт разрушения облака, а то, что в случае развития рэлей–тейлоровской неустойчивости (в отличие от действия ветров) это разрушение происходит по достижении микрочастицами облака некоторого порогового размера. Действие неустойчивости, таким образом, обосновывает принципиальную невозможность существования облаков с частицами микрометровых размеров, что соответствует данным наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе была представлена теоретическая модель, описывающая возможный механизм формирования плазменно-пылевых облаков марсианской ионосферы. Представленная модель учитывает особенности, важные для ионосферы Марса, но обычно не рассматриваемые при описании плазменно-пылевой системы на Земле. Было показано, что одним из важных факторов, влияющих на процесс формирования плазменно-пылевого облака, является развитие на нижней границе облака неустойчивости Рэлея–Тейлора. Развитие неустойчивости ограничивает максимальный размер микрочастиц облака (сверху) величиной порядка нескольких сотен нанометров, что согласуется с данными наблюдений.

Данная работа была поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики “БАЗИС”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтунин В.В. Теплофизические свойства двуокиси углерода. М.: Изд. стандартов, 1975. 546 с.
- Дубинский А.Ю., Попель С.И. Формирование и эволюция плазменно-пылевых структур в ионосфере // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 96. № 1. С. 22–28.
- Дубинский А.Ю., Резниченко Ю.С., Попель С.И. К вопросу о формировании и эволюции плазменно-пылевых структур в ионосферах Земли и Марса // Физика плазмы. 2019. Т. 45. № 10. С. 913–921.
- Дубинский А.Ю., Резниченко Ю.С., Попель С.И. О кинетических особенностях седиментации пылевых частиц в атмосфере Марса // Астрон. вестн. 2023. Т. 57. № 3. С. 225–231. (Dubinsky A. Yu., Reznichenko Yu. S., Popel S. I. On the kinetic features of sedimentation of dust particles in the Martian atmosphere // Sol. Syst. Res. 2023. V. 57. № 3. P. 214–220).
- Извекова Ю.Н., Попель С.И. Плазменные эффекты в пылевых вихрях у поверхности Марса // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 12. С. 1010–1017.
- Клумов Б.А., Владимиров С.В., Морфилл Г.Е. Особенности пылевых структур в верхней атмосфере Земли // Письма в ЖЭТФ. 2005б. Т. 82. № 10. С. 714–719.
- Клумов Б.А., Морфилл Г.Е., Попель С.И. Формирование структур в запыленной атмосфере // ЖЭТФ. 2005а. Т. 127. № 1. С. 171–185.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Часть 1. М.: Наука, 1976. 584 с.
- Савельев Р.С., Розанов Н.Н., Социлин Г.Б., Чивилихин С.А. Релей–Тейлоровская неустойчивость запыленного газа // Научно-техн. вестн. Санкт-Петербургского гос. университета информ. технологий, механики и оптики. 2011. Т. 73. № 3. С. 18–22.
- Шематович В.И., Бисикало Д.В., Жилкин А.Г. Влияние вариации протяженной водородной короны Марса на эффективность перезарядки с протонами солнечного ветра // Астрон. журн. 2021. Т. 98. № 3. С. 232–238.
- Barnes M.S., Keller J.H., Forster J.C., O'Neill J.A., Coul-tas D.K. Transport of dust particles in glow-discharge plasmas // Phys. Rev. Lett. 1992. V. 68. P. 313–316.
- Forget F., Montmessin F., Bertaux J.L., Gonzalez-Galindo F., Lebonnois S., Quemerais E., Reberac A., Dimarellis E., Lopez-Valverde M.A. Density and temperatures of the upper Martian atmosphere measured by stellar occultations with Mars Express SPICAM // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. id. E01004 (19 p.).
- Fortov V.E., Ivlev A.V., Khrapak S.A., Khrapak A.G., Mor-fill G.E. Complex (dusty) plasmas: Current status, open issues, perspectives // Phys. Reports. 2005. V. 421. P. 1–103.
- Fox J.L., Benna M., Mahaffy P.R., Jakosky B.M. Water and water ions in the Martian thermosphere/ionosphere // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42. P. 8977–8985.
- Hayne P.O., Paige D.A., Schofield J.T., Kass D.M., Klein-böhl A., Heavens N.G., McCleese D.J. Carbon dioxide snow clouds on Mars: South polar winter observations by the Mars climate sounder // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. id. E08014 (23 p.).
- Klumov B.A., Popel S.I., Bingham R. Dust particle charging and formation of dust structures in the upper atmosphere // JETP Lett. 2000. V. 72. № 7. P. 364–368.
- Montmessin F., Bertaux J.L., Quémerais E., Korablev O., Rannou P., Forget F., Perriera S., Fussend D., Lebon-nois S., Rébéraca A. Subvisible CO₂ ice clouds detected in the mesosphere of Mars // Icarus. 2006. V. 183. P. 403–410.
- Montmessin F., Gondet B., Bibring J.P., Langevin Y., Dros-sart P., Forget F., Fouchet T. Hyperspectral imaging of convective CO₂ ice clouds in the equatorial mesosphere of Mars // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. id. E11S90 (14 p.).

- Popel S.I., Kopnin S.I., Yu M.Y., Ma J.X., Huang F.* The effect of microscopic charged particulates in space weather // *J. Phys. D: Applied Phys.* 2011. V. 44. id. 174036.
- Reznichenko Yu.S., Dubinskii A. Yu., Popel S.I.* On dusty plasma formation in Martian. ionosphere // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1556. id. 012072 (7 p.).
- Shukla P.K., Mamun A.A.* Introduction to Dusty Plasmas Physics. Bristol/Philadelphia: Inst. Phys. Publ., 2002. 270 p.
- Tsyтович V.N., Morfill G.E., Vladimirov S.V., Thomas H.* Elementary Physics of Complex Plasmas. Berlin/Heidelberg: Springer, 2008. 370 p.
- Zahn U., Baumgarten G., Berger U., Fiedler J., Hartogh P.* Noctilucent clouds and the mesospheric water vapour: the past decade // *Atmos. Chem. Phys.* 2004. V. 4. P. 2449–2464.
- Whiteway J.A., Komguem L., Dickinson C., Cook C., Illnicki M., Seabrook J., Popovici V., Duck T.J., Davy R., Taylor P.A., Pathak J., Fisher D., Carswell A.I., Daly M., Hipkin V., Zent A.P., Hecht M.H., Wood S.E., Tamppari L.K., Renno N., Moores J.E., Lemmon M.T., Daerden F., Smith P.* Mars water-ice clouds and precipitation // *Science*. 2009. V. 325. Iss. 5936. P. 68–70. https://www.newsru.com/hitech/30may2021/mars_clouds.html

УДК 523.4

ДОЛИННЫЙ РЕЛЬЕФ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЗЕМЛИ КИММЕРИЯ НА МАРСЕ

© 2024 г. А. Э. Мухамеджанова

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

e-mail: alinam2001@gmail.com

Поступила в редакцию 23.11.2023 г.

После доработки 19.12.2023 г.

Принята к публикации 18.01.2024 г.

Выполнено исследование долинного рельефа северо-восточной части Земли Киммерия на Марсе. Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы. 1) Морфология изученных долинных систем соответствует их предполагаемому флювиальному происхождению. 2) Остатки палеodelьты в кратере Гусев, фрагменты прослеживаемых по долине террасовых уровней, регулярные изменения их высоты, а также остатки эродированных аккумулятивных тел, обнаруженные в долине Ма'адим указывают на существование отдельных эпизодов частичного заполнения долин наносами, вероятно, за счет активизации самых верхних звеньев долинной сети, поставивших обломочный материал в главную долину. Детальное изучение морфологии и топографии долины Дуриус позволяет предположить такой же механизм и ее формирования.

Ключевые слова: Марс, Земля Киммерия, долина Ма'адим, долина Дуриус, долинный рельеф, водная эрозия, флювиальное происхождение

DOI: 10.31857/S0320930X24030027, **EDN:** NEERJA

ВВЕДЕНИЕ

На Марсе существуют формы рельефа, визуально напоминающие речные долины и русла водотоков (Carr, 1981; Baker, Partridge, 1986). Одним из возможных объяснений этого факта является флювиальный характер этих образований, предполагающий наличие жидкой воды как агента формирования такого рода рельефа (Carr, 1996; Baker, 2001). Наиболее важными в таком случае являются вопросы об источниках воды, длительности ее активной работы, возрасте этих форм, приемных бассейнах.

Земля Киммерия — крупный марсианский регион, располагающийся в пределах Южного кратерированного материка и представляющий собой обширную территорию (4–5 тыс. км в поперечнике) с центром на 34.7° ю. ш.; 145° в. д. К северу от него располагается обладающая специфическим рельефом переходная зона между древним южным кратерированным материком и относительно более молодыми и низкими равнинами северного полушария (Нупек и др., 2010). Выбор ключевого участка исследования обусловлен наличием данной специфической переходной зоны и предполагал исследование долинного рельефа северо-восточной части Земли Киммерия с учетом особенностей строения конкретной части переходной зоны на Марсе.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Цель данной работы — выявить наиболее вероятный вариант происхождения долин северо-востока земли Киммерия. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- провести мониторинг и анализ представлений о происхождении долинных и долинно-руслых форм на Марсе,
- охарактеризовать геолого-геоморфологическое строение ключевого участка исследований — северо-восточной части Земли Киммерия,
- провести дешифрирование долинных форм рельефа северо-восточной части Земли Киммерия и охарактеризовать их геоморфологическое строение и пространственные взаимоотношения с прочими формами и комплексами форм рельефа разного возраста и происхождения.

Основными методами, используемыми в работе, являются геоморфологическое дешифрирование данных дистанционного зондирования Марса и геоморфологическое картографирование территории, а также морфометрические измерения с использованием ГИС-технологий. Методика исследования долинных форм включала в себя: дешифрирование тальвегов долин, изучение структуры долинной сети, изучение морфологии отдельных долин, изучение соотношения долин с формами рельефа иного генезиса.

На основе глобальной геологической карты Марса (Tanaka и др., 2014), геологической карты квадранта Аэолис (Scott и др., 1978), а также визуального дешифрирования космических снимков CTX (Context Camera на борту Mars Reconnaissance Orbiter) с пространственным разрешением 6 м была составлена геоморфологическая карта исследуемого участка. Было выявлено, что северо-восток Земли Киммерия представляет собой сочетание существенно переработанных в Гесперийское и Амазонийское время комплексной денудацией и импактно-взрывными процессами равнин различной морфологии, сформированных на древних (предположительно, ранне- и средненейского возраста) комплексах горных пород. Эти равнины прорезаны двумя субмеридионально ориентированными долинными системами – Ма’адим и Дуриус.

В качестве дешифровочных признаков долинных форм использовался набор характеристик, которые помогли идентифицировать и описать данный тип рельефа. Так, например, узкие и глубокие долины свидетельствуют о том, что условия формирования такого рода форм существовали короткое время, но с активными процессами врезания. Широкие долины свидетельствуют о продолжительном времени их формирования. В некоторых случаях долины имеют довольно четкий облик, по которому можно определить их структуру, рисунок и морфологию. Так, и в системе долин Ма’адим, и в системе долин Дуриус по форме, размеру и альбедо отчетливо выделяются главные долины и их притоки. В ходе дешифрирования было проведено кодирование структуры долинной сети. При этом использовалась система определения порядка долин Штралера (Strahler, 1957), где каждый приток реки классифицируется в соответствии с его положением в общей сети. Были получены основные характеристики сети: длины долин, их ширина, уклон, а также морфологические характеристики долин: продольный профиль, глубина и ширина по бровкам и днищу, форма поперечного профиля. Анализировалось также изменение формы и параметров поперечного профиля вниз по долинам для выяснения закономерностей развития долин.

ДОЛИННЫЕ ФОРМЫ НА МАРСЕ

На Марсе обнаружены разнообразные типы долин, имеющие большое морфологическое сходство с долинами земных рек и представляющие собой свидетельство в пользу того, что когда-то, в геологическом прошлом, на поверхности планеты происходила флювиальная деятельность (см., например, Pieri, 1976).

На основании рассмотренных при литературном обзоре гипотез можно сказать, что большинство из долин глубоко врезаны в поверхность кратерированных возвышенностей южного полушария и имеют прямоугольное или U-образное сечение. Предположительно, их образование было интенсивным в Ноахийский период, но затухло к его концу; вновь активизировалось в Гесперийский и в начале Амазонийского периодов. Более теплый и влажный климат по сравнению с современным, вероятно, был необходим для обеспечения стока. Если это так, то возраст долин подразумевает устойчивые теплые условия в Ноахийский период и климатические оптимумы впоследствии (Бронштэн, 1977; Кац, Макарова, 1987; Кузьмин, 1983; Лукашов, 1996; Маров, 1986; Gaidos, Marion, 2003; Leverington, 2019; Neukum, Hiller, Henkel, Bodechtel, 1979).

Изучение структуры долинных сетей необходимо для проверки гипотезы об их флювиальном происхождении. Существует несколько вариантов формирования долин: например, вода поступала из атмосферных осадков. Для подтверждения данного предположения необходимо выделить водосборный бассейн каждой долины, однако это представляется невозможным вследствие полной переработки рельефа эндогенными и экзогенными процессами за более чем 3 млрд лет с момента их образования. Другим возможным вариантом является поступление воды из точечных источников, таких как выходы грунтовых вод. Данное предположение также трудно подтвердить или опровергнуть из-за вышеупомянутой причины. Однако исследование морфологических и морфометрических параметров рельефа ключевого участка территории может способствовать получению более четкого представления о происхождении долинных форм на Марсе.

Ключевой район исследований – северо-восточная часть Земли Киммерия – интересен своим расположением вблизи глобальной переходной зоны (рис. 1).

Его характерной чертой является наличие нескольких крупных долинных систем, начинающихся во внутренних районах материка и открывающихся в крупные кратеры в пределах переходной зоны, либо вообще на низколежащих равнинах севера. В ходе исследования долин Ма’адим и Дуриус было проведено кодирование их структуры (рис. 2).

СИСТЕМА ДОЛИН МА’АДИМ

Долинная система Ма’адим располагается на северо-востоке Земли Киммерия и рассекает поверхность высоких равнин древнего кратерированного материка южного полушария Марса

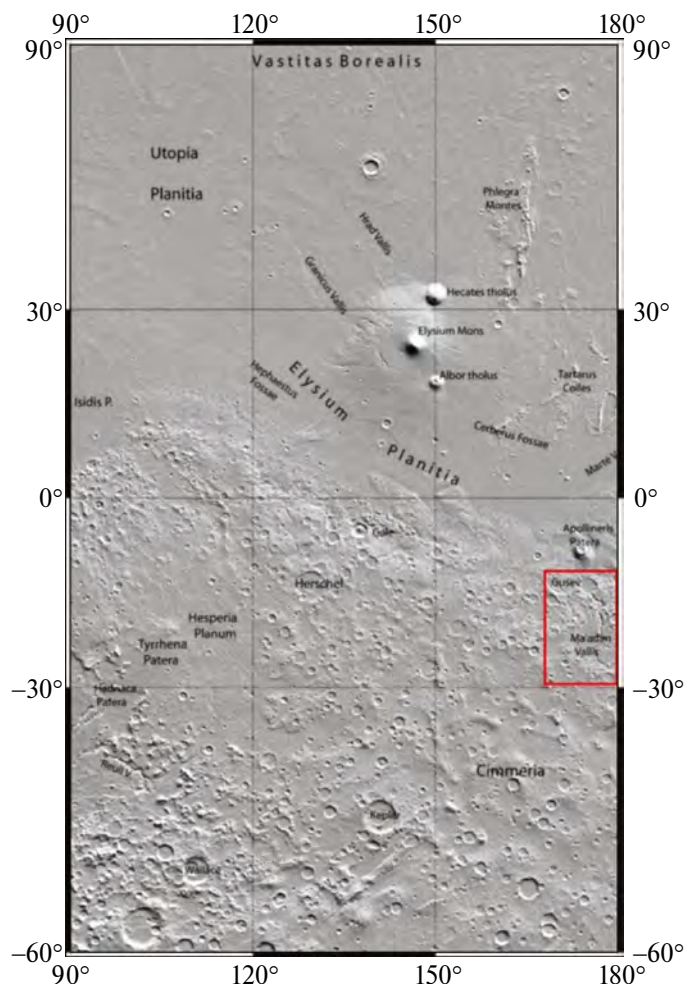


Рис. 1. Область исследования на карте Марса (Carr, 2006).

к югу от кратера Гусев. Долинная сеть вытянута субмеридионально с юга на север на ~900 км, с запада на восток на ~250 км. Площадь территории, которую прорезает долинная сеть, составляет около 900000 км². Расположена она между 15° и 25° ю. ш. и 25° и 35° в. д.

Структура долинной сети Ма'адим представляет собой сеть узких и глубоких каньонов и долин, которые разветвляются и соединяются между собой, образуя сложную и переплетенную систему. Они имеют различную длину, ширину и глубину вследствие действия разных агентов рельефообразования, преобразовавших долинные формы.

Долина имеет большое количество притоков в своем верхнем течении, ее остальные 2/3 протоков — единая долина с единичными притоками первого порядка. Главная долина четвертого порядка вбирает в себя суммарно 142 долины меньших порядков. Их общая протяженность составляет ~3966 км.

Долина Ма'адим берет свое начало на 28° ю. ш. и 177° в. д. Ее верховья располагаются на возвышенной равнине, обладающей сильно

расчлененным рельефом. Точечный исток долинной сети Ма'адим определить невозможно. Участок возможного водосбора представляет собой широкую слаборасчлененную равнину, простирающуюся на сотни километров на юг. Возможно, верховья долины Ма'адим были сильно сnivelированы за счет вулканической и/или эоловой активности.

Морфологические характеристики долины можно охарактеризовать при изучении ее продольного профиля (рис. 3).

Рассматривая продольный профиль долины, можно заметить, что самая верхняя его часть (примерно первые 200 км) выглядит субгоризонтальной и оканчивается заметным топографическим валом и переломом склона (рис. 3). Вал соответствует выбросам из ударного кратера, частично перекрывшим долину. Нижние 3/4 долины сначала характеризуются вогнутым рельефом (250–450 км), затем профиль выполаживается (450–750 км), а в нижней части долины (750–900 км) профиль снова становится вогнутым (см. рис. 3). Единичные пики, наблюдаемые

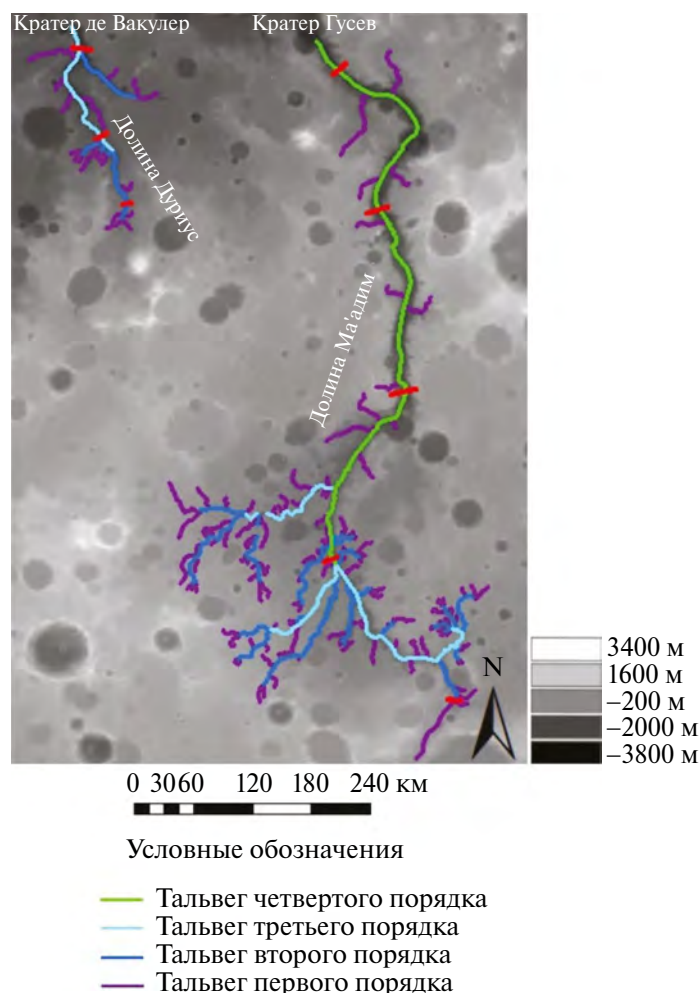


Рис. 2. Долинные сети Ма'адим и Дуриус на снимке ЦМР MOLA (пространственное разрешение — 463 м/пкс).



Рис. 3. Продольный профиль главной долины системы долин Ма'адим на основе данных ЦМР MOLA (пространственное разрешение — 463 м/пкс), где L — расстояние вдоль профиля и H — высота.

в районе 140 км и 580 км от истока, соответственно, представляют собой выбросы из более молодых кратеров, а также, возможно, проявлений оползневых процессов на бортах долины.

Для главного русла Ма'адим, можно выявить общий тренд — это пологонаклонная долина с вогнуто-выпуклым профилем длиной в 913.5 км. Она берет свое начало на возвышенной равнине на высоте ≈ 500 м, достигая в устье-

вой части отметки ≈ -1600 м. Амплитуда высот составляет чуть более 2 км, следовательно, средний уклон значительно меньше одного градуса ($\sim 0.12^\circ$). Длинноволновая компонента продольного профиля долины имеет незначительные перегибы. Для характеристики локальной топографической конфигурации долины Ма'адим была построена серия поперечных профилей с шагом ~ 200 км (рис. 4).

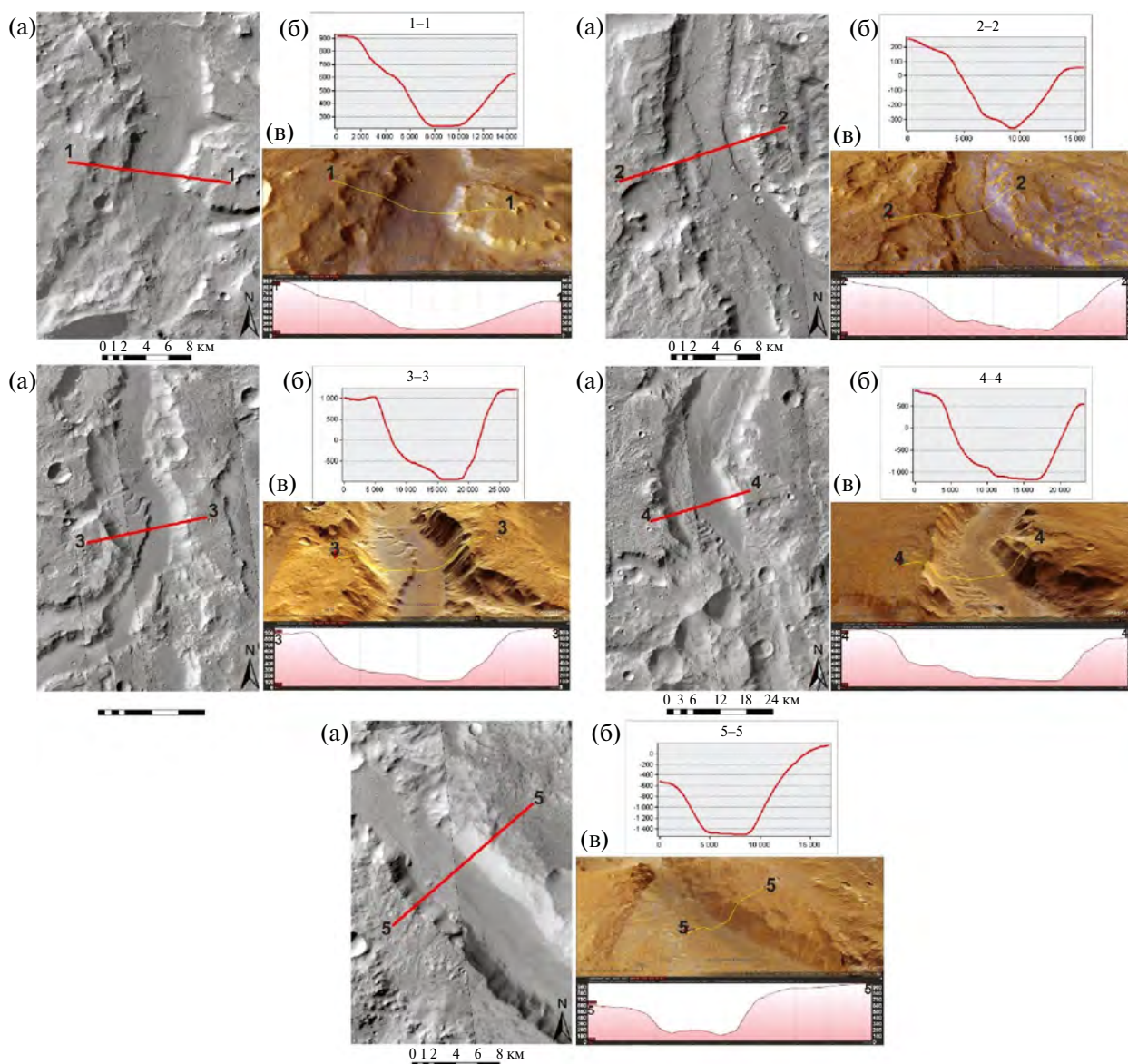


Рис. 4. Поперечные профили 1–1 – 5–5 главной долины системы долин Ма'адим: (а) – на основе снимков CTX; (б) – ЦМР MOLA; (в) – на основе ЦМР HRSC, полученных на КА Mars Express.

При исследовании поперечных профилей главной долины Ма'адим наблюдается закономерное расширение дна долины, а также увеличение ее глубины. Такие характеристики могут свидетельствовать о длительных процессах врезания исследуемой долиной сети. Также обращает на себя внимание обнаружение на трех из пяти поперечных профилей террас (или террасовых уровней). Террасы не отмечены в верховьях и в низовьях долины. Высота террасовых уровней максимальна в среднем течении – убывая и вверх, и вниз по долине. Такая ситуация характерна для хордовых террас речных долин Земли. В днище долины, в среднем ее течении, также были обнаружены вытянутые положительные формы (гряды) длиной около 30 км и максималь-

ной шириной около 3 км. Высота гряд достигает 100 м. Возможно, они представляют собой останцы продольных наносных гряд заполнения дна долины.

Долина Ма'адим открывается в кратер Гусев ($14^{\circ}30'$ ю. ш., $175^{\circ}24'$ в. д., 150 км в диаметре), прорезая его на южный вал. В южной части дна долины имеются следы предполагаемой палеодолины Ма'адим, простирающейся субмеридионально на ≈ 33 км и ≈ 39 км субширотно. Исследования марсохода Spirit показали наличие большого количества различных стратиграфических единиц в пределах данной формы рельефа, в которых наблюдается слоистость, что свидетельствует о многочисленных событиях осадконакопления и эрозии (McSween, Moersch, Burr, 2019).

СИСТЕМА ДОЛИН ДУРИУС

Долинная сеть Дуриус располагается в 160 км к западу от долинной сети Ма'адим. Она вытянута субмеридионально с юга на север на ~220 км, с запада на восток на ~100 км. Площадь территории, которую пререзает долинная сеть, составляет около 20000 км², т. е. она меньше площади территории сети долин Ма'адим в 45 раз.

Долина имеет небольшое количество притоков, и они распределены относительно равномерно на протяжении всей главной долины сети

Дуриус. Главная долина третьего порядка вбирает в себя суммарно 25 долин меньших порядков. Их общая протяженность составляет ~589 км.

Верховья главной долины Дуриус представляют собой некое подобие водосборного бассейна. Большое количество притоков первого порядка впадает в единую долину (до двух километров в поперечнике), где она начинает свое расширение.

Морфологические характеристики главной долины долинной сети Дуриус можно охарактеризовать при изучении ее продольного профиля (рис. 5).

Продольный профиль главной долины Дуриус

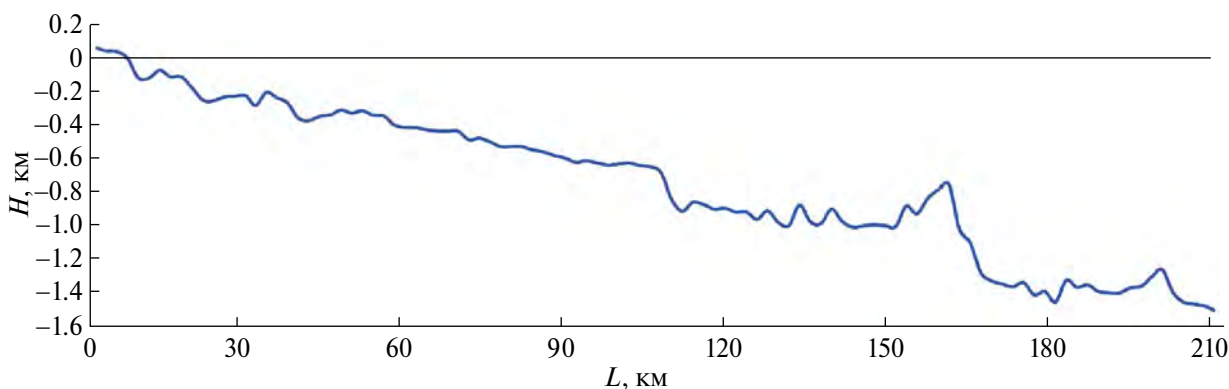


Рис. 5. Продольный профиль главной долины системы долин Дуриус на основе данных ЦМР MOLA (пространственное разрешение — 463 м/пкс), где L — расстояние вдоль профиля и H — высота.

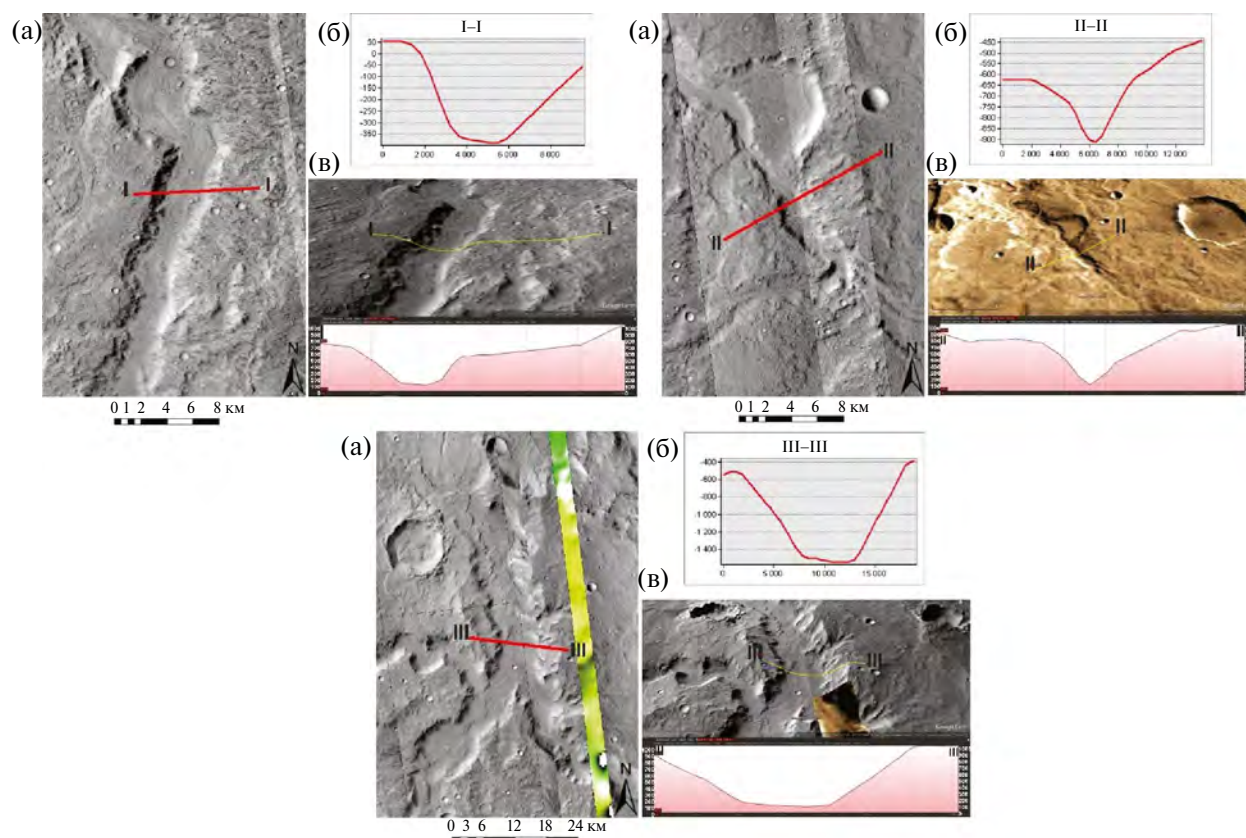


Рис. 6. Поперечные профили I-I–III-III главной долины системы долин Дуриус: (а) — на основе снимков CTX; (б) — ЦМР MOLA; (в) — на основе ЦМР HRSC, полученных на КА Mars Express.

Рассматривая продольный профиль долины, можно заметить, что он прямой, за исключением нижней части, где наблюдается резкое валообразное повышение (рис. 5). Эта часть долины была перекрыта выбросами из более молодого ударного кратера диаметром около 40 км, располагающегося к северо-западу от самой долины.

Для главной долины Дуриус, можно выявить общий тренд — это пологонаклонная долина длиной в 215 км. Она берет свое начало практически на нулевой отметке, достигая в устьевой части отметки ≈ -1500 м.

Для характеристики локальной топографической конфигурации долины была построена серия поперечных профилей (рис. 6).

Для верховьев долины характерен корытообразный профиль с плоским дном шириной 2 км (рис. 6, профиль I—I). Поперечный профиль II—II располагается на территории, где долинная форма местами теряет свои очертания, вероятно, вследствие перекрытия долины материалами вулканической или импактной природы. Также видно, что, хотя долина была ими временно перекрыта, впоследствии эрозионная деятельность возобновилась и прорезала новое русло, имеющее V-образный профиль (рис. 6, профиль II—II). Поперечный профиль III—III расположен в близустьевой части главной долины. Конфигурация долины корытообразная с выровненным дном, а ее ширина составляет около 5 км.

Долина Дуриус прорезает юго-восточный вал кратера Де Вакулер ($13^{\circ}18'$ ю. ш. $171^{\circ}00'$ в. д., 300 км в диаметре). На области предполагаемого устья долины Дуриус не наблюдается ни дельты, ни конусов выноса или их останцев.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования было установлено, что для обеих долинных систем характерна разветвленность (наличие водотоков нескольких порядков) в совокупности со слабым развитием верхних звеньев эрозионной сети: притоки низких порядков имеют незначительную длину и недостаточную морфологическую выраженность по сравнению с главной долиной. Выявлен общий тренд врезания с юга на север. Обе главные долины имеют тенденцию к выработке U-образного профиля и к расширению дна по приближению к устью. Коррелирующие формы рельефа (конусы выноса, террасы) в долине Ма'адим могут указывать на деятельность текучей воды.

Долины прорезают окружающие равнины, сложенные породами ранне- и среднеохийского возраста, что свидетельствует о более молодом возрасте долин. Отмечаются участки, где долинная система частично уничтожена в результате

ударных событий, а также наблюдается достаточно низкая морфологическая сохранность палеодельты долины Ма'адим. Эти факты позволяют предполагать достаточно древнее заложение долины и прекращение ее активного функционирования еще в доамазонийское время.

Таким образом, наиболее вероятным временным промежутком для формирования данных долинных систем видится позднеохийское — раннегесперийское время, что не противоречит существующим оценкам по некоторым другим долинам. Вероятнее всего, рассмотренные долины формировались за счет относительно быстрого (по геологическим меркам) эрозионного врезания. Однако относительно простая морфология рассматриваемых долин не дает оснований предполагать действие многочисленных циклов флювиальной активности. В то же время отмеченные в долине Ма'адим террасы и частично эродированные фрагменты древнего аккумулятивного дна долины указывают на существование отдельных эпизодов частичного заполнения долин наносами, вероятно, за счет активизации самых верхних звеньев долинной сети, поставивших обломочный материал в главную долину.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института (ГЕОХИ РАН). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бронштэн В.А. Планета Марс. М.: Наука, 1977. 95 с.
- Кац Я.Г., Макарова Н.В. Основы сравнительной геологии планет. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. 102 с.
- Кузьмин Р.О. Криолитосфера Марса. М.: Наука, 1983. 114 с.
- Лукашов А.А. Рельеф планетных тел. Введение в сравнительную геоморфологию: Учеб. Пособие. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996. 112 с.
- Маров М.Я. Планеты Солнечной системы. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1986. 320 с.
- Baker V.R., Partridge J.B. Small Martian valleys: Pristine and degraded morphology // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. P. 3561–3572.
- Baker V.R. Water and Martian Landscape // Nature. 2001. V. 412. P. 228–236.
- Carr M.H. The Surface of Mars. New Haven: Yale Univ. Press, 1981. 232 p.
- Carr M.H. Water on Mars. New York: Oxford Univ. Press, 1996. 229 p.
- Carr M.H. The surface of Mars. U.S. Geological Survey. Menlo Park, CA, 2006. P. 307.
- Gaidos E., Marion G. Geologic and geochemical legacy of a cold early Mars // J. Geophys. Res. 2003. P. 108.

- Hynek B.M., Beach M., Hoke M.R.T.* Updated global map of Martian valley networks and implications for climate and hydrologic processes // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. id. E09008.
- Leverington D.W.* Formation of Ares Vallis (Mars) by effusions of low-viscosity lava within multiple regions of chaotic terrain // *Geomorphology*. 2019. P. 345.
- McSween H.Y., Moersch J.E., Burr D.M.* Planetary Geoscience. Cambridge Univ. Press, 2019. 340 p.
- Neukum G., Hiller K., Henkel J., Bodechtel J.* Surface age of Martian shield volcanoes and channels // Abstracts X // Lunar and Planet. Sci. Conf. March 19–23. 1979. P. 907–909.
- Pieri D.* Distribution of small channels of the Martian surface // *Icarus*. 1976. V. 27. № 1. P. 25–50.
- Scott D.H., Morris E.C., West M.N.* Geologic map of the Aeolis Quadrangle of Mars // U.S.G.S. Misc. Inv. Map 1–1111. 1978.
- Strahler A.N.* Quantitative analysis of watershed geomorphology // *Transactions Am. Geophys. Union*. 1957. V. 38. № 6. P. 913–920.
- Tanaka K.L., Skinner J.A. Jr., Dohm J.M., Irwin R.P. III, Kolb E.J., Fortezzo C.M., Platz T., Michael G.G., Hare T.M.* Geologic map of Mars: U.S. Geological Survey. Scientific Investigations Map 3292, scale 1:20,000,000 // U.S.G.S. 2014. P. 43.

УДК 523.4-36

РАДИОЛИЗ КАК ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ СИНТЕЗА ПЕРХЛОРАТОВ НА МАРСЕ И ЕВРОПЕ

© 2024 г. Д. В. Белоусов^{*,а}, В. С. Чепцов^{б,с}, А. К. Павлов^а

^а ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

^б МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^с Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

*e-mail: dom.999.bel@gmail.com

Поступила в редакцию 14.11.2023 г.

После доработки 21.11.2023 г.

Принята к публикации 11.01.2024 г.

Перхлораты обнаружены в составе реголита Марса и Луны, во льду Европы, в составе метеоритов. Понимание процессов образования и разрушения данных соединений важно как для понимания геологической и климатической эволюции ряда планет и тел Солнечной системы, так и для оценки возможности их обитаемости. К настоящему времени предложен ряд механизмов синтеза перхлоратов в условиях Марса, однако эти механизмы не объясняют наблюдаемых в реголите концентраций перхлората и неприменимы для безатмосферных тел, в частности Европы. Нами исследованы процессы синтеза и разрушения перхлоратов при облучении моделей льда и реголита высокоэнергичными электронами в условиях низкой температуры (-50°C) и при отсутствии атмосферы (при давлении 0.01 мбар). Полученные данные свидетельствуют о том, что перхлораты могут эффективно синтезироваться в реголите Марса и поверхностном слое льда Европы под действием облучения при отсутствии жидкой фазы или атмосферы.

Ключевые слова: Марс, Европа, космические лучи, радиолиз, астробиология

DOI: 10.31857/S0320930X24030035, **EDN:** NEEJPP

ВВЕДЕНИЕ

Перхлораты (ClO_4^-) были обнаружены прямыми методами в двух местах посадки космических аппаратов на Марсе в концентрациях от 0.5% до 1% (Hecht и др., 2009; Glavin и др., 2013). Предполагается, что перхлораты могут быть распространены по всей планете в верхних слоях реголита (Davila и др., 2013). Следует отметить, что Марс не является единственным объектом Солнечной системы, где были обнаружены перхлораты. В лунных образцах и метеоритах также были обнаружены перхлораты и хлораты (Jackson и др., 2015). Анализ инфракрасных спектров поверхности Европы показал присутствие перхлоратов магния и натрия (Ligier и др., 2016).

Наличие солей перхлоратов является важной особенностью марсианского реголита, влияющей на сохранность органики и возможность выживания микроорганизмов. Перхлораты могут выступать как в роли сильного окислителя, разрушающего органику и приводящего к гибели клеток, так и в роли источника энергии для микроорганизмов, а их растворы могут являться источником доступной воды при низких тем-

пературах (Cheptsov и др., 2021). Одновременно перхлораты могут быть индикатором геологических и климатических изменений на поверхности Марса. Так как перхлораты обладают высокой растворимостью в воде, их распределение может косвенно указывать на цикл жидкой воды на Марсе и на условия, при которых перхлораты образовывались.

На Земле перхлораты обнаруживаются, как правило, в засушливых областях (пустыня Атакама, Чили) в концентрациях, намного меньших, чем на Марсе. Образование перхлоратов на Земле происходит за счет фотохимических реакций атмосферного хлора с озоном. С другой стороны, фотохимический механизм образования перхлората на Марсе дает на порядки меньшую скорость образования данных соединений, чем необходимая для синтеза обнаруженного в реголите количества перхлората (Smith и др., 2014). Поэтому для объяснения современного содержания перхлората необходим процесс его синтеза с участием вещества поверхности Марса. На спутнике Юпитера Европе атмосфера практически отсутствует, поэтому механизмы формирования перхлоратов на поверхности с помощью атмосферных процессов

невозможны. В то же время Европа, находящаяся в радиационном поясе Юпитера, подвергается чрезвычайно интенсивному облучению прежде всего энергичными (≥ 1 МэВ) электронами (Paranicas и др., 2009). Из-за отсутствия плотной атмосферы и собственного магнитного поля, поверхность Марса подвергается сильному облучению галактическими (ГКЛ) и солнечными (СКЛ) космическими лучами (Pavlov и др., 2012). С учетом большой дозы облучения предполагается, что главным механизмом синтеза перхлората мог быть радиолиз хлорсодержащего марсианского грунта (Kim и др., 2013). С другой стороны, облучение может приводить также к разрушению перхлоратов (Turner и др., 2016). На настоящий момент механизм глобального синтеза перхлората на Марсе не определен. Был предложен механизм атмосферного синтеза перхлората из диоксида хлора, который образуется при облучении электронами или УФ-фотонами хлорсодержащего льда (Wilson и др., 2016). Эксперименты с хлорсодержащим CO_2 -льдом показали образование хлоратов (ClO_2 , ClO_3^-) при облучении высокоэнергичными электронами (Kim и др., 2013). В условиях наличия атмосферы экспериментально удалось получить анионы хлората (ClO_3^-) и перхлората (ClO_4^-) при облучении УФ-фотонами (Carriger, Kounaves, 2015).

В данной работе исследуются процессы синтеза и разрушения перхлоратов при облучении высокоэнергичными электронами. Наши результаты показывают, что перхлораты могут эффективно образовываться в реголите Марса и поверхностном слое Европы под действием облучения при отсутствии жидкой фазы или атмосферы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Подготовка образцов и облучение

В качестве модельного марсианского грунта и поверхностного слоя льда Европы были исследованы три вида образцов: 1) хлорид натрия (NaCl) и дистиллированная вода, 2) хлорид натрия и диоксид кремния (SiO_2) и 3) хлорид натрия, диоксид кремния и дистиллированная вода. Для исследования эффекта разрушения перхлоратов были приготовлены образцы из чистого перхлората натрия (NaClO_4). Все использованные вещества имели чистоту не менее 98%. Перед подготовкой образцов перхлорат натрия и диоксид кремния помещались в сухожаровой шкаф при $\sim 100^\circ\text{C}$ для удаления остатков сорбированной воды. В качестве первого вида образцов использовался 30% раствор хлорида натрия. Смесь хлори-

да натрия и диоксида кремния готовилась путем добавления раствора хлорида натрия к диоксиду кремния с последующим нагревом в течение 3 ч. в сухожаровом шкафу. Третий вид образцов готовился при смешивании 30% раствора хлорида натрия и диоксида кремния.

Готовые смеси охлаждались до температуры -20°C и помещались в полиэтиленовые пакеты. Толщина и масса всех образцов составляла 2 мм и 1 г соответственно. Толщина образцов выбиралась исходя из глубины проникновения электронов с энергией 0.9 МэВ (табл. 1).

Облучение образцов проводилось в научно-технологическом комплексе “Ядерная физика” Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого с использованием резонансного ускорителя электронов РТЭ-1В. Энергия электронов на выходе ускорителя равна 0.9 МэВ, что позволяет моделировать облучение на поверхности Европы, а также моделировать воздействие вторичных электронов, создаваемых ГКЛ в реголите Марса (Paranicas и др., 2009; Pavlov и др., 2012). Для исследования процесса синтеза и разрушения перхлоратов в безатмосферной среде облучение образцов проводилось в вакуумной камере, подробно описанной ранее (Pavlov и др., 2022).

Облучение образцов проводилось при температуре -50°C и давлении 0.01 мбар. Облучение электронами происходило в сканирующем режиме с потоком электронов $4.5 \times 10^{12} \text{e}^- \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. Во время всего эксперимента температура образцов измерялась датчиком температур с медно-константановыми термопарами (датчик сконструирован в лаборатории масс-спектрометрии ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Россия). После облучения образцы извлекались из вакуумной камеры и транспортировались для дальнейшего анализа. Значения доз облучения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Длина пробега электронов и доза облучения в зависимости от состава образцов^a

Состав образца	Длина пробега электронов, мм	Поглощенная доза, 10^4 Дж cm^{-2}
NaClO_4	2.3	1.6
$\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$ (30% p-p)	3.7	1.0
SiO_2 (90%) + NaCl (10%)	2.7	1.4
SiO_2 (70%) + H_2O (21%) + NaCl (9%)	2.6	1.5

Примечание. ^aДлина свободного пробега и доза рассчитывались с помощью пакета Geant4 (Agostinelli и др., 2003). Результаты расчетов сравнивались с NISTESTAR.

Анализ образцов

Образцы транспортировались при температуре около -78°C (в сухом льду) и далее хранились при -18°C . В связи с высокой гигроскопичностью перхлоратов и возможностью поглощения ими паров воды из воздуха в ходе транспортировки и хранения (Gu и др., 2017), перед анализом все образцы помещались в стеклянные вials и высушивались или выпаривались при 150°C в течение 3 ч. Температура высушивания обусловлена тем, что при нагреве до 150°C происходит дегидратация соединений перхлората (Devlin, Herley, 1987). После высушивания отбирались навески массой ~ 50 мг (для образцов, облучавшихся в виде раствора, и соответствующих контрольных образцов) и ~ 500 мг (для образцов в смеси с песком) с точностью 0.1 мг. Навески помещались в полиэтиленовые стаканы с 50 мл дистиллированной воды.

Анализ полученных растворов проводился с помощью ионометрии (прямой потенциометрии) (Reznicek и др., 2023) с использованием перхлорат-селективного электрода XC-ClO₄-001 (Сенсорные системы, Россия), двухключевого хлор-серебряного электрода сравнения ЭСр-10101/3.5 (НПО Измерительная техника, Россия), заполненного 3.5 М раствором KNO₃, и иономера И-160М (ООО Антех, Беларусь). Перед началом измерений перхлорат-селективный электрод в течение суток выдерживался в 1×10^{-5} М растворе перхлората натрия, затем отмывался дистиллированной водой, согласно инструкциям производителя. Коэффициент селективности электрода в отношении хлорид-ионов составляет 1:1000, в связи с чем для анализа образцов, содержащих хлориды, калибровочные кривые строились в трех вариантах: а) в градиенте концентраций перхлората натрия от 1.63×10^{-1} М (2%) до 8.17×10^{-6} М ($1 \times 10^{-4}\%$); б) в градиенте концентраций хлорида натрия от 1.71 М (10%) до 8.56×10^{-3} М (0.05%); в) в градиенте концентраций перхлората натрия от 8.17×10^{-4} М ($1 \times 10^{-2}\%$) до 8.17×10^{-6} М ($1 \times 10^{-4}\%$) в присутствии 0.1% хлорида натрия. Выбор концентрации хлорида натрия для последнего варианта калибровки обусловлен тем, что концентрация NaCl в исследуемых растворах (с учетом указанных выше навесок, объема раствора и концентрации NaCl в исходных образцах) должна была составлять около 0.1%.

При снятии калибровочных кривых и при анализе образцов перхлорат-селективный электрод и электрод сравнения ополаскивались дистиллированной водой, затем помещались в анализируемый раствор и выдерживались в течение 2 мин., затем фиксировалась разность потенциалов. Далее концентрация перхлората в исследуемых об-

разцах определялась по калибровочным кривым. Коэффициент корреляции калибровочных кривых превышал 0.995. Для оценки ошибки измерений была приготовлена серия растворов перхлората натрия (пять навесок NaClO₄ с массами от 60 до 150 мг были растворены в 50 мл дистиллированной воды), измерена разность потенциалов и проведен расчет концентраций с помощью калибровочной кривой. Относительная ошибка измерений не превышала 2.5%.

Достоверность различий концентраций перхлората определялась с применением U-критерия Манна–Уитни с помощью пакета программ Statistica 7.0 (StatSoft, USA).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В образцах NaClO₄, облученных ускоренными электронами, концентрация перхлорат-ионов достоверно снизилась ($p < 0.05$) и составляла в среднем 93.5% от контрольных значений.

Во всех облученных образцах с NaCl были обнаружены перхлорат-ионы. Разности потенциалов в растворах, полученных из данных образцов, варьировали в диапазоне 180–237 мВ, в то время как разность потенциалов для 0.1% раствора NaCl составляла около 362 мВ. Зафиксированные разности потенциалов не могли быть обусловлены присутствием NaCl, так как даже для 10% раствора хлорида натрия это значение составляло 289 мВ.

Концентрация перхлората натрия в образцах после облучения находилась в пределах от 0.61% до 8.25% (табл. 2). Количество синтезированного перхлората достоверно отличалось между всеми тремя вариантами состава образцов ($p < 0.05$). Наибольшие концентрации NaClO₄ (4.90%–8.25%) обнаруживались в облученном растворе хлорида натрия, наименьшие — в образцах песка с раствором хлорида натрия (0.61%–0.75%). Учитывая молярные массы NaCl и NaClO₄, можно рассчитать долю молекул NaCl, преобразовавшихся в NaClO₄ в ходе облучения. Эта величина изменялась от 3.24% до 13.12% и была наибольшей в растворе NaCl, а наименьшей — в SiO₂ с 30% раствором NaCl. Следует отметить, что полученные значения, вероятно, недооценивают количество разрушенных молекул NaCl, так как нами не учитывались газообразные продукты (в частности ClO₂), а также ионы ClO₂[–] и ClO₃[–], которые, вероятно, также образовывались в ходе эксперимента, как было показано в подобных экспериментах (Carrier, Kounaves, 2015; Kim и др., 2013). Используя значения поглощенной дозы из табл. 1, можно оценить количество синтезированных молекул перхлората на эВ поглощенной энергии электронов (табл. 2). Выход NaClO₄ в растворе NaCl в 3–10 раз превышал выходы в образцах с SiO₂.

Таблица 2. Количество перхлората натрия в облученных образцах

Состав образца	Повторность	Начальная концентрация NaCl, %	Концентрация NaClO_4 после облучения, %	Доля молекул NaCl, преобразованных в NaClO_4 , %	Выход NaClO_4 , 10^{-3} молекулы / эВ
$\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$ (30% p-p)	1	30	5.69	9.05	4.5
	2	30	4.90	7.79	3.9
	3	30	8.25	13.12	6.5
SiO_2 (90%) + NaCl (10%)	1	10	1.34	6.40	1.3
	2	10	1.30	6.22	1.2
	3	10	0.96	4.56	0.9
SiO_2 (70%) + H_2O (21%) + NaCl (9%)	1	9	0.62	3.29	0.6
	2	9	0.75	3.96	0.7
	3	9	0.61	3.24	0.6

ОБСУЖДЕНИЕ

К ключевым результатам экспериментов можно отнести следующие:

1) обнаружение разрушения перхлоратов под действием энергичных электронов;

2) обнаружение эффективного синтеза ионов перхлората при отсутствии жидкой фазы и атмосферы при облучении хлорида натрия в различных матрицах (SiO_2 и водяной лед).

Наши результаты показывают, что порядка 6.5% перхлоратов разрушается при поглощенной дозе 10 эВ на одну молекулу перхлората при температуре 223 К, что соответствует 6.5×10^{-3} разрушенных ионов перхлората на один эВ поглощенной энергии электронов. Ранее процесс разрушения перхлоратов был подробно исследован в экспериментах по облучению электронами чистого гексагидрата перхлората магния ($\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) в вакууме (Turner и др., 2016). Первичными продуктами облучения ионов перхлоратов (ClO_4^-) являются хлораты (ClO_3^-) и атомарный кислород (O). Turner и др. (2016) получили, что $(8.0 \pm 2.5) \times 10^{-3}$ и $(4.6 \pm 1.3) \times 10^{-3}$ ионов перхлората на один эВ деградируют при температурах 160 и 260 К соответственно. Таким образом, наши результаты находятся в хорошем согласии с результатами Turner и др. (2016).

Количество синтезированного перхлората в образцах с NaCl сильно зависит от наличия SiO_2 и льда. В процессе облучения происходит поэтапное окисление хлоридов до ионов перхлоратов (ClO_4^-). Также синтезируются промежуточные продукты: ионы ClO^- , ClO_2^- , ClO_3^- (Carrier, Kounaves, 2015; Kim и др., 2013). Большой выход перхлоратов в образцах с NaCl и H_2O , чем в образцах NaCl и SiO_2 , может быть связан с высокой подвижностью радикалов O в случае воды. Также облученный водяной лед является источником

гидроксильных радикалов OH, которые вносят вклад в реакции окисления. С другой стороны, минеральная компонента играет роль катализатора в реакциях синтеза перхлората (Carrier, Kounaves, 2015). Здесь важно указать, что Carrier и Kounaves (2015) синтезировали перхлорат в камере, моделирующей атмосферу Марса. В наших экспериментах при облучении имели место реакции только в твердой фазе. Высокая подвижность радикалов O и OH в водяном льду при температуре 233 К (Johnson, Quickenden, 1997; Pavlov и др., 2022) может обеспечить эффективный синтез перхлоратов. Kim и др. (2013) обнаружили синтез ClO_2 и ClO_3 при облучении высокоэнергичными электронами хлорсодержащего льда в присутствии CO_2 в условиях высокого вакуума и низких температур, 10–80 К. Однако не были представлены ни доза облучения, ни концентрация синтезированных хлоратов, что делает невозможным количественное сравнение с нашими результатами.

Мощность поглощенной дозы ГКЛ на поверхности современного Марса составляет 0.076 Гр/год, тогда как на глубине 1 м мощность дозы равна 0.036 Гр/год (Hassler и др., 2014). При плотности реголита поверхности Марса $\rho = 2.8 \text{ г/см}^3$ (Hassler и др., 2014) мощность дозы ГКЛ, усредненная по слою в один метр, равна $3.3 \times 10^9 \text{ эВ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. В табл. 3 приведена скорость синтеза перхлората в реголите Марса, рассчитанная на основании полученных нами данных. Согласно работе (Wilson и др., 2016), для получения современного содержания перхлоратов в реголите минимальная скорость синтеза хлорной кислоты (HClO_4) должна быть $7.7 \times 10^3 \text{ молекул см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (в слое 30 см) в предположении, что накопление перхлоратов происходило в течение всего Амазонийского периода ($\approx 3 \times 10^9$ лет). Исходя из данных, представленных в табл. 3, перхлораты могут накапливаться

до современных значений за несколько десятков миллионов лет при облучении потоком ГКЛ.

На Европе мощность поглощенной дозы электронов лежит в диапазоне от ~10⁴ Гр/год на глубине 1 см до ~1 Гр/год на глубине 1 м (Pavlov и др., 2019). Перхлорат натрия и гексагидрат перхлората магния были обнаружены на поверхности Европы преимущественно в восточном полушарии, где происходит наиболее интенсивное облучение, в концентрациях ~ (0.3–0.8)% и (0.6–4.2)% соответственно (King и др., 2022). Хлорсодержащие соли (MgCl₂, NaCl) присутствуют на поверхности Европы в концентрациях <10% (King и др., 2022). Из табл. 3 следует, что на Европе синтез перхлоратов до значений 0.8% может происходить за десятки лет на поверхности (1 см) и сотни тысяч лет на глубине 1 м. Средняя скорость обновления поверхности Европы по оценкам составляет ~20 м за 10⁸ лет (Ir и др., 1998). При данной скорости обновления поверхности и рассчитанной нами скорости образования перхлоратов, концентрации ClO₄ во льду могли бы существенно превышать наблюдаемые значения. Поскольку под действием облучения одновременно с синтезом происходит радиолиз перхлоратов, то при больших дозах вероятно возникновение баланса скорости образования и разрушения. Температура облучения в наших экспериментах значительно превышала температуры, характерные для Европы. Как показано Turner и др. (2016), температура влияет на скорость разрушения перхлоратов. В связи с этим для уточнения скорости синтеза и разрушения на Европе необходимо проведение экспериментов при более низких температурах (≤100 K). Тем не менее полученные нами данные подтверждают существование механизма синтеза перхлоратов на телах Солнечной системы, не имеющих атмосферы, в частности на Европе.

Таблица 3. Скорости синтеза перхлоратов на Марсе и Европе

Состав грунта	Скорость синтеза NaClO ₄ (Марс), молекулы см ⁻³ с ⁻¹	Скорость синтеза NaClO ₄ (Европа ^a), молекулы см ⁻³ с ⁻¹
NaCl + H ₂ O (30% p-p)	(1.3–2.1) × 10 ⁵	(2.4–4.1) × 10 ¹⁰
SiO ₂ (90%) + NaCl (10%)	(3.0–4.3) × 10 ⁴	—
SiO ₂ (70%) + H ₂ O (21%) + NaCl (9%)	(2.0–2.3) × 10 ⁴	—

Примечание. ^a Слой на глубине 1 см с плотностью 1 г/см³ (водяной лед) и мощностью дозы 10⁴ Гр/год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтез перхлоратов возможен непосредственно в реголите Марса и поверхностном слое Европы под действием облучения энергичными электронами и не требует наличия жидкой воды и атмосферы.

Под действием ГКЛ процесс накопления доз облучения, необходимых для достижения наблюдаемых концентраций перхлоратов в поверхностном слое реголита Марса, занимает несколько десятков миллионов лет.

В поверхностном слое льда Европы аналогичные концентрации перхлоратов могут накапливаться в течение от нескольких десятков лет до сотни тысяч лет под действием интенсивного облучения энергичными электронами радиационного пояса Юпитера при наличии достаточного содержания солей во льду.

При больших концентрациях перхлоратов большие дозы облучения приводят к существенному разрушению перхлоратов.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант № 20-02-00470 (в части облучения); Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № 122012400153 (в части ионометрии).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Agostinelli S., Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H., Arce P., Asai M., Axen D., Banerjee S., Barrand G., Behner F., Bellagamba L., Boudreau J., Broglia L., Brunengo A., Burkhardt H., Chauvie S., Chuma J., Chytracek R., Cooperman G., Cosmo G., Degtyarenko P., Dell'Acqua A., Depaola G., Dietrich D., Enami R., Feliciello A., Ferguson C., Fesefeldt H., Folger G., Foppiano F., Forti A., Garelli S., Giani S., Giannitrapani R., Gibin D., Gómez Cadenas J., and 90 co-authors. Geant4 – a simulation toolkit // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2003. V. 506 (3). P. 250–303.

Carrier B.L., Kounaves S.P. The origins of perchlorate in the Martian soil // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42 (10). P. 3739–3745.

Cheptsov V., Belov A., Soloveva O., Vorobyova E., Osipov G., Manucharova N., Gorlenko M. Survival and growth of soil microbial communities under influence of sodium perchlorates // Int. J. Astrobiol. 2021. V. 20 (1). P. 36–47.

Davila A., Willson D., Coates J., McKay C. Perchlorate on Mars: A chemical hazard and a resource for humans // Int. J. Astrobiol. 2013. V. 12 (4). P. 321–325.

Devlin D.J., Herley P.J. Thermal decomposition and dehydration of sodium perchlorate monohydrate // Reactivity of solids. 1987. V. 3 (1–2). P. 75–84.

Glavin D.P., Freissinet C., Miller K.E., Eigenbrode J.L., Brunner A.E., Buch A., Sutter B., Archer Jr. P.D., Atreya S.K., Brinckerhoff W.B., Cabane M., Coll P., Conrad P.G., Coscia D., Dworkin J.P., Franz H.B., Grotzinger J.P.,

- Leshin L.A., Martin M.G., McKay C., and 8 co-authors.* Evidence for perchlorates and the origin of chlorinated hydrocarbons detected by SAM at the Rocknest aeolian deposit in Gale Crater // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2013. V. 118. P. 1955–1973.
- Gu W., Li Y., Tang M., Jia X., Ding X., Bi X., Wang X.* Water uptake and hygroscopicity of perchlorates and implications for the existence of liquid water in some hyperarid environments // *RSC advances*. 2017. V. 7 (74). P. 46866–46873.
- Hassler D.M., Zeitlin C., Wimmer-Schweingruber R.F., Ehresmann B., Rafkin S., Eigenbrode J.L., Brinza D.E., Weigle G., Böttcher S., Böhm E., Burmeister S., Guo J., Köhler J., Martin C., Reitz G., Cucinotta F.A., Kim M.H., Grinspoon D., Bullock M.A., Posner A., Gómez-Elvira J., Vasavada A., Grotzinger J.P., Team M.S., Kemppinen O., and 432 co-authors..* Mars' surface radiation environment measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity Rover // *Science*. 2014. V. 343. id. 1244797.
- Hecht M.H., Kounaves S.P., Quinn R.C., West S.J., Young S.M.M., Ming D.W. and 8 co-authors.* Detection of perchlorate and the soluble chemistry of Martian soil at the Phoenix lander site // *Science*. 2009. V. 325 (5936). P. 64–67.
- Ip W.H., Williams D.J., McEntire R.W., Mauk B.H.* Ion sputtering and surface erosion at Europa // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 829–832.
- Jackson W.A., Davila A.F., Sears D.W.G., Coates J.D., McKay C.P., Brundrett M., Estrada N., Bohlke J.K.* Widespread occurrence of (per)chlorate in the Solar System // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2015. V. 430. P. 470–476.
- Johnson R.E., Quickenden T.I.* Photolysis and radiolysis of water ice on outer Solar System bodies // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102 (E5). P. 10985–10996.
- Kim Y.S., Wo K.P., Maity S., Atreya S.K., Kaiser R.I.* Radiation-induced formation of chlorine oxides and their potential role in the origin of Martian perchlorates // *J. Am. Chem. Soc.* 2013. V. 135 (13). P. 4910–4913.
- King O., Fletcher L.N., Ligier N.* Compositional mapping of Europa using MCMC modeling of near-IR VLT/SPHERE and Galileo/NIMS observations // *Planet. Sci. J.* 2022. V. 3:72. P. 19.
- Ligier N., Poulet F., Carter J., Brunetto R., Gourgeot F.* VLT/SINFONI observations of Europa: New insights into the surface composition // *Astron. J.* 2016. V. 151. id. 163.
- Paranicas C., Cooper J.F., Garrett H.B., Johnson R.E., Sturner S.J.* Europa's Radiation Environment and Its Effects on the Surface // *Europa* / Eds: Pappalardo R., McKinnon W., Khurana K. Tucson: Univ. Arizona Press, 2009. 529 p.
- Pavlov A.A., Vasilyev G., Ostryakov V.M., Pavlov A.K., Mahaffy P.* Degradation of the organic molecules in the shallow subsurface of Mars due to irradiation by cosmic rays // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. id. L13202.
- Pavlov A.K., Belousov D.V., Tsurkov D.A., Lomasov V.N.* Cosmic ray irradiation of comet nuclei: A possible source of cometary outbursts at large heliocentric distances // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2022. V. 511. P. 5909–5914.
- Pavlov A., Cheptsov V., Tsurkov D., Lomasov V., Frolov D., Vasiliev G.* Survival of radioresistant bacteria on Europa's surface after pulse ejection of subsurface ocean water // *Geosciences*. 2019. V. 9. id. 9.
- Reznicek J., Bednarik V., Filip J.* Perchlorate sensing – Can electrochemistry meet the sensitivity of standard methods? // *Electrochimica Acta*. 2023. V. 445. id. 142027.
- Smith M.L., Claire M.W., Catling D.C., Zahnle K.J.* The formation of sulfate, nitrate and perchlorate salts in the Martian atmosphere // *Icarus*. 2014. V. 231. P. 51–64.
- Turner A.M., Abplanalp M.J., Kaiser R.I.* Mechanistic studies on the radiolytic decomposition of perchlorates on the Martian surface // *Astrophys. J.* 2016. V. 820. id. 127.
- Wilson E.H., Atreya S.K., Kaiser R.I., Mahaffy P.R.* Perchlorate formation on Mars through surface radiolysis-initiated atmospheric chemistry: A potential mechanism // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2016. V. 121 (8). P. 1472–1487.

УДК 523.6, 523.34

ПОЛУЧЕНИЕ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ ОБЛАКОВ ИЗ МЕТЕОРИТНОГО ВЕЩЕСТВА, ЕГО АНАЛОГОВ И ИМИТАТОРОВ ЛУННОГО РЕГОЛИТА С ПОМОЩЬЮ МИКРОВОЛНОВОГО РАЗРЯДА

© 2024 г. В. Д. Борзосек^{a, b, *}, Н. С. Ахмадуллина^c, А. С. Соколов^a, Т. Э. Гаянова^a,
А. Д. Резаева^{a, b}, В. Д. Степахин^a, Е. М. Кончечков^a, Д. В. Малахов^a, Е. В. Воронова^a,
И. Р. Нугаев^a, В. П. Логвиненко^{a, b}, А. В. Князев^a, А. А. Летунов^a, Д. Е. Харлачев^a,
Е. А. Образцова^{a, d}, Т. И. Морозова^e, М. А. Зайцев^e, А. В. Ищенко^f, И. А. Вайнштейн^f,
В. И. Гроховский^f, О. Н. Шишилов^{d, g}, Н. Н. Скворцова^a

^a Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

^b Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

^c Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия

^d Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Россия

^e Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

^f Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия

^g МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

*e-mail: borzosekov@fpl.gpi.ru

Поступила в редакцию 15.11.2023 г.

После доработки 14.12.2023 г.

Принята к публикации 13.01.2024 г.

В эксперименте получены плазменно-пылевые облака из вещества метеорита Царев, имитатора лунного реголита LMS-1D и ильменитового концентрата с помощью микроволнового разряда в порошковых средах. Для каждого из образцов зарегистрирована динамика развития разряда и образования плазменно-пылевого облака с последующей релаксацией после окончания микроволнового импульса. По спектрам излучения плазмы и поверхности твердого тела определены температуры газа, электронов и поверхности. Проведенное сравнение фазового и элементного состава исходных образцов и образцов после воздействия плазмы показало, что существенного изменения состава не происходит. Однако результаты сканирующей электронной микроскопии четко указывают на сфероидизацию исходных угловатых частиц и частиц неправильной формы. Также наблюдается появление сферических частиц, размеры которых больше, чем линейные размеры частиц в исходном образце. Полученные результаты указывают на возможность использования таких экспериментов для исследования химических и плазмохимических процессов синтеза и модификации веществ в условиях плазменно-пылевых облаков, встречающихся в космических явлениях.

Ключевые слова: плазменно-пылевое облако, микрометеороид, лунный реголит, метеорит Царев, предбиологический синтез, микроволновый разряд, гиротрон

DOI: 10.31857/S0320930X24030049, EDN: NEEAJM

ВВЕДЕНИЕ

В ходе различных космических процессов образуется многофазная плазменно-пылевая среда (Kuznetsov и др., 2023; Popel и др., 2018; Zakharov и др., 2020; Johnstone, 2013; Goetz и др., 2022). Такие плазменно-пылевые облака могут содержать не только плазму, но и пылевые частицы, капли расплава, нейтральный газ. Удары метеороидов

и микрометеороидов о поверхность астрономического тела (Gerasimov и др., 1998; Popel и др., 2020), движение метеороидов в атмосфере планет (Бронштэн, 1981; Silber и др., 2018) являются процессами, в которых образуется такая многофазная среда.

Существующие пути лабораторного моделирования предполагают как прямые методы

(Mocker и др., 2011; Friichtenicht, 1962; Shu и др., 2012; Semkin и др., 2007; 2009; Hudepohl и др., 1989; Best, Rose, 1999; Igenbergs и др., 1987; Vriecella и др., 2017; Chhabildas и др., 1995; Thornhill и др. 2006; Lexow и др., 2013) моделирования, так и “косвенные” (Helber и др., 2019; Loehle и др., 2017; Blanchard, Cunningham, 1974; Bones и др., 2016; Gómez Martín и др., 2017; Sorokin и др., 2020a; Stöffler, Langenhorst, 1994; Fulvio и др., 2021; Moroz и др., 1996; Grokhovsky и др., 2020; Bezaeva и др., 2010). Прямые методы моделирования основаны на разгоне ударника до скоростей, характерных для метеороидов Солнечной системы, а в косвенных методах воспроизводятся какие-то стадии процессов или условия.

Создание плазменно-пылевых облаков из вещества метеоритов, реголитов или эквивалентных им искусственных смесей в лабораторных условиях позволяет исследовать отдельные вопросы космического выветривания (Prince и др., 2020; Sasaki и др., 2003; Sorokin и др., 2020b), предбиологического синтеза (Managadze, 2003; Zaitsev и др., 2016; Ferus и др., 2020; Martins и др., 2013). Синтез органических веществ из простейших неорганических в условиях плазменно-пылевого облака отличается от других возможных путей предбиологического синтеза наличием большого числа возможных плазмохимических реакций (с атомами и молекулами в возбужденном состоянии, с заряженными частицами, фотолитические реакции под действием ультрафиолетового излучения), а также наличием частиц пыли, которые могут играть роль как центров кристаллизации, так и катализаторов реакций (Parmon, 1999; Gerasimov, Safonova, 2008; Peters и др., 2023; Saladino и др., 2013; 2018; Snytnikov, 2002; 2010).

Заряженная пыль присутствует повсеместно в космосе и атмосфере Земли: в межзвездном веществе, туманностях и облаках, остатках сверхновых, протопланетных дисках, в окрестностях активных ядер галактик, в ионосфере Земли и хвостах метеороидов, в хвостах комет, в атмосферах других планет и в экзосферах безатмосферных тел (спутников и астероидов). На отдельных телах и пылинках могут быть найдены органические соединения.

На пылевых частицах в молекулярных слоях протопланетных дисков могли происходить сложные химические реакции и образовываться органические соединения, в том числе — простые аминокислоты (например, глицин). Можно ожидать развития процессов синтеза органических соединений в переходных областях протопланетных дисков, где еще высоки концентрации заряженных частиц (в том числе заряженной пыли), но вместе с тем присутствуют плотные молекулярные области. Также предпосылками для раз-

вития данных процессов могут быть вспышки звезд, которые дают высокое излучение, проходящее в более плотные слои, и высыпания зарядов. В итоге рядом оказываются области с противоположно заряженными частицами, ионами и ион-радикалами, которые притягиваются и интенсивнее вступают в химические реакции.

В небольших метеоритах (или в верхних частях ядра кометного вещества), в которых не происходило нагрева внутренних пород, соединения могут существовать в таком виде, в каком они осаждались на поверхности пылинок в процессе формирования планет в протопланетном диске или образовывались на поверхности пыли в результате химических реакций. Это подтверждается наблюдениями. Во время метеорного потока Леониды в 2001 г. были собраны данные аппаратом Leonid MAC, которые показали, что метеорные тела с размерами 50 мкм — 10 см богаты соединениями CN (Jenniskens и др., 2004), а также H_2 , O, H, H_2O , CO_2 , CO, CH_4 , CH, C_2HO (Jenniskens, 2001). В спектрах метеорных потоков наблюдались полосы O и N_2 в разных возбужденных состояниях.

Кометы являются источником метеорных тел, которые могут попасть в атмосферу Земли и служить триггерами для предбиологического синтеза органических веществ и для зарождения жизни. Кометы и порождаемые ими мелкие метеорные тела практически не испытывали термальный метаморфизм, и в их составе могли сохраниться более сложные вещества, синтезированные на пылевых частицах во время образования планет (Vasyunin и др., 2008). При прохождении метеорным телом атмосферы Земли в плазменно-пылевом хвосте метеороида создаются высокие температуры и концентрации частиц, что оказывается благоприятными условиями для быстрого протекания ряда химических реакций. Вместе с тем быстрая термическая “закалка” продуктов синтеза может благоприятствовать сохранению синтезированных органических веществ.

Известно, что азот — эссенциальный элемент многих органических соединений, необходимых для жизни земных организмов. Такими соединениями являются азотистые основания (строительные блоки нуклеиновых кислот и АТФ и др.) и аминокислоты (структурные элементы пептидов, белков и т. д.). Вместе с тем газообразный азот (преобладающий компонент земной атмосферы) довольно химически инертное вещество. Но преобразованной кинетической энергии метеороида хватает, чтобы при взаимодействии атмосферных газов и паров (N_2 , CO_2 , H_2O ,) с простыми и сложными веществами, а также отдельными функциональными группами веществ, присутствующих в метеоритах (C, N, H, CN, H_2O и т. д.), получи-

лись такие соединения, как HCN, NO, в условиях высоких температур — азотистые основания, серо- и фторсодержащие соединения и т. д.

В наших исследованиях по задачам синтеза микро- и наночастиц в микроволновом разряде в смесях порошков металл/диэлектрик (Gayanova и др., 2023; Skvortsova и др., 2021a; 2023a; Batanov и др., 2013; Akhmadullina и др., 2019; Sokolov и др., 2023) мы получаем плазменно-пылевые облака даже в условиях атмосферного давления рабочего газа. Такую постановку эксперимента мы использовали и для создания облака частиц из порошковых образцов, повторяющих химический состав лунного реголита (Skvortsova и др., 2017; 2019; 2021b; 2023b; Batanov и др., 2022; Kachmar и др., 2021). В облаке, содержащем плазму, испарившееся вещество, капли расплава, частицы пыли, температура газа порядка 5000 К, а плотность плазмы составляет $\sim 10^{14}$ см⁻³. В ходе плазменного воздействия образуются новые вещества и фазы, происходят морфологические изменения частиц пыли. При этом процесс нагрева быстрый (< 50 мкс), поскольку связан с развитием низкорогового разряда на контактах металл-диэлектрик либо полупроводник-диэлектрик (Batanov и др., 2004; Batanov, Kossyi, 2015), а не с непосредственным нагревом веществ в микроволновом поле (Вуков и др., 2001; Vodop'yanov и др., 2017; Rybakov и др., 2006; 2013; Rybakov, Buyanova, 2018; Egorov и др., 2010). Непосредственный нагрев веществ в микроволновом поле является относительно медленным процессом даже с учетом возможного развития тепловой неустойчивости. Вероятность инициации микроволнового пробоя в смесях порошковых образцов зависит от близости к оптимуму размера проводящих частиц (соответствует толщине скин-слоя), доли проводящих частиц в смеси, интенсивности микроволнового излучения.

При использовании в экспериментах по микроволновому разряду в смесях порошков в качестве исходных смесей минералогических образцов, характерных для космических тел, становится возможным моделирование плазменно-пылевых сред, образующихся, например, при ударе микрометеороида о поверхность безатмосферного тела или при движении метеороида в атмосфере планеты. Причем такое моделирование позволит воссоздать многофазную среду с характерными для нее процессами превращений и синтеза веществ.

В представляемой работе мы использовали в экспериментах в качестве исходных веществ три типа образцов: 1) ильменитовый концентрат, поскольку ильменит часто выступает фазой, содержащейся в лунном реголите; 2) имитатор лунной пыли LMS-1D (Lunar mare simulant —

dust) (Long-Fox, Britt, 2023; Madison и др., 2022; Stockstill-Cahill и др., 2021; 2022) как образец, повторяющий по минералогическому составу и распределению частиц по размерам реголит лунных морей (Флоренский и др., 1975; Slyuta, 2014; Heiken и др., 1991; NASA Lunar sample and photocatalog; Виноградов, 1974; Барсуков, Сурков, 1979; Барсуков, 1980), а точнее, его самую мелкую фракцию — лунную пыль (Кузнецов и др., 2016; Zakharov и др., 2020; Park и др., 2006); 3) вещество метеорита Царев (обыкновенный хондрит L5) (Семенова и др., 1984; Мигдисова и др., 1982; Барсукова и др., 1982; Slyuta, 2017) как пример оригинального вещества космической природы со сложным минералогическим составом. Отдельно основные результаты экспериментов с веществом метеорита Царев нами уже были представлены в (Akhmadullina и др., 2023).

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве источника линейно поляризованного микроволнового излучения с длиной волны $\lambda = 4$ мм (частота $f = 75$ ГГц) используется гиротрон (Litvak и др., 2021). В экспериментах используются импульсы длительностью до 10 мс и мощностью до 450 кВт. Микроволновое излучение на выходе гиротрона представляет собой гауссов пучок. Этот пучок от гиротрона до образца передается через квазиоптическую систему фокусирующих зеркал (рис. 1). В месте расположения образца диаметр микроволнового пучка составляет 5 см, что обеспечивает средние интенсивности электромагнитной волны до 20 кВт/см².

Исследуемый порошковый образец размещается горизонтально тонким слоем (1–2 мм) в виде пятна диаметром 4–5 см на поверхности кварцевого диска с диаметром 8 см. Для ограничения разлета и сбора вещества в процессе эксперимента на кварцевый диск (толщина 6–8 мм) вертикально и соосно с ним устанавливается тонкостенная кварцевая трубка диаметром 7 см и высотой до 10 см. Исследуемый образец в сборке с кварцевым диском и кварцевой трубкой помещается в вакуумируемый (до 10^{-2} торр) плазмохимический реактор (рис. 1) так, что центр порошкового образца совпадает с осью микроволнового пучка. Плазмохимический реактор имеет снизу и сверху прозрачные для микроволнового излучения кварцевые окна. Микроволновое излучение подается в плазмохимический реактор снизу вверх, т. е. проходит через слой порошка, а разряд будет возникать на верхней открытой поверхности порошкового образца. Это возможно, поскольку начальный (при нормальных условиях) коэффициент поглощения микроволнового излучения не превышает 30%.

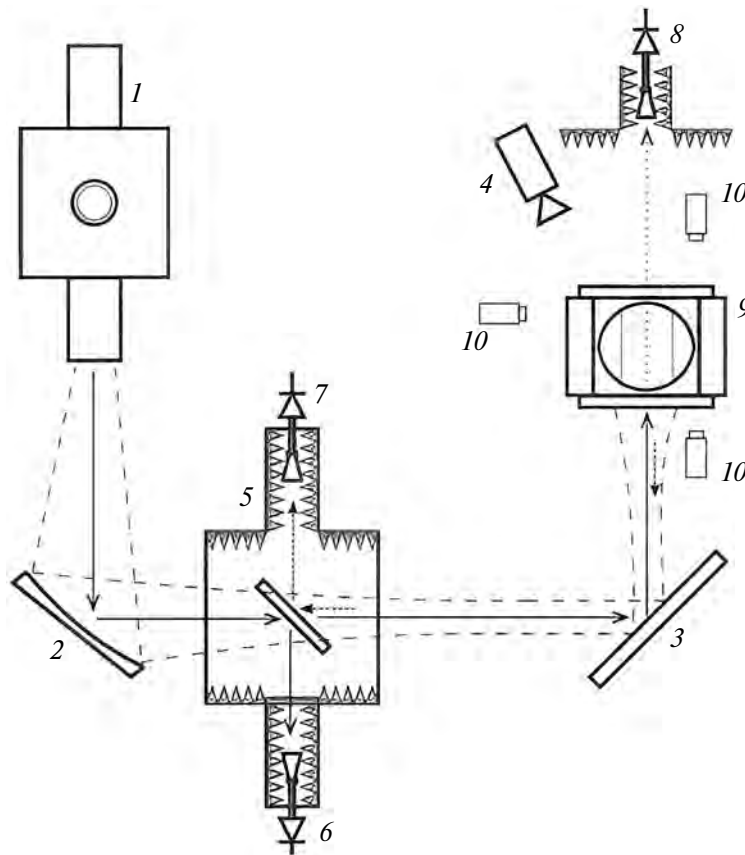


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – гиротрон, 2 – фокусирующее зеркало квазиоптического тракта, 3 – плоское зеркало, 4 – высокоскоростная камера Phantom VEO 710L, 5 – квазиоптический СВЧ-ответвитель, 6–8 – детекторы падающего отраженного и прошедшего микроволнового излучения, 9 – плазмохимический реактор, 10 – оконечные линзы передающих световодов спектрометров Avantes AvaSpec.

Для оценки величины и динамики коэффициента поглощения микроволнового излучения в порошковом образце и плазменно-пылевом облаке используется система балансных микроволновых измерений (рис. 1). С временным разрешением 200 нс регистрируется уровень подаваемой микроволновой мощности, уровень отраженного излучения (сумма отражений от стационарных объектов и плазменно-пылевого облака) и уровень излучения, прошедшего через порошковый образец и плазменно-пылевое облако.

Регистрация спектров излучения плазмы и поверхностей твердых тел позволяет определять: температуру электронов T_e (по относительной интенсивности линий металлов); вращательную температуру газа T_r (по полосам молекулы TiO), которая максимально близка к поступательной температуре в условиях микроволновых разрядов; температуру поверхности твердого тела T_s (по континууму излучения в виновской области спектра), которая соответствует температуре поверхности порошкового образца. Линии обзора спектрометров имеют три характерных направления (рис. 1): сверху – луч проходит через

плазменно-пылевое облако и упирается в верхнюю поверхность порошкового образца; сбоку – луч проходит сквозь плазменно-пылевое облако параллельно поверхности порошкового образца; снизу – луч проходит через весь слой порошкового образца. Всего в исследованиях используется несколько спектрометров с разной полосой обзора и спектральным разрешением (AvaSpec-3648-U80: диапазон 371–920 нм, разрешение 0.36 нм; AvaSpec-ULS4096-CL-2-EVO 2109527U2: диапазон 219–381 нм, разрешение ~0.1 нм; 2109528U2: диапазон 379–521 нм, разрешение ~0.1 нм; AvaSpec-ULS2048CL-EVO 210952U1: диапазон 520–739 нм, разрешение ~0.25 нм) (Sokolov и др., 2023).

Динамика процессов развития микроволнового разряда и эволюции плазменно-пылевого облака регистрируется высокоскоростной видеокамерой Phantom VEO 710L (монохромная, 1280×800 пикселей, 7400 кадр/с, 680000 кадр/с при разрешении 64×8 пикселей, минимальное время экспозиции 1 мкс, светочувствительность сенсора ISO Mono 6400D, динамический диапазон 12 бит), которая располагается над плазмохимическим реактором (рис. 1).

ОПИСАНИЕ ОБРАЗЦОВ

Ильменитовый концентрат

Был приобретен коммерчески доступный ильменитовый концентрат в виде порошка с размерами частиц не более 100 мкм. В документации, предоставляемой поставщиком, указан минеральный состав (ильменит 95%, рутил 3%, циркон 0.4%) и элементный состав (табл. 1), полученный с помощью рентгенофлуоресцентного анализа. Ильменитовый концентрат измельчался посредством перетирания в агатовой ступке в течение 10 мин., и 1 г материала был использован в качестве образца в эксперименте без добавления дополнительного металлического порошка. Как упоминалось выше, низкочастотный микроволновый пробой происходит в смеси порошков металла и диэлектрика (обычно необходима массовая доля металла от 5%) либо полупроводника и диэлектрика. Ильменит же обладает полупроводниковыми свойствами, поэтому изначально мы предполагали, что микроволновой разряд сможет развиваться в нем без добавок. Для подготовленно-

го образца ильменита были получены микрофотографии рис. 2 и рис. 3. Измерения проводились с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Zeiss Merlin, оборудованного приставкой для рентгеновского микроанализа Oxford Instruments INCAx-act. Для получения изображений было использовано ускоряющее напряжение 10 кВ, что позволило одновременно получать достаточно качественные изображения материалов и проводить измерения с помощью рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии (РЭДС). Элементный состав проанализированных участков в целом соответствует заявленному поставщиком. Частицы имеют неправильную форму, в некоторых случаях с выделяющимися острыми ребрами, размер частиц достигает 100 мкм.

Имитатор лунной пыли LMS-1D

Используемый в эксперименте имитатор лунной пыли LMS-1D был произведен компанией ExolithLab (США). Имитатор повторяет по минералогическому составу (табл. 2), элементному составу (табл. 3) и распределению частиц по размерам пыль лунных морей. Элементный состав в табл. 3 получен с помощью рентгенофлуоресцентного анализа производителем. Состав и распределения частиц по размерам предоставлены

Таблица 1. Элементный состав образца ильменитового концентрата

№ п/п	Элемент	Доля, %
1	TiO ₂	53.9
2	Fe ₂ O ₃	41.7
3	SiO ₂	1.5
4	SO ₃	1.1
5	MnO	0.6
6	Al ₂ O ₃	0.6
7	ZrO ₂	0.2
8	P ₂ O ₅	0.2
9	CaO	0.1
10	NbO	0.1

Таблица 2. Минералогический состав имитатора лунной пыли LMS-1D

№ п/п	Минералы и породы	Доля (масс.), %
1	Пироксен	32.8
2	Базальт, содержащий стекло	32.0
3	Анортозит	19.8
4	Оливин	11.1
5	Ильменит	4.3

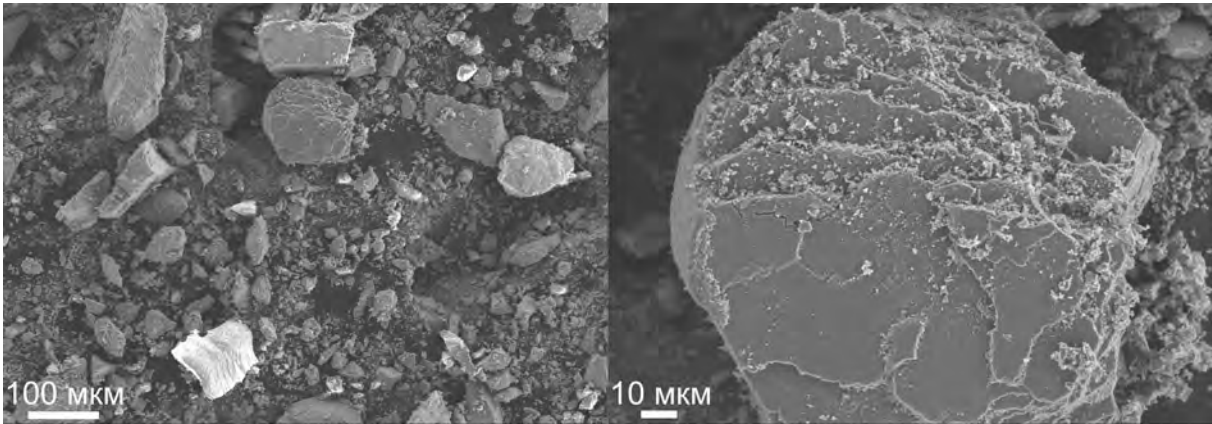


Рис. 2. Микрофотографии подготовленного образца ильменитового концентрата.

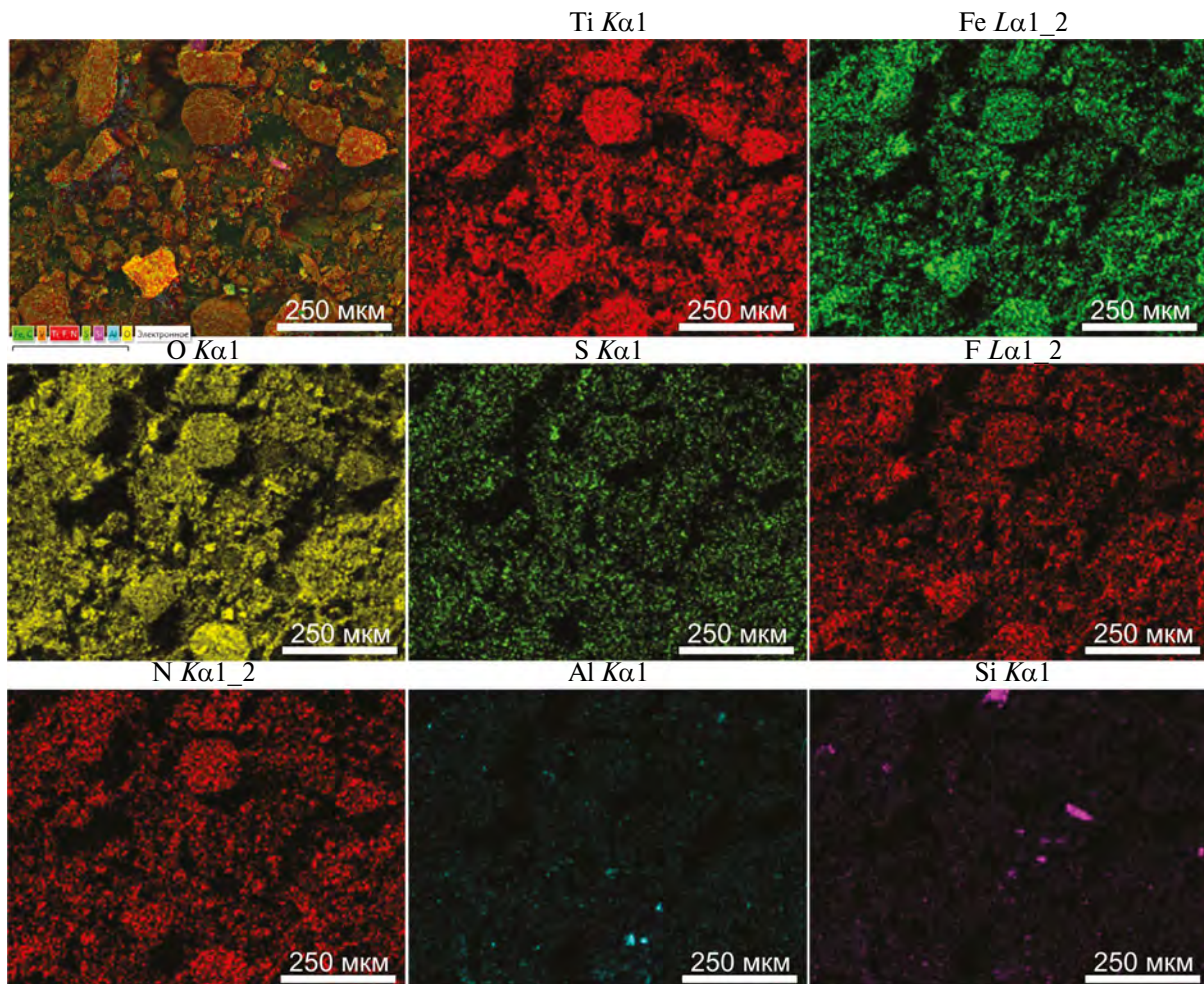


Рис. 3. Микрофотография подготовленного образца ильменитового концентрата с наложенными многослойными картами распределения элементов и карты распределения отдельных элементов. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи.

Таблица 3. Элементный состав имитатора лунной пыли LMS-1D, полученный с помощью рентгенофлуоресцентного анализа производителя (ExolitLab)

№ п/п	Оксид	Доля (масс.), %
1	Si O ₂	46.9
2	MgO	16.8
3	Al ₂ O ₃	12.4
4	FeO	8.6
5	CaO	7.0
6	TiO ₂	3.6
7	Na ₂ O	1.7
8	K ₂ O	0.7
9	MnO	0.2
10	P ₂ O ₅	0.2

производителем. Диапазон размеров частиц лежит в пределах 0.04–32 мкм с медианным размером 4 мкм. При приготовлении образца для эксперимента к LMS-1D добавлялось 10% (по массе) металлического магния (размер частиц не более 75 мкм). Такая добавка необходима для инициации микроволнового пробоя, поскольку лунный реголит, а значит и его имитатор, представляет собой в основном композицию диэлектрических материалов без включений нейтральных металлов. Стоит отметить, что нанокластерное железо (Taylor и др., 2001; Basu, 2005), которое в лунной пыли образуется, в частности, термовосстановительным путем при прохождении ударной волны при ударах микрометеоритов (Sorokin и др., 2020b), в используемом имитаторе отсутствует. А нанокластерное железо — характерный продукт космического выветривания лунного реголита. Его наличие могло бы привести к возникновению низкотокового микроволнового пробоя в имитаторе и без необходимости добавления порошка металла. После приготовления смеси

LMS-1D с 10% порошка металлического магния полученный образец был перетерт в ступке для гомогенизации и разбития агломератов. Мы получили микрофотографии РЭМ нескольких участков (рис. 4), наложенные на них многослой-

ные карты распределения элементов и карты распределения элементов по отдельности (рис. 5). Элементный состав оказался в рамках заявленного производителем. Добавленные частицы нейтрального магния уверенно обнаруживаются

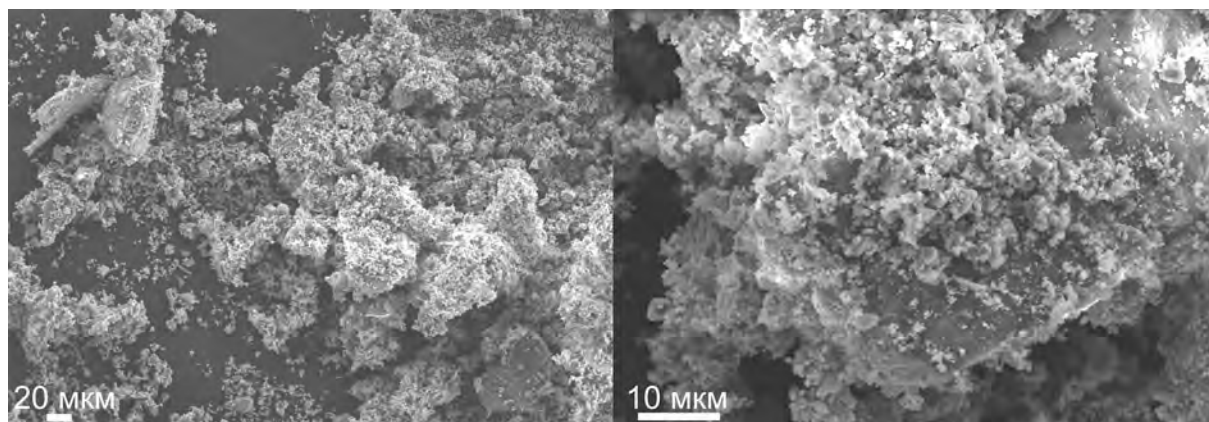


Рис. 4. Микрофотографии подготовленного образца имитатора лунной пыли LMS-1D с добавлением 10% металлического магния.

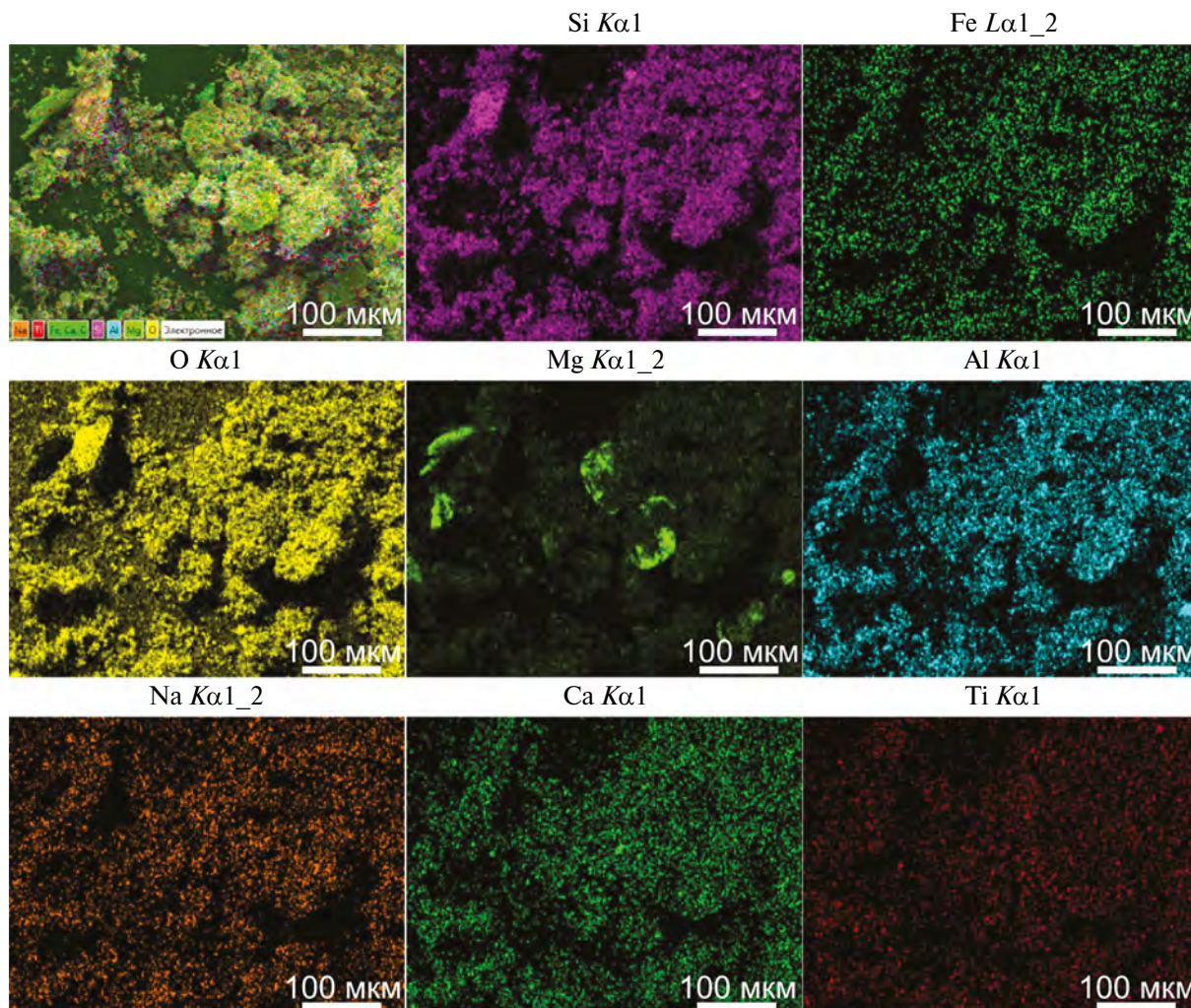


Рис. 5. Микрофотография подготовленного образца имитатора лунной пыли LMS-1D с добавлением 10% металлического магния с наложенными многослойными картами распределения элементов и карты распределения отдельных элементов. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи.

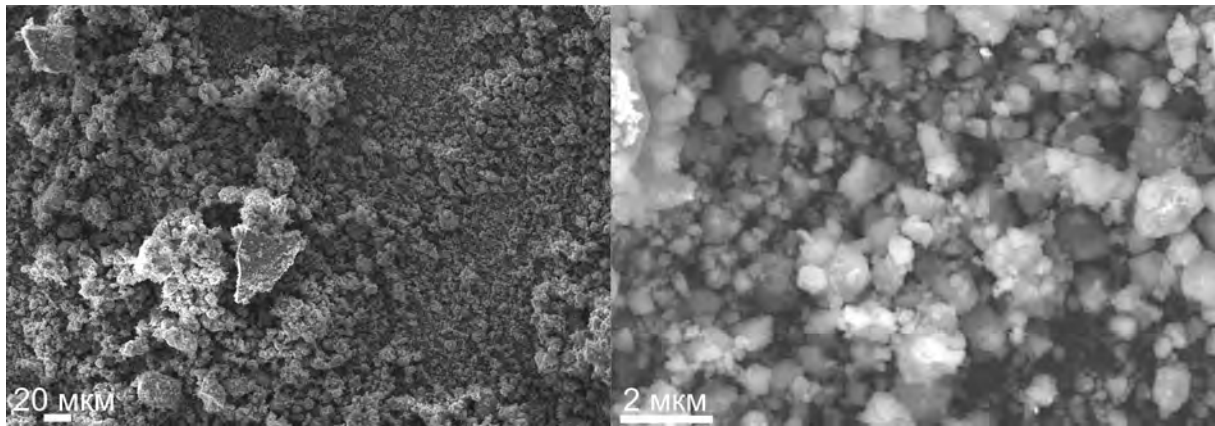


Рис. 6. Микрофотографии подготовленного образца вещества метеорита Царев, полученного после размолта на шаровой мельнице.

на микрофотографиях. Частицы имитатора лунной пыли имеют неправильную форму, в некоторых случаях с выделяющимися острыми ребрами, размер частиц достигает 100 мкм. Частицы малых размеров преимущественно образуют агломераты, а также покрывают поверхность более крупных частиц, что затрудняет идентификацию и описание формы последних. В образце не обнаруживаются стеклянных частиц сферической формы, присутствие которых характерно для лунного реголита (Slyuta, 2014; Popel и др., 2020).

Вещество метеорита Царев

Минералогический и элементный состав метеорита Царев, представляющего собой хондрит петрографического типа L5, был изучен ранее (Семенова и др., 1984; Мигдисова и др., 1982; Барсукова и др., 1982; Oshtrakh и др., 2008; 2013a; 2013b; Maksimova и др., 2014; 2017; 2018). Основными фазами являются оливин, ортопироксен, троилит, клинопироксен, металлическая фаза представлена в основном сплавом железа, никеля и кобальта.

Предоставленный нам образец весом 102 г был предварительно расколот на несколько частей, которые затем были размолоты в шаровой мельнице Fritsch Pulverisette 7 (в стакане из карбида вольфрама с использованием шариков из карбида вольфрама). Помол осуществляли при 600 об/мин 2 раза по 10 мин.

Размер частиц вещества метеорита после размолта, измеренный с помощью метода динамического рассеяния света, лежит в диапазоне 0.2–19.7 мкм. Микрофотографии (рис. 6), полученные на РЭМ, в целом подтверждают такие размеры. Частицы имеют неправильную форму, в некоторых случаях с выделяющимися острыми ребрами. Стеклянных частиц сферической формы в образце не обнаружено. Частицы больших

размеров представляют собой в основном агломераты более мелких частиц.

В пробах вещества, исследованных с РЭМ и методом РЭДС, не обнаружено отдельных частиц железа или другого металла. Карты распределений элементов представлены на рис. 7, а элементный состав для отдельной пробы представлен в табл. 4. Состав в пределах ожидаемого, однако определить долю кобальта в образце не удалось в пределах погрешности метода. Наличие никеля и большое содержание железа указывают на то, что, несмотря на невозможность обнаружить на микрофотографиях отдельные частицы металлов, железоникелевые сплавы могут присутствовать в образце. Это нам дало возможность предположить, что самого вещества метеорита Царев будет достаточно для инициации микроволнового пробы и не потребуются добавка дополнительного порошка металла.

Таблица 4. Элементный состав пробы вещества метеорита Царев

№ п/п	Элемент	Доля (масс.), %
1	C	4.67
2	O	39.85
3	Na	0.58
4	Mg	11.72
5	Al	1.09
6	Si	14.46
7	S	1.93
8	Cl	0
9	Ca	1.38
10	Fe	22.10
11	Co	0
12	Ni	2.23

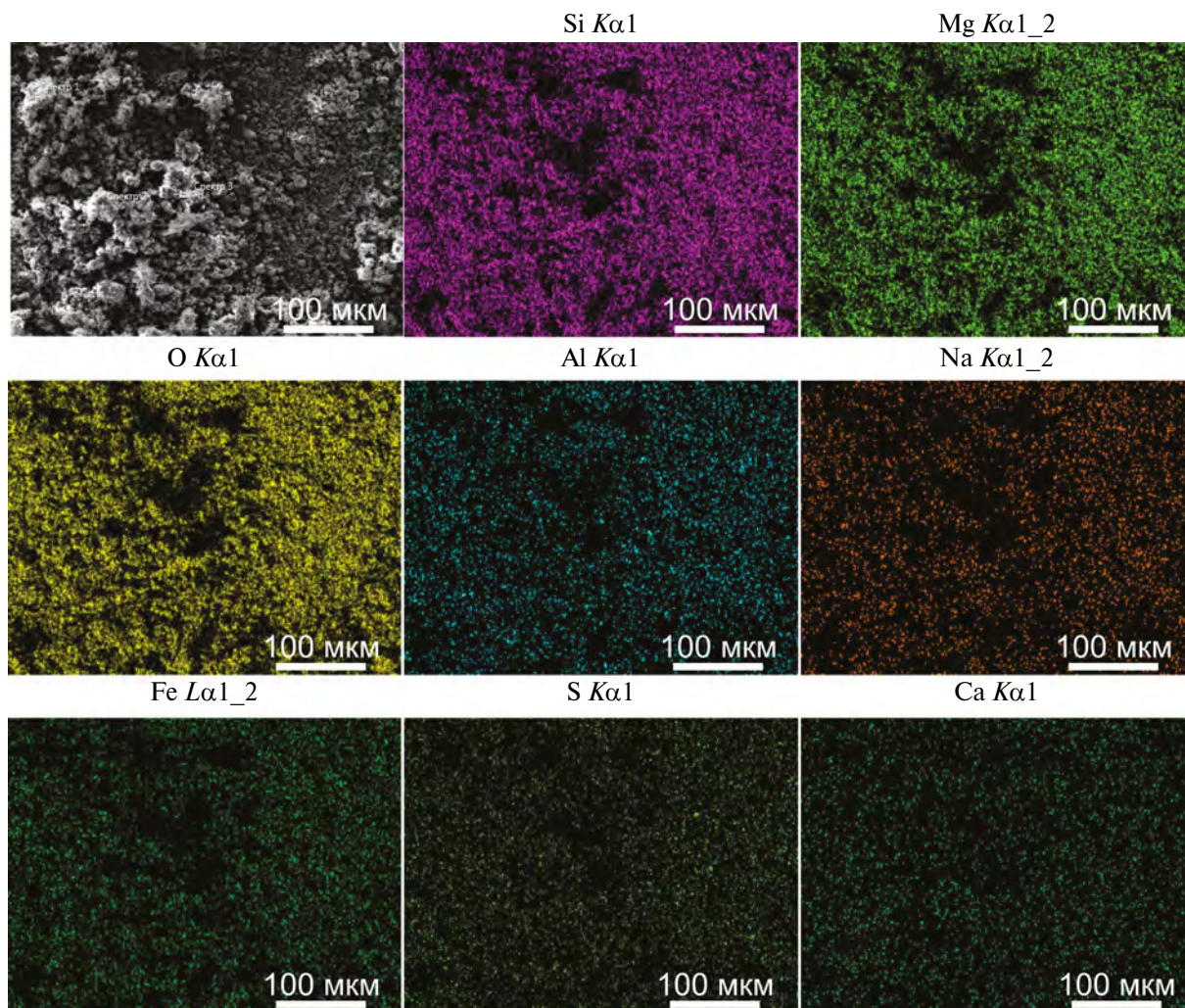


Рис. 7. Микрофотография вещества метеорита Царев, полученного после размолла на шаровой мельнице, и карты распределения элементов. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи.

Проведенные нами в (Akhmadullina и др., 2023) исследования фазового состава образца вещества метеорита выявили только основные фазы в виде оливина и ортопироксена. Обнаружению остальных фаз методом рентгенофазового анализа (РФА) мешает их малое количество (содержание меньше 3% по объему) и низкая кристалличность для ряда фаз.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Ильменитовый концентрат

Рабочим газом в эксперименте являлся воздух атмосферного давления. Мощность микроволнового излучения составляла 300–400 кВт, а длительности импульсов 6–8 мс. Образец испытал воздействие пяти микроволновых импульсов с суммарной энергией 11.4 кДж. Разряд в порошковом образце ильменитового концентрата инициировался практически сразу на фронте

(~100 мкс) микроволнового импульса. Фотографии образца до и после воздействия разряда приведены на рис. 8.

Развитие разряда в порошковом образце сопровождается радиальным расширением плазменного образования над образцом до размеров порядка ширины микроволнового пучка. Это более длительный (0.5–1 мс) по сравнению с первичным пробоем процесс. В течение микроволнового импульса плазменно-пылевое образование обладает наибольшей температурой и интенсивностью свечения (рис. 9, кадр на 5.35 мс), визуально наблюдается разлет частиц в объем реактора. После окончания микроволнового импульса (рис. 9, кадр на 18.3 мс) интенсивность свечения плазменно-пылевого образования начинает спадать. В условиях атмосферного давления рабочего газа существующая в течение микроволнового импульса концентрация плазмы ($\sim 10^{14}$ см⁻³, измерялась ранее по штарковскому уширению линии водорода H_α в экспериментах с добавлением

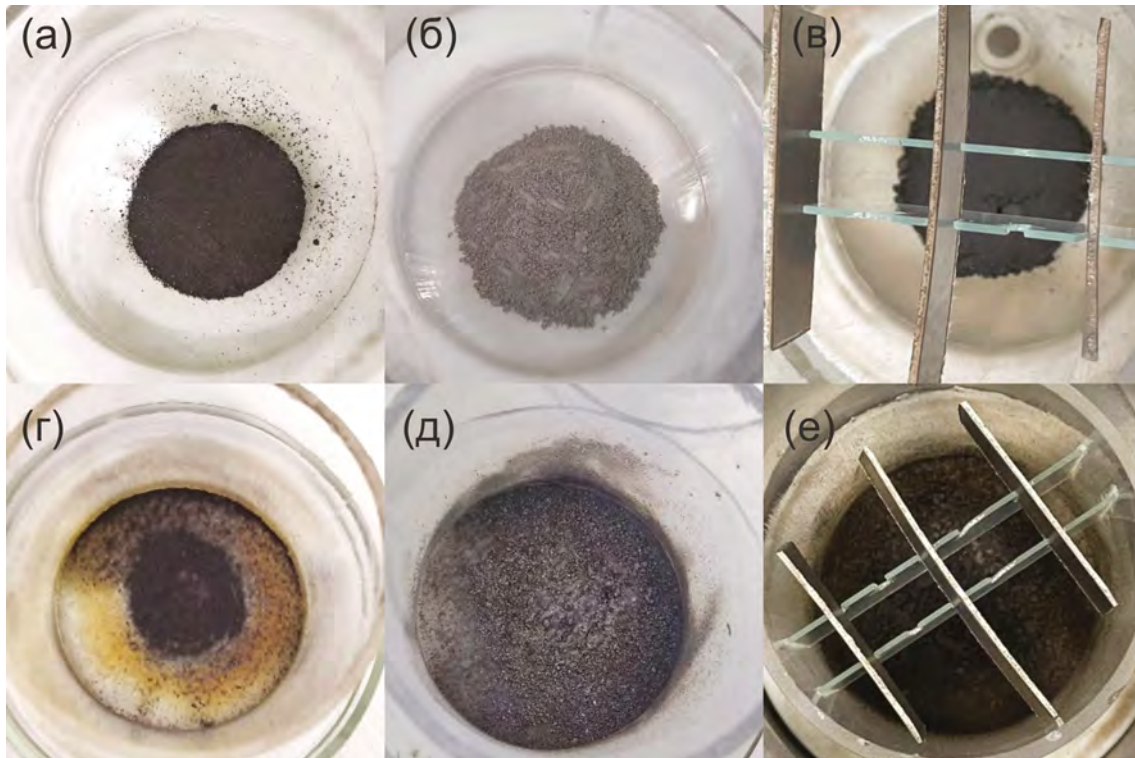


Рис. 8. Фотографии образцов, размещенных на кварцевой подложке внутри кварцевой трубки: (а) — ильменитовый концентрат до воздействия разряда; (б) — имитатор лунной пыли LMS-1D с добавлением порошка металлического магния до воздействия разряда; (в) — вещество метеорита Царев до воздействия разряда; (г) — ильменитовый концентрат после воздействия разряда; (д) — имитатор лунной пыли LMS-1D с добавлением порошка металлического магния после воздействия разряда; (е) — вещество метеорита Царев после воздействия разряда. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи.

небольшого процента водородосодержащих примесей) должна за время порядка 1–2 мс спадать на несколько порядков (Райзер, 2009). Поэтому кадр высокоскоростной камеры на 18.3 мс (рис. 9) соответствует уже газопылевому облаку, а свечение вызвано тепловым излучением нагретого газа и отдельных пылевых частиц.

В спектрах излучения (рис. 10), зарегистрированных обзорным спектрометром (Avantes AvaSpec-3648-U80, спектральный диапазон 371–920 нм, разрешение 0.36 нм), линия обзора которого направлена снизу вверх и проходит через

весь слой порошкового образца, зарегистрированы линии нейтрального железа Fe I, нейтрального титана Ti I, иона титана Ti II, молекулярные полосы TiO, FeO, а также линии примесей (Na, Li, K). Данный спектр позволяет определить температуру теплового излучения по континууму в виновской области спектра (рис. 11) (Voropova и др., 2021). Очевидно, что в тепловом излучении при такой линии обзора будет преобладать излучение твердого тела, а не плазмы или газа в плазменно-пылевом облаке. Поскольку энергии в импульсе микроволнового излучения (до 3 кДж)



Рис. 9. Кадры развития микроволнового разряда в образце ильменитового концентрата. Время начала кадра (миллисекунды) от момента пробоя указано на каждом кадре в левом верхнем углу. Время экспозиции кадра 100 мкс. Мощность микроволнового излучения 300 кВт, длительность импульса микроволнового излучения 8 мс.

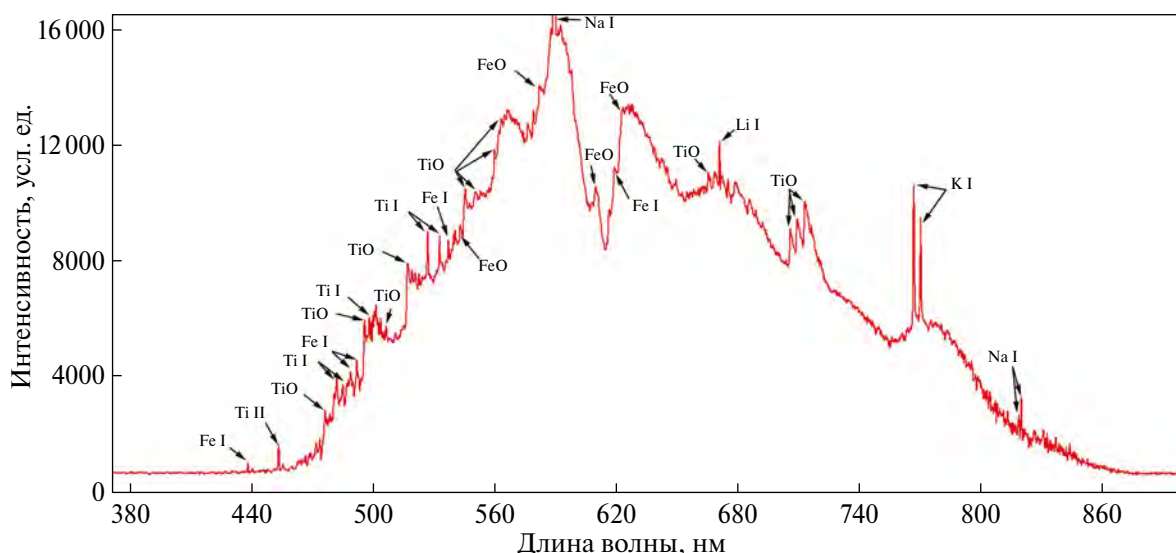


Рис. 10. Спектр излучения в эксперименте с созданием плазменно-пылевого облака в порошковом образце ильменитового концентрата в течение длительности микроволнового импульса.

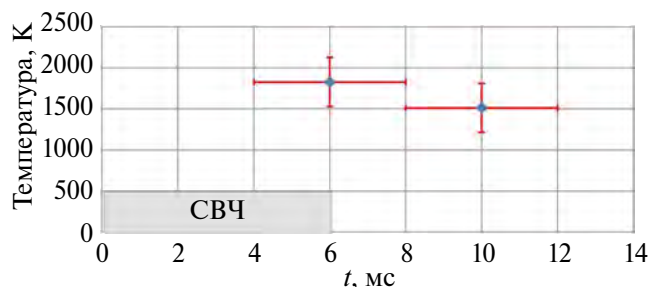


Рис. 11. Динамика температуры поверхности порошкового образца ильменитового концентрата. Длительность микроволнового импульса отмечена серым прямоугольником.

принципиально не хватит, чтобы нагреть всю массу (1 г) образца до измеряемых в эксперименте температур 1500–3000 К, то эта температура характеризует тонкий поверхностный слой, в котором и происходит основное взаимодействие частиц образца с плазмой и микроволновым излучением.

Вращательная температура газовой компоненты плазменно-пылевого облака определялась по молекулярной полосе γ -TiO (Hermann и др., 2001) в спектре, полученном со спектрометром AvaSpec-ULS2048CL-EVO (210952U1: диапазон 520–739 нм, разрешение ~ 0.25 нм), обладающим лучшим разрешением, и линия обзора которого проходила над поверхностью порошкового образца параллельно. Вычислению вращательных температур мешает наличие теплового континуума, поэтому вычисленное значение имеет значительную погрешность $T_r = 5500 \pm 1500$ К.

Более детальные спектры снимались со спектрометром AvaSpec-ULS4096-CL-2-EVO (2109527U2: диапазон 219–381 нм, спектральное разрешение ~ 0.1 нм; 2109528U2: диапазон

379–521 нм, спектральное разрешение ~ 0.1 нм). Температура электронов вычислялась по относительной интенсивности пар линий металлов (две пары линий Fe I 396.23 нм и 407.15 нм, 396.23 нм и 438.35 нм) в предположении, что существует равновесие между заселенностью некоторых электронных уровней элементов в газовой фазе и температурой электронного газа (Лохте-Хольтгрёвен, 1971), с использованием

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1 g_1 \lambda_2}{A_2 g_2 \lambda_1} \exp\left(-\frac{E_1 - E_2}{kT}\right), \quad (1)$$

где I — интенсивность линии, A — вероятность перехода, g — коэффициент вырождения, λ — длина волны, E — энергия верхнего уровня перехода, T — температура, k — постоянная Больцмана. Индексы 1 и 2 относятся к двум различным линиям одного элемента.

Полученная температура в 5000 К оказывается меньше среднего значения вращательной температуры, что может указывать на некоторые ошибки в допущениях используемых методов расчета или на неравномерность распределения температуры в плазменно-пылевого облаке.

Для получения РЭМ микрофотографий (рис. 12 и рис. 13) и карт распределения элементов (рис. 14 и рис. 15) по РЭДС пробы вещества ильменитового концентрата после воздействия микроволнового разряда отбирались как из основной массы вещества на кварцевом диске (рис. 12), так и с внутренних стенок кварцевой трубки (рис. 13). В пробе из основной массы вещества преобладают частицы с угловатой формой, как в исходном образце, но появилось и значительное количество сферических частиц. Сфероидизация частиц является характерным процессом плазменного воздействия

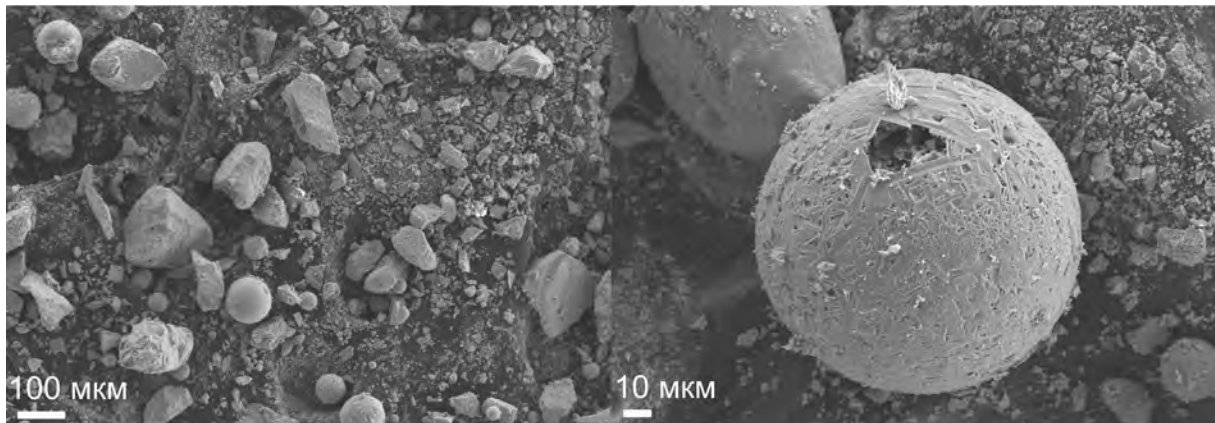


Рис. 12. Микрофотографии ильменитового концентрата после воздействия микроволнового разряда. Проба взята из основной массы вещества на кварцевом диске.

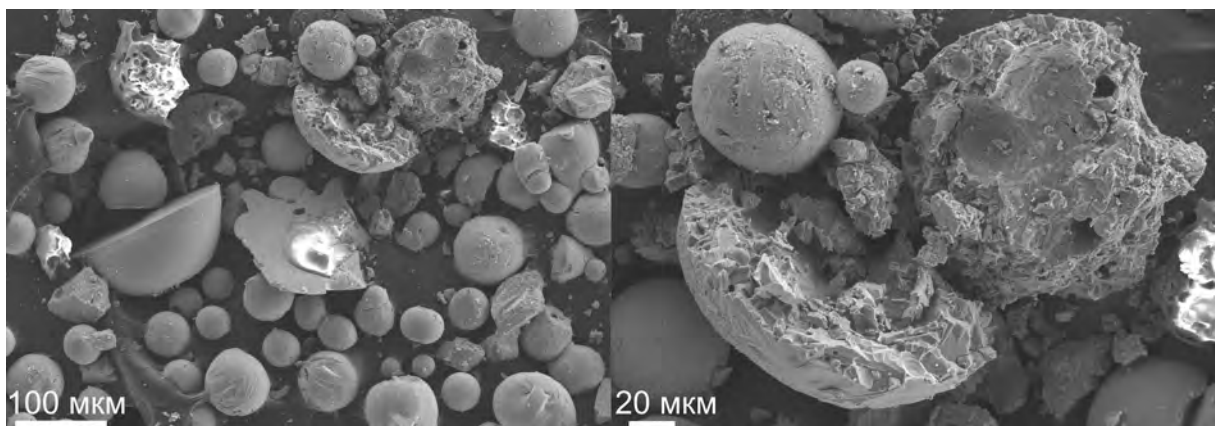


Рис. 13. Микрофотографии ильменитового концентрата после воздействия микроволнового разряда. Проба взята с внутренних стенок кварцевой трубки.

(Самохин и др., 2019; Károly, Szépvölgyi, 2005). Сферические частицы имеют негладкую поверхность и пористую структуру. На крупных частицах (>10 мкм) осело некоторое количество более мелких (~ 1 мкм) частиц. Судя по картам распределений элементов (рис. 14 и рис. 15), заметного изменения элементного состава по сравнению с исходным образцом не произошло. Даже сфе-

рические частицы не имеют отличного от других частиц распределения элементов. Локальные измерения элементного состава (табл. 5) демонстрируют некоторый разброс содержания Fe, Ti и O.

Имитатор лунной пыли LMS-1D

Рабочим газом в эксперименте являлся аргон атмосферного давления. Мощность микроволнового излучения составляла 400 кВт, а длительности импульсов 6 мс. Образец испытал воздействие пяти микроволновых импульсов с суммарной энергией 7.2 кДж. Разряд в порошковом образце имитатора лунной пыли LMS-1D (с добавлением 10% массовой доли порошка металлического магния) инициировался на фронте микроволнового импульса. Фотографии образца до и после воздействия разряда приведены на рис. 8. Динамика развития разряда в порошковом образце имитатора лунной пыли практически не отличается от образца ильменитового концентрата: на начальной стадии происходит радиальное расширение плазменного образования; наибольшая интенсивность излучения и температура плазменно-пылевого

Таблица 5. Содержание кислорода, железа и титана в образце ильменитового концентрата до и после (пробы №№ 1–4) воздействия микроволнового разряда

№ п/п	Элемент, %	Доля (масс.) в исх. образце, %	Проба № 1. Доля (масс.) после эксперимента, %	Проба № 2	Проба № 3	Проба № 4
1	O	59.78	40.7	40.5	66.1	59.5
2	Fe	16.68	29.6	32.1	15.0	24.8
3	Ti	17.98	29.0	27.0	18.3	11.4

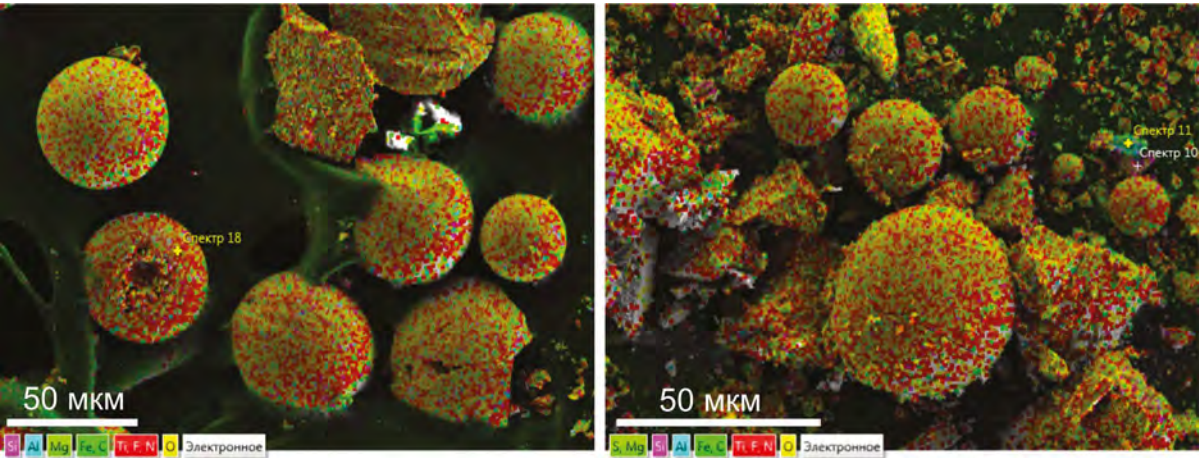


Рис. 14. Многослойные карты распределения элементов в пробах ильменитового концентрата после воздействия микроволнового разряда: слева – проба из основной массы образца; справа – проба с внутренних стенок кварцевой трубки. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи.

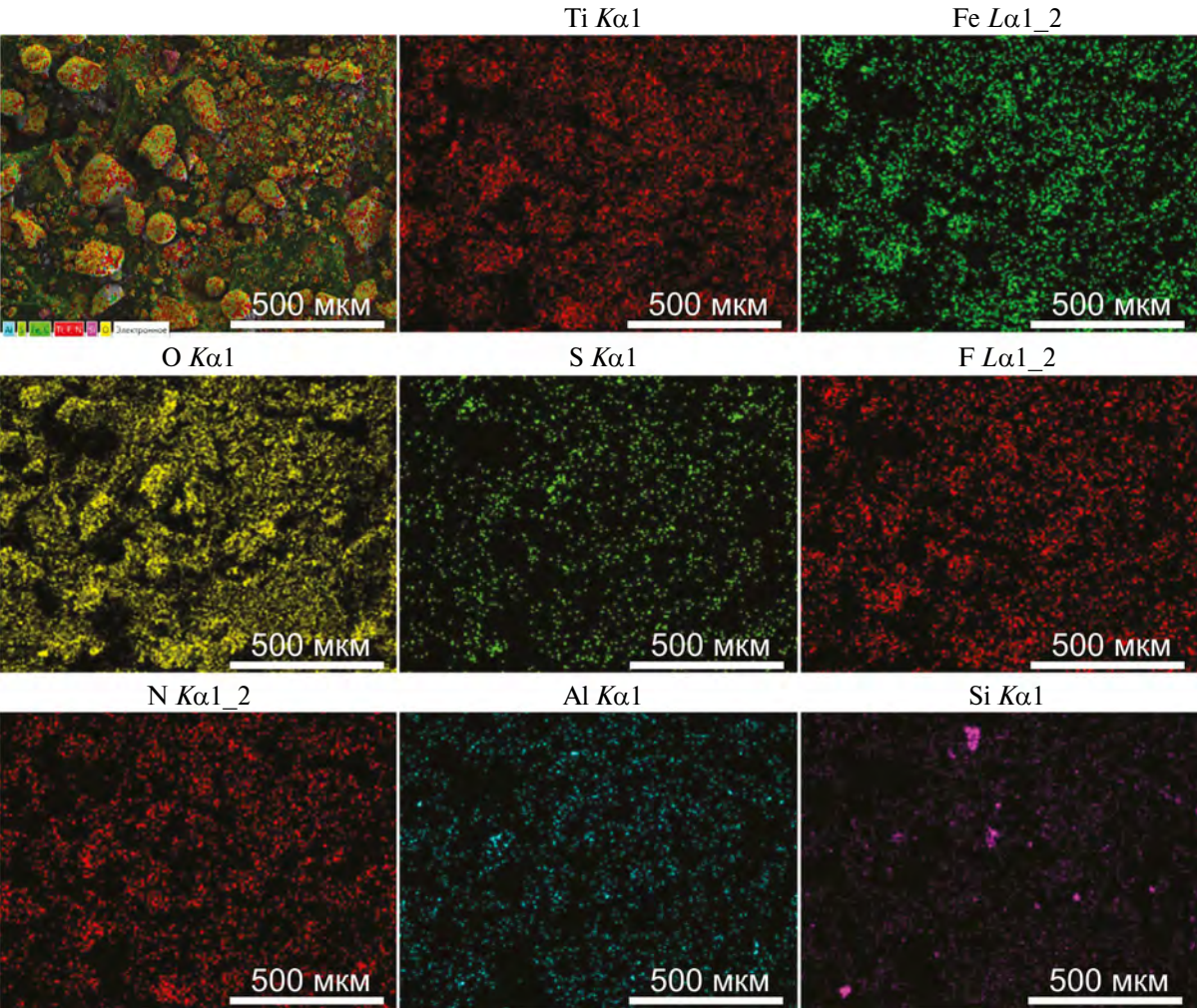


Рис. 15. Микрофотография пробы ильменитового концентрата после воздействия микроволнового разряда с наложенными многослойными картами распределения элементов и карты распределения отдельных элементов. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи.

образования наблюдаются в течение микроволнового импульса (рис. 16, кадр на 5.35 мс), когда также визуально наблюдается разлет частиц в объем реактора; после окончания микроволнового импульса (рис. 16, кадр на 18.3 мс) интенсивность свечения плазменно-пылевого образования начинает спадать, как и температуры.

В спектрах излучения (рис. 17), зарегистрированных с обзорным спектрометром, линия обзора которого проходит снизу вверх через весь слой порошкового образца, зарегистрированы линии нейтральных железа Fe I, титана Ti I, калия KI и его регулярного спутника рубидия Rb I, натрия Na I, иона железа Fe II, молекулярные полосы оксидов Mn O. Причем линии щелочных металлов обладают большой интенсивностью. На обзорном спектре отсутствуют полосы нейтрального магния или его иона, однако в эксперименте были зарегистрированы линии магния в ультрафиолетовой области с помощью спектрометра AvaSpec-ULS4096-CL-2-EVO. Динамика

температуры поверхности образца, определенная по континууму в виновской области спектра, приведена на (рис. 18). Температура электронов, вычисленная по относительной интенсивности ряда линий железа (метод описан ниже), составила ~5500 К. Вследствие отсутствия полос излучения TiO, несмотря на наличие титана в составе LMS-1D в форме ильменита, определить вращательную температуру газа отработанным для образца ильменитового концентрата методом оказалось невозможно.

По ряду линий железа Fe I (табл. 6) температура рассчитывалась исходя из формулы (1), приведенной к виду

$$\ln \frac{I\lambda}{gA} = -\frac{E}{kT} + K, \quad (2)$$

где все параметры, кроме температуры, относятся к одной линии, а величина K одинакова для всех линий одного источника (в нашем случае нейтрального железа Fe I). Каждой линии

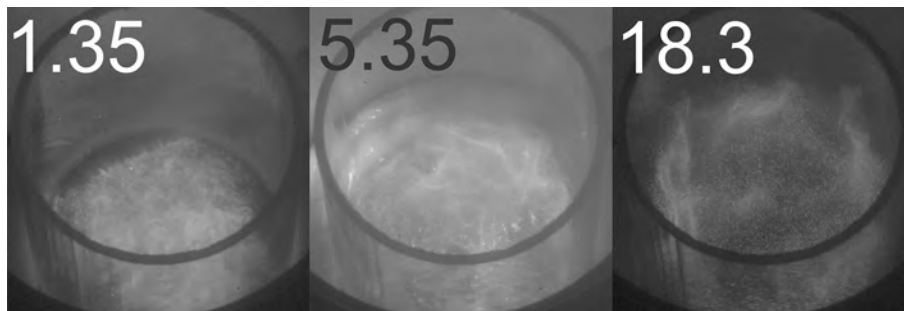


Рис. 16. Кадры развития микроволнового разряда в образце имитатора лунной пыли LMS-1D. Время начала кадра (миллисекунды) от момента пробоя указано на каждом кадре в левом верхнем углу. Время экспозиции кадра 100 мкс. Мощность микроволнового излучения 400 кВт, длительность импульса микроволнового излучения 6 мс.

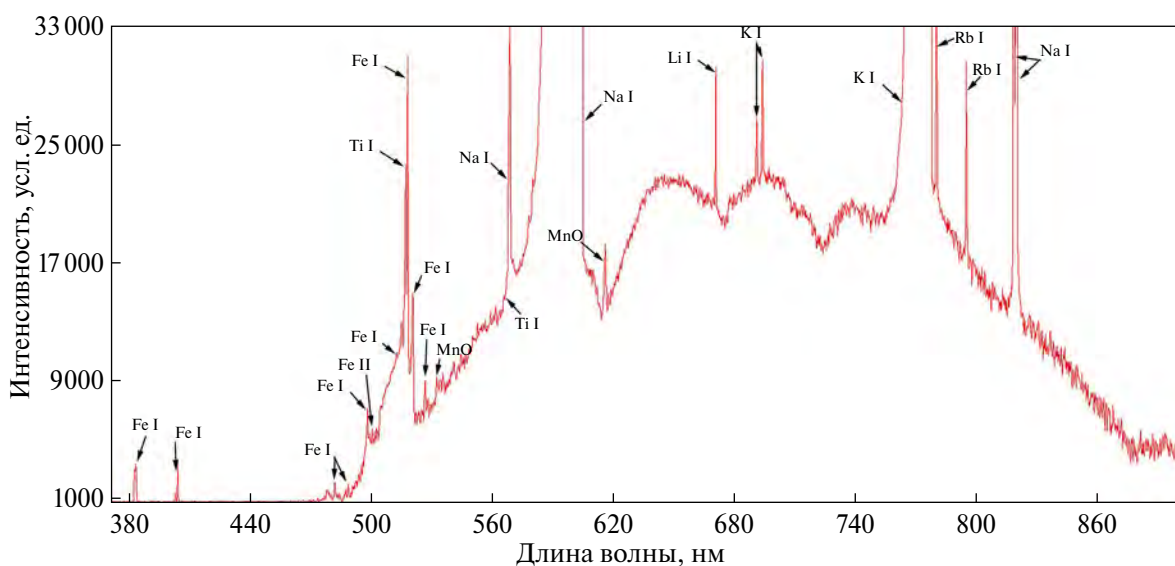


Рис. 17. Спектр излучения в эксперименте с созданием плазменно-пылевого облака в порошковом образце имитатора лунной пыли LMS-1D с добавлением порошка металлического магния в течение длительности микроволнового импульса.

Таблица 6. Линии нейтрального железа Fe I, наблюдавшиеся в спектрах свечения плазменно-пылевого облака и для образца вещества метеорита Царев, и для имитатора лунной пыли LMS-1D

№ п/п	Линия	Длина волны λ , нм	$g_k A_{ki}$, с ⁻¹	Энергия верхнего уровня, E_k см ⁻¹
1	Fe I	381.584	1.12×10^8	38175.36
2	Fe I	382.0425	6.67×10^7	33095.94
3	Fe I	385.6371	4.64×10^6	26339.7
4	Fe I	386.5523	1.55×10^7	34017.1
5	Fe I	389.5656	9.39×10^6	26550.48
6	Fe I	389.9707	2.58×10^6	26339.7
7	Fe I	390.2946	2.14×10^7	38175.36
8	Fe I	400.5242	2.04×10^7	37521.16
9	Fe I	406.3594	6.65×10^7	37162.75
10	Fe I	407.1738	7.64×10^7	37521.16
11	Fe I	426.0474	3.99×10^7	42815.86
12	Fe I	432.5762	5.16×10^7	36079.37
13	Fe I	433.7046	1.02×10^6	35611.63
14	Fe I	438.3545	5.00×10^7	34782.42
15	Fe I	440.475	2.75×10^7	35257.32
16	Fe I	441.5122	1.19×10^6	35611.63
17	Fe I	452.8614	5.44×10^8	39625.8

соответствует точка в координатах $Ln \frac{I\lambda}{gA}$ и E . Эти точки должны лежать на прямой, угол наклона которой зависит только от температуры. Конкретные значения для каждого кадра вычислялись методом наименьших квадратов.

На рис. 19 представлены микрофотографии пробы вещества имитатора лунной пыли LMS-1D с добавлением порошка металлического магния после воздействия микроволнового разряда. Проба на рис. 19 отбиралась со внутренних стенок кварцевой трубки. Среди осажденных частиц много очень мелкой пыли и частиц, по форме не отличающихся от исходных. Сферические частицы также встречаются, но реже, чем в образце ильменитового концентрата. Причем обнаруживаются и довольно крупные (~100 мкм) сферические частицы. На картах распределения элементов (рис. 20) можно отметить, что, как и в исходном образце, основные составляющие элементы распределены практически равномерно, за исключением магния, часть которого

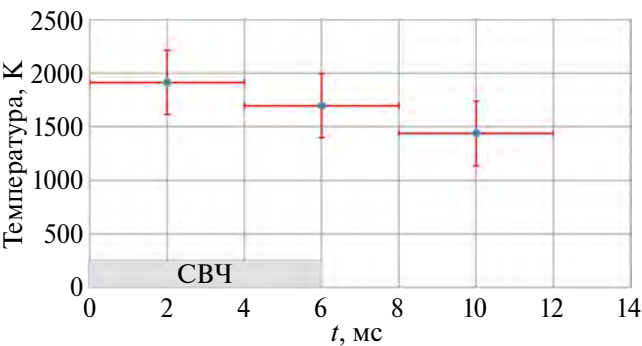


Рис. 18. Динамика температуры поверхности порошкового образца имитатора лунной пыли LMS-1D с добавлением порошка металлического магния. Длительность микроволнового импульса отмечена серым прямоугольником.

была добавлена в виде металлического порошка. Локальные измерения элементного состава в различных участках пробы и для частиц разной формы явно указывают на увеличение (до двух раз) доли магния по сравнению с составом исходной пробы имитатора лунной пыли LMS-1D с добавлением порошка металлического магния (табл. 7), что, видимо, связано с распылением и последующим осаждением на поверхности других частиц металлического магния, добавленного в виде порошка к имитатору. Вероятнее всего, магний присутствует в окисленном состоянии. Также можно отметить образование агломератов мелких частиц или оседания мелких частиц на крупные частицы, в некоторых случаях до состояния полного покрытия поверхности крупных частиц.

Вещество метеорита Царев

Рабочим газом в эксперименте являлся воздух атмосферного давления. Как часть дополнительного эксперимента в кварцевую трубку были помещены титановые пластины (рис. 8). Они располагались длинной стороной перпендикулярно вектору напряженности электрического поля линейно поляризованного микроволнового излучения. Мощность микроволнового излучения увеличивалась от импульса к импульсу от 200 кВт 400 кВт, а длительности импульсов от 4 мс до 6 мс. Образец испытал воздействие 17 микроволновых импульсов с суммарной энергией 39.2 кДж. Разряд в порошковом образце вещества метеорита Царев инициировался с задержкой 1–2 мс от начала фронта микроволнового импульса. Фотографии образца до и после воздействия разряда приведены на рис. 8.

Развитие разряда в веществе метеорита Царев (рис. 21) имеет те же стадии, что и два приведенных выше образца: радиальное расширение плазменного образования; стадия с наиболь-

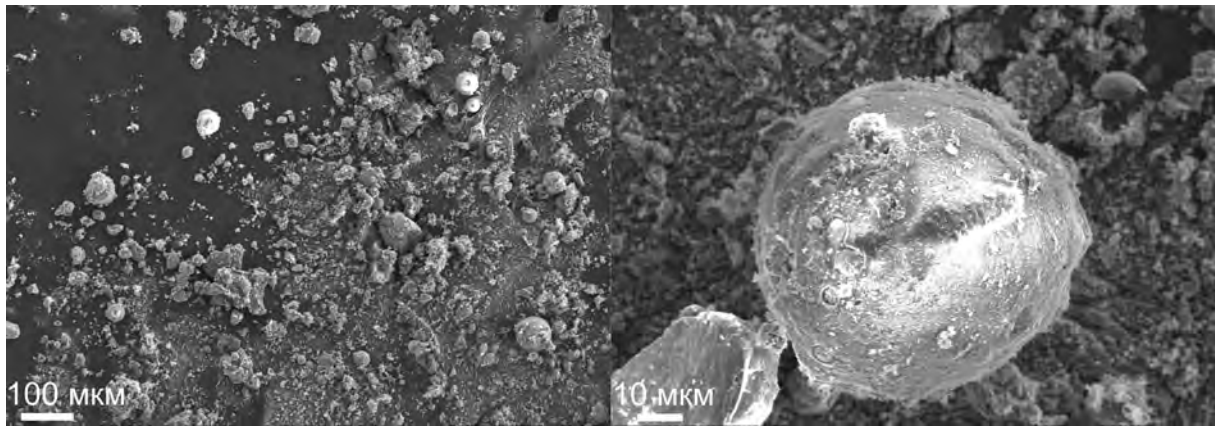


Рис. 19. Микрофотографии имитатора лунной пыли LMS-1D с добавлением порошка металлического магния после воздействия микроволнового разряда. Проба взята с внутренних стенок кварцевой трубки.

Таблица 7. Элементный состав имитатора лунной пыли LMS-1D с добавлением порошка металлического магния до и после (пробы №№ 1–6) воздействия микроволнового разряда

№ п/п	Элемент	Доля (масс.) в исх. образце, %	Проба № 1. Доля (масс.) после эксперимента, %	Проба № 2	Проба № 3	Проба № 4	Проба № 5	Проба № 6
1	N	0.00	0.00	0.00	1.62	0.00	1.51	0.00
2	F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.48	0.56
3	K	0.13	0.43	0.00	0.00	0.44	0.24	0.53
4	Na	1.06	0.49	0.32	0.26	0.80	0.95	0.86
5	Ti	0.72	0.82	0.64	0.00	0.00	0.00	0.00
6	Fe	0.73	1.59	0.00	4.53	4.88	0.00	0.00
7	Ca	1.51	2.63	2.21	1.21	2.46	0.21	0.43
8	Al	4.63	4.09	4.35	1.23	1.32	0.00	0.42
9	Si	11.90	12.10	10.75	10.36	6.21	1.43	2.34
10	Mg	22.36	25.74	22.04	32.08	41.37	42.62	51.94
11	O	56.94	52.11	59.71	48.71	42.52	52.43	42.92

шей интенсивностью излучения и температурой плазменно-пылевого образования в течение микроволнового импульса; стадия остывания и разлета после окончания микроволнового импульса. Меньшая интенсивность и длительность свечения на кадрах рис. 21 по сравнению с рис. 9 и рис. 16 может быть связана с использованием существенно меньшего времени экспозиции.

На обзорном спектре излучения (рис. 22) для направления приема излучения снизу вверх через весь слой порошкового образца присутствует много линий нейтрального железа Fe I, линии нейтрального титана Ti I, кальция Ca I, лития Li I, калия K I, рубидия Rb I, натрия Na I, иона кальция Ca II, молекулярные полосы оксидов MgO, CaO. В работе (Akhmadullina и др., 2023) были обнаружены и линии иона железа Fe II в ультрафи-

олетовой области. Получаемые нами в эксперименте спектры имеют схожие черты со спектрами метеоров (Borovička, 1994; Vojáček и др., 2015), со спектрами расширяющегося газового облака после ударного события (Schultz, Eberhardy, 2015) и со спектрами при моделировании ударного события с помощью лазерной абляции (Ferus и др., 2018; 2019; Hawkes и др., 2008; Křivková и др., 2021). Сходство состоит в наличии большого числа линий железа и кальция (табл. 6, табл. 8). Из наиболее существенных отличий стоит выделить: наличие интенсивного теплового континуума, отсутствие линий двукратно ионизованного железа и других металлов. Детальное сравнение спектров заслуживает отдельного исследования.

Значения температуры поверхности образца приведены на (рис. 23). Температура электронов,

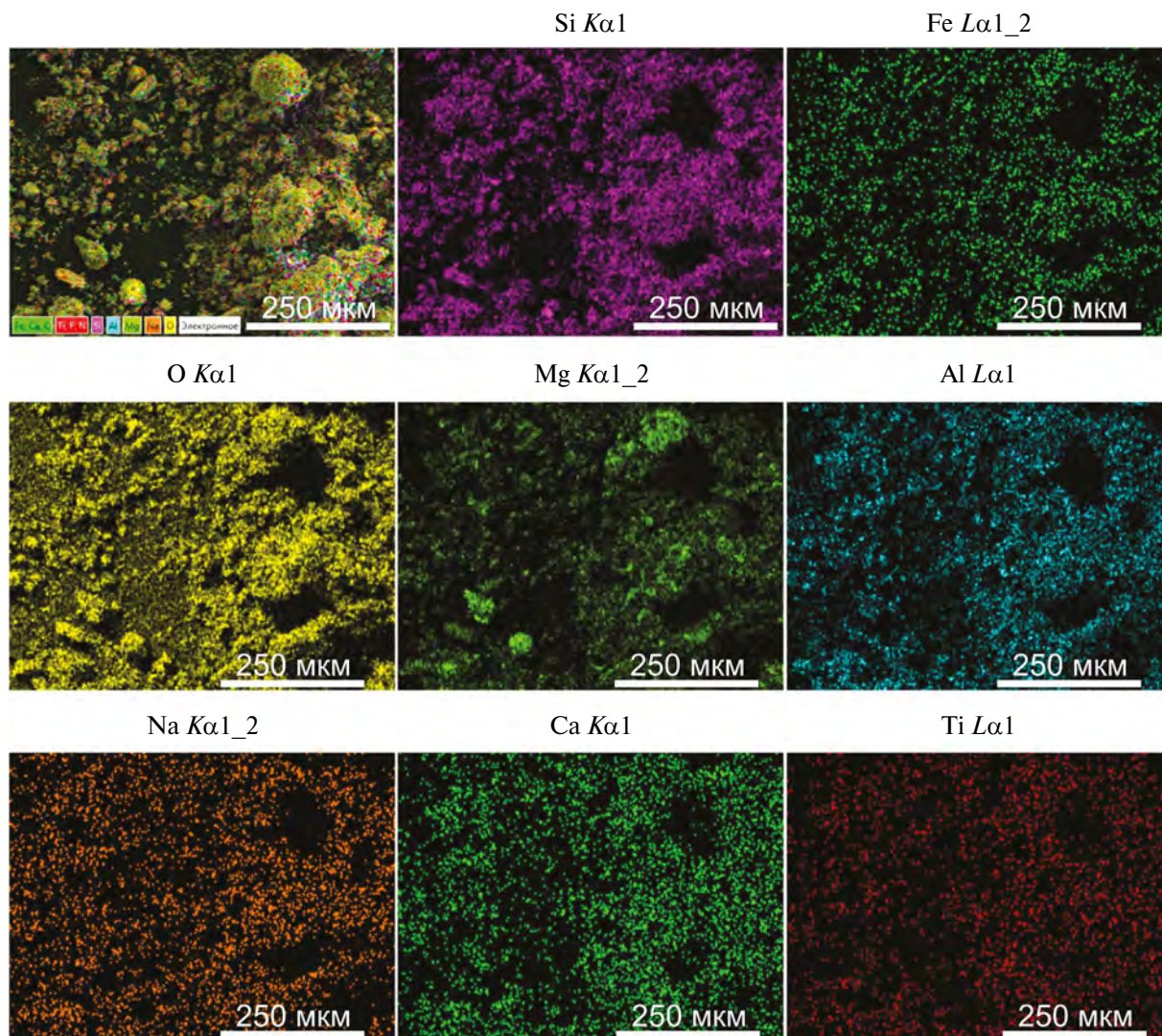


Рис. 20. Микрофотография, с наложенной многослойной картой распределения элементов, и карты распределения отдельных элементов в образце имитатора лунной пыли LMS-1D с добавлением 10% металлического магния после воздействия микроволнового разряда. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи.

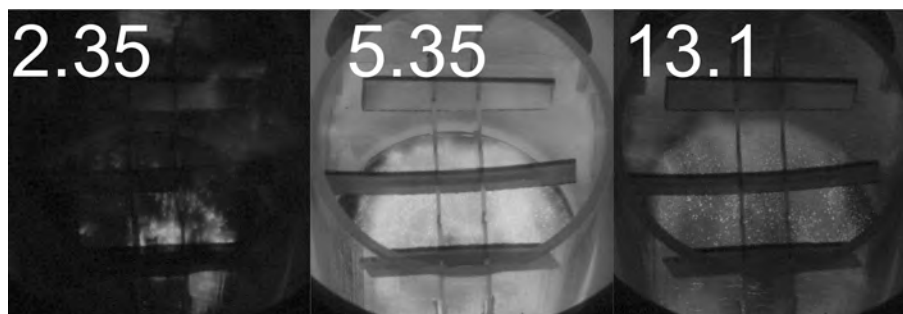


Рис. 21. Кадры развития микроволнового разряда в образце вещества метеорита Царев. Время начала кадра (миллисекунды) от момента пробоя указано на каждом кадре в левом верхнем углу. Время экспозиции кадра 0.6 мкс. Мощность микроволнового излучения 400 кВт, длительность импульса микроволнового излучения 6 мс.

вычисленная по относительной интенсивности пар линий кальция Ca I (линии 422.673 нм и 430.253 нм), имеющих существенную разницу в энергии верхнего уровня и присутствующих в нескольких временных окнах регистрации в те-

чение одного разряда, составила ~ 7900 К. Динамика изменения температуры электронов приведена в табл. 9 для расчетов по вышеуказанным линиям Ca I (T_{Ca}) и ряду линий Fe I (T_{Fe}) (метод приведен выше). Расчет проводился для указан-

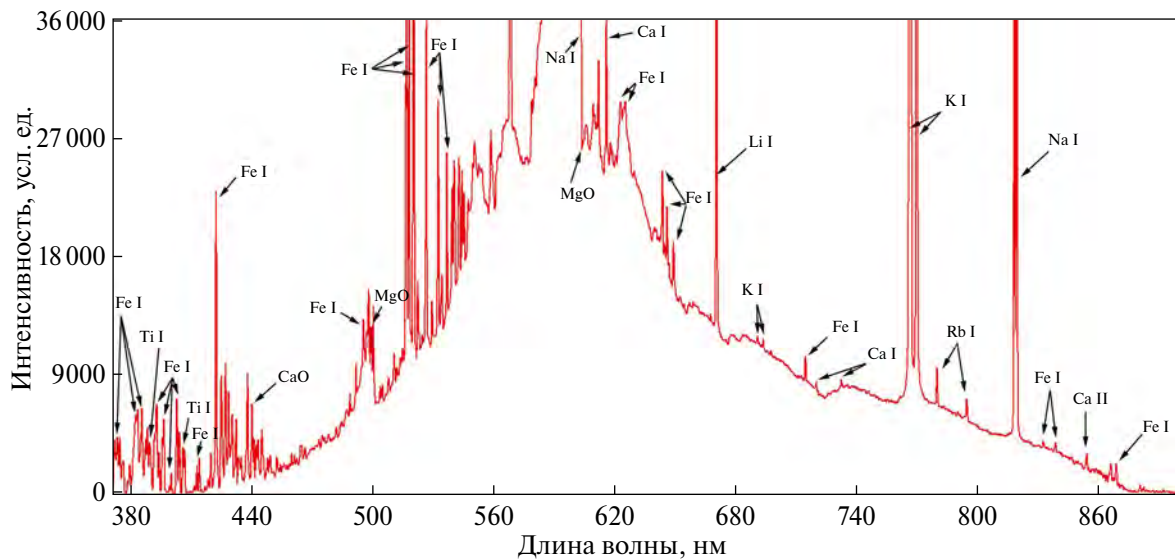


Рис. 22. Спектр излучения в эксперименте с созданием плазменно-пылевого облака в порошковом образце вещества метеорита Царев в течение длительности микроволнового импульса.

Таблица 8. Линии нейтрального кальция Ca I и иона кальция Ca II, наблюдавшиеся в спектре свечения плазменно-пылевого облака для образца вещества Царев

№ п/п	Элемент	Длина волны, нм	$g_k A_{ki}, \text{c}^{-1}$	Энергия нижнего уровня, $E_i, \text{см}^{-1}$	Энергия верхнего уровня, $E_k, \text{см}^{-1}$
1	Ca I	336.192	1.56×10^8	15315.943	45052.374
2	Ca I	336.214	3.20×10^7	15315.943	45050.419
3	Ca I	347.476	1.40×10^7	15210.063	43980.767
4	Ca I	363.075	1.48×10^8	15210.063	42744.716
5	Ca I	363.097	4.59×10^7	15210.063	42743.002
6	Ca II	370.603	1.80×10^8	25191.51	52166.93
7	Ca II	373.69	3.40×10^8	25414.4	52166.93
8	Ca I	374.835	1.70×10^7	20335.36	47006.194
9	Ca II	393.366	5.88×10^8	0	25414.4
10	Ca II	396.847	2.80×10^8	0	25191.51
11	Ca I	422.673	6.54×10^8	0	23652.304
12	Ca I	428.301	2.17×10^8	15210.063	38551.558
13	Ca I	428.936	1.80×10^8	15157.901	38464.808
14	Ca I	429.899	1.40×10^8	15210.063	38464.808
15	Ca I	430.253	6.80×10^8	15315.943	38551.558
16	Ca I	430.774	1.99×10^8	15210.063	38417.543
17	Ca I	431.865	2.20×10^8	15315.943	38464.808
18	Ca I	443.496	3.40×10^8	15210.063	37751.867
19	Ca I	443.569	1.03×10^8	15210.063	37748.197
20	Ca I	445.478	6.10×10^8	15315.943	37757.449
21	Ca I	445.589	1.00×10^8	15315.943	37751.867
22	Ca I	445.661	7.35×10^6	15315.943	37748.197
23	Ca I	452.694	1.20×10^8	21849.634	43933.477
24	Ca I	504.162	9.90×10^7	21849.634	41679.008
25	Ca I	527.027	2.50×10^8	20371	39340.08

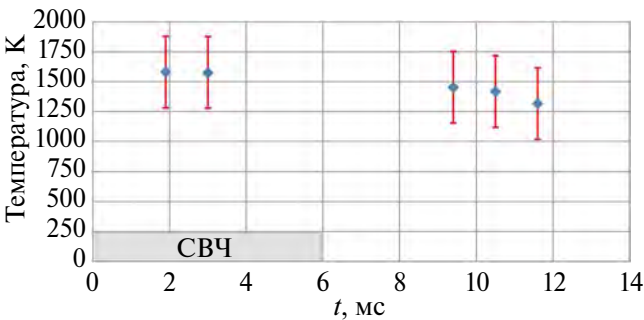


Рис. 23. Динамика температуры поверхности порошкового образца вещества метеорита. Длительность микроволнового импульса отмечена серым прямоугольником.

ных в табл. 9 моментов времени, которые находились как в пределах длительности (≤ 4 мс) микроволнового импульса, так и после его окончания (>4 мс). Время экспозиции спектра составляет 0.5 мс, а время, приведенное в табл. 9, соответствует началу временного интервала накопления спектра.

Выполненный на РЭМ анализ проб вещества метеорита Царев после воздействия микроволнового разряда приведен на рис. 24. В пробе, отобранной с внутренних стенок кварцевой трубки, содержатся в основном сферические частицы.

Таблица 9. Динамика изменения температуры электронов

№ п/п	Время, мс	T_{Ca} , К	T_{Fe} , К
1	1.5	8100	6000
2	2.7	6900	6400
3	3.9	7700	6100
4	5.1	8900	6500

Стоит отметить наличие сферических частиц, размеры которых (~ 100 мкм) больше размеров частиц исходного вещества, что указывает на вероятное слияние микрокапель расплава, образующегося при воздействии микроволнового разряда. Также в пробе присутствуют пористые частицы и частицы сложной формы. На поверхности крупных частиц наблюдаются субмикронные частицы и прилипшие к ним мелкие сферические частицы. Элементный состав сферических частиц близок друг другу (рис. 25), но можно отметить локальные увеличения концентраций никеля, алюминия, серы и натрия в пределах отдельных частиц. Элементный состав отдельной пробы вещества метеорита Царев после воздействия микроволнового разряда представлен в табл. 10 вместе с элементным составом исходного образца

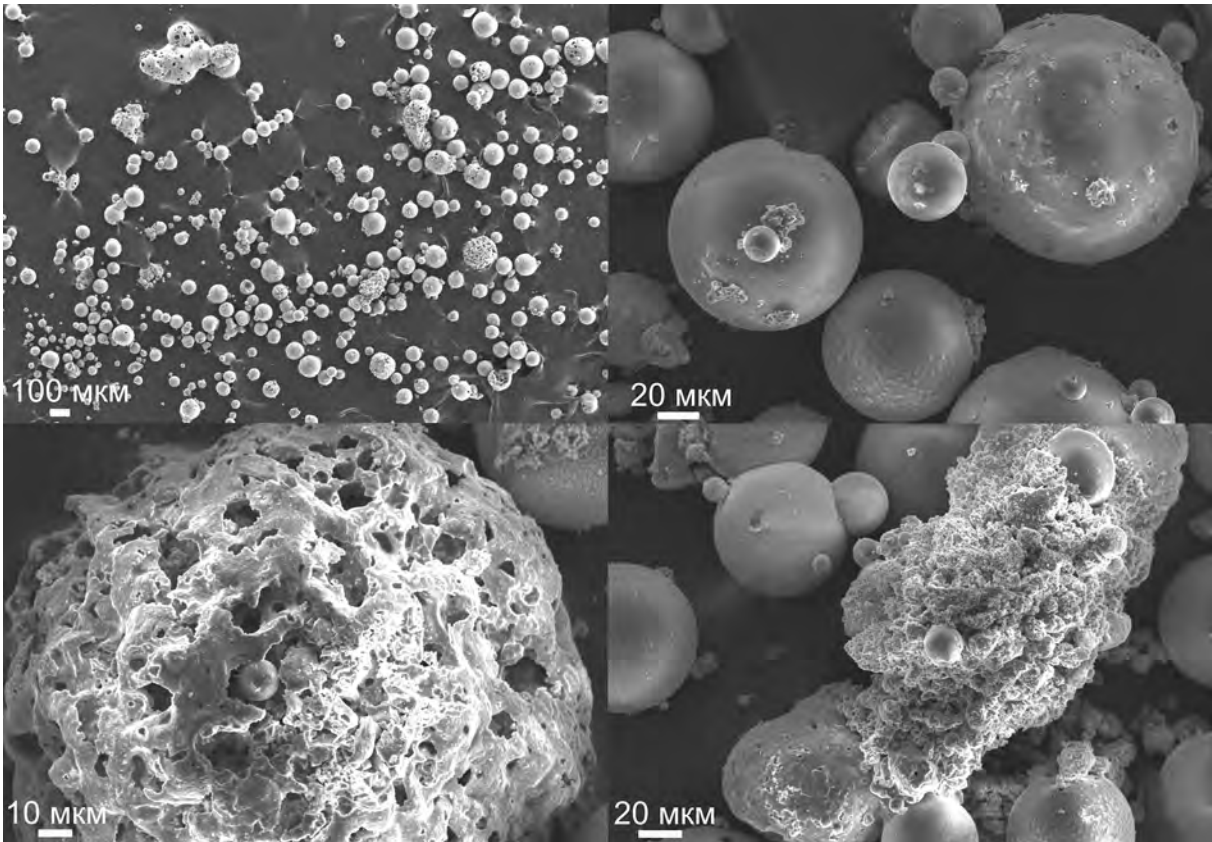


Рис. 24. Микрофотографии вещества метеорита Царев после воздействия микроволнового разряда. Проба взята с внутренних стенок кварцевой трубки.

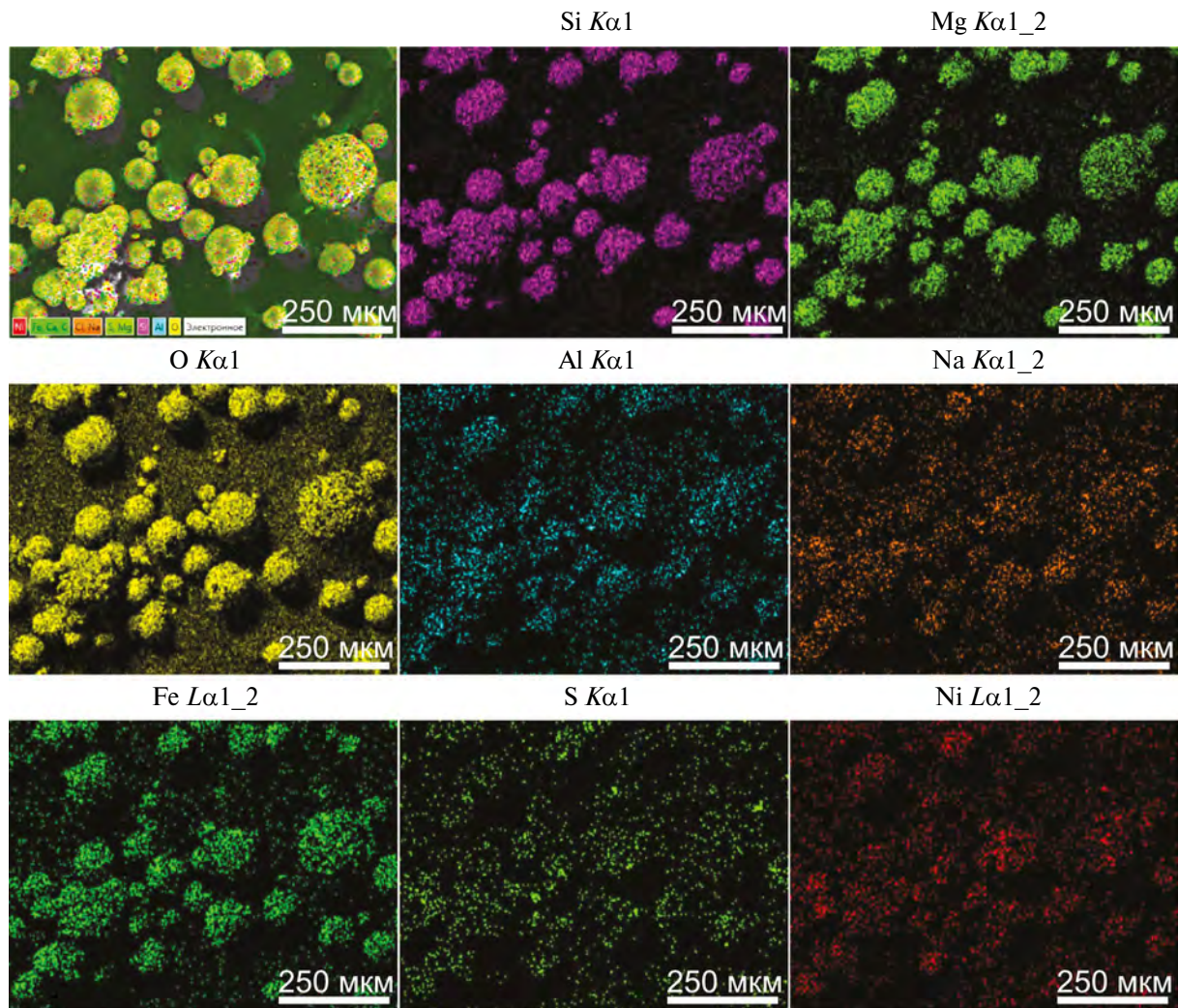


Рис. 25. Микрофотография с наложенной многослойной картой распределения элементов и карты распределения отдельных элементов в пробе вещества метеорита Царев после воздействия микроволнового разряда. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи.

Таблица 10. Элементный состав в исходной пробе вещества метеорита Царев и в пробе после воздействия микроволнового разряда по локальным измерениям

№ п/п	Элемент	Доля (масс.) в исх. образце, %	Доля (масс.) после эксперимента, %
1	C	4.67	9.55
2	O	39.85	39.41
3	Na	0.58	1.12
4	Mg	11.72	9.94
5	Al	1.09	1.29
6	Si	14.46	18.40
7	S	1.93	0.76
8	Cl	0	0.41
9	Ca	1.38	2.56
10	Fe	22.10	16.57
11	Co	0	0
12	Ni	2.23	1.44

для удобства сравнения. Проведенный нами в работе (Akhmadullina и др., 2023) РФА не показал появления новых фаз или изменения соотношения основных фаз (оливин основная фаза, ортопироксен вторичная) после воздействия на образец микроволнового разряда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В экспериментах по микроволновому разряду в порошковых образцах были получены плазменно-пылевые облака из веществ, релевантных для космических процессов образования многофазной плазменно-пылевой среды. Динамика развития плазменно-пылевых облаков имела характерные стадии: инициирования разряда; радиального расширения плазменного образования над поверхностью образцов; поддержания максимальной температуры плазмы и газа в течение длительности микроволнового импульса с идущим

испарением вещества и вылетом частиц образца в объем; остывания и разлета после завершения микроволнового импульса. В спектрах излучения плазменно-пылевых облаков зарегистрированы линии нейтральных атомов, линии ионов и молекулярные полосы оксидов веществ, входящих в состав исходных проб. Измеренные температуры электронов достигали 7000 К, газа — 5500 К, поверхности порошкового образца — 2000 К.

Возникновение низкопорогового микроволнового разряда в порошковом образце ильменитового концентрата и вещества метеорита Царев без добавления к ним металлических порошков интересно само по себе. Это является следствием достаточного собственного содержания проводящих фаз в этих образцах для возникновения разряда такого типа. Данный факт может оказаться необходимым для учета, например, в прикладных задачах по спеканию лунного реголита путем облучения микроволновым излучением (Taylor, Meek, 2005; Meurisse и др., 2017). При превышении некоторого порога (10–20 кВт/см²) по интенсивности волны и достаточном содержании проводящей фазы может возникнуть разряд. Причем для возникновения разряда условия вакуума не должны являться помехой, поскольку он будет развиваться в облаке собственных паров нагреваемого реголита. В дальнейшем было бы интересно провести такой эксперимент в условиях глубокого вакуума.

Результатом воздействия микроволнового разряда на все образцы стало изменение морфологии частиц (произошла сфероидизация частиц) и до некоторой степени — размеров частиц (появились отдельные сферические частицы, более крупные, чем в исходных образцах). В случае образца имитатора лунной пыли LMS-1D в пробах наблюдалось меньшее количество сферических частиц, чем для двух других образцов. На поверхности крупных частиц наблюдалось появление частиц субмикронного размера. При этом очевидного изменения элементного состава, определенного методом РЭДС для всех образцов, не обнаружено.

Использованный в работе экспериментальный подход возможно применить для исследований предбиологического синтеза органических веществ в условиях плазменно-пылевых облаков с важной ролью пылевых частиц как центров кристаллизации и/или как катализатора (Parmon, 1999; Peters и др., 2023; Saladino и др., 2013; 2018; Snytnikov, 2010; Snytnikov и др., 2002). Для этого необходимо в качестве порошковых образцов использовать либо минералы, характерные для космических объектов, либо непосредственно вещество космических объектов. В качестве рабочего газа может выступать смесь газов, предполагае-

мая для места протекания процесса (например, модель первичной атмосферы Земли).

Плазменно-пылевые методы оказываются эффективными для изучения возможности процессов синтеза органических соединений в условиях ранней Земли, в частности во время пролетов метеорных тел в атмосфере. При таком пролете образуется метеороидный след, содержащий различные фазы веществ, в том числе пылевую компоненту. Органическое вещество достаточно легко синтезируется на твердых катализаторах. Для этого они должны содержать, например, железо, никель и кремний, которые присутствуют в метеорном веществе. Также в результате развития волн и неустойчивостей в пылевой плазме метеороидных хвостов пылевые частицы могут концентрироваться в локальных областях, что повышает вероятность реализации химических реакций (Morozova, Popel, 2020; 2021a; 2021b; 2022a; 2022b; 2023). Энергии для возбуждения колебательных степеней свободы при температурах, достигаемых в метеорных следах, дают возможность развития свободнорадикальных химических процессов и протекания более широкого спектра химических реакций (Gurel, Gurel, 1983). Также в протопланетных дисках можно ожидать развитие процессов синтеза органических соединений в областях концентрации пыли, особенно в случае ее зарядки и присутствия электронов и ионов в окружающей плазме, а также во время вспышек протозвезд (Морозова, Кузнецов, 2023; Morozova и др., 2022c; Snytnikov др., 2002).

Авторы благодарят Российский научный фонд за финансовую поддержку, проект № 21-72-10164.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барсуков В.Л., Сурков Ю.А. (ред.) Грунт из материкового района Луны. М.: Наука, 1979. 708 с.
- Барсуков В.Л. (ред.) Лунный грунт из Моря Кризисов. М.: Наука, 1980. 360 с.
- Барсукова Л.Д., Харитонова В.Я., Банных Л.Н. Химический состав метеорита Царев // Метеоритика. 1982. Вып. 41. С. 41–43.
- Бронштэн В.А. Физика метеорных явлений. М.: Наука, 1981. 416 с.
- Виноградов А.П. (ред.) Лунный грунт из Моря Изобилия. М.: Наука, 1974. 624 с.
- Кузнецов И.А., Захаров А.В., Дольников Г.Г., Ляш А.Н., Афонин В.В., Попель С.И., Шашкова И.А., Борисов Н.Д. Лунная пыль: свойства и методы исследований // Вестн. НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 4 (34). С. 20–32.
- Лохте-Хольтгревен В. (ред.) Методы исследования плазмы. М.: Мир, 1971. 552 с.

- Мигдисова Л.Ф., Заславская Н.И., Иванов А.В., Щербовский Е.Я., Левский Л.К. Особенности состава и структуры метеорита Царев // Метеоритика. 1982. № 41. С. 13–30.
- Морозова Т.И., Кузнецов И.А. Фотозарядка пыли в условиях протопланетных дисков // Вестн. Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2023. Т. 78. № 3. id. 2330802.
<https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2330802>
- Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Долгопрудный: Изд. дом “Интеллект”, 2009. 736 с.
- Самохин А.В., Фадеев А.А., Алексеев Н.В., Синайский М.А., Суфияров В.Ш., Борисов Е.В., Корзников О.В., Федина Т.В., Водовозова Г.С., Барышков С.В. Сфероидизация порошков на основе железа в потоке плазмы электродугового плазматрона и их применение в селективном лазерном плавлении // Физика и химия обработки материалов. 2019. № 4. С. 12–20.
<https://doi.org/10.30791/0015-3214-2019-4-12-20>
- Семенова Л.Ф., Фисенко А.В., Кашкарова В.Г., Мельникова Л.Н., Безрогова Е.В., Помыткина В.А., Лаврухина А.К. Исследование химического состава минеральных фракций хондрита Царев // Метеоритика. 1984. № 43. С. 114–122.
- Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Николаева О.В. Лунный грунт: свойства и аналогии. Модель 1974 года. Монография. М.: Всероссийский институт научной и технической информации РАН, 1975. 72 с.
- Akhmadullina N.S., Skvortsova N.N., Obraztsova E.A., Stepakhin V.D., Konchekov E.M., Letunov A.A., Kononov A.A., Kargin Yu.F., Shishilov O.N. Plasma-chemical processes under high-power gyrotron's discharge in the mixtures of metal and dielectric powders // Chem. Phys. 2019. V. 516. P. 63–70.
<https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2018.08.023>
- Akhmadullina N.S., Borzosekov V.D., Skvortsova N.N., Stepakhin V.D., Gusein-Zade N.G., Malakhov D.V., Knyazev A.V., Gayanova T.E., Kozak A.K., Sokolov A.S., Sarksyian K.A., Ishchenko A.V., Weinstein I.A., Grokhovsky V.I., Shishilov O.N. Interaction of the substance of the Tsarev meteorite with radiation from a powerful gyrotron: Dusty plasma cloud formation and phase transformations // Fusion Sci. and Technology. 2023. Published online 19 Sep 2023.
<https://doi.org/10.1080/15361055.2023.2250669>
- Basu A. Nanopahse Fe in lunar soils // J. Earth System Sci. 2005. V. 114. P. 375–380.
<https://doi.org/10.1007/BF02702956>
- Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Kossyi I.A., Magunov A.N., Silakov V.P. Interaction of high-power microwave beams with metal-dielectric media // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2004. V. 26. P. 11–16.
<https://doi.org/10.1051/epjap:2004016>
- Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Borzosekov V.D., Iskhakova L.D., Kolik L.V., Konchekov E.M., Letunov A.A., Malakhov D.V., Milovich F.O., Obraztsova E.A., Obraztsova E.D., Petrov A.E., Sarksyian K.A., Skvortsova N.N., Stepakhin V.D., Kharchev N.K. Application of microwave discharge for the synthesis of TiB₂ and BN nano- and microcrystals in a mixture of Ti-B powders in a nitrogen atmosphere // Plasma Phys. Rep. 2013. V. 39. P. 843–848.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X13100024>
- Batanov G.M., Kossyi I.A. Pulsed microwave discharges in powder mixtures: Status, problems, and prospects // Plasma Phys. Rep. 2015. V. 41. P. 847–857.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X15090020>
- Batanov G.M., Borzosekov V.D., Voronova E.V., Kachmar V.V., Kolik L.V., Konchekov E.M., Letunov A.A., Malakhov D.V., Petrov A.E., Sarksyian K.A., Skvortsova N.N., Stepakhin V.D., Kharchev N.K. Microwave discharge in gas above regolith surface // Plasma Phys. Rep. 2022. V. 48. P. 408–414.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X22040031>
- Best S.R., Rose M.F. A plasma drag hypervelocity particle accelerator (HYPER) // Int. J. Impact Eng. 1999. V. 23. № 1. Pt 1. P. 67–76.
[https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(99\)00063-9](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(99)00063-9)
- Bezaeva N.S., Badjukov D.D., Rochette P., Gattacceca J., Trukhin V.I., Kozlov E.A., Uehara M. Experimental shock metamorphism of the L4 ordinary chondrite Saratov induced by spherical shock waves up to 400 GPa // Meteorit. and Planet. Sci. 2010. V. 45. № 6. P. 1007–1020.
<https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2010.01069.x>
- Blanchard M.B., Cunningham G.G. Artificial meteor ablation studies: Olivine // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. № 26. P. 3973–3980.
<https://doi.org/10.1029/JB079i026p03973>
- Bones D.L., Gómez Martín J.C., Empson C.J., Carrillo Sánchez J.D., James A.D., Conroy T.P., Plane J.M.C. A novel instrument to measure differential ablation of meteorite samples and proxies: The Meteoric Ablation Simulator (MASI) // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87. № 9. id. 094504.
<https://doi.org/10.1063/1.4962751>
- Borovička J. Two components in meteor spectra // Planet. and Space Sci. 1994. V. 42. № 2. P. 145–150.
[https://doi.org/10.1016/0032-0633\(94\)90025-6](https://doi.org/10.1016/0032-0633(94)90025-6)
- Bykov Yu.V., Rybakov K.I., Semenov V.E. High-temperature microwave processing of materials // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V. 34. id. R55.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/34/13/201>
- Chhabildas L.C., Kmetyk L.N., Reinhart W.D., Hall C.A. Enhanced hypervelocity launcher – capabilities to 16 km/s // Int. J. Impact Eng. 1995. V. 17. № 1–3. P. 183–194.
[https://doi.org/10.1016/0734-743X\(95\)99845-I](https://doi.org/10.1016/0734-743X(95)99845-I)
- Egorov S.V., Ereemeev A.G., Plotnikov I.V., Rybakov K.I., Kholoptsev V.V., Bykov Yu.V. Absorption of microwaves in metal-ceramic powder materials // Radiophys. and Quantum Electronics. 2010. V. 53. № 5–6. P. 354–362.
<https://doi.org/10.1007/s11141-010-9234-8>
- Ferus M., Koukal J., Lenža L., Srba J., Kubelík P., Laitl V., Zanožina E.M., Pavel V., Kaiserová T., Knížek A., Rimmer P., Chatzitheodoridis E., Civiš S. Calibration-free quantitative elemental analysis of meteor plasma using reference laser-induced breakdown spectroscopy

- of meteorite samples // *Astron. and Astrophys.* 2018. V. 610. id. A73 (12 p.).
https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629950
- Ferus M., Kubelík P., Petera L., Lenža L., Koukal J., Křivková A., Laitl V., Knížek A., Saeidfirozeh H., Pastorek A., Kalvoda T., Juha L., Dudžák R., Civiš S., Chatzitheodoridis E., Krůs M. Main spectral features of meteors studied using a terawatt-class high-power laser // *Astron. and Astrophys.* 2019. V. 630. id. A127 (20 p.).
https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935816
- Ferus M., Rimmer P., Cassone G., Knížek A., Civiš S., Šponer J.E., Ivanek O., Šponer J., Saeidfirozeh H., Kubelík P., Dudžák R., Petera L., Juha L., Pastorek A., Křivková A., Krůs M. One-pot hydrogen cyanide-based prebiotic synthesis of canonical nucleobases and glycine initiated by high-velocity impacts on early Earth // *Astrobiology.* 2020. V. 20. № 12. P. 1476–1488.
http://doi.org/10.1089/ast.2020.2231
- Friichtenicht J.F. Two-million-volt electrostatic accelerator for hypervelocity research // *Rev. Sci. Instrum.* 1962. V. 33. № 2. P. 209–212.
https://doi.org/10.1063/1.1746548
- Fulvio D., Fuks Maron L., Cires Perez Y., Tahir, Del Rosso T. Micrometeorite bombardment simulated by ns-pulsed laser ablation: Morphological characterization of the impact craters // *Icarus.* 2021. V. 366. id. 114532.
https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114532
- Gayanova T.E., Voronova E.V., Kuznetsov S.V. Obratsova E.A., Skvortsova N.N., Sokolov A.S., Nugaev I.R., Stepakhin V.D. Synthesis of microstructures of hexagonal boron nitride in gyrotron discharge in metal–dielectric powder mixtures // *High Energy Chem.* 2023. V. 57. Suppl. 1. S. 53–56.
https://doi.org/10.1134/S0018143923070111
- Gerasimov M.V., Ivanov B.A., Yakovlev O.I., Dikov Yu.P. Physics and chemistry of impacts // *Earth, Moon and Planets.* 1998. V. 80. P. 209–259.
https://doi.org/10.1023/A:1006322032494
- Gerasimov M.V., Safonova E.N. Shock processes role in abiotic synthesis of organics matter at the early stages of the Earth formation // *Problemy zarozhdeniya i evolyutsii biosfery (Problems of Biosphere Origin and Evolution)* / Ed. Galimov E.M. M.: URSS, 2008. P. 145–153.
- Goetz C., Gunell H., Volwerk M., Beth A., Eriksson A., Galand M., Henri P., Nilsson H., Simon Wedlund C., Alho M., Andersson L., Andre N., De Keyser J., Deca J., Ge Y., Glassmeier K.-H., Hajra R., Karlsson T., Kasahara S., Kolmasova I., LLera K., Madanian H., Mann I., Mazelle C., Odelstad E., Plaschke F., Rubin M., Sanchez-Cano B., Snodgrass C., Vigren E. Cometary plasma science // *Exp. Astron.* 2022. V. 54. P. 1129–1167.
https://doi.org/10.1007/s10686-021-09783-z
- Gómez Martín J.C., Bones D.L., Carrillo-Sánchez J.D., James A.D., Trigo-Rodríguez J.M., Fegley B.Jr., Plane J.M.C. Novel experimental simulations of the atmospheric injection of meteoric metals // *Astrophys. J.* 2017. V. 836. id. 212 (26 p.).
https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa5c8f
- Grokhovsky V.I., Muftakhedinova R.F., Yakovlev G.A., Brunsynsya E.V., Petrova E.V. Post-impact metamorphism of the Chelyabinsk meteorite in shock experiment // *Planet. and Space Sci.* 2020. V. 192. id. 105050.
https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.105050
- Gurel D., Gurel O. Oscillations in chemical reactions. Berlin. Heidelberg. New York, Tokio: Springer-Verlag, 1983. 146 p.
- Hawkes R.L., Milley E.P., Ehrman J.M., Woods R.M., Hoyaland J.D., Pettipas C.L., Tokaryk D.W. What can we learn about atmospheric meteor ablation and light production from laser ablation? // *Earth, Moon and Planet.* 2008. V. 102. P. 331–336.
https://doi.org/10.1007/s11038-007-9186-y
- Heiken G., Vaniman D., French B. (Eds) *Lunar Sourcebook.* Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1991. P. 286–356.
- Helber B., Dias B., Bariselli F., Zavalan L.F., Pittarello L., Goderis S., Soens B., McKibbin S.J., Claeyes P., Magin T.E. Analysis of meteoroid ablation based on plasma wind-tunnel experiments, surface characterization, and numerical simulations // *Astrophys. J.* 2019. V. 876. № 2. id. 120 (14 p.).
https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab16f0
- Hermann J., Perrone A., Dutouquet C. Analyses of the TiO- γ system for temperature measurements in a laser-induced plasma // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 2001. V. 34. 153–164.
https://doi.org/10.1088/0953-4075/34/2/303
- Hudepohl A., Rott M., Igenbergs E. Coaxial plasma accelerator with compressor coil and radial gas injection // *IEEE Trans. Magn.* 1989. V. 25. P. 232–237.
https://doi.org/10.1109/20.22540
- Igenbergs E., Aigner S., Hudepohl A., Iglseder H., Kuczera H., Rott M., Weishaupt U. Launcher technology, in-flight velocity measurement and impact diagnostics at the TUM/LRT // *Int. J. Impact Eng.* 1987. V. 5. № 1–4. P. 371–385.
https://doi.org/10.1016/0734-743X(87)90054-6
- Jenniskens P. Meteors as a delivery vehicle for organic matter to the early Earth // *Meteoroids 2001 Conf., ESA Special Publication* // 2001. V. 495. P. 247–254.
- Jenniskens P., Schaller E.L., Laux C.O., Wilson M.A., Schmidt G., Rairden R.L. Meteors do not break exogenous organic molecules into high yields of diatomics // *Astrobiology.* 2004. V. 4. № 1. P. 67–79.
http://doi.org/10.1089/153110704773600249
- Johnstone A.D. (Ed) *Cometary Plasma Processes.* Geophysical Monograph Series. American Geophysical Union, 2013. 364 p.
- Kachmar V.V., Moshkina K.G., Borzosekov V.D., Sorokin A.A., Skvortsova N.N. Non-Gaussian distribution of regolith particles deposited on tantalum and molybdenum surfaces under gyrotron pulsed radiation // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. V. 2036. id. 012030.
https://doi.org/10.1088/1742-6596/2036/1/012030
- Károly Z., Szépvölgyi J. Plasma spheroidization of ceramic particles // *Chemical Eng. and Processing: Process Intensification.* 2005. V. 44. № 2. P. 221–224.
https://doi.org/10.1016/j.cep.2004.02.015

- Křivková A., Petera L., Laitl V., Kubelík P., Chatzitheodoridis E., Lenža L., Kouka J., Knížek A., Dudžák R., Páclík D., Civiš S., Krůs M., Ferus M. Application of a dielectric breakdown induced by high-power lasers for a laboratory simulation of meteor plasma // *Exp. Astron.* 2021. V. 51. P. 425–451.
<https://doi.org/10.1007/s10686-020-09688-3>
- Kuznetsov I.A., Zakharov A.V., Zelenyi L.M., Popel S.I., Morozova T.I., Shashkova I.A., Dolnikov G.G., Lyash A.N., Dubov A.E., Viktorov M.E., Topchieva A.P., Klumov B.A., Usachev A.D., Lisin E.A., Vasiliev M.M., Petrov O.F., Porroikov A. Yu. Dust particles in space: Opportunities for experimental research // *Astron. Rep.* 2023. V. 67. P. 35–60.
<https://doi.org/10.1134/S1063772923010110>
- Lexow B., Wickert M., Thoma K., Schäfer F., Poelchau M.H., Kenkmann T. The extra-large light-gas gun of the Fraunhofer EMI: Applications for impact cratering research // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2013. V. 48. P. 3–7.
<https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2012.01427.x>
- Litvak A.G., Denisov G.G., Glyavin M.Y. Russian gyrotrons: achievements and trends // *IEEE J. Microwaves.* 2021. V. 1. № 1. P. 260–268.
<https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3030917>
- Loehle S., Zander F., Hermann T., Eberhart M., Meindl A., Oefele R., Vaubaillon J., Colas F., Vernazza P., Drouard A., Gattacceca J. Experimental simulation of meteorite ablation during Earth entry using a plasma wind tunnel // *Astrophys. J.* 2017. V. 837. id. 112 (10 p.).
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa5cb5>
- Long-Fox J.M., Britt D.T. Characterization of planetary regolith simulants for the research and development of space resource technologies // *Frontiers in Space Technol.* 2023. V. 4. id. 1255535 (16 p.).
<https://doi.org/10.3389/frspt.2023.1255535>
- Madison A., Landsman Z., Long-Fox J., Metke A., Krol K., Easter P., Sipe C., Weber L., Britt D. Lunar dust simulants and their applications // *Conf. Earth and Space.* 2022. P. 86–94.
<https://doi.org/10.1061/9780784484470.008>
- Maksimova A.A., Oshtrakh M.I., Klencsár Z., Petrova E.V., Grokhovsky V.I., Kuzmann E., Homonnay Z., Semionkin V.A. A comparative study of troilite in bulk ordinary chondrites Farmington L5, Tsarev L5 and Chelyabinsk LL5 using Mössbauer spectroscopy with a high velocity resolution // *J. Mol. Struct.* 2014. V. 1073. P. 196–201.
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2014.05.049>
- Maksimova A.A., Oshtrakh M.I., Petrova E.V., Grokhovsky V.I., Semionkin V.A. Comparison 263 of iron-bearing minerals in ordinary chondrites from H, L and LL groups using Mössbauer spectroscopy with a high velocity resolution // *Spectrochim. Acta. Part A: Molec. and Biomolec. Spectroscopy.* 2017. V. 172. P. 65–76.
<https://doi.org/10.1016/j.saa.2016.04.032>
- Maksimova A.A., Kamalov R.V., Chukin A.V., Felner I., Oshtrakh M.I. An analysis of orthopyroxene from Tsarev L5 meteorite using X-ray diffraction, magnetization measurement and Mössbauer spectroscopy // *J. Mol. Struct.* 2018. V. 1174. P. 6–11.
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.06.040>
- Managadze G.G. The synthesis of organic molecules in a laser plasma similar to the plasma that emerges in hypervelocity collisions of matter at the early evolutionary stage of the Earth and in interstellar clouds // *J. Exp. Theor. Phys.* 2003. V. 97. P. 49–60.
<https://doi.org/10.1134/1.1600796>
- Martins Z., Price M., Goldman N., Sephton M.A., Burckell M.J. Shock synthesis of amino acids from impacting cometary and icy planet surface analogues // *Nature Geosci.* 2013. V. 6. P. 1045–1049.
<https://doi.org/10.1038/ngeo1930>
- Meurisse A., Beltzung J.C., Kolbe M., Cowley A., Sperl M. Influence of mineral composition on sintering lunar regolith // *J. Aerospace Eng.* 2017. V. 30. № 4. id. 113695951.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0000721](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000721)
- Mocker A., Bugiel S., Auer S., Baust G., Colette A., Drake K., Fiege K., Grün E., Heckmann F., Helfert S., Hillier J., Kempf S., Matt G., Mellert T., Munsat T., Otto K., Postberg F., Röser H.-P., Shu A., Sternovsky Z., Srama R. A 2 MV Van de Graaff accelerator as a tool for planetary and impact physics research // *Rev. Sci. Instrum.* 2011. V. 82. № 9. id. 095111.
<https://doi.org/10.1063/1.3637461>
- Moroz L.V., Fisenko A.V., Semjonova L.F., Pieters C.M., Korotaeva N.N. Optical effects of regolith processes on S-asteroids as simulated by laser shots on ordinary chondrite and other mafic materials // *Icarus.* 1996. V. 122. № 2. P. 366–382.
<https://doi.org/10.1006/icar.1996.0130>
- Morozova T.I., Popel S.I. On the plasma–dust processes accompanying meteor showers // *Plasma Phys. Rep.* 2020. V. 46. P. 1075–1088.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X20100074>
- Morozova T.I., Popel S.I. Electrophonic noises from meteors and dust acoustic modulational perturbations // *J. Phys. Conf. Ser.* 2021a. V. 1787. id. 012052.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1787/1/012052>
- Morozova T.I., Popel S.I. Modulational interaction in a dusty plasma of meteoroid wakes // *Geomagn. Aeron.* 2021b. V. 61. P. 888–895.
<https://doi.org/10.1134/S0016793221060116>
- Morozova T.I., Popel S.I. Lower hybrid waves upon interaction of meteor wakes with the Earth's ionosphere // *Plasma Phys. Rep.* 2022a. V. 48. P. 774–777.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X22600384>
- Morozova T.I., Popel S.I. Modulational interaction of Langmuir waves and generation of magnetic field in meteoroid trails // *Plasma Phys. Rep.* 2022b. V. 48. P. 1075–1079.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X22600414>
- Morozova T.I., Garasev M.A., Kuznetsov I.A. On the possibility of dust grain destruction by the Coloumb explosion in protoplanetary disks // *Radiophys. and Quantum Electronics.* 2022c. V. 65. P. 1–8.
<https://doi.org/10.1007/s11141-022-10188-x>
- Morozova T.I., Popel S.I. Some Aspects of Modulational Interaction in Earth's Dusty Ionosphere Including Dusty Plasmas of Meteor Tails // *Plasma Phys. Rep.* 2023. V. 49. P. 65–69.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X22601389>

- NASA Lunar sample and photo catalog.*
<https://curator.jsc.nasa.gov/lunar/samplecatalog/> (accessed November 13, 2023)
- Oshtrakh M.I., Petrova E.V., Grokhovsky V.I., Semionkin V.A.* A study of ordinary chondrites by Mössbauer spectroscopy with high-velocity resolution // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2008. V. 43. № 5. P. 941–958.
<https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2008.tb01091.x>
- Oshtrakh M.I., Petrova E.V., Grokhovsky V.I., Semionkin V.A.* Variations in quadrupole splitting of the 57Fe in the M1 and M2 sites of meteoritic olivines with different origin // *Hyperfine Interact.* 2013a. V. 222. P. 61–66.
<https://doi.org/10.1007/s10751-012-0694-4>
- Oshtrakh M.I., Grokhovsky V.I., Petrova E.V., Larionov M. Yu., Goryunov M.V., Semionkin V.A.* Mössbauer spectroscopy with a high velocity resolution applied for the study of meteoritic iron-bearing minerals // *J. Mol. Struct.* 2013b. V. 1044. P. 268–278.
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2012.09.059>
- Park J., Liu Y., Kihm K.D., Hill E., Taylor L.A.* Submicron particle size distribution of Apollo 11 lunar dust // *Earth and Space 2006: Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environment. Proc.* 2006. Pages: 1–6.
[https://doi.org/10.1061/40830\(188\)2](https://doi.org/10.1061/40830(188)2)
- Parmon V.N.* Abiogenic catalysis in Nature // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. and Engineering Aspects.* 1999. V. 151. № 1–2. P. 351–365.
[https://doi.org/10.1061/40830\(188\)27](https://doi.org/10.1061/40830(188)27)
- Peters S., Semenov D.A., Hochleitner R., Trapp O.* Synthesis of prebiotic organics from CO₂ by catalysis with meteoritic and volcanic particles // *Sci. Rep.* 2023. V. 13. id. 6843.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-33741-8>
- Popel S.I., Zelenyi L.M., Golub' A.P., Dubinskii A.Yu.* Lunar dust and dusty plasmas: Recent developments, advances, and unsolved problems // *Planet. and Space Sci.* 2018. V. 156. P. 71–84.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2018.02.010>
- Popel S.I., Golub' A.P., Zakharov A.V., Zelenyi L.M.* Formation of microspherules of lunar regolith in plasma–dust processes initiated by meteoroid impacts // *Plasma Phys. Rep.* 2020. V. 46. P. 265–272.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X20030101>
- Prince B.S., Magnuson M.P., Chaves L.C., Thompson M.S., Loeffler M.J.* Space weathering of FeS induced via pulsed laser irradiation // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2020. V. 125. № 5. id. e2019JE006242.
<https://doi.org/10.1029/2019JE006242>
- Rybakov K.I., Semenov V.E., Egorov S.V., Ereemeev A.G., Plotnikov I.V., Bykov Yu.V.* Microwave heating of conductive powder materials // *J. Appl. Phys.* 2006. V. 99. № 2. id. 023506.
<https://doi.org/10.1063/1.2159078>
- Rybakov K.I., Olevsky E.A., Krikun E.V.* Microwave sintering: fundamentals and modeling // *J. Am. Ceram. Soc.* 2013. V. 96. № 4. P. 1003–1020.
<https://doi.org/10.1111/jace.12278>
- Rybakov K.I., Buyanova M.N.* Microwave resonant sintering of powder metals // *Scripta Materialia.* 2018. V. 149. P. 108–111.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.02.014>
- Saladino R., Botta G., Delfino M., Di Mauro E.* Meteorites as catalysts for prebiotic chemistry // *Chem. Eur. J.* 2013. V. 19. № 50. P. 16916–16922.
<https://doi.org/10.1002/chem.201303690>
- Saladino R., Botta L., Di Mauro E.* The prevailing catalytic role of meteorites in formamide prebiotic processes // *Life.* 2018. V. 8. № 1. id. 6 (11 p.).
<https://doi.org/10.3390/life8010006>
- Sasaki S., Kurahashi E., Yamanaka C., Nakamura K.* Laboratory simulation of space weathering: Changes of optical properties and TEM/ESR confirmation of nanophase metallic iron // *Adv. Space Res.* 2003. V. 31. № 12. P. 2537–2542.
[https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00575-1](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00575-1)
- Schultz P.H., Eberhardy C.A.* Spectral probing of impact-generated vapor in laboratory experiments // *Icarus.* 2015. V. 248. P. 448–462.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.10.041>
- Semkin N.D., Piyakov A.V., Voronov K.E., Bogoyavlenskii N.L., Goryunov D.V.* A linear accelerator for simulating micrometeorites // *Instrum. Exp. Tech.* 2007. V. 50. P. 275–281.
<https://doi.org/10.1134/S0020441207020194>
- Semkin N.D., Voronov K.E., Piyakov A.V., Piyakov I.V.* Simulation of micrometeorites using an electrodynamic accelerator // *Instrum. Exp. Tech.* 2009. V. 52. P. 595–601.
<https://doi.org/10.1134/S0020441209040228>
- Shu A., Collette A., Drake K., Grün E., Horányi M., Kempf S., Mocker A., Munsat T., Northway P., Srama R., Sternovsky Z., Thomas E.* 3 MV hypervelocity dust accelerator at the Colorado Center for Lunar Dust and Atmospheric Studies // *Rev. Sci. Instrum.* 2012. V. 83. id. 075108.
<https://doi.org/10.1063/1.4732820>
- Silber E.A., Boslough M., Hocking W.K., Gritsevich M., Whitaker R.W.* Physics of meteor generated shock waves in the Earth's atmosphere – A review // *Adv. Space Res.* 2018. V. 62. № 3. P. 489–532.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.05.010>
- Sokolov A.S., Akhmadullina N.S., Borzosekov V.D., Voronova E.V., Gayanova T.É., Gusein-zade N.G., Zakletskii Z.A., Kozak A.K., Malakhov D.V., Skvortsova N.N., Stepakhin V.D., Obraztsova E.A., Shishilov O.N.* Plasma-chemical facility for synthesis of micro- and nanoparticles having controlled compositions and structures on the basis of a microwave discharge in the gyrotron radiation // *Radiophys. and Quantum Electronics.* 2023. V. 65. P. 840–854.
<https://doi.org/10.1007/s11141-023-10261-z>
- Skvortsova N.N., Malakhov D.V., Stepakhin V.D., Maiorov S.A., Batanov G.M., Borzosekov V.D., Konchev E.M., Kolik L.V., Letunov A.A., Obraztsova E.A., Petrov A.E., Pozdnyakov D.O., Sarkisyan K.A., Sorokin A.A., Ukruykov G.V., Kharchev N.K.* Initiation of dusty structures in chain reactions under the action of gyrotron radiation on

- a mixture of metal and dielectric powders with an open boundary // *JETP Lett.* 2017. V. 106. P. 262–267.
https://doi.org/10.1134/S0021364017160135
- Skvortsova N.N., Maiorov S.A., Malakhov D.V., Stepakhin V.D., Obraztsova E.A., Kenzhebekova A.I., Shishilov O.N.* On the dust structures and chain reactions induced over the regolith by gyrotron radiation // *JETP Lett.* 2019. V. 109. № 7. P. 441–448.
https://doi.org/10.1134/S0021364019070130
- Skvortsova N.N., Shishilov O.N., Akhmadullina N.S., Konchev E.M., Letunov A.A., Malakhov D.V., Obraztsova E.A., Stepakhin V.D.* Synthesis of micro- and nanostructured materials via oscillating reactions initiated by high-power microwave pulses // *Ceram. Int.* 2021a. V. 47. P. 3978–3987.
https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.262
- Skvortsova N.N., Stepakhin V.D., Sorokin A.A., Malakhov D.V., Gusein-zade N.G., Akhmadullina N.S., Borzosekov V.D., Voronova E.V., Shishilov O.N.* Microwave simulation experiments on regolith (lunar dust) deposition on stainless steel // *Materials.* 2021b. V. 14. id. 6472.
https://doi.org/10.3390/ma14216472
- Skvortsova N.N., Obraztsova E.A., Stepakhin V.D., Konchev E.M., Gayanova T.E., Vasilieva L.A., Lukianov D.A., Sybachin A.V., Skvortsov D.A., Gusein-Zade N.G., Shishilov O.N.* Microdispersed Ti/B/N materials synthesized in chain reactions in processes initiated by microwaves of a high-power gyrotron: Structure and cytotoxicity // *Fusion Sci. and Technol.* 2023a.
https://doi.org/10.1080/15361055.2023.2255442
- Skvortsova N.N., Stepakhin V.D., Borzosekov V.D., Sorokin A.A., Malakhov D.V., Kachmar V.V., Kolik L.V., Konchev E.M., Gusein-zade N.G., Akhmadullina N.S., Voronova E.V., Shishilov O.N.* Microwave plasma imitation experiments on deposition of lunar dust on metal plates // *Plasma Phys. Rep.* 2023b. V. 49. P. 120–128.
https://doi.org/10.1134/S1063780X22601833
- Slyuta E.N.* Physical and mechanical properties of the lunar soil (a review) // *Sol. Syst. Res.* 2014. V. 48. P. 330–353.
https://doi.org/10.1134/S0038094614050050
- Slyuta E.N.* Physical and mechanical properties of stony meteorites // *Sol. Syst. Res.* 2017. V. 51. P. 64–85.
https://doi.org/10.1134/S0038094617010051
- Snytnikov V.N., Dudnikova G.I., Gleaves J.T., Nikitin S.A., Parmon V.N., Stoyanovsky V.O., Vshivkov V.A., Yablonsky G.S., Zakharenko V.S.* Space chemical reactor of protoplanetary disk // *Adv. Space Res.* 2002. V. 30. № 6. P. 1461–1467.
https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00507-0
- Snytnikov V.N.* Astrocatalsis abiogenic synthesis and chemical evolution at pregeological stages of the Earth's formation // *Paleontol. J.* 2010. V. 44. P. 761–777.
https://doi.org/10.1134/S0031030110070063
- Sokolov A.S., Akhmadullina N.S., Borzosekov V.D., Voronova E.V., Gayanova T.E., Gusein-zade N.G., Zakletskii Z.A., Kozak A.K., Malakhov D.V., Skvortsova N.N., Stepakhin V.D., Obraztsova E.A., Shishilov O.N.* Plasma-chemical facility for synthesis of micro- and nanoparticles having controlled compositions and structures on the basis of a microwave discharge in the gyrotron radiation // *Radiophys. and Quantum Electronics.* 2023. V. 65. P. 840–854.
https://doi.org/10.1007/s11141-023-10261-z
- Sorokin E.G., Yakovlev O.I., Slyuta E.N., Gerasimov M.V., Zaitsev M.A., Shcherbakov V.D., Ryazantsev K.M., Krashennnikov S.P.* Experimental modeling of a micro-meteorite impact on the Moon // *Geochem. Int.* 2020a. V. 58. P. 113–127.
https://doi.org/10.1134/S0016702920020111
- Sorokin E.M., Yakovlev O.I., Slyuta E.N., Gerasimov M.V., Zaitsev M.A., Shcherbakov V.D., Ryazantsev K.M., Krashennnikov S.P.* Experimental model of the formation of nanophase metallic iron in the lunar regolith // *Dokl. Earth Sci.* 2020b. V. 492. P. 431–433.
https://doi.org/10.1134/S1028334X20060203
- Stöffler D., Langenhorst F.* Shock metamorphism of quartz in nature and experiment: I. Basic observation and theory // *Meteorit. and Planet. Sci.* 1994. V. 29. № 2. P. 155–181.
https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1994.tb00670.x
- Stockstill-Cahill K., Blewett D.T., Benjamin D., Bussey J., Cahill J.T.S., Clyde B., Denevi B.W., Hibbitts K., Graziano M., Greenhagen B.T., Martin A.C., Montalbano T.J., Patterson G.W., Stickle A.M., Wagoner C.M.* 2021 Lunar Simulant Assessment // *JHU-APL LSII REPORT.* 2021. Johns Hopkins Applied Physics Laboratory.
https://lsic.jhuapl.edu/Our-Work/Working-Groups/files/Lunar-Simulants/2021%20Lunar%20Simulant%20Assessment_final.pdf (accessed November 13, 2023).
- Stockstill-Cahill K., Martin A., Wagoner C.* 2022 Lunar Simulant Assessment // *JHU-APL LSII REPORT.* 2022. Johns Hopkins Applied Physics Laboratory.
https://lsic.jhuapl.edu/Our-Work/Working-Groups/files/Lunar-Simulants/2022%20Lunar%20Simulants%20Assessment%20Final.pdf (accessed November 13, 2023).
- Taylor L.A., Pieters C.M., Keller L.P., Morris R.V., McKay D.S.* Lunar Mare Soils: Space weathering and the major effects of surface-correlated nanophase Fe // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2001. V. 106 (E11). P. 27985–27999.
https://doi.org/10.1029/2000JE001402
- Taylor L.A., Meek T.T.* Microwave Sintering of Lunar Soil: Properties, Theory, and Practice // *J. Aerospace Eng.* 2005. V. 18. № 3. P. 188–196.
https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1321(2005)18:3(188)
- Thornhill T.F., Chhabildas L.C., Reinhart W.D., Davidson D.L.* Particle launch to 19 km/s for micro-meteoroid simulation using enhanced three-stage light gas gun hypervelocity launcher techniques // *Int. J. Impact Eng.* 2006. V. 33. P. 799–811.
https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2006.09.015
- Vasyunin A.I., Semenov D., Henning Th., Wakelam V., Herbst E., Sobolev A.M.* Chemistry in protoplanetary disks: A sensitivity analysis // *Astrophys. J.* 2008. V. 672. P. 629–641.
https://doi.org/10.1086/523887
- Vodop'yanov A.V., Mansfeld D.A., Samokhin A.V., Alekseev N.V., Tsvetkov Yu.V.* Production of nanopowders by

- the evaporation–condensation method using a focused microwave radiation // Radiophys. and Quantum Electronics. 2017. V. 59. P. 698–705.
<https://doi.org/10.1007/s11141-017-9737-7>
- Vojáček V., Borovička J., Koten P., Spurný P., Štork R.* Catalogue of representative meteor spectra // Astron. and Astrophys. 2015. V. 580. id. A67 (31 p.).
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425047>
- Voronova E.V., Knyazev A.V., Letunov A.A., Logvinenko V.P., Skvortsova N.N., Stepakhin V.D.* Temperature of the surface of powders in experiments with chain plasma-chemical reactions initiated by the radiation of a gyrotron in Pd + Al₂O₃ mixtures // Phys. Atom. Nuclei. 2021. V. 84. № 10. P. 1761–1764.
<https://doi.org/10.1134/S1063778821090374>
- Vricella A., Delfini A., Pacciani A., Pastore R., Micheli D., Rubini G., Marchetti M., Santoni F.* A new advanced rail-gun system for debris impact study // Procedia Struct. Integr. 2017. V. 3. P. 545–552.
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.04.044>
- Zaitsev M.A., Gerasimov M.V., Safonova E.N., Vasiljeva A.S.* Peculiarities in the formation of complex organic compounds in a nitrogen–methane atmosphere during hypervelocity impacts // Sol. Syst. Res. 2016. V. 50. P. 113–129.
<https://doi.org/10.1134/S0038094616020076>
- Zakharov A.V., Zelenyi L.M., Popel' S.I.* Lunar dust: properties and potential hazards // Sol. Syst. Res. 2020. V. 54. P. 455–476.
<https://doi.org/10.1134/S0038094620060076>

УДК 520.44+523.44+523.4-1/-8

НАБЛЮДАЕМЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРИЗНАКИ И ВЕРОЯТНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИ ТОНКОЙ И ТОЛСТОЙ ПЫЛЕВОЙ ЭКЗОСФЕРЫ АКТИВНЫХ АСТЕРОИДОВ

© 2024 г. В. В. Бусарев^{a, b, *}, Е. В. Петрова^c, В. Б. Пузин^b,
С. И. Барабанов^b, М. П. Щербина^{b, a}, С. Ю. Кузнецов^d

^a МГУ им. М.В. Ломоносова, Астрономический ин-т им. П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ), Москва, Россия

^b Институт астрономии РАН (ИНАСАН), Москва, Россия

^c Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия

^d МГУ им. М.В. Ломоносова, факультет космических исследований, Москва, Россия

*e-mail: busarev@sai.msu.ru

Поступила в редакцию 14.11.2023 г.

После доработки 04.12.2023 г.

Принята к публикации 15.01.2024 г.

Обнаружение и изучение спектральных признаков сублимационно-пылевой активности (СПА) двадцати астероидов примитивных типов Главного пояса, наблюдаемых в видимом диапазоне, позволило нам установить ее временный (или периодический) характер. СПА астероидов проявляет себя с относительно низкой интенсивностью преимущественно вблизи их минимальных гелиоцентрических расстояний и, соответственно, при их наиболее высоких подсолнечных температурах (т. е. вблизи абсолютного максимума поверхностной температуры астероида в центре его освещенного полушария). С высокой вероятностью основной причиной СПА этих астероидов является наличие льда H_2O в их недрах, который оказывается вскрытым благодаря недавним ударным событиям. Как следует из численного моделирования спектров отражения рассматриваемых активных астероидов, окружающая эти тела оптически тонкая пылевая экзосфера (ПЭ), обусловленная СПА, состоит из субмикронных однородных частиц разного состава и/или фракталоподобных агрегатов таких частиц. С учетом крайне слабого гравитационного поля астероидов (особенно при их размерах менее ~ 10 км), неспособного удерживать такую оптически-тонкую ПЭ даже непродолжительное время, мы пришли к выводу о том, что ПЭ активных астероидов примитивных типов поддерживается совместной работой двух механизмов: электростатическое поле фотоэмиссионной природы создает плазменно-пылевой слой на подсолнечной стороне астероида (как и всех безатмосферных небесных тел), а СПА обеспечивает дополнительный выброс пылевых частиц с поверхности в этот слой до обнаружимого уровня; при этом собственное вращение тела способствует их распределению вокруг астероида.

Ключевые слова: активность астероидов, спектры отражения, оптически тонкая и толстая пылевая экзосфера, электростатическое поле фотоэмиссионной природы

DOI: 10.31857/S0320930X24030056, **EDN:** NECSAL

ВВЕДЕНИЕ

За последние два десятилетия в Главном поясе астероидов (ГПА) было обнаружено около 30 тел с разными признаками активности (см., например, Jewitt, Hsieh, 2022, а также указанные в данной работе ссылки). Примерно половина из них — это тела размером ~ 1 км и менее, так называемые кометы Главного пояса (КГП) астероидов, которые были обнаружены благодаря их кометоподобной активности, но впоследствии регулярно проявляли только более слабую сублимационно-пылевую активность (СПА) вблизи

перигелийного расстояния (Hsieh, Jewitt, 2006; Hsieh, Haghighipour, 2016; Hsieh и др., 2023). Авторы указанных работ рассматривают КГП как потухшие ядра комет, попавшие в ГПА из семейства комет Юпитера под влиянием гравитационных резонансов. Вероятной причиной возобновления активности КГП считается ускорение их осевого вращения под влиянием эффекта Ярковского—О'Кифа—Радзиевского—Пэддака, в результате которого происходит их частичное разрушение под действием центробежной силы (Jewitt, 2012; Hsieh и др., 2023). Но имеется

и другой механизм активации ядер КГП, — при столкновениях с заполняющими ГПА телами меньших размеров. Высокая частота ударных событий в ГПА подтверждается данными космического телескопа IRAS, которые позволили обнаружить связанные с ГПА устойчивые пылевые пояса (Sykes и др., 1989; Veeder, Tedesco, 1992). “Ударный” сценарий активации КГП подтверждается и модельными расчетами (см., например, Шустов и др., 2022). Кроме того, последовавшее за первоначальной высокой активностью КГП проявление последней у них только вблизи перигелия (Hsieh и др., 2023) считается признаком наличия льда H_2O в составе вещества, что характерно для гипотетических кометных ядер, исчерпавших в основном запас более летучих соединений. Но нехарактерным для КГП является обнаружение космическим телескопом JWST льда H_2O в составе комы одной из них (238P/Read) при одновременном отсутствии признаков CO_2 (Kelley и др., 2023). Это указывает на то, что КГП, возможно, представляют собой не ядра комет, образовавшиеся на далекой периферии Солнечной системы, а астероиды примитивных типов с низкотемпературной минералогией. Как уже обсуждалось в наших публикациях (Бусарев, 2002; 2010; 2016; Бусарев и др., 2023; Busarev, 2012; Busarev и др., 2018; 2021a), такие астероиды могли сформироваться в ранней Солнечной системе вблизи границы конденсации льда H_2O (а также за ее пределами) и удерживать его в своих недрах до настоящего времени (см., например, Schorghofer, 2008; 2016). Предполагаемое происхождение астероидов примитивных типов следует из их абсолютного количественного преобладания над астероидами других типов вместе взятых. Судя по спектральным базам данных, они составляют не менее 75% всех известных астероидов.

В статье представлены и обсуждаются спектры отражения активных астероидов (АА) примитивных типов с тонкой пылевой экзосферой, состоящей из субмикронных однородных частиц разного состава или их агрегатов разной структуры, которые могут образоваться в процессе СПА. Существование такой ПЭ у АА подтверждается хорошим согласием наблюдательных и модельных спектров отражения АА, полученных с помощью расчетов характеристик рассеяния указанных частиц и переноса излучения в экзосфере, содержащей такие частицы. Приводится обоснование механизма и условий удержания оптически тонкой ($\tau \leq 0.5$) экзосферы активным астероидом, обладающим слабым гравитационным полем, а также рассматривается возможность возникновения временной оптически толстой ПЭ (до $\tau = 6.0$) условного АА.

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ С СУБЛИМАЦИОННО-ПЫЛЕВОЙ АКТИВНОСТЬЮ: РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты наблюдений

Наши наблюдательные программы были направлены на изучение астероидов примитивных типов с целью обнаружения у них вблизи перигелийных расстояний признаков СПА, связанной с наличием в их составе вещества водяного льда. Спектрофотометрия низкого разрешения ($R \sim 100$) и/или $UBVR_cI_c$ -фотометрия были основными методами измерений (см., например, Бусарев, 1999; Бусарев и др., 2023); они сопровождалась расчетом спектров отражения астероидов (или их аппроксимированных спектров отражения) по их наблюдательным данным, а также по данным переменных звезд солнечного типа в качестве аналогов Солнца. Спектральные наблюдения астероидов примитивных типов были нами начаты в сентябре 2012 г. Они позволили к настоящему моменту обнаружить признаки СПА (или у некоторых такие признаки подозреваются), в основном достаточно слабые, у 20 астероидов Главного пояса и одного Марс-кроссера вблизи перигелия (Бусарев и др., 2016; 2019; 2022; 2023; Busarev и др., 2015; 2018; 2020; 2021a). В число этих астероидов вошли: 1 Церера, 19 Фортуна, 24 Фемида, 51 Немауза, 52 Европа, 65 Кибела, 145 Адеона, 177 Ирма, 203 Помпея, 266 Алина, 302 Кларисса, 322 Фео, 379 Гуенна, 383 Янина, 435 Элла, 449 Гамбург, 690 Вратиславия, 704 Интерамния, 779 Нина и 1474 Бейра с таксономическими типами С, В, F, G и X. Несколько подробнее следует охарактеризовать активность 1 Цереры, обнаруженной нами на основе многолетних спектрофотометрических наблюдений (Busarev и др., 2020). Изучение этих данных показало, что вариации спектров отражения Цереры, связанные, вероятно, как и у вышеперечисленных астероидов, с процессом СПА, коррелируют с солнечной активностью, что с учетом предельно малых значений эксцентриситета ее орбиты и наклона оси вращения к плоскости орбиты (Schorghofer и др., 2016) позволяет рассматривать последний фактор в активности этого астероида как основной (Busarev и др., 2020).

В качестве примеров на рис. 1 приведены нормированные спектры отражения АА Главного пояса 145 Адеоны (С или Ch), 704 Интерамнии (F или B), 779 Нины (X) и Марс-кроссера 1474 Бейры (FX или B) (в скобках указана спектральная классификация Tholen (1989) или SMASII, или только Tholen), полученные в сентябре 2012 г. во время максимума солнечной активности, когда астероиды находились вблизи

перигелийных расстояний. Для сравнения черным цветом показаны спектры отражения из базы данных SMASSII, полученные ранее для тех же астероидов, но в спокойном состоянии. Относительные погрешности спектров отражения в центре видимого диапазона составляют 1–2% и возрастают вблизи его границ до 5–7% (Бусарев и др., 2016). Приведенные спектры астероидов измерены нами в диапазоне фазовых углов 13.9° – 24.0° .

Как видно из рис. 1, наиболее характерными деталями на спектрах отражения АА 145 Адеоны, 704 Интерамнии, 779 Нины и 1474 Бейры, полученных в 2012 г., являются необычные максимумы вблизи ~ 0.4 – 0.5 и 0.6 – 0.7 мкм по сравнению с гладкими или почти прямолинейными спектрами отражения этих же астероидов в неактивном состоянии. В нашей работе (Бусарев и др., 2016) было впервые сделано предположение, что эти максимумы образуются в спектрах АА примитивных типов при рассеянии света субмикронными пылевыми частицами разного размера, состава и структуры, вынесенными с поверхности газовыми потоками при СПА. Можно предполагать, что в период максимума солнечной активности указанные максимумы имели наиболее выраженную форму благодаря тому, что более сильная электризация пылевых частиц приводила к более

интенсивному их выносу и увеличивала их концентрацию в ПЭ АА. Вернемся к этому вопросу в разделе о механизме формирования оптически тонкой ПЭ АА.

Другие астероиды из вышеприведенного списка продемонстрировали вблизи перигелийных расстояний похожие, но в большинстве случаев более слабые спектральные особенности, на основании чего были также включены в список АА. В качестве примеров на рис. 2 приводятся спектры отражения шести таких астероидов, у которых была обнаружена СПА с помощью $UBVR_{\text{c}}$ -наблюдений (полиномиальная аппроксимация спектров астероидов выполнена по их отражательной способности на эффективных длинах используемых фотометрических полос) (Бусарев и др., 2023).

Максимальные расчетные погрешности измерений (в виде баров ошибок) на представленных на рис. 2 спектрах, показаны только на эффективных длинах волн фотометрических полос U' , B' и I'_{c} . В полосах V и R'_{c} они составляют менее 1% и поэтому не приведены (Бусарев и др., 2023). Из рисунка видно, что отклонения у коротковолновых и длинноволновых границ спектров отражения АА 145, 322 и 779 от их канонических спектров из базы SMASSII (когда астероиды были в неактивном состоянии) в 2–3 раза больше

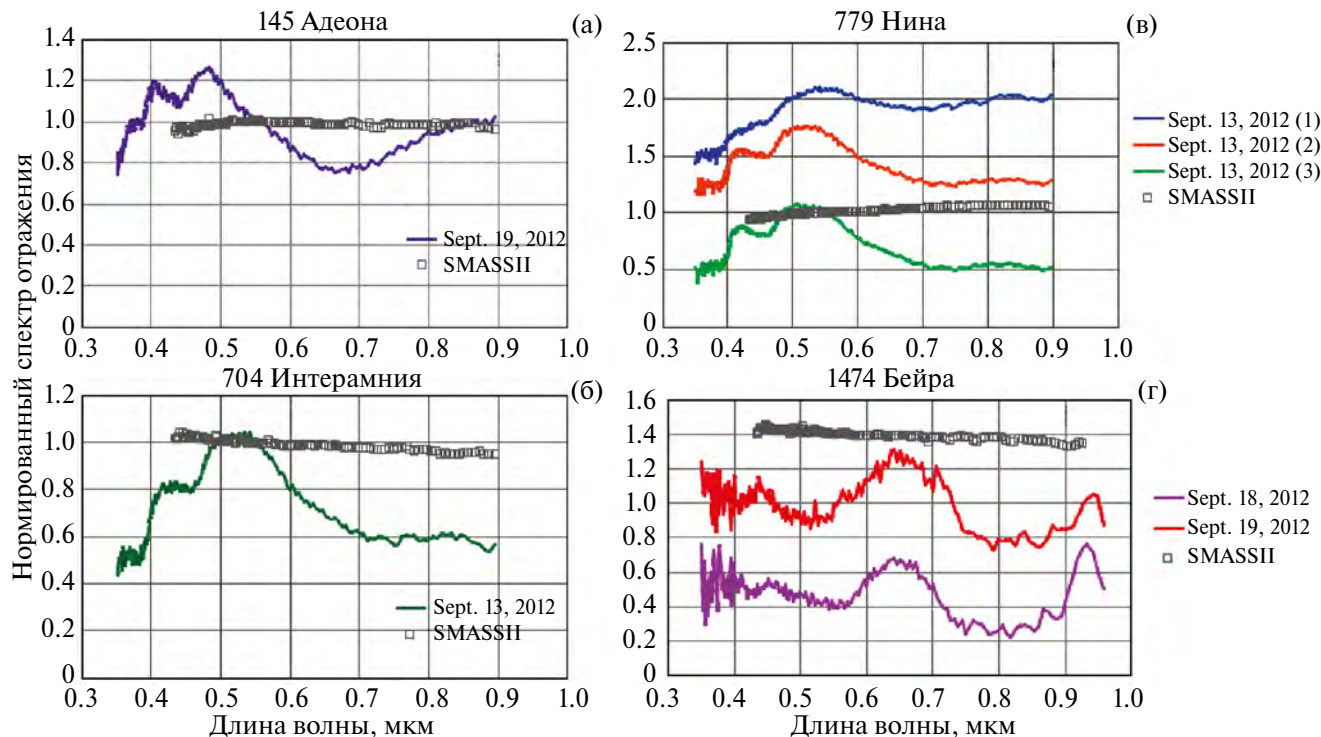


Рис. 1. Нормированные (на длину волны 0.55 мкм) спектры отражения, полученные в 2012 г. при активном состоянии астероидов (разноцветные кривые) и спектры этих астероидов в неактивном состоянии (кривые черного цвета из базы данных SMASSII): (а) – 145 Адеоны (С или Ch); (б) – 704 Интерамнии (F или B); (в) – 779 Нины (X); (г) – 1474 Бейры (FX или B) (Бусарев и др., 2016). В скобках указана спектральная классификация астероидов по Толену (Tholen, 1989) или согласно базе данных SMASSII (https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html).

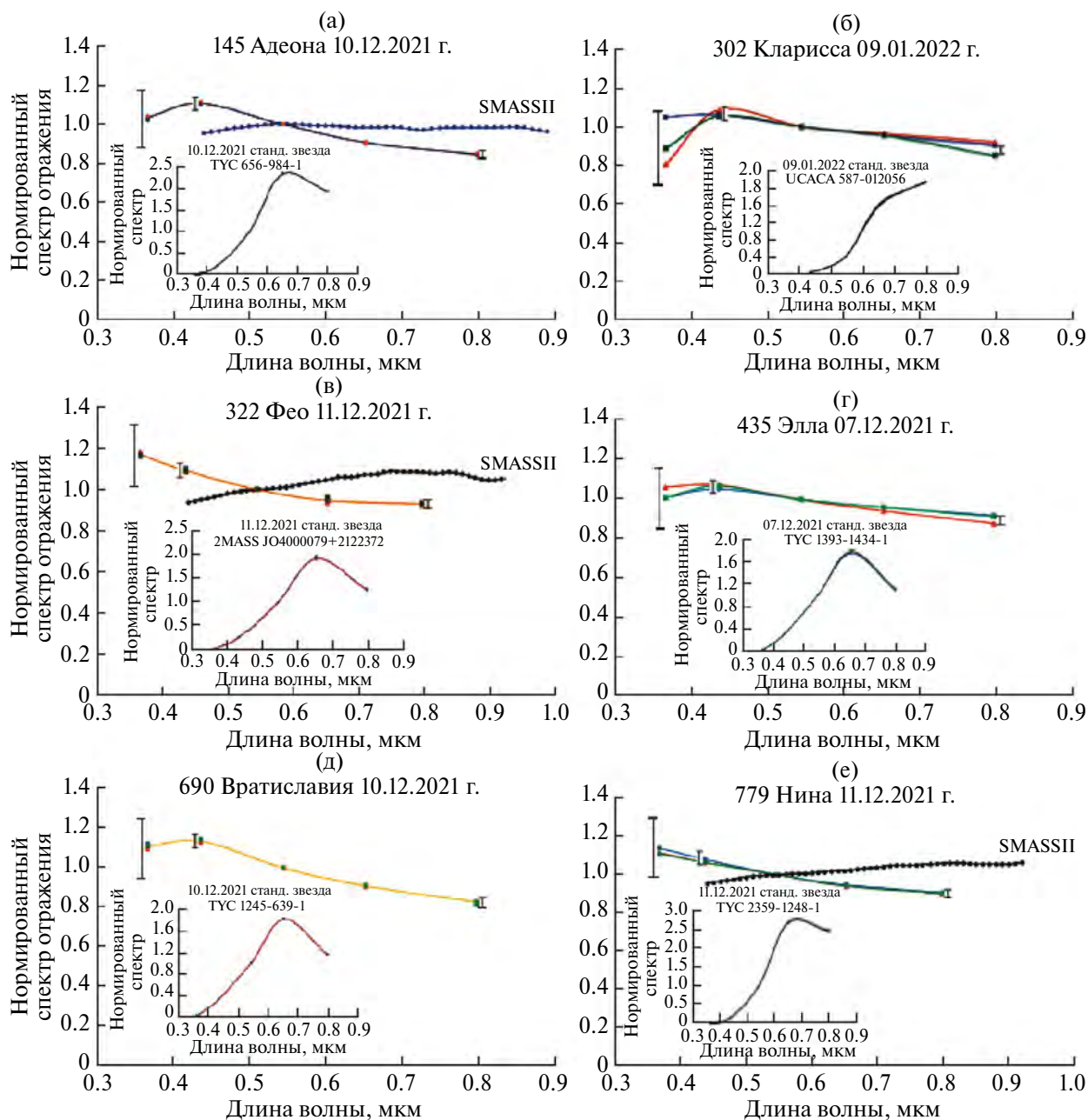


Рис. 2. Нормированные (на длине волны 0.55 мкм) аппроксимированные спектры отражения астероидов: (а) – 145 Адеона; (б) – 302 Кларисса; (в) – 322 Фео; (г) – 435 Элла; (д) – 690 Вратиславия; (е) – 779 Нина (Бусарев и др., 2023). Три последовательных спектра отражения каждого астероида изображены разными цветами. Для контроля стабильности фотометрических наблюдательных условий на вставках на каждом графике также показаны по три нормированных на длине волны 0.55 мкм последовательных спектра (практически совпадающих по причине хороших наблюдательных условий) контрольных непериодических звезд с общих с астероидами ПЗС-кадров.

указанных ошибок. Фазовые углы рассматриваемых астероидов в период наблюдений составляли 7.2° – 17.2° (Бусарев и др., 2023).

Только у трех из этих астероидов (145, 322 и 779) в базе данных SMSSII имелись ранее полученные спектры отражения, когда астероиды были неактивны (изображенные на рис. 2), которые мы использовали для сравнения со спектрами астероидов в активном состоянии и оценки

величин их максимальных отклонений у коротковолновой и длинноволновой границ спектрального диапазона. Для трех других астероидов (302, 435 и 690) в качестве “канонических” использовались усредненные спектры отражения их таксономических (спектральных) типов (Tholen, Barucci, 1989). Важно отметить, что серийные измерения трех последовательных спектров АА 302 Кларисса (диаметр 38.5 км) на общем интервале време-

ни около 30 мин. (рис. 26) (три последовательных измерения по одному разу во всех светофильтрах) позволили обнаружить изменения нормированной отражательной способности этого астероида у коротковолновой и длинноволновой границ спектрального диапазона, превышающие ошибки измерений. Этот результат можно рассматривать как дополнительное подтверждение СПА и подвижности ПЭ 302 Клариссы (Бусарев и др., 2023), поскольку изменения блеска астероидов достаточно крупных размеров, связанные с вариациями альбедо их поверхности, происходят значительно медленнее. Как показывают статистические исследования, периоды вращения астероидов Главного пояса с размерами ~ 30 – 100 км не выходят за пределы интервала $\sim 5^h$ – 15^h (Pravec и др., 2002). Следует также отметить, что активность 145 Адеоны и 779 Нины была нами подтверждена вблизи перигелия в третий раз за 10 лет (с 2012 г. по 2022 г.), что сопоставимо с тремя периодами их обращения вокруг Солнца и позволяет оценить длительность процесса СПА каждого астероида вблизи перигелия около нескольких месяцев.

Результаты моделирования

Для подтверждения наших предположений о спектральных признаках и физическом механизме СПА астероидов с низкотемпературной минералогией было выполнено численное моделирование спектров отражения условного астероида С-типа (сферической формы для простоты расчетов) с геометрическим альбедо 0.07 на длине волны 0.55 мкм. Эти расчеты основаны на теории переноса излучения в экзосфере, состоящей из субмикронных однородных частиц и/или фракталоподобных агрегатов таких частиц (так называемых мономеров). Предварительно были вычислены характеристики рассеяния однород-

ных и агрегатных частиц разного состава и морфологии. Подробное описание вычислительных методов, а также выбора параметров частиц можно найти в наших предыдущих работах (Busarev и др., 2021a; Петрова, Бусарев, 2023). Здесь лишь отметим, что агрегатные структуры, размеры мономеров в агрегатах и их состав были выбраны на основе результатов исследований частиц межпланетной и кометной пыли, а также результатов анализа поляриметрии комет.

При вычислении модельных спектров мы рассматривали как плотно упакованные, так и разреженные агрегатные структуры, а для радиуса мономеров в агрегатах были выбраны четыре значения: $r = 0.08, 0.10, 0.12$ и 0.15 мкм. Форма мономеров была принята сферической, что существенно облегчает расчеты и в то же время не оказывает заметного влияния на результаты моделирования из-за малого размера частиц относительно длины волны в рассматриваемом спектральном диапазоне. Что касается однородных частиц, их форма тоже была принята сферической из-за относительной малости размеров (эффективный радиус распределения по размерам $R_{\text{eff}} = 0.1$ мкм при эффективной вариации $v_{\text{eff}} = 0.1$).

В качестве материала частиц для модельных расчетов характеристик рассеяния мы рассматривали восемь веществ: льды H_2O и CO_2 , железомagneзиальные силикаты (оливины), так называемые астрономические силикаты (их оптические характеристики были получены на основе синтеза результатов лабораторных измерений и теоретического моделирования деталей в ИК-спектре для того, чтобы обеспечить согласие с данными ряда астрономических наблюдений), аморфный углерод, тугоплавкую органику и смеси органических веществ, известные как толины Титана и Плутона. Однако, поскольку часть этих материалов имеет близкие по спектральному

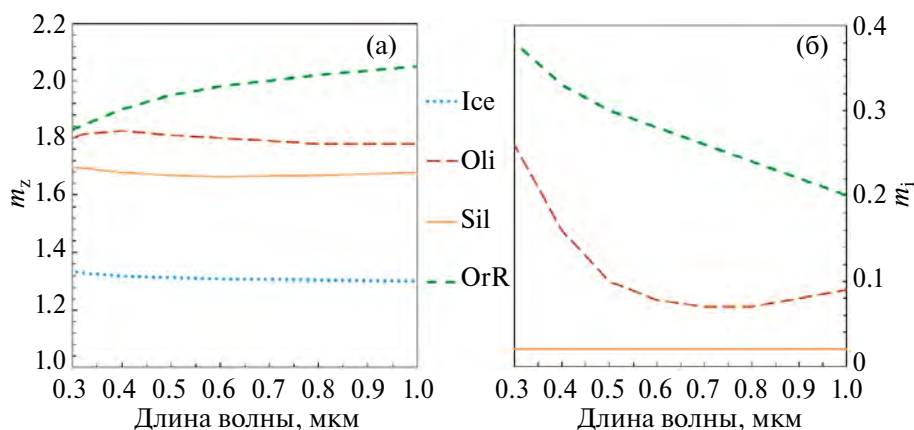


Рис. 3. Спектральные зависимости показателя преломления льда H_2O (Ice), астрономических силикатов (Sil), оливинов (Oli), и тугоплавкой органики (OrR): (a) — для действительной части показателя m_z ; (б) — для мнимой части показателя m_i . Для льда значения m_i близки к нулю в данном спектральном диапазоне. Ссылки приведены в тексте.

поведению показатели преломления в рассматриваемом диапазоне, спектры интенсивности излучения, рассеянного частицами этих материалов, также близки. Поэтому ниже представлены модельные спектры отражения АА с экзосферой, содержащей агрегатные частицы, только для показателей преломления четырех материалов: льда H_2O (Warren, Brandt, 2008), астрономических силикатов (Li, Greenberg, 1997), оливинов (Dorschner и др., 1995) и тугоплавкой органики (Li, Greenberg, 1997). Действительная m_r и мнимая m_i части показателей преломления этих веществ представлены на рис. 3.

Как было показано в наших предыдущих работах (Busarev и др., 2021a; Петрова, Бусарев, 2023), рассеяние на частицах сложной структуры, состоящих из мономеров с радиусом около 0.1 мкм, может вызывать появление необычных деталей, наблюдаемых в ряде случаев в спектрах отражения АА в ближнем УФ- и видимом диапазонах (см. рис. 1). В частности, экстремумы в коротковолновой части спектров таких агрегатов обусловлены интерференцией электромагнитных волн, рассеянных на отдельных мономерах в составе агрегата, в то время как интерференция волн, рассеянных группами мономеров, ответственна за детали на более длинных волнах. Более того, положение интерференционных деталей в спектре определяется размерами этих мономеров (но не самих агрегатов) и действительной частью их показателя преломления и слабо зависит от структуры агрегатов и количества мономеров.

Последнее обстоятельство дает возможность ограничиться в модельных расчетах относительно небольшими ансамблями частиц; в показанных ниже примерах (рис. 4 и рис. 5) экзосфера состоит из агрегатов с плотно упакованной структурой (пористость около 0.55), содержащих 100 мономеров. Из модельных спектров на рис. 4 видно, что при увеличении размеров мономеров в агрегатах интерференционная картина сдвигается в “красную” сторону спектра. Такой же эффект производит увеличение действительной части показателя преломления, а рост поглощения подавляет интерференционные детали в коротковолновом диапазоне.

Примеры модельных спектров на рис. 4 рассчитаны для оптической толщины экзосферы $\tau = 0.5$. При этом значении τ детали спектра, обусловленные рассеянием на агрегатных частицах, становятся хорошо заметными. Изменение формы нормированного спектра отражения АА с изменением оптической толщины экзосферы показано на рис. 5. При $\tau = 0.1$ присутствие экзосферы слабо заметно в спектрах, но оно существенно растет с увеличением τ до некоторого значения, обусловленного влиянием многократного рассеяния и зависящего от свойств частиц. Ниже мы обсудим эти эффекты подробнее.

Влияние оптической толщины экзосферы на нормированный спектр отражения АА хорошо видно на рис. 6, где показаны модельные спектры для случая однородных субмикронных частиц льда и оливина в экзосфере. Очевидно, что

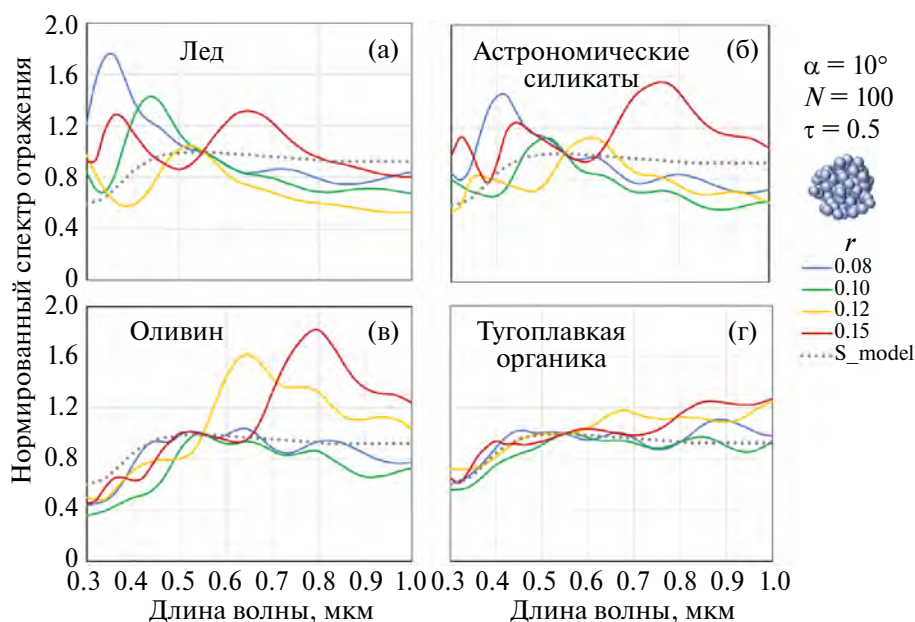


Рис. 4. Модельные нормированные (на длине волны 0.55 мкм) спектры отражения условного астероида С-типа при фазовом угле $\alpha = 10^\circ$ (спектр отражения астероида без экзосферы показан точечной линией “S_model”). Экзосфера содержит плотно упакованные агрегатные частицы (структура показана справа), состоящие из 100 мономеров указанных радиусов r (в микронах) и указанного состава. Оптическая толщина экзосферы $\tau = 0.5$.

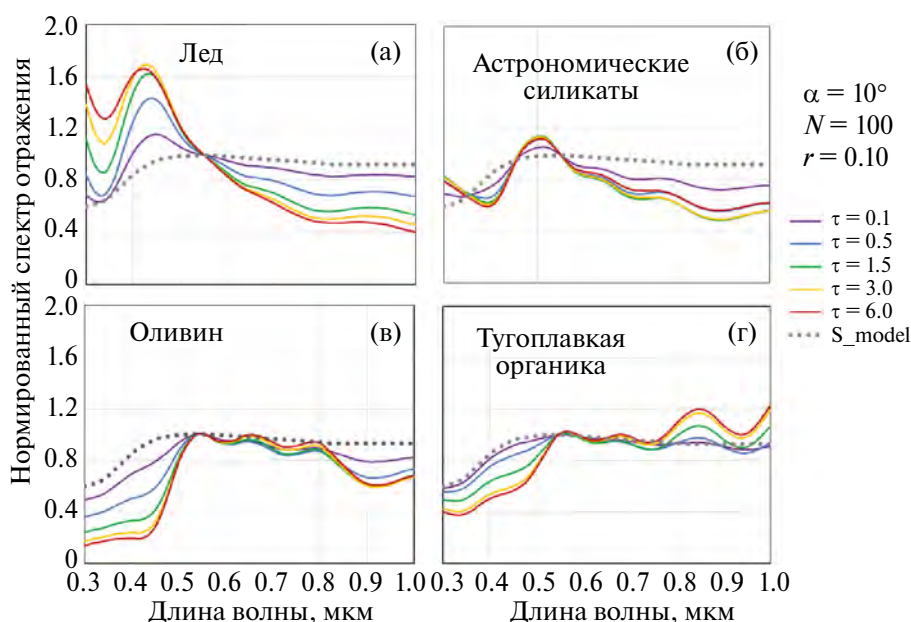


Рис. 5. То же, что на рис. 4, но для экзосферы разной оптической толщины (от 0.1 до 6.0), содержащей агрегатные частицы, состоящие из 100 мономеров с радиусом 0.1 мкм.

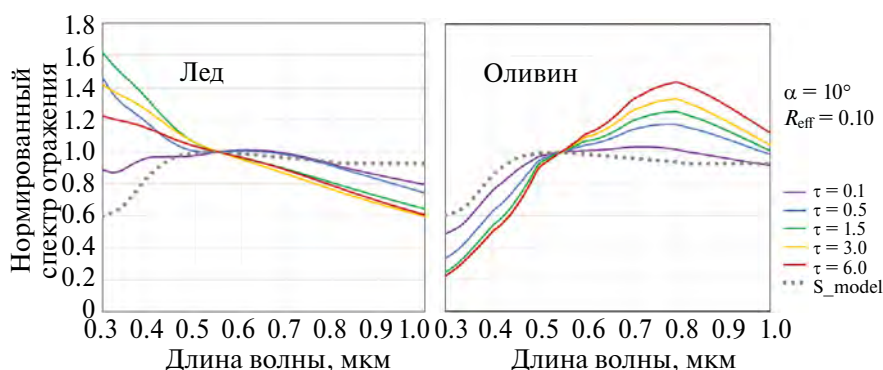


Рис. 6. То же, что на рис. 4, но для экзосферы, содержащей субмикронные однородные частицы указанного состава с эффективным радиусом $R_{\text{eff}} = 0.1$ мкм (при $v_{\text{eff}} = 0.1$). Оптическая толщина экзосферы τ изменяется 0.1 до 6.0.

присутствие частиц непоглощающего льда существенно поднимает коротковолновую часть спектра (аналогичное влияние оказывает присутствие слабопоглощающих астрономических силикатов), и с ростом оптической толщины до некоторого значения, обусловленного влиянием многократного рассеяния, этот эффект усиливается. Присутствие в экзосфере частиц, поглощающих в коротковолновом диапазоне, подавляет яркость в этом диапазоне и увеличивает положительный градиент спектра тем сильнее, чем больше τ .

ОБСУЖДЕНИЕ

Сходные тенденции поведения и детали в наблюдаемых (рис. 1 и 2) и модельных (рис. 4–6) нормированных спектрах отражения АА примитивных типов свидетельствуют о правильности

наших представлений о причинах СПА и физических механизмах формирования спектральных особенностей АА. Как следует из полученных нами результатов, слабая СПА и образование связанной с ней оптически тонкой ПЭ у астероидов ГПА примитивных типов с низкотемпературной минералогией возможны при следующих общих условиях: 1) наличие льда H_2O в составе вещества; 2) недавние столкновения астероидов с телами меньших размеров в ГПА, приведшие к образованию локальных обнажений льда на их поверхности или к вскрытию его залежей под поверхностью; 3) значительный эксцентриситет орбиты (>0.1) как благоприятный фактор для возникновения СПА при более высоких подсолнечных температурах; 4) спорадические события и/или общее повышение солнечной активности, приводящие к образованию ударных волн в плазме солнечного ветра, воздействующих

на поверхностное и подповерхностное вещество астероидов. Очевидно, что длительность существования временной ПЭ на астероиде в каждом конкретном случае определяется интенсивностью и продолжительностью соответствующего процесса СПА в зависимости от объема ледяных обнажений у поверхности, а также параметрами орбиты астероида.

Модельные расчеты показали, что изменение наклона спектра отражения АА может быть вызвано присутствием ПЭ, содержащей очень мелкие субмикронные не поглощающие или слабо поглощающие частицы, а необычные детали спектра, такие как экстремумы и “ступеньки”, могут быть обусловлены рассеянием на частицах сложной структуры, состоящих из субмикронных зерен. При этом оптическая толщина ПЭ находится примерно в пределах от 0.1 до 0.5.

*Вероятный механизм формирования
оптически тонкой пылевой экзосферы
активных астероидов*

Как известно, астероиды считаются безатмосферными небесными телами по причине малой массы и, соответственно, слабого гравитационного поля, которое не может удерживать даже на интервале времени порядка одного периода обращения этих тел вокруг Солнца не только газовую атмосферу, но и разреженную ПЭ. Тем не менее теоретически предложены несколько механизмов (например, Jewitt, 2012), которые могут приводить к возникновению временной ПЭ, среди которых на первом месте стоит СПА по данным о частоте обнаружений КГП и их свойствам (Jewitt, Hsieh, 2022). Наиболее вероятной причиной формирования ПЭ у подобных объектов может быть процесс выноса мельчайшей пыли с поверхности газовыми потоками, возникающими при сублимации подповерхностного водяного льда или его обнажении, возникшем при ударном событии.

Для простоты будем считать, что астероид имеет сферическую форму, радиус R и равномерное распределение массы, а частицы являются материальными точками с пренебрежимо малой

массой, движущимися в системе координат с началом на поверхности астероида. Если рассмотреть траекторию одной частицы, выброшенной вертикально вверх с поверхности астероида с первой космической скоростью, то ее движение с ускорением g_a (с учетом только гравитационного поля астероида) будет описываться одномерным дифференциальным уравнением

$$m \times \ddot{x} = -\frac{m \times g_a \times R^2}{(R + x)^2}, \quad (1)$$

где m — масса частицы, а x — ее координата. Интегрирование этого уравнения и учет граничных условий позволяют получить формулу для максимальной высоты (H_1) подъема частицы, где ее скорость обращается в ноль:

$$H_1 = \frac{R \times v_1^2}{2 \times g_a \times R - v_1^2}. \quad (2)$$

Для пробной пылевой частицы малой массы в таблице 1 приведены расчетные значения космических скоростей, гравитационных ускорений и высоты H_1 вблизи трех астероидов с разными массами и размерами. Эти значения показывают, что независимо от размера астероида, с учетом только силы его гравитационного поля, высота H_1 подъема основного количества пылевых частиц над его поверхностью примерно равна его радиусу. Это подтверждается результатами численного моделирования заполнения частицами временной ПЭ астероидов с использованием метода Монте-Карло (Schläppi и др., 2008). Найденную высоту H_1 можно было бы использовать как некоторую условную верхнюю границу ПЭ астероидов, если бы не было других значительных факторов. С увеличением высоты подъема пылевых частиц в слабом поле тяготения астероида его гравитационное влияние на частицы быстро ослабевает, особенно — на частицы субмикронного размера. В общем случае пылевая частица, отделившаяся от поверхности астероида под действием каких-либо факторов, подвергается суммарному воздействию не только гравитационных полей самого астероида, Солнца и других оказавшихся поблизости небесных тел, но

Таблица 1. Сравнение силы гравитационного поля у астероидов с разными массами и размерами

Название астероида	R , км	v_1 , м/с	v_2 , м/с	g_a , м/с ²	H_1 , км
1 Церера (C)	469.7	365.15	516.40	0.2839	469.6
10 Гигея (C)	203.6	185.42	262.22	0.1689	203.5
101955 Бенну (B)	0.241	0.14245	0.20145	0.0000842	0.241

Примечание. R — эффективный радиус астероида; v_1 и v_2 — первая и вторая космические скорости соответственно; g_a — ускорение свободного падения вблизи поверхности астероида; H_1 — максимальная высота, достигаемая частицей при движении вертикально вверх с первой космической скоростью под влиянием только гравитационного поля астероида. Для расчетов были использованы данные о величинах GM и R астероидов с номерами 1, 10 и 101955 с сайта <https://ssd.jpl.nasa.gov/>.

и электростатического поля фотоэмиссионной природы, возникающего под действием мягкого рентгеновского и ультрафиолетового солнечного излучения (см., например, Singer, Walker, 1962; Nitter, Havnes, 1992; Lee, 1996; Борисов, Захаров, 2014).

Как известно из результатов первых космических исследований лунной поверхности (см., например, Criswell, 1972; Rennilson, Criswell, 1974; Berg и др., 1976), сила электростатического поля фотоэмиссионной природы может превосходить силу гравитации, способна отрывать от поверхности и приводить в состояние левитации заряженные пылевые частицы субмикронных и микронных размеров. Такие частицы вместе с электронами и протонами формируют плазменно-пылевую оболочку, или слой (англ. перевод — *plasma sheath*), “скользящий” непосредственно над освещенной Солнцем поверхностью вращающегося безатмосферного тела. Теоретические расчеты и моделирование показывают (см., например, Nitter, Havnes, 1992; Lee, 1996; Colwell и др., 2005; Poppe и др., 2012; 2015; Popel и др., 2015; Hartzell, 2019, а также указанные в данных работах ссылки), что мельчайшие заряженные пылевые частицы (порядка $\sim 10^{-2}$ мкм и меньше), оказавшись в пределах плазменно-пылевого слоя, толщина которого увеличивается от нескольких десятков сантиметров вблизи подсолнечной точки до примерно километра вблизи терминатора, ускоряются возрастающим электростатическим градиентом (до ~ 300 В/м) настолько, что выбрасываются из поля тяготения этого тела. Частицы несколько большего размера, от 10^{-2} до 1 мкм, оказавшиеся в тех же условиях, балансируют между силами электростатического и гравитационного полей, но могут быть в любой момент выброшены под действием флуктуаций солнечного ветра или радиационного давления (Nitter, Havnes, 1992; Lee, 1996). Как следует из результатов наших наблюдений и моделирования, именно такие частицы наиболее эффективно влияют на спектральные характеристики АА.

Таким образом, мы предполагаем, что: 1) временная ПЭ, возникающая на астероиде примитивного типа при СПА, в основном соответствует плазменно-пылевому слою, который пополняется пылевыми частицами, увлекаемыми газовыми потоками из обнажения или вскрытых подповерхностных залежей льда H_2O при вращении астероида, что приводит к увеличению оптической толщины ПЭ примерно до значений $\tau \sim 0.1-0.5$, которые согласуются с результатами модельных расчетов спектров отражения; 2) агрегатные частицы с размерами от $\sim 10^{-2}$ до 1 мкм формируются, вероятно, в плазменно-пылевом слое АА из левитирующих одиночных частиц, имеющих

противоположные заряды, которые образуются в процессе их стохастического накопления при фотоионизации частиц коротковолновым электромагнитным излучением и при их взаимодействии с электронами и протонами солнечного ветра. Это предположение основано на подобии физических условий в плазменно-пылевом слое безатмосферных небесных тел и астрофизической среды досолнечной туманности (небулы) и протопланетных дисков, где коагуляция частиц пыли является фундаментальным процессом, который подтверждается теоретическими и модельными расчетами (см., например, Mendis, Rosenberg, 1994; Matthews, Hyde, 2009; Matthews и др., 2013; 2018). Объединение в агрегаты частиц микронных и более крупных размеров, левитирующих в плазменно-пылевом слое, также наблюдалось в вакуумной камере под действием УФ-излучения и потока электронов на микросферы SiO_2 (например, Orgel и др., 2021).

Оптически толстая пылевая экзосфера

Из рис. 5 видно, что с увеличением оптической толщины ПЭ основными тенденциями изменения спектров отражения АА являются: 1) значительный рост интенсивности света, рассеянного в экзосфере непоглощающими или слабо поглощающими частицами (лед H_2O , астрономические силикаты) и, напротив, заметное снижение этого параметра для сильно поглощающих частиц (оливин и тугоплавкая органика) в коротковолновой части спектра; 2) повышение отражательной способности в длинноволновой части спектра для частиц тугоплавкой органики, в отличие от остальных соединений, демонстрирующих постепенное уменьшение этого параметра. С учетом вышесказанного можно предполагать, что в рассматриваемом спектральном диапазоне с ростом оптической толщины ПЭ, состоящей из агрегатных частиц смешанного состава (например, в простейшем случае, при равных долях указанных соединений), спектр отражения АА может приобрести более гладкую и частично вогнутую (или выпуклую) форму в результате взаимной компенсации интерференционных максимумов и минимумов при многократных отражениях света. Возможно, что такую форму спектров отражения мы наблюдаем у активных ядер комет, окруженных плотной комой (см., например, Busarev и др., 2021b). Однако следует подчеркнуть, что в общем случае влияние увеличения оптической толщины ПЭ на форму спектра отражения АА может быть весьма разнообразным в зависимости от состава вещества (показателя преломления) частиц в экзосфере и их морфологии, поскольку их эффекты в самых разных комбинациях будут накладываться

ся на изменения, вызванные увеличением оптической толщины.

Мы предполагаем, что оптически толстая ПЭ (τ в пределах 1.0–6.0) на АА может образоваться только при сильных ударных событиях, когда с поверхности астероида одновременно выбрасывается большое количество мельчайшей пыли и более крупных частиц. Возможными примерами таких событий являются обнаружения КГП – кометоподобных тел километрового и меньшего размеров (см., например, Hsieh и др., 2023), внезапная активность которых делает их заметными и, вероятно, является следствием столкновения тел сопоставимых размеров.

ВЫВОДЫ

Таким образом, обнаружение спектральным методом СПА и связанной с ней ПЭ у 20 астероидов примитивных типов ГПА и изучение особенностей их спектров отражения с помощью модельных расчетов переноса излучения в экзосфере, содержащей частицы разного состава и морфологии, позволило установить наличие подповерхностных залежей водяного льда примерно у 20% изученных объектов.

СПА астероидов примитивных типов ГПА представляет собой относительно слабый процесс (периодически возникающий у некоторых тел со значительным эксцентриситетом орбиты (>0.1)) выноса пылевых частиц газовыми потоками при сублимации водяного льда в локальных обнажениях или из подповерхностных залежей льда H_2O , вскрытых преимущественно при недавних ударных событиях.

Как следует из моделирования, результатом СПА астероидов примитивных типов ГПА является образование оптически тонкой ($\tau \sim 0.1–0.5$) ПЭ, состоящей из субмикронных однородных частиц разного состава и/или фракталоподобных агрегатов таких частиц. Поскольку слабое гравитационное поле астероидов не может удерживать оптически тонкую ПЭ на интервале времени более нескольких месяцев (что по нашим оценкам представляет собой типичную продолжительность СПА АА вблизи перигелия), возможным дополнительным механизмом удержания ПЭ АА является электростатическое поле фотоэмиссионной природы, которое образуется практически на всех безатмосферных телах по действием солнечного УФ- и мягкого рентгеновского излучения.

Хотя, как следует из экспериментальных и модельных исследований, воздействие электростатического поля на частицы субмикронного размера, левитирующие над заряженной непроводящей поверхностью, сводится к их преимущественному выбросу из гравитационного поля

астероида, инъекция частиц указанных размеров в плазменно-пылевой слой газовыми потоками из локального обнажения льда при вращении астероида в случае его СПА, вероятно, позволяет увеличивать их концентрацию до уровня оптически тонкой ПЭ.

Изучение с помощью моделирования особенностей спектров отражения АА в случае оптически толстой ПЭ ($\tau \sim 1.0–6.0$) показывает, что с увеличением оптической толщины рассеивающей среды могут “замываться” (исчезать) наиболее значительные максимумы и минимумы интенсивности света, рассеянного непоглощающими или слабо поглощающими свет агрегатными частицами, но в то же время могут возникать другие экстремумы, обусловленные присутствием сильно поглощающих частиц.

Авторы (Бусарев В.В., Петрова Е.В., Барабанов С.И., Щербина М.П. и Кузнецов С.Ю.) выражают благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку работы (грант РНФ 22-12-00115).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисов Н.Д., Захаров А.В. Электризация и движение пыли вблизи поверхности астероида // Астрон. вестн. 2014. Т. 48. № 1. С. 24–34. (Borisov N.D., Zakharov A.V. Electrostatic charging and motion of dust near the surface of an asteroid // Sol. Syst. Res. 2014. V. 48. № 1. P. 22–32).
- Бусарев В.В. Спектрофотометрия безатмосферных тел Солнечной системы // Астрономический вестник. 1999. Т. 33. С. 140–150. (Busarev V.V. Spectrophotometry of atmosphereless celestial bodies of the solar system // Sol. Syst. Res. 1999. V. 33. P. 120–129).
- Бусарев В.В. Гидратированные силикаты на астероидах М-, S- и E-типов как возможные следы столкновений с телами из зоны роста Юпитера // Астрон. вестн. 2002. Т. 36. № 1. С. 39–47. (Busarev V.V. Hydrated silicates on asteroids of M-, S-, and E- types as possible traces of collisions with bodies of the Jupiter growth zone // Sol. Syst. Res. 2002. V. 36. № 1. P. 39–47).
- Бусарев В.В. Спектральные исследования астероидов 21 Лютеция и 4 Веста как объектов космических миссий // Астрон. вестн. 2010. Т. 44. № 6. С. 539–551. (Busarev V.V. Spectral investigations of asteroids 21 Lutetia and 4 Vesta as objects of space missions // Sol. Syst. Res. 2010. V. 44. № 6. P. 507–519).
- Бусарев В.В. Новые спектры отражения 40 астероидов: сравнение с предшествующими результатами и интерпретация // Астрон. вестн. 2016. Т. 50. № 1. С. 15–26. (Busarev V.V. New reflectance spectra of 40 asteroids: A comparison with previous results and interpretation // Sol. Syst. Res. 2016. V. 50. № 1. P. 13–23).
- Бусарев В.В., Барабанов С.И., Пузин В.Б. Оценка состава вещества и обнаружение сублимационной активности астероидов 145 Адеоны, 704 Интерам-

- нии, 779 Нины и 1474 Бейры // *Астрон. вестн.* 2016. Т. 50. № 4. С. 300–312. (Busarev V.V., Barabanov S.I., Puzin V.B. Material composition assessment and discovering sublimation activity on asteroids 145 Adeona, 704 Interamnia, 779 Nina, and 1474 Beira // *Sol. Syst. Res.* 2016. V. 50. № 4. P. 281–293).
- Бусарев В.В., Щербина М.П., Барабанов С.И., Ирсмамбетова Т.Р., Кохирова Г.И., Хамроев У.Х., Хамитов И.М., Бикмаев И.Ф., Гумеров Р.И., Иртуганов Э.Н., Мельников С.С. Подтверждение сублимационной активности примитивных астероидов Главного пояса 779 Нины, 704 Интерамнии и 145 Адеоны и ее вероятные спектральные признаки у 51 Немаузы и 65 Цибелы // *Астрон. вестн.* 2019. Т. 53. № 4. С. 273–290. (Busarev V.V., Shcherbina M.P., Barabanov S.I., Irsambetova T.R., Kokhirova G.I., Khamroev U.Kh., Khamitov I.M., Bikmaev I.F., Gumerov R.I., Irtuganov E.N., Mel'nikov S.S. Confirmation of the sublimation activity of the primitive Main-belt asteroids 779 Nina, 704 Interamnia, and 145 Adeona, as well as its probable spectral signs on 51 Nemausa and 65 Cybele // *Sol. Syst. Res.* 2019. V. 53. № 4. P. 261–77).
- Бусарев В.В., Савелова А.А., Щербина М.П., Барабанов С.И. Спектральные признаки одновременной сублимационной активности и появления пылевой экзосферы у 8 астероидов Главного пояса вблизи перигелия // *Астрон. вестн.* 2022. Т. 56. № 2. С. 92–108. (Busarev V.V., Savelova A.A., Shcherbina M.P., Barabanov S.I. Spectral signs of simultaneous sublimation activity and the appearance of a dust exosphere on eight asteroids of the Main belt near perihelion // *Sol. Syst. Res.* 2022. V. 56. № 2. P. 84–99).
- Бусарев В.В., Петрова Е.В., Щербина М.П., Кузнецов С.Ю., Бурлак М.А., Иконникова Н.П., Савелова А.А., Белинский А.А. Поиск признаков сублимационно-пылевой активности астероидов примитивных типов вблизи перигелия // *Астрон. вестн.* 2023. Т. 57. № 5. С. 439–457. (Busarev V.V., Petrova E.V., Shcherbina M.P., Kuznetsov S. Yu., Burlak M.A., Ikonnikova N.P., Savelova A.A., Belinskii A.A. Search for signs of sublimation-driven dust activity of primitive-type asteroids near perihelion // *Sol. Syst. Res.* 2023. V. 57. № 5. P. 449–466).
- Петрова Е.В., Бусарев В.В. О возможностях оценки свойств частиц в экзосфере активного астероида по деталям в УФ- и видимом диапазонах спектров отражения // *Астрон. вестн.* 2023. Т. 57. № 2. С. 166–180. (Petrova E.V., Busarev V.V. On the prospects for estimating the properties of particles in an active asteroid exosphere by features in the UV and visible reflectance spectra // *Sol. Syst. Res.* 2023. V. 57. № 2. P. 161–174).
- Шустов Б.М., Золотарёв Р.В., Бусарев В.В., Щербина М.П. Ударные события как возможный механизм активации сублимационно-пылевой активности астероидов Главного пояса // *Астрон. журн.* 2022. Т. 99. № 11. С. 1058–1071.
- Berg O.E., Wolf H., Rhee J. Lunar Soil Movement Registered by the Apollo 17 Cosmic Dust Experiment // *International Astronomical Union Colloquium.* Cambridge University Press, 1976. V. 31. P. 233–237.
- Busarev V.V. A hypothesis on the origin of C-type asteroids and carbonaceous chondrites // *Asteroids, Comets, Meteors (ACM) 2012. Proc. Conf. May 16–20. 2012.* Niigata, Japan. LPI Contrib. № 1667. id. 6017. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1211/1211.3042.pdf>
- Busarev V.V., Barabanov S.I., Rusakov V.S., Puzin V.B., Kravtsov V.V. Spectrophotometry of (32) Pomona, (145) Adeona, (704) Interamnia, (779) Nina, (330825) 2008 XE3, and 2012 QG42 and laboratory study of possible analog samples // *Icarus.* 2015. V. 262. P. 44–57.
- Busarev V.V., Makalkin A.B., Vilas F., Barabanov S.I., Shcherbina M.P. New candidates for active asteroids: Main-belt (145) Adeona, (704) Interamnia, (779) Nina, (1474) Beira, and near-Earth (162,173) Ryugu // *Icarus.* 2018. V. 304. P. 83–94.
- Busarev V.V., Golubeva L.F., Petrova E.V., Shestopalov D.I. Variability of the reflectance spectra of (1) Ceres and solar activity // *The Eleventh Moscow Solar System Symposium (11MS3) 5–9 October 2020, Space Research Inst., Abstract # 11MS3-SB-09, P. 255–258.*
- Busarev V.V., Petrova E.V., Irsambetova T.R., Shcherbina M.P., Barabanov S.I. Simultaneous sublimation activity of primitive asteroids including (24) Themis and (449) Hamburga: Spectral signs of an exosphere and the solar activity impact // *Icarus.* 2021a. V. 369. id. 114634 (18 p.).
- Busarev V.V., Petrova E.V., Shcherbina M.P., Ikonnikova N.P., Burlak M.A., Belinski A.A. Interstellar comet 21/Borisov: Dust composition from multiband photometry and modeling // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2021b. V. 502. № 2. P. 1882–1894.
- Criswell D.R. Lunar dust motion // *Proc. 3rd Lunar Sci. Conf. (Suppl. 3, Geochim. et Cosmochim. Acta).* 1972. V. 3. P. 2671–2680.
- Colwell J.E., Gulbis A.A., Horányi M., Robertson S. Dust transport in photoelectron layers and the formation of dust ponds on Eros // *Icarus.* 2005. V. 175. P. 159–169.
- Dorschner J., Begemann B., Henning T., Jaeger C., Mutschke H. Steps toward interstellar silicate mineralogy. II. Study of Mg-Fe-silicate glasses of variable composition // *Astron. and Astrophys.* 1995. V. 300. P. 503–520.
- Hartzell C.M. Dynamics of 2D electrostatic dust levitation at asteroids // *Icarus.* 2019. V. 333. P. 234–242.
- Hsieh H.H., Jewitt D.A. Population of comets in the Main asteroid belt // *Science.* 2006. V. 312. P. 561–563.
- Hsieh H.H., Haghighipour N. Potential Jupiter-family comet contamination of the Main asteroid belt // *Icarus.* 2016. V. 277. P. 19–38.
- Hsieh H.H., Micheli M., Kelley M.S.P., Knight M.M., Moskovitz N.A., Pittichová J., Sheppard S.S., Thirouin A., Trujill C.A., Wainscoat R.J., Weryk R.J., Ye Q. Observational characterization of Main-belt comet and candidate Main-belt comet nuclei // *Planet. Sci. J.* 2023. V. 4. id. 43 (22 p.).
- Jewitt D. The active asteroids // *Astron. J.* 2012. V. 143. id. 66 (14 p.).
- Jewitt D., Hsieh H.H. The asteroid-comet continuum // *Comets III / Eds: Meech K., Combi M. Univ. Arizona Press, 2022. (35 p.).* arXiv preprint arXiv:2203.01397.

- Kelley M.S., Hsieh H.H., Bodewits D., Saki M., Villanueva G.L., Milam S.N., Hammel H.B. Spectroscopic identification of water emission from a Main-belt comet // *Nature*. 2023. V. 619. P. 720–723.
- Lee P. Dust levitation on asteroids // *Icarus*. 1996. V. 124. P. 181–194.
- Li A., Greenberg J.M. A unified model of interstellar dust // *Astron. and Astrophys.* 1997. V. 232. P. 566–584.
- Matthews L.S., Hyde T.W. Effect of dipole–dipole charge interactions on dust coagulation // *New J. Phys.* 2009. V. 11. id. 063030 (17 p.).
- Matthews L.S., Shotorban B., Hyde T.W. Cosmic dust aggregation with stochastic charging // *Astrophys. J.* 2013. V. 776. id. 103 (9 p.).
- Matthews L.S., Shotorban B., Hyde T.W. Discrete stochastic charging of aggregate grains // *Phys. Rev.* 2018. V. E97. id. 053207 (11 p.).
- Mendis D.A., Rosenberg M. Cosmic dusty plasma // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.* 1994. V. 32. P. 419–463.
- Nitter T., Havnes O. Dynamics of dust in a plasma sheath and injection of dust into the plasma sheath above Moon and asteroidal surfaces // *Earth, Moon and Planets*. 1992. V. 56. P. 7–34.
- Orger N.C., Toyoda K., Masui H., Cho M. Experimental investigation on particle size and launch angle distribution of lofted dust particles by electrostatic forces // *Advances in Space Research*. 2021. V. 68. P. 1568–1581.
- Popel S.I., Zelenyi L.M., Atamaniuk B. Dusty plasma sheath-like structure in the region of lunar terminator // *Phys. Plasmas*. 2015. V. 22. id. 123701 (8 p.).
- Poppe A.R., Piquette M., Likhanskii A., Horányi M. The effect of surface topography on the lunar photoelectron sheath and electrostatic dust transport // *Icarus*. 2012. V. 221. P. 135–146.
- Poppe A.R., Zimmerman M.I., Halekas J.S., Farrell W.M. The electrostatic plasma environment of a small airless body under non-aligned plasma flow and UV conditions // *Planet. and Space Sci.* 2015. V. 119. P. 111–120.
- Pravec P., Harris A.W., Michalowski T. Asteroid rotations // *Asteroids III* / Eds: Bottke W. et al. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 113–122.
- Rennilson J.J., Criswell D.R. Surveyor observations of Lunar horizon-glow // *Moon*. 1974. V. 10. P. 121–142.
- Schläppi B., Altwegg K., Wurz P. Asteroid exosphere: A simulation for the ROSETTA flyby targets (2867) Steins and (21) Lutetia // *Icarus*. 2008. V. 195. P. 674–685.
- Schorghofer N. The lifetime of ice on main belt asteroids // *Astrophys. J.* 2008. V. 682. P. 697–705.
- Schorghofer N. Predictions of depth-to-ice on asteroids based on an asynchronous model of temperature, impact stirring, and ice loss // *Icarus*. 2016. V. 276. P. 88–95.
- Schorghofer N., Mazarico E., Platz T., Preusker F., Schröder S.E., Raymond C.A., Russell C.T. The permanently shadowed regions of dwarf planet Ceres // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 6783–6788.
- Singer S.F., Walker E.H. Photoelectric screening of bodies in interplanetary space // *Icarus*. 1962. V. 1. P. 7–12.
- Sykes M.V., Greenberg R., Dermott S.F., Nicholson P.D., Burns J.A. Dust bands in the asteroid belt // *Asteroids II* / Eds: Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 336–367.
- Tholen D.J. Asteroid taxonomic classifications // *Asteroids II* / Eds: Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 1139–1150.
- Tholen D.J., Barucci M.A. Asteroid taxonomy // *Asteroids II* / Eds: Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 298–315.
- Veeder G.J., Tedesco E.F. Results from the IRAS Minor Planet Survey // *IRAS Minor Planet Survey. Final Report PL-TR-92–2049* / Eds: Tedesco E.F., et al. Massachusetts: Phillips Laboratory, 1992. P. 107–126.
- Warren S.G., Brandt R.E. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: a revised compilation // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. id. D14220.
- West R., Lavvas P., Anderson C., Imanaka H. Titan's haze // *Titan: interior, surface, atmosphere, and space environment* / Eds: Müller-Wodarg I., Griffith C.A., Lellouch E., Cravens T.E. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2014. P. 285–321.

УДК 52-17::521.182::523.44

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МУЛЬТИПЛЕТОВ ОРБИТАЛЬНЫХ РЕЗОНАНСОВ АСТЕРОИДОВ С МАЛЫМИ ПЕРИГЕЛИЙНЫМИ РАССТОЯНИЯМИ

© 2024 г. Т. Ю. Галушина*, О. Н. Летнер, О. М. Сюсина

Томский государственный университет, Томск, Россия

**e-mail: tatyana.galushina@mail.tsu.ru*

Поступила в редакцию 15.11.2023 г.

После доработки 03.12.2023 г.

Принята к печати 15.01.2024 г.

Исследование орбитальных резонансов в динамике астероидов и больших планет имеет важное значение с точки зрения решения проблемы астероидной опасности. В ходе подобных исследований часто возникает необходимость анализа большого числа временных рядов резонансных (критических) аргументов, поскольку для полноты картины необходимо рассматривать не только основной аргумент, но и весь мультиплет. Для работы с мультиплетом нами были разработаны алгоритм и программа классификации поведения резонансного аргумента, которые были применены к изучению динамики резонансных объектов с малыми перигелийными расстояниями. В работе приводятся результаты построения и анализа резонансных мультиплетов для 13 таких астероидов. Исследование показало, что для выявления особенностей резонансного взаимодействия исследуемых астероидов с планетами в большинстве случаев достаточно рассматривать поведение основного критического аргумента. Использование программы автоматизации процесса классификации поведения аргументов значительно сократило временные затраты и вероятность случайных ошибок в процессе обработки полученных данных.

Ключевые слова: астероиды с малыми перигелийными расстояниями, орбитальный резонанс, мультиплет, машинный анализ, автоматизация

DOI: 10.31857/S0320930X24030062, **EDN:** NEBRQF

ВВЕДЕНИЕ

Орбитальные резонансы с планетами Солнечной системы, возникающие в движении астероидов, являются одной из важных особенностей их динамики, так как характер этого взаимодействия оказывает значительное влияние на поведение этих малых объектов в процессе эволюции. В движении астероидов встречается два вида орбитальных резонансов: двухтельный и трехтельный. Двухтельный орбитальный резонанс имеет место при возникновении соизмеримости орбитальных периодов астероида и одной планеты. В случае трехтельного орбитального резонанса возникает соизмеримость средних движений трех тел: астероида и двух планет. Сохранение этой соизмеримости на рассматриваемом интервале времени характеризует устойчивый тип взаимодействия, и если говорить в качестве примера о двухтельном резонансном взаимодействии, то устойчивая геометрическая конфигурация “астероид–планета” способна служить защитным механизмом от тесных сближений с взаимодействующим

телом. При периодическом разрушении этой соизмеримости имеет место неустойчивый резонанс, который повышает риск тесных сближений астероида с планетой (Мюррей, Дермотт, 2009). Неустойчивый резонанс и, как следствие, сближения с планетой способны привести к значительным изменениям параметров орбиты исследуемого объекта, что весьма важно при исследовании динамики астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ).

Для астероидов Главного пояса, помимо двухтельных орбитальных резонансов, стоит отметить важность исследования трехтельных взаимодействий с большими планетами, которые вносят существенный вклад в формирование динамической структуры Главного пояса (Murray и др., 1998; Nesvorný, Morbidelli, 1998a, 1998b).

Процесс выявления соизмеримостей средних движений и оценки типа резонансного взаимодействия часто является весьма трудоемким, так как обычно рассматривается так называемый мультиплет резонансных аргументов, когда определенной соизмеримости средних движений вза-

имедействующих тел соответствуют несколько резонансных аргументов. В ходе подобных исследований часто возникает необходимость анализа большого числа временных рядов резонансных аргументов. В связи с этим встает актуальный вопрос разработки программ и комплексов автоматизации этих процессов.

Среди работ, посвященных разработке алгоритмов и программ для автоматического отождествления орбитальных двухтельных и трехтельных резонансов в динамике астероидов Главного пояса, стоит отметить цикл дополняющих друг друга статей (Smirnov, Shevchenko, 2013; Smirnov, Markov, 2017; Smirnov, 2017; 2023; Smirnov, Dovgalev, 2018; Smirnov и др., 2018). Авторы представляют результаты построения идентификационной матрицы больших полуосей, соответствующих различным соизмеримостям средних движений. На основе данных из каталога AstDyS (Asteroids – DynamicSite, <http://hamilton.dm.unipi.it/cgi-bin/astdys/>) производится идентификация орбитальных резонансов астероидов Главного пояса по следующему алгоритму. По результатам интегрирования орбит астероидов производится сопоставление усредненных значений больших полуосей с матрицей резонансов и определяются соизмеримости средних движений. Затем выполняется численный анализ набора резонансных аргументов (мультиплета). В работе (Smirnov, Markov, 2017) авторы предлагают методы машинного обучения, не требующие численного интегрирования, для идентификации трехтельных резонансов астероидов Главного пояса. И как продолжение этого исследования в работе (Smirnov, 2023) представляется программный пакет, разработанный на языке Python, позволяющий выявлять и анализировать резонансы средних движений, как двухтельные, так и трехтельные, в Солнечной и других планетных системах. Показаны преимущества использования разработанных программ по сравнению с результатами предыдущих работ.

В настоящем исследовании мы представляем результаты построения резонансных мультиплетов для двухтельных орбитальных резонансов астероидов с перигелийными расстояниями, не превышающими 0.15 а. е., с планетами Солнечной системы. Исследование является прямым продолжением работы (Галушина и др., 2023), где приводятся результаты выявления двухтельных орбитальных резонансов астероидов с малыми перигелийными расстояниями с большими планетами и оценки влияния эффекта Ярковского и светового давления на поведение резонансных характеристик. Для того, чтобы облегчить трудоемкий процесс формирования резонансных мультиплетов, сократить временные затраты

и избежать случайных ошибок, нами разработаны алгоритм и программа для автоматического формирования мультиплета аргументов и последующей классификации поведения каждого из них. В качестве идеи определения типа резонансного взаимодействия взят алгоритм, представленный в работе (Sekhar и др., 2016), который был нами доработан и модифицирован. Разработанная автоматизация внедрена в программный комплекс IDA (Galushina, Letner, 2021) и применена к изучению динамики резонансных астероидов, имеющих малые перигелийные расстояния.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ МУЛЬТИПЛЕТОВ

Орбитальный резонанс возникает при соизмеримости орбитальных периодов астероида и планеты. В качестве характеристики резонансного движения рассматривается резонансный (критический) аргумент (Мюррей, Дермотт, 2009; Ellis, Murray, 2000; Nesvorný и др., 2002)

$$\beta = k_1 \lambda' - k_2 \lambda + k_3 \varpi' + k_4 \varpi + k_5 \Omega' + k_6 \Omega, \quad (1)$$

где λ – средняя долгота, ϖ – долгота перигелия, Ω – долгота восходящего узла, $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ – целые положительные числа. Величины со штрихом относятся к астероиду, а без штриха – к планете.

Соизмеримость орбитальных периодов определяется равенством нулю первой производной по времени от критического аргумента $\beta = 0$, называемой резонансной полосой или “щелью” и обычно обозначаемой как α (Гребеников, Рябов, 1978). Точный резонанс, или точная соизмеримость, возникает при равенстве α нулю. В случае астероидного движения вековые частоты $\varpi', \varpi, \Omega', \Omega$ малы по сравнению с орбитальными частотами λ', λ , поэтому резонансная щель принимает вид

$$\alpha = k_1 \dot{\lambda}' - k_2 \dot{\lambda}. \quad (2)$$

Орбитальные частоты (средние движения) можно в явном виде выразить через большие полуоси астероида и планеты. Это означает, что резонансному условию (2) с единственными k_1 и k_2 , но различными k_3, k_4, k_5, k_6 , будут соответствовать одни и те же значения больших полуосей. Такая структура называется резонансным мультиплетом.

При построении мультиплета для коэффициентов выполняются два основных условия (Мюррей, Дермотт, 2009; Ellis, Murray, 2000; Nesvorný и др., 2002)

$$k_1 - k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 = 0, \quad (3)$$

$$k_5 + k_6 = 0, 2, 4... \quad (4)$$

Когда коэффициент k_3 принимает максимально возможное по модулю значение при равенстве нулю остальных коэффициентов, формируется основной резонансный аргумент, в который существенный вклад вносят долготы астероида (Nesvorný, Roig, 2001; Gallardo, 2019; Li и др., 2019). Основным аргументом нами представляется в виде

$$\beta = k_1\lambda' - k_2\lambda + (k_2 - k_1)\varpi'. \quad (5)$$

По характеру поведения аргументов β оценивается устойчивость резонанса или его отсутствие. Назовем резонанс устойчивым, если β либрирует, т. е. колеблется около определенного центра с амплитудой строго меньше 360° . Поведение, когда β изменяется от 0 до 360° , не имея определенного центра, классифицируется как циркуляция и отсутствие резонанса. Смена либрации аргумента на циркуляцию и наоборот характеризует смешанный тип поведения, при котором резонанс определяется как неустойчивый.

Размер мультиплета зависит от порядка резонанса $|k_1 - k_2|$ и его анализ требует классификации значительного числа временных рядов, особенно в случае исследования множества объектов. Поэтому мы сочли разумным использовать алгоритм автоматизации, идея которого описана в работе (Sekhar и др., 2016) и заключается в следующем. Значения аргумента дискретно разбиваются на подинтервалы в пределах от 0 до 360° и фиксируется попадание каждого значения в сформированные ячейки. В этот алгоритм нами был введен

ряд модификаций, в частности разбиение временного интервала для определения смешанных типов поведения резонансных аргументов.

С помощью программного комплекса IDA путем перебора коэффициентов k_3, k_4, k_5, k_6 автоматически формируется мультиплет резонансных аргументов. Для каждого такого набора с помощью численного интегрирования строится орбитальная эволюция объектов на заданном интервале времени. Полученные файлы эволюции резонансных аргументов автоматически анализируются программой классификации резонансного поведения. В результате работы программы определяется характер поведения аргумента (циркуляция, либрация или смешанное поведение) и строятся графики аргументов в зависимости от времени. Помимо основного функционала, программа на выходе выдает результат перебора коэффициентов в виде их комбинаций и число аргументов в мультиплете.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Астероиды с малыми перигелийными расстояниями представляют собой класс малых небесных тел Солнечной системы с перигелийным расстоянием $q \leq 0.15$ а. е. Эти объекты вызывают большой интерес, так как относятся к АСЗ, и выявление особенностей их движения является неотъемлемым этапом решения проблемы предотвращения астероидной опасности. В работе (Галушина

Таблица. Соизмеримости средних движений и размер мультиплета аргументов для некоторых астероидов с малыми перигелийными расстояниями, движущихся в окрестности орбитальных резонансов с большими планетами

Астероид	Устойчивый резонанс			Неустойчивый резонанс		
	Планета	k_2/k_1	N_β	Планета	k_2/k_1	N_β
(3200) Phaethon				Венера	3/7	19
(137924) 2000 BD19				Венера	3/4	2
(399457) 2002 PD43				Земля	1/4	10
(431760) 2008 HE				Марс	5/9	19
2005 HC4				Венера	1/4	10
2011 KE				Сатурн	9/1	85
2013 YC	Юпитер	3/1	6	Земля	1/4	10
2015 EV				Земля	1/3	10
				Марс	5/8	10
				Юпитер	4/1	6
2015 HG				Земля	1/3	6
				Юпитер	4/1	10
2019 JZ6	Юпитер	3/1	6	Земля	1/4	10
2020 HY2				Марс	5/9	19
				Юпитер	7/2	28
2020 TS2	Юпитер	3/1	6	Земля	1/4	10
2023 FS5				Сатурн	7/1	44

и др., 2023) исследована динамика этих астероидов на интервале времени 4000 лет и выявлены все орбитальные резонансы с большими планетами. В работе показано, что из 60 известных на момент исследования астероидов с малыми перигелийными расстояниями 33 движутся в окрестности резонансов с одной или несколькими планетами одновременно. Предварительный поиск соизмеримостей осуществлялся путем оценки поведения резонансной щели (2), а устойчивость резонанса определялась поведением основного резонансного аргумента вида (5).

Так как каждый резонанс, определяемый соизмеримостью k_2/k_1 средних движений астероида и планеты, состоит из нескольких резонансных членов, получаемых из условий (3)–(4), то для идентификации типа резонанса и рассмотрения полноценной картины резонансной динамики необходимо построение мультиплетов аргументов. Как продолжение исследования, представленного в работе (Галушина и др., 2023), среди рассматриваемых астероидов нами было отобрано 13 объектов, движущихся в окрестности орбитальных резонансов с разными планетами, для построения и анализа резонансных мультиплетов. В табл. для них приводятся соизмеримости средних движений и число резонансных аргументов N_β , формирующих мультиплет. Из табл. видно, что в большинстве случаев резонансные взаимодействия неустойчивы, лишь при движении в окрестности резонанса 3/1 с Юпитером возникает устойчивая геометрическая конфигурация с планетой. Интересно отметить, что это взаимодействие сопровождается неустойчивым резонансом 1/4 с Землей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОСТРОЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ МУЛЬТИПЛЕТОВ

Как уже отмечалось выше, построение и анализ мультиплетов играют важную роль в формировании общей картины орбитальной эволюции каждого объекта. Особый интерес представляет выявление смешанного типа поведения аргументов, так как такое поведение является неустойчивым и способно существенным образом повлиять на орбиту объекта в будущем. Причем наличие в мультиплете хотя бы одного неустойчивого резонанса может сильно отразиться на процессе прогнозирования движения астероида. С этой точки зрения важно исследовать все резонансные члены с целью выявления различий в характере их поведения или же зафиксировать их отсутствие и остановиться на детальном анализе основного аргумента.

Для астероидов из табл. в несколько этапов были построены и проанализированы резонансные мультиплеты с использованием программ-

ного комплекса IDA. На первом шаге получены номинальные орбиты путем улучшения параметров астероидов по наблюдениям, взятым из Центра малых планет (Minor Planet Center of the International Astronomical Union, <https://www.minorplanetcenter.net>). На следующем шаге в автоматическом режиме подбирался допустимый интервал исследования путем численного интегрирования уравнений движения астероидов методом Lobbie (Авдюшев, 2022). Меняя конечный момент времени, оценивалась точность путем сравнения результатов прямого и обратного интегрирования. В качестве приемлемой погрешности принималось значение, не превышающее 10^{-9} а. е. Таким образом, интервал исследования подбирался индивидуально для каждого астероида. И наконец производилось отображение во времени номинальной орбиты каждого астероида на подобранном на предыдущем шаге интервале. В результате пошагового интегрирования с разными комбинациями коэффициентов в аргументе была построена эволюция резонансной щели и всех аргументов мультиплета. Используя программу комплекса IDA для автоматической визуализации аргументов и определения типа резонансного поведения, получаем базовый анализ, на основе которого формируется общая картина резонансного взаимодействия каждого астероида с планетой.

В качестве примера на рис. 1–3 приведем резонансные мультиплеты для разного типа резонансного взаимодействия. Рис. 1 демонстрирует пример устойчивого резонанса 3/1 астероида 2019 JZ6 с Юпитером. На интервале времени (0, 4500) лет была построена эволюция его орбитальных элементов, резонансной щели и шести аргументов, формирующих мультиплет этого резонанса. На рис. 1 на графике (а) приводится эволюция α , на графике (б) — основной критический аргумент β_1 , определяемый выражением (5), а затем остальные аргументы резонансного мультиплета. Астероид 2019 JZ6 находится в устойчивой геометрической конфигурации “астероид–Юпитер”, которая защищает его от сближений с планетой на рассматриваемом интервале времени. Из графика эволюции резонансной щели видно, что α регулярно колеблется около нуля с небольшой амплитудой, а критические аргументы резонансного мультиплета либрируют. Можно заметить, что для всех аргументов амплитуда колебаний составляет примерно 100° , но смещается центр либрации. При этом тип резонанса сохраняется для всего мультиплета.

Резонансное поведение астероида 2019 JZ6 не ограничивается устойчивым взаимодействием с Юпитером, как видно из табл., этот резонанс сопровождается движением астероида

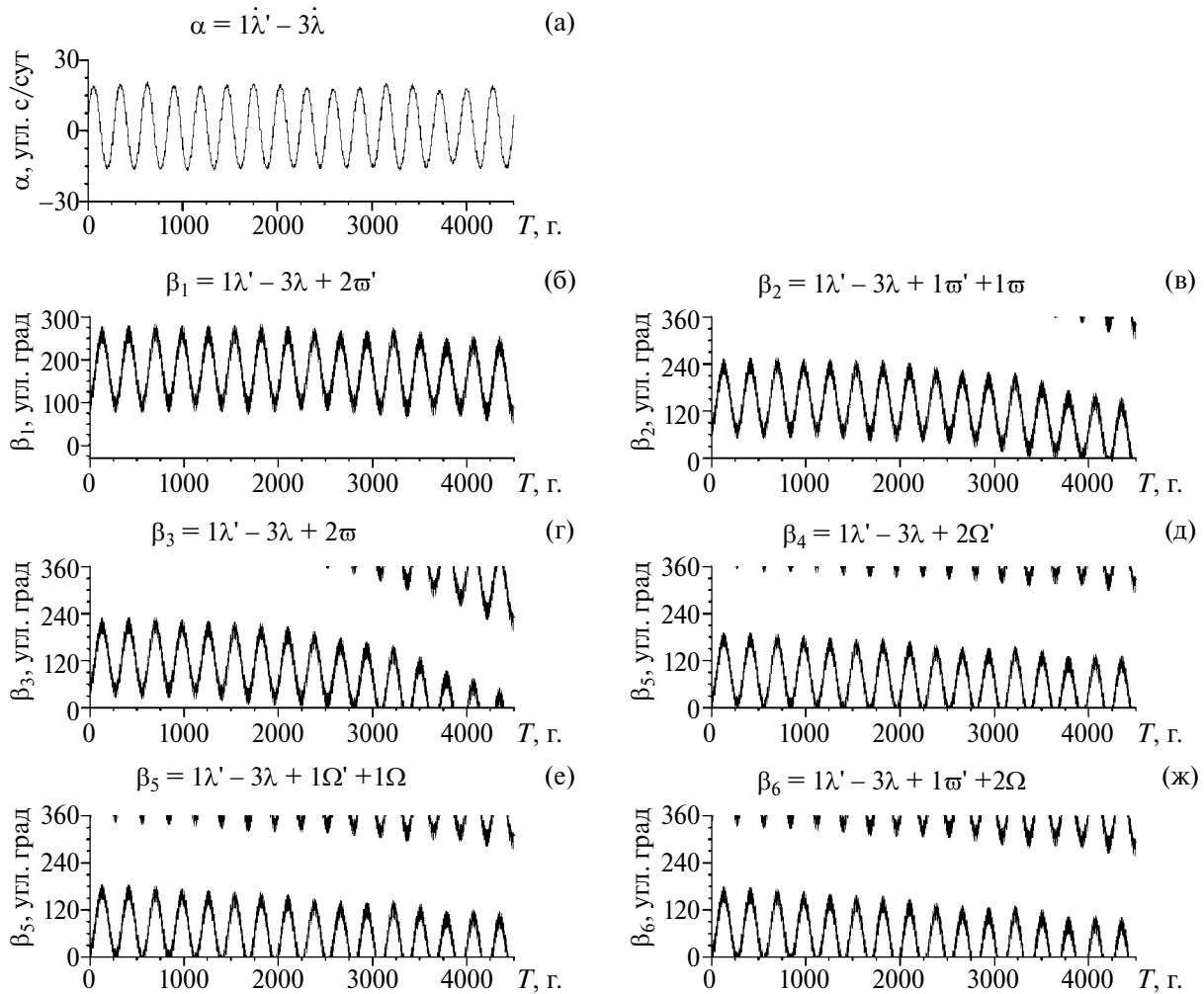


Рис. 1. Эволюция резонансной щели α (а), основного критического аргумента β_1 (б) и остальных аргументов: (в) (г), (д), (е), (ж) мультиплета устойчивого резонанса 3/1 астероида 2019 JZ6 с Юпитером.

в окрестности резонанса 1/4 с Землей. Этот пример неустойчивого резонансного взаимодействия показан на рис. 2. При соизмеримости средних движений $k_2/k_1 = 1/4$ мультиплет резонансных аргументов будет включать в себя 10 членов. Для удобства восприятия приводятся 6 из них. Подобно рис. 1, на рис. 2а отображается эволюция резонансной щели α , на рис. 2б — эволюция основного критического аргумента β_1 , а на графиках 2в–2ж — еще пяти аргументов резонансного мультиплета. Поведение аргументов демонстрирует частую смену участков либрации циркуляцией и обратно. В подобных случаях, при частой регулярной смене характера поведения резонансного аргумента, колебания резонансной щели смещаются относительно нуля и имеют предельно большую амплитуду. Смешанный тип резонанса сохраняется для всего мультиплета, но так же, как и в случае устойчивого резонанса 3/1 с Юпитером, происходит смещение центра колебания аргументов на участках либрации для разных резонансных

членов. Астероид 2019 JZ6 находится в неустойчивой геометрической конфигурации “астероид–Земля” и испытывает регулярные сближения с планетой.

С точки зрения резонансной эволюции интересно изучить пример резонанса, для которого сохраняемый на длительном интервале времени тип взаимодействия сменяется другим, будь то разрушение резонанса или, наоборот, захват в процессе эволюции. В качестве такого примера рассмотрим движение астероида (137924) 2000 BD19 в окрестности орбитального резонанса 3/4 с Венерой. Резонансный мультиплет в случае такой соизмеримости состоит всего из двух аргументов. На рис. 3 представлена эволюция резонансной щели α (а) и двух аргументов (б) и (в), формирующих мультиплет. На интервале времени (–7000, 3500 лет) астероид находится в устойчивом резонансе 3/4 с Венерой, но затем нарушается периодичность в либрации аргументов и она сменяется частой циркуляцией. Устойчивый на

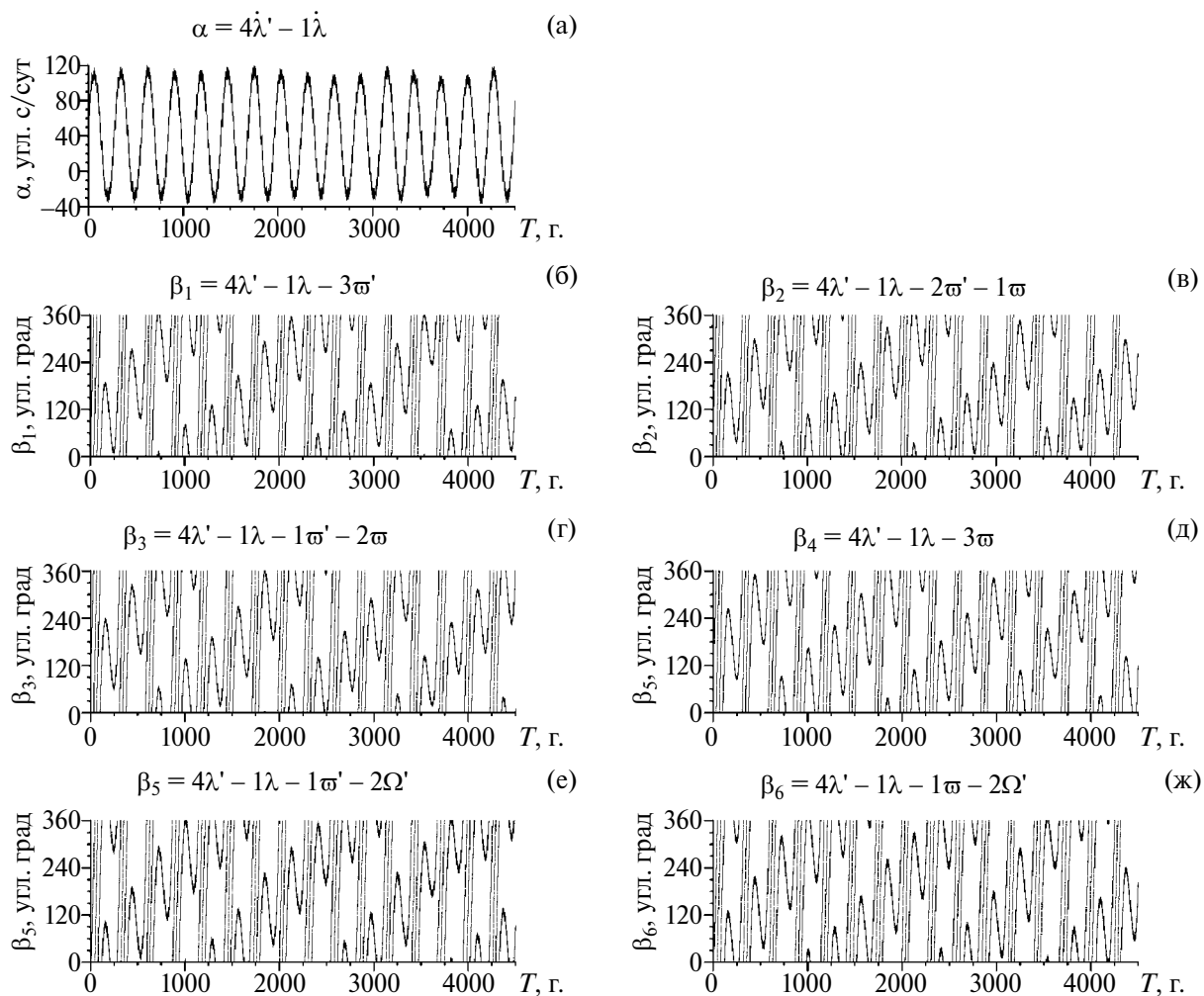


Рис. 2. Эволюция резонансной щели α (а), основного критического аргумента β_1 (б) и пяти аргументов (в), (г), (д), (е), (ж) мультиплета неустойчивого резонанса 1/4 астероида 2019 JZ6 с Землей.

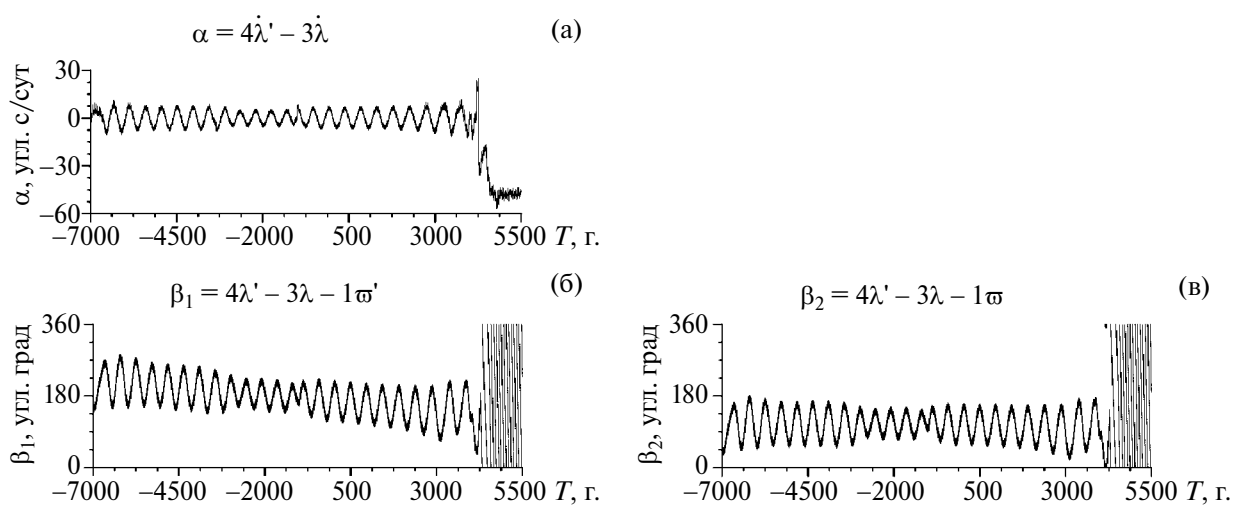


Рис. 3. Эволюция резонансной щели α и двух аргументов β_1 (б) и β_2 (в) мультиплета неустойчивого резонанса 3/4 астероида (137924) 2000 BD19 с Венерой.

длительном интервале времени резонанс разрушается. В этот момент резонансная щель теряет близость к нулю и начинает колебаться по одну сторону от точной соизмеримости. Такое поведение справедливо для всего резонансного мультиплета. Так же, как и в предыдущих примерах, смещается центр либрации аргументов, но тип резонансного взаимодействия сохраняется.

Среди особенностей движения астероидов, так сильно влияющих на изменение большой полуоси, а следовательно, и резонансных характеристик, можно выделить многократные и/или тесные сближения с большими планетами. Астероид (137924) 2000 BD19 в процессе своей эволюции имеет несколько сближений с Меркурием и регулярно сближается с Землей. В окрестности 4200–4500 г. происходит ряд тесных сближений с Землей в пределах 0.05 а. е., наиболее тесные из которых 0.009 а. е. в 4206 г. и 0.004 а. е. в 4274 г. Эти регулярные возмущения со стороны планеты, скорее всего, и являются причиной изменения параметров орбиты астероида 2000 BD19, в особенности большой полуоси, которые ведут к разрушению резонанса с Венерой. На всем интервале исследования астероид не испытывает сближений с Венерой даже после нарушения устойчивости геометрической конфигурации “астероид–планета”.

В представленных нами примерах резонансных взаимодействий астероидов с большими планетами видно, что в пределах одного мультиплета тип резонанса сохраняется, меняется лишь центр либрации критических аргументов. Такое поведение характерно для всех астероидов из табл. Проведенное исследование и анализ резонансных мультиплетов привели нас к заключению, что для выявления особенностей резонансного поведения рассматриваемых астероидов в большинстве случаев достаточно рассматривать поведение основного критического аргумента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследования резонансных взаимодействий астероидов, имеющих малые перигелийные расстояния, с большими планетами нами было рассмотрено такое явление, как резонансный мультиплет. При сохранении определенной соизмеримости средних движений взаимодействующих тел резонансный аргумент включает в себя несколько членов. Необходимость анализа большого числа временных рядов аргументов привела нас к идее создания программы автоматизации процесса расчета, построения графиков и определения типа резонансного взаимодействия. Разработанный алгоритм и программа были внедрены в программный комплекс IDA (Ga-

lushina, Letner, 2021) и применены к изучению динамики резонансных объектов с малыми перигелийными расстояниями. Использование автоматизации значительно сократило временные затраты и вероятность случайных ошибок в процессе обработки полученных данных.

В проведенном нами исследовании были построены и проанализированы мультиплеты критических аргументов для 13 астероидов, движущихся в окрестности орбитальных резонансов с разными планетами. Анализ резонансных мультиплетов показал, что в пределах мультиплета поведение резонансных аргументов не отличается, лишь смещается центр их либрации при устойчивом резонансе. Таким образом, для выявления особенностей резонансного взаимодействия исследуемых астероидов с планетами в большинстве случаев достаточно рассматривать поведение основного критического аргумента.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-72-10022, <https://rscf.ru/project/19-72-10022/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авдюшев В.А. Коллокационный интегратор Lobbie в задачах орбитальной динамики // Астрон. вестн. 2022. Т. 56. № 1. С. 36–46. doi: 10.31857/S0320930X22010017. (Avdyushev V.A. Collocation integrator Lobbie in orbital dynamics problems // Sol. Syst. Res. 2022. V. 56(1). P. 32–42).
- Галушина Т.Ю., Летнер О.Н., Сюсина О.М. Влияние светового давления и эффекта Ярковского на резонансное поведение астероидов с малыми перигелийными расстояниями // Вестн. Томского гос. университета. Математика и механика. 2023. № 85. С. 101–116.
- Гребеников Е.А., Рябов Ю.А. Резонансы и малые знаменатели в небесной механике. М.: Наука, 1978. 128 с.
- Мюррей К., Дермотт С. Динамика Солнечной системы. М.: Физматлит, 2009. 588 с.
- Ellis K.M., Murray C.D. The disturbing function in Solar System dynamics // Icarus. 2000. V. 147. № 1. P. 129–144.
- Gallardo T. Orbital stability in the Solar system for arbitrary inclinations and eccentricities: planetary perturbations versus resonances // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2019. V. 487. P. 1709–1716.
- Galushina T. Yu., Letner O.N. Modified version of IDA software and its application to the study of the motion of asteroid 2007 PR10 // Astron. and Astrophys. Transactions. 2021. V. 32. № 4. P. 355–370.
- Li M., Huang Yu., Gong Sh. Assessing the risk of potentially hazardous asteroids through mean motion resonances analyses // Astrophys. and Space Sci. 2019. V. 364. № 5. id. 78 (12 p.). <https://doi.org/10.1007/s10509-019-3557-5>

- Murray N., Holman M., Potter M.* On the origin of chaos in the asteroid belt // *Astron. J.* 1998. V. 116. № 5. P. 2583–2589.
- Nesvorný D., Morbidelli A.* Three-body mean motion resonances and the chaotic structure of the asteroid belt // *Astron. J.* 1998a. V. 116. № 6. P. 3029–3037.
- Nesvorný D., Morbidelli A.* An analytic model of three-body mean motion resonances // *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 1999b. V. 71. P. 243–271.
- Nesvorný D., Ferraz-Mello S., Holman M., Morbidelli A.* Regular and chaotic dynamics in the mean-motion resonances: Implications for the structure and evolution of the asteroid belt // *Asteroids III* / Eds: Bottke W.F., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R.P. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 379–394.
- Nesvorný D., Roig F.* Mean motion resonances in the trans-neptunian region // *Icarus*. 2001. V. 150. № 1. P. 104–123. <https://doi.org/10.1006/icar.2000.6568>
- Sekhar A., Asher D.J., Vaubaillon J.* Three-body resonance in meteoroid streams // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. V. 460. № 2. P. 1417–1427.
- Smirnov E.A.* Asteroids in three-body mean-motion resonances with Jupiter and Mars // *Sol. Syst. Res.* 2017. V. 51. № 2. P. 145–149.
- Smirnov E.A.* A new python package for identifying celestial bodies trapped in mean-motion resonances // *Astron. and Computing*. 2023. V. 43. id. 100707. <https://doi.org/10.1016/j.ascom.2023.100707>
- Smirnov E.A., Dvornikov I.S.* Identification of asteroids in two-body resonances // *Sol. Syst. Res.* 2018. V. 52. № 4. P. 347–354.
- Smirnov E.A., Dvornikov I.S., Popova, E.A.* Asteroids in three-body mean motion resonances with planets // *Icarus*. 2018. V. 304. P. 24–30. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.09.032>
- Smirnov E.A., Markov A.B.* Identification of asteroids trapped inside three-body mean motion resonances: a machine-learning approach // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2017. V. 469. № 2. P. 2024–2031.
- Smirnov E., Shevchenko I.I.* Massive identification of asteroids in three-body resonances // *Icarus*. 2013. V. 222. № 1. P. 220–228.

УДК 521.3, 523.6

АНАЛИЗ ТРАЕКТОРИЙ ПЕРЕЛЕТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА К ВЕНЕРЕ С ПРОЛЕТОМ АСТЕРОИДОВ

© 2024 г. В. А. Зубко^a*, Н. А. Эйсмонт^a, Р. Р. Назиров^a, К. С. Федяев^{a, b}, А. А. Беляев^a

^a Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

^b Московский авиационный институт, Москва, Россия

*e-mail: v.zubko@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 06.11.2023 г.

После доработки 07.11.2023 г.

Принята к печати 19.01.2024 г.

Проведено исследование энергетически малозатратных баллистических траекторий перелета космического аппарата к Венере с попутным пролетом астероидов. Показано, что при использовании схем, включающих гравитационный маневр, требуемый для доставки посадочного аппарата в заданный район на поверхности Венеры, возможен пролет хотя бы одного астероида. Всего было обнаружено 39 астероидов, пролет которых может быть осуществлен при старте в 2029–2050 гг. Проведен анализ достижимых районов посадки при перелете космического аппарата к Венере по траекториям данного типа. Показано, что в каждое из окон старта в период с 2029 по 2050 гг. можно найти астероид, пролет которого оказывается возможным в период времени между двумя сближениями космического аппарата с Венерой.

Ключевые слова: Венера, гравитационный маневр, резонансные орбиты, схемы перелета, межпланетные траектории, миссия к астероидам

DOI: 10.31857/S0320930X24030077, **EDN:** NDXEXR

ВВЕДЕНИЕ

Исследование астероидов является важным элементом развития научного познания состава и строения Солнечной системы. Первые астероиды были открыты в самом начале XIX века при помощи оптических наблюдений, сегодня эти объекты изучаются с использованием также и средств космического базирования (космических телескопов, исследовательских зондов). Среди наиболее известных миссий к малым телам Солнечной системы отметим проекты “Bepi-Colombo” и “-2”, Giotto, DeepImpact, NEAR, Hayabusa, Osiris-ReX и другие. Всего же на сегодняшний день с помощью космических аппаратов исследовано 39 (29 из них с пролетной траекторией) малых тел Солнечной системы (из списка миссий к малым телам, приведенного на сайте JPL NASA <https://ssd.jpl.nasa.gov/sb/targets.html> (дата обращения 30/10/2023)), из которых только 7 объектов — короткопериодические кометы, что составляет лишь незначительную часть от общего числа известных малых тел: современные каталоги насчитывают 452 нумерованные кометы (из 3757 известных) и 1132058 астероидов (число астероидов и комет приведено на момент 2021–09–13 19:03:09 <https://ssd.jpl.nasa.gov/>

[sb/elem_tables.html](#) (дата обращения 10/21/2023) по состоянию на 2021 г.).

Миссии Stardust, Hayabusa, Hayabusa2, Osiris-ReX совершили революцию в области космических исследований, доставив на Землю частицы породы, собранные на комете 81P/Wild 2 (Stardust) и на астероидах 25143 Итокава (Hayabusa), 162173 Рюгу (Hayabusa2), 101955 Бенну (Osiris-ReX).

В ближайшие годы (2022–2026) планируются как новые миссии к малым телам Солнечной системы, среди которых крупный металлический астероид главного пояса 16 Психея, так и расширение (продление) программ полета функционирующих космических аппаратов (КА), таким примером служит Osiris-ReX (Lauretta и др., 2017), который после доставки грунта с астероида 101955 Бенну (24.09.2023 г. грунт был доставлен на Землю) будет направлен на сближение с астероидом 99942 Апофис (DellaGiustina, 2022). Другой пример продления миссии — Hayabusa2, в рамках которой планируется пролет астероидов 2001 CC21 в июле 2026 г. и 1998 KY26 в июле 2031 г. (Hirabayashi и др., 2021; Kikuchi и др., 2023). Большой вклад в изучение структуры троянских астероидов Юпитера должна принести миссия Lucy (Levison

и др., 2021; Olkin и др., 2021) (находится в полете с 2021 г.).

Космические миссии, в которых предполагается непосредственное исследование одного астероида, т. е. подлет к нему с последующим выходом на орбиту спутника или посадкой на поверхность, обладают как неоспоримым преимуществом — получение максимального числа данных о строении и составе астероида — так и некоторыми недостатками, к числу наиболее очевидных из них можно отнести высокую стоимость. С другой стороны космические проекты, предполагающие изучение астероидов с пролетной траектории, т. е. когда КА в течение некоторого времени может наблюдать астероид с близкого расстояния, лишены обозначенного недостатка и позволяют проводить исследование многих объектов в рамках одной схемы перелета (в качестве примера можно упомянуть миссии Lucy (Levison и др., 2021) и Hanned (Sukhanov, 1996). Однако такой подход несет в себе недостаток, связанный с тем, что количество научной информации, получаемое с пролетной траектории, несравнимо меньше, чем в случаях контактных исследований или изучения астероида с орбиты его искусственного спутника.

Перспективным представляется направление развития космических миссий, включающих этап попутного исследования астероидов в рамках выполнения основной научной программы. Наиболее яркими примерами служат снимки астероидов 243 Ида (см. рис. 1а) и 951 Гаспра (Belton и др., 1996), полученные с борта межпланетной станции Galileo, астероида 2685 Мазурского, сделанные с КА Cassini—Huygens (Porco и др., 2005), а также прохождение газовых хвостов нескольких комет КА Ulysses (Neugebauer и др., 2007). Известен также пролет астероида Главного пояса 253 Матильда (см. рис. 1б), совершенный КА NEAR (Veverka и др., 1997; 1999) во время перелета к астероиду 433 Эрос, подобное сближение, помимо получения высококачественных снимков, позволило определить массу астероида.

К числу успешных исследований астероидов с пролетной траектории можно отнести и пролет транснептунового объекта 486958 Аппокот (Stern и др., 2018) в рамках программы полета межпланетной станции New Horizons (пролет произошел 01.01.2019 г.). Одним из последних и наиболее ярких событий с точки зрения исследования астероидов с пролетной траектории стало сближение аппарата Lucy с астероидом 152830 Динкинеш, произошедшее 01.11.2023 г. (de Leon и др., 2023; Bolin и др., 2023), в результате которого были получены снимки поверхности астероида и обнаружено наличие у него спутника (рис. 1в).

Пролет астероидов рассматривается в качестве возможного продолжения миссий, функциони-

рующих в настоящее время; например, для КА “Спектр-Рентген-Гамма” были проведены исследования (Eismont и др., 2021), в которых показано, что после 2026 г. (предполагаемая дата завершения основной части миссии) аппарат может быть перенаправлен для изучения с пролетной траектории околоземных астероидов, таких как 99942 Апофис, 1997 XF11 и др.

Отметим, что существуют работы, в которых подобное исследование проведено для перспективных космических миссий к далеким космическим объектам, например, объектам Пояса Койпера, рассеянного диска и к возможным объектам Облака Оорта (90377 Седна, 2012 VP113 и другим транснептуновым телам) (Baskaran и др., 2014).

В настоящей работе рассматривается возможность попутного изучения астероида космическим аппаратом, совершающим перелет по схеме Земля—Венера—Венера, где гравитационный маневр у Венеры производится для изменения места посадки. Ранее авторами был разработан возможный баллистический сценарий такой миссии, состоящий из следующих этапов (Eismont и др., 2021).

1. Старт миссии с низкой околоземной орбиты и перелет к Венере по гелиоцентрической траектории.
2. Первое сближение с Венерой и переход на гелиоцентрическую орбиту с периодом, равным орбитальному периоду Венеры (т. е. на резонансную 1:1 орбиту).
3. Перелет по резонансной орбите до следующего сближения с Венерой.
4. Второе сближение с Венерой и посадка в заданной области ее поверхности.

Показано, что за счет выбора резонансной орбиты и даты старта внутри заданного окна можно обеспечить посадку аппарата на этапе 4 практически в любую область поверхности планеты.

Демонстрируется, что включенный в состав сценария попутный безымпulseный пролет (здесь и далее под этим термином будем понимать отсутствие дополнительных импульсов при пролете КА астероида; отметим, что затраты на корректирующие маневры при этом не учитываются) малого небесного тела приводит к существенным ограничениям, которые сокращают достижимые области посадки. Однако при этом в работе показано, что данные ограничения могут быть устранены путем выбора подходящего астероида из числа тех, пролет которых может быть совершен без дополнительных импульсов (за исключением импульсов для коррекции траектории полета), или путем переноса даты старта в другое пусковое окно, или сдвига самого пускового окна за счет некоторого увеличения ΔV_0 (характеристическая скорость, потребная КА для перехо-

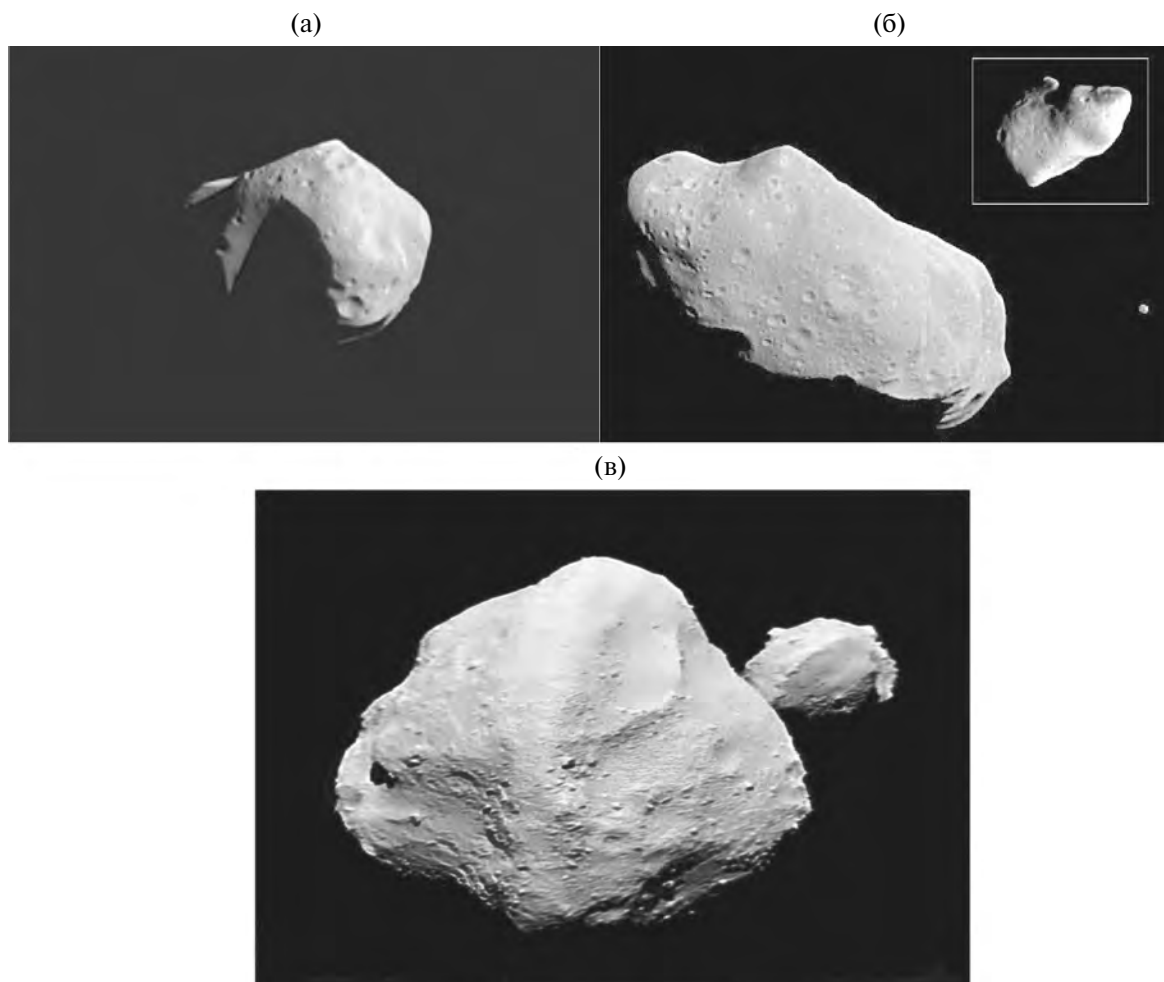


Рис. 1. Пример снимков астероидов, полученных с борта космических аппаратов: (а) — фотография астероида 253 Матильда, сделанная во время его облета (27.06.1997 г.) аппаратом NEAR (https://nssdc.gsfc.nasa.gov/imgcat/html/object_page/nea_19970627_mos.html (дата обращения 02.11.2023) ©NASA/JPL; (б) — фотография астероида Главного пояса 243 Ида и его спутника I Дактил (18.10.1989 г.), сделанная с автоматической межпланетной станции Galileo при полете к Юпитеру ©NASA/JPL (<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00119> (дата обращения 02.11.2023); (в) — фотография астероида 152830 Динкинеш ©NASA/Goddard/SwRI/Johns Hopkins APL/NOAO (<https://www.nasa.gov/image-article/nasas-lucy-spacecraft-discovers-2nd-asteroid-during-dinkinesh-flyby/> (дата обращения 02.11.2023)).

да с низкой околоземной орбиты на траекторию перелета от Земли к Венере, рассчитывается без учета гравитационных потерь и дополнительных корректирующих маневров).

В работе (Zubko, 2023a) были сделаны оценочные расчеты траекторий перелета КА к Венере, при движении по которым КА, совершающий полет к планете, после гравитационного маневра и перехода на резонансную орбиту (под орбитой (или траекторией) КА, резонансной с орбитой планеты в соотношении $m:n$ (далее для краткости будем называть такую орбиту КА резонансной $m:n$) в работе понимается гелиоцентрическая орбита КА, отношение периода которой к периоду орбиты планеты является рациональным числом m/n) с целью повторной встречи с Венерой (т. е. на этапе 3 перелета) осуществляет пролет небольшого астероида.

В рамках настоящего исследования было отобрано 120 малых небесных тел, удовлетворяющих главным образом критерию характерного размера, который должен составлять не менее 1 км. Для 39 из этих 120 небесных тел определены траектории перелета к ним в пределах исследуемого интервала дат старта с 2029 по 2050 гг. Такой интервал дат принят с учетом результатов работ (Zubko, 2022; 2023b) и того, что все разрабатываемые в настоящее время миссии по исследованию Венеры: “Венера-Д” (Eismont, 2018; Zasova, 2018; Vorontsov, 2011; Симонов и др., 2021), DAVINCI+ (Garvin и др., 2022), VERITAS (Smrekar и др., 2016), EnVision (Widemann и др., 2020) запланированы к реализации в период с 2029 по середину 2030 гг., а также с учетом возможности разработки последующих подобных миссий.

Полученные в работе результаты показывают, что представленный подход позволяет проектировать траектории перелета КА к Венере с посадкой в заданной области, в том числе и с попутным безымпulsным облетом астероида. Показано, что требование к безымпulsному пролету астероида сокращает доступные в результате гравитационного маневра области посадки. Построены области посадки и определены астероиды, пролет которых возможен при отсутствии дополнительных импульсов на интервале дат старта с 2029 по 2040 гг.

ВЫБОР ЦЕЛЕВЫХ АСТЕРОИДОВ ИЗ МЕЖДУНАРОДНЫХ КАТАЛОГОВ

Для выбора астероидов, пролет которых может быть осуществим в рамках рассматриваемой миссии к Венере, использовалась база данных Лаборатории реактивного движения NASA (JPL), содержащая сведения о более чем 1.5 млн малых тел Солнечной системы, среди которых выбирались астероиды, удовлетворяющие критериям, описываемым ниже.

- Астероид должен принадлежать к группе нумерованных астероидов.

Данное требование обуславливается тем, что орбиты астероидов, принадлежащих к группе нумерованных, известны с хорошей точностью и периодически уточняются. Так, большие полуоси и эксцентриситеты орбит нумерованных астероидов, которые или полностью располагаются внутри орбиты Земли, или ее пересекают, известны с точностью не хуже 10^{-7} а. е. для большой полуоси и 10^{-9} для эксцентриситета; угловые параметры, согласно оценкам JPL, известны с худшей точностью (до 10^{-5} а.е.).

- Перигелий орбиты астероида не должен составлять менее 0.8 а. е.

В работе (Zubko, 2023b) было показано, что введение такого ограничения позволяет упростить поиск астероидов, орбиты которых хотя бы частично проходят вблизи орбиты Венеры, что позволяет допустить возможность сближения с такими астероидами КА, находящегося на резонансной 1:1 орбите.

Так, в случае уменьшения минимальной допустимой величины перигелия, список потенциально доступных для сближения астероидов будет расти, однако вместе с тем понадобится или вводить ограничения на эксцентриситет орбиты таких астероидов, или осуществлять поиск траекторий сближения с теми астероидами, с которыми сближение возможно только путем перевода КА на резонансную орбиту с высоким афелием, т. е. на резонансную 1:n орбиту, где $n \gg 1$, что крайне нежелательно, поскольку приведет к кратному уве-

личению времени между двумя последовательными сближениями КА с Венерой и, следовательно, к резкому увеличению продолжительности миссии в целом.

- Диаметр астероида должен составлять не менее 1 км.

Данный критерий позволяет выделить только относительно крупные объекты, которые могут представлять больший интерес для научного исследования. Отметим, что приведенные в каталоге JPL диаметры астероидов оцениваются по следующей зависимости (https://cneos.jpl.nasa.gov/tools/ast_size_est.html (дата обращения 05.11.2023)):

$$d = 1329 / \sqrt{p_v} 10^{-0.2H},$$

где d — диаметр астероида, км; p_v — геометрическое альbedo; H — абсолютная звездная величина.

Однако при использовании этой зависимости необходимо учитывать неопределенность в оценке геометрического альbedo, которая может достигать более 50% для большинства астероидов, диаметр которых приводится в базах данных. В частности, в используемой нами базе данных JPL в том случае, если альbedo астероида известно с низкой точностью, его диаметр приводится из расчета, что в среднем для большинства астероидов альbedo приблизительно равно 0.15. Таким образом, оценка диаметра астероида может оказаться весьма грубой. Тем не менее данный критерий хоть и не является надежным для определения точного размера астероида, но позволяет выделить те объекты, для которых имеется хотя бы какая-либо оценка диаметра.

С использованием вышеприведенных критериев из каталога JPL для дальнейшего рассмотрения было отобрано 120 малых небесных тел, среди них 116 астероидов и 4 кометы.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТРАЕКТОРИИ КА С ПОПУТНЫМ ПРОЛЕТОМ АСТЕРОИДА

Предлагаемая методика определения траектории перелета КА к Венере с посадкой в заданной области ее поверхности и попутным безымпulsным пролетом астероида состоит из двух этапов.

1. Определение минимального расстояния ($\Delta r_{\min}$), на которое КА сближается с астероидом, и соответствующего момента времени сближения. Предварительный отбор астероидов, для которых $\Delta r_{\min}$ меньше некоторой величины $(\Delta r_{\min})^{\lim}$, в настоящей работе на основе многократных расчетов принято ограничение $(\Delta r_{\min})^{\lim} = 20$ млн км.

2. Уточнение траектории сближения КА с астероидом путем ее разбиения на отдельные участки, определяемые путем решения задачи Эйлера—Ламберта, с последующим их склеиванием.

Рассмотрим подробнее первый этап. Пусть известны кеплеровские элементы $a_1(\Phi, \gamma)$, $e_1(\Phi, \gamma)$, $i_1(\Phi, \gamma)$, $\Omega_1(\Phi, \gamma)$, $\omega_1(\Phi, \gamma)$, $f_1(\Phi, \gamma)$ резонансной гелиоцентрической орбиты КА после гравитационного маневра. Здесь Φ и γ — углы, которые задают ориентацию вектора асимптотической скорости КА при подлете к Венере в локальной орбитальной системе координат (несколько модифицированной относительно классической так, что ось абсцисс направлена по вектору гелиоцентрической скорости Венеры, ось аппликат направлена по вектору интеграла площадей, а ось ординат дополняет тройку векторов до правой и находится в плоскости орбиты Венеры; оси системы координат зафиксированы на момент времени t_1 подлета КА к Венере), как в работе (Zubko, 2023b). Первый параметр Φ определяет энергетические характеристики орбиты КА после гравитационного маневра у Венеры, γ определяет ориентацию плоскости орбиты относительно орбиты Венеры. Отметим, что, поскольку величина Φ постоянна, то и большая полуось резонансной орбиты $a_1(\gamma)$ также является константой.

Требуется определить моменты времени, соответствующие дате старта с Земли (t_0), первому облету Венеры (t_1), максимальному сближению КА с астероидом (t_2).

Координаты и скорости целевого астероида в гелиоцентрической системе координат в момент сближения с аппаратом t_2 определяются по эфемеридам JPL $\{r_{ast,x}, r_{ast,y}, r_{ast,z}, V_{ast,x}, V_{ast,y}, V_{ast,z}\}$.

Координаты КА на момент времени t_2 могут быть получены с помощью следующих преобразований.

1. Задается точка посадки в планетографических координатах λ_L, ϕ_L , а также радиус окружности допустимых отклонений. Центр упомянутой окружности располагается в точке (λ_L, ϕ_L) .

2. По заданным значениям координат точки посадки и окружности допустимых отклонений определяются требуемые значения γ и $\Delta\gamma$, ограничивающие область возможных направлений поворота вектора асимптотической скорости V_r^+ .

3. Решается оптимизационная задача определения минимума расстояния между астероидом и КА на резонансной орбите $\Delta r(\gamma, t) = \|\mathbf{r}_{res}(\gamma, t) - \mathbf{r}_{AST}(t)\|$, где $\mathbf{r}_{res}(\gamma, t)$ и $\mathbf{r}_{AST}(t)$ — радиус-векторы, определяющие положение КА и астероида в гелиоцентрической системе координат в момент времени t . Соответствующий функционал может быть записан в виде

$$J(\gamma, t) = [\Delta r(\gamma, t)]^2 = (\mathbf{r}_{res}(\gamma, t) - \mathbf{r}_{AST}(t)) \cdot (\mathbf{r}_{res}(\gamma, t) - \mathbf{r}_{AST}(t))$$

при $\gamma \in (\gamma_{min}, \gamma_{max}]$, $t \in [t_1, t_1 + \frac{m}{n} T_{pl}]$, где γ_{min} , γ_{max} — предельные углы поворота проекции V_r на плоскость, ортогональную вектору V_p ; T_{pl} — период гелиоцентрической орбиты КА.

4. В результате выполнения шага 3 определяются величины $\gamma = \gamma(\Delta r_{min})$, $t_1 = t_1(\Delta r_{min})$, т. е. определяется резонансная орбита, обеспечивающая минимальное расстояние пролета астероида, и момент t_2 максимального сближения КА с ним.

5. В результате выполнения шагов 1–4 определяются моменты времени t_0 , t_1 , t_2 , момент времени повторного сближения с Венерой t_3 определяется из условия движения КА по резонансной орбите $t_3 = t_1 + m T_{pl}$, где T_{pl} — гелиоцентрический период планеты.

В рамках второго этапа, используемого подхода, требуется осуществить расчет траекторий перелета КА по уже известным моментам времени старта с Земли t_0 , пролета Венеры t_1 и астероида t_2 , посадки на Венеру t_3 , полученным на предыдущем шаге. Этот расчет может быть выполнен следующим образом.

1. Задаются небесные тела — Земля, Венера, целевой астероид. Производится расчет координат заданных небесных тел на моменты времени t_0 , t_1 , t_2 , t_3 .

2. Рассчитываются участки траектории Земля—Венера—астероид—Венера с помощью решения задачи Ламберта на каждом из участков. Результатом являются векторы гелиоцентрических скоростей КА в каждый из вышеперечисленных моментов времени.

3. По данным, полученным на предыдущем шаге, рассчитывается импульс ΔV_{GAM} , сообщаемый КА в момент времени t_1 при пролете Венеры в предположении, что гравитационный маневр является активным, по формуле (Суханов, 2010):

$$\Delta V_{GAM} = \Delta V_\pi + \Delta V_t,$$

где $\Delta V_\pi = \sqrt{\frac{2\mu_1}{r_\pi} + (V_r^-)^2} - \sqrt{\frac{2\mu_1}{r_\pi} + (V_r^+)^2}$ — импульс, сообщаемый КА в перигеетре пролетной гиперболической траектории ($r_\pi > 6551$ км, 6551 км — величина, принятая с целью исключить пролет КА через атмосферу Венеры) и требуемый для изменения величины асимптотической скорости на выходе из сферы действия Венеры; $\mu_1 = 324853.4$ км³/с² — гравитационный параметр Венеры; $\Delta V_t = 2V_r^- \sin \frac{\Delta\alpha}{2}$ — импульс поворота

асимптоты, который применяется в том случае, если требуемый угол поворота больше максимального естественного угла поворота; последний вычисляется по известным формулам (см., например, в работах (Суханов, 2010; Боровин и др., 2018); $\Delta\alpha$ – разность величин максимального и требуемого естественных углов поворота.

4. При пролете астероида, в предположении, что массами астероида и КА можно пренебречь, используется следующая формула для расчета активного маневра КА:

$$\Delta V_{AST} = |\mathbf{V}_{AST}^+ - \mathbf{V}_{AST}^-|,$$

где $\mathbf{V}_{AST}^-$, $\mathbf{V}_{AST}^+$ – векторы гелиоцентрических скоростей КА до и после пролета астероида.

5. Суммарный импульс $\Delta V_{\Sigma}(\mathbf{T})$, где $\mathbf{T} = \{t_0, t_1, t_2, t_3\}$, рассчитывается как сумма импульсов: $\Delta V_0(t_0, t_1)$ – при старте с круговой низкой околоземной орбиты с заданными параметрами (радиус 6571 км, наклонение 51.6°), $\Delta V_{GAM}(t_1, t_2)$ – при пролете Венеры, $\Delta V_{AST}(t_1, t_2)$ – при пролете астероида. Тогда можно записать

$$\Delta V_{\Sigma}(\mathbf{T}) = \Delta V_0(t_0, t_1) + \Delta V_{GAM}(t_1, t_2) + \Delta V_{AST}(t_2, t_3).$$

6. $\Delta V_{\Sigma}(\mathbf{T})$ минимизируется по критерию $\Delta V_{\Sigma}(\mathbf{T}) \rightarrow \min_{\mathbf{T}}$ с помощью любого доступного способа отыскания минимума целевой функции ΔV_{Σ} .

7. Далее из полученных траекторий отбираются удовлетворяющие критерию

$$\begin{cases} \left\| \sum_{i=0}^3 (t_{i+1} - t_i) - \frac{m}{n} T_{pl} \right\| \leq \varepsilon_1, \\ \Delta V_{GAM}(t_1, t_2) + \Delta V_{AST}(t_2, t_3) \leq \varepsilon_2, \\ \Delta V_0 \leq (\Delta V_0)_{lim}, \end{cases}$$

где T_{pl} – период орбиты планеты, $(\Delta V_0)_{lim}$ – максимально допустимая величина стартового импульса; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – некоторые малые величины, задающие точность вычислений периода и импульса соответственно.

8. В случае, если условие $\left\| \sum_{i=0}^3 (t_{i+1} - t_i) - \frac{m}{n} T_{pl} \right\| \leq \varepsilon$

не удовлетворяется, считается, что пролет астероида при полете на витке резонансной орбиты невозможен.

Заметим, что максимально возможная величина стартового импульса $(\Delta V_0)_{lim}$ может быть выбрана из практических соображений; как правило, эта величина для венерианских миссий колеблется в пределах от ~ 3.66 до ~ 4.2 км/с (Glaze

и др., 2018; Eismont и др., 2019). Однако в настоящей работе это значение было увеличено до 4.5 км/с, поскольку в этом случае становится возможным пролет на витке резонансной орбиты некоторых астероидов, которые представляют особую научную ценность, и рассмотрение сценария с облетом этих астероидов может существенно повысить научную значимость миссии в целом, что оправдывает необходимость увеличения энергетических затрат. Поэтому авторами было принято решение включить данные траектории в общий список возможных сценариев.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Общий анализ результатов

В первую очередь была исследована возможность безимпульсного пролета астероида на участке траектории Земля–Венера. В этом случае траектория КА может быть рассчитана путем двукратного решения задачи Ламберта на участках Земля–астероид и астероид–Венера. Однако при поиске среди выбранных из базы данных JPL 120 астероидов в интервале дат старта с 2029 по 2050 гг. не удалось обнаружить ни одного астероида, пролет которого мог бы быть осуществлен на участке Земля–Венера, во-первых, безимпульсно, а во-вторых, при длительности полета, соответствующей траектории второго полувитка (под межпланетными траекториями первого и второго полувитков обычно понимают траектории перелета, обеспечивающие встречу с планетой назначения на угловой дальности менее 180° или более 180° соответственно).

Далее, как было описано в разделе “Методика расчета траекторий...”, было проведено моделирование траекторий КА с облетом Венеры и астероида и последующей посадкой на поверхность Венеры.

Всего удалось найти 62 возможных сценария полета КА (55 уникальных и 7 дублирующих, см. табл. 1, рис. 2), удовлетворяющих ограничениям на ΔV_0 . На рис. 2 показано распределение количества возможных сценариев по годам запуска. Отметим, что пролет некоторых астероидов возможен для нескольких различных сценариев при запуске миссии в разные окна старта.

В табл. 1 приводятся некоторые характеристики построенных сценариев. Для каждого сценария указаны год запуска миссии, наименование астероида, сближение с которым происходит во время перелета, основные даты сценария (даты старта, пролета Венеры, сближения с астероидом, возвращения к Венере и посадки на ее поверхность). Также для каждого сценария

Таблица 1. Достижимые малые небесные тела и параметры соответствующих траекторий перелета КА от Земли к Венере

Год запуска миссии	Малое небесное тело	Дата старта	Дата пролета Венеры	Дата пролета малого небесного тела	Дата посадки на поверхность Венеры	ΔV_0 , км/с	H_p , 10^3 км	V_p , км/с	$V_{r,ast}$, км/с	i , угл. град
2029	153195 (2000 WB1)	19.10.2029	30.01.2030	02.06.2030	12.09.2030	3.83	8.67	6.16	28.72	5.49
	184990 (2006 KE89)	28.10.2029	14.02.2030	08.04.2030	27.09.2030	3.87	12.23	4.31	42.52	3.67
2031	2004 TH10	19.05.2031	19.08.2031	06.10.2031	31.03.2032	4.21	10.83	10.00	34.04	5.71
	4341 (Poseidon) (1987 KF)	19.05.2031	13.11.2031	09.01.2032	25.06.2032	4.31	0.50	6.19	19.38	11.77
	154276 (2002 SY50)	21.05.2031	27.09.2031	25.12.2031	09.05.2032	3.82	12.67	3.56	17.73	2.39
	1996 FG3	23.05.2031	22.11.2031	19.03.2032	04.07.2032	3.76	24.24	5.61	6.66	4.11
2032–33	6063 Jason (1984 KB)	21.11.2032	09.05.2033	05.11.2033	14.03.2034	3.96	0.50	3.97	17.49	3.40
	1685 Toro (1948 OA)	23.12.2032	01.04.2033	31.07.2033	12.11.2033	4.09	16.74	8.29	11.70	5.55
	9162 Kwiila (1987 OA)	29.12.2032	23.04.2033	07.07.2033	04.12.2033	3.66	28.82	4.63	17.17	3.40
	2P/Enke	29.01.2033	02.06.2033	22.08.2033	13.01.2034	5.13	14.08	8.88	30.72	12.20
	2003 UC20	31.01.2033	23.07.2033	20.10.2033	04.03.2034	3.86	18.70	6.70	8.08	5.58
	139289 (2001 KR1)	15.02.2033	06.08.2033	21.01.2034	19.03.2034	3.88	33.51	7.73	38.96	2.09
2034	1998 KN3	28.04.2034	14.11.2034	15.01.2035	26.06.2035	4.18	0.50	4.62	35.04	1.00
	141484 (2002 DB4)	04.06.2034	29.11.2034	11.03.2035	12.07.2035	3.86	1.35	3.17	15.09	2.16
	2005 TG10	03.07.2034	31.12.2034	23.03.2035	13.08.2035	3.88	15.87	3.85	34.05	8.02
	1865 Cerberus (1971 UA)	17.07.2034	31.10.2034	14.01.2035	12.06.2035	4.05	26.01	8.82	13.66	2.70
	9162 Kwiila (1987 OA)	21.07.2034	08.12.2034	18.04.2035	21.07.2035	3.99	4.00	6.85	22.21	3.91
	163243 (2002 FB3)	31.07.2034	05.01.2035	21.02.2035	18.08.2035	4.26	6.22	5.58	25.94	10.01
	4544 Xanthus (1989 FB)	15.09.2034	02.03.2035	23.06.2035	13.10.2035	3.80	17.15	7.53	12.78	3.10
2036	159686 (2002 LB6)	06.03.2036	18.06.2036	23.08.2036	29.01.2037	3.84	26.20	7.71	20.83	2.78
	5731 Zeus (1988 VP4)	06.03.2036	22.09.2036	27.10.2036	04.05.2037	4.00	9.21	7.15	14.10	5.21
	154035 (2002 CV59)	30.04.2036	20.10.2036	12.04.2037	01.06.2037	3.90	7.91	8.19	38.73	7.05

Таблица 1. Продолжение

Год запуска миссии	Малое небесное тело	Дата старта	Дата пролета Венеры	Дата пролета малого небесного тела	Дата посадки на поверхность Венеры	ΔV_0 , км/с	H_p , 10^3 км	V_p , км/с	$V_{r,ast}$, км/с	i , угл. град
2037– 38	139289 (2001 KR1)	26.09.2037	11.03.2038	15.04.2038	22.10.2038	3.87	0.97	5.33	37.05	3.80
	154276 (2002 SY50)	21.10.2037	06.02.2038	05.07.2038	18.09.2038	3.82	30.89	4.97	23.00	5.10
	2001 UY4	18.11.2037	04.05.2038	13.07.2038	14.12.2038	3.80	24.66	6.21	29.77	4.36
	4197 Morpheus (1982 TA)	28.11.2037	17.05.2038	21.10.2038	28.12.2038	3.92	34.94	7.02	23.52	3.09
	184990 (2006 KE89)	29.11.2037	17.05.2038	01.12.2038	27.12.2038	3.91	30.92	6.99	47.44	3.86
2040	1686 Toro (1948 OA)	20.12.2040	31.03.2041	29.07.2041	11.11.2041	4.06	12.29	7.95	12.01	6.70
	3554 Amun (1986 EB)	20.12.2040	05.04.2041	30.06.2041	16.11.2041	4.33	0.50	6.80	21.30	8.45
2042	154276 (2002 SY50)	08.06.2042	06.12.2042	18.02.2043	19.07.2043	3.86	8.42	2.96	22.55	1.81
	141484 (2002 DB4)	15.06.2042	15.12.2042	28.02.2043	28.07.2043	3.87	6.65	3.12	19.72	7.27
	138013 (2000 CN101)	30.06.2042	16.12.2042	13.05.2043	29.07.2043	4.00	0.50	3.65	20.60	3.30
	184990 (2006 KE89)	30.06.2042	19.01.2043	20.03.2043	31.08.2043	4.09	5.21	5.78	36.33	8.31
	3555 Amun (1986 EB)	25.07.2042	16.01.2043	27.05.2043	29.08.2043	3.83	28.34	5.02	18.42	5.05
	1862 Apollo (1932 HA)	06.08.2042	23.10.2042	31.01.2043	05.06.2043	4.40	2.66	11.49	25.30	8.34
	184990 (2006 KE89)	15.08.2042	19.01.2043	20.03.2043	01.09.2043	3.99	21.53	5.81	36.36	8.30
	1998 TU3	23.08.2042	22.01.2043	06.05.2043	04.09.2043	4.12	4.63	6.38	21.04	3.34
	55532 (2001 WG2)	25.08.2042	23.12.2042	09.03.2043	04.08.2043	4.33	6.09	6.39	32.85	7.59
	4769 Castalia (1989 PB)	30.08.2042	06.03.2043	01.06.2043	17.10.2043	4.08	13.07	8.49	13.72	4.20
	2P/Encke	30.09.2042	11.04.2043	17.07.2043	22.11.2043	5.25	0.51	11.85	25.10	11.10
	6064 Jason (1984 KB)	20.10.2042	03.04.2043	20.09.2043	14.11.2043	4.11	30.64	9.40	15.29	2.54
2044	2004 UC20	24.03.2044	13.09.2044	05.11.2044	26.04.2045	3.66	24.69	6.01	11.74	3.10
	3556 Amun (1986 EB)	29.06.2044	07.12.2044	25.04.2045	20.07.2045	4.49	5.59	11.81	16.09	7.63
2045	Mithra (1987 SB)	04.10.2045	14.03.2046	12.05.2046	25.10.2046	3.81	2.52	5.47	15.14	3.04
	1999 TU3	20.10.2045	30.03.2046	17.08.2046	09.11.2046	3.61	30.01	4.97	15.66	2.56

Таблица 1. Окончание

Год запуска миссии	Малое небесное тело	Дата старта	Дата пролета Венеры	Дата пролета малого небесного тела	Дата посадки на поверхность Венеры	ΔV_0 , км/с	H_p , 10^3 км	V_r , км/с	$V_{r,ast}$, км/с	i , угл. град
2047	153195 (2000 WB1)	26.05.2047	13.11.2047	13.01.2048	24.06.2048	3.67	18.25	4.99	29.85	5.90
	3753 Cruithne (1986 TO)	07.06.2047	23.08.2047	23.10.2047	04.04.2048	4.30	0.50	8.89	20.05	11.17
2048–49	139345 (2001 KA67)	08.11.2048	22.04.2049	23.09.2049	03.12.2049	4.42	0.50	7.46	23.78	6.48
	154276 (2002 SY50)	12.12.2048	13.06.2049	22.08.2049	24.01.2050	3.87	15.37	4.45	20.96	4.13
	1687 Toro (1948 OA)	15.12.2048	29.03.2049	26.07.2049	08.11.2049	4.07	6.14	7.80	12.71	8.83
	1688 Toro (1948 OA)	01.01.2049	28.03.2049	22.07.2049	08.11.2049	4.26	0.50	8.54	13.72	11.22
	154276 (2002 SY50)	07.01.2049	15.06.2049	21.08.2049	26.01.2050	3.94	5.22	4.57	21.15	4.25
2050	138013 (2000 CN101)	22.08.2050	08.02.2051	06.06.2051	20.09.2051	3.77	18.42	6.55	23.80	5.47
	3360 Syrinx (1981 VA)	11.06.2050	10.12.2050	10.03.2051	22.07.2051	3.85	13.44	3.01	25.70	7.39
	3360 Syrinx (1981 VA)	10.08.2050	28.01.2051	04.03.2051	10.09.2051	3.79	8.81	5.91	28.70	4.75

Примечание. Повторение некоторых астероидов означает, что были обнаружены сценарии перелета, схожие по величине с ΔV_0 , но различающиеся по длительности перелета участка Земля–Венера.

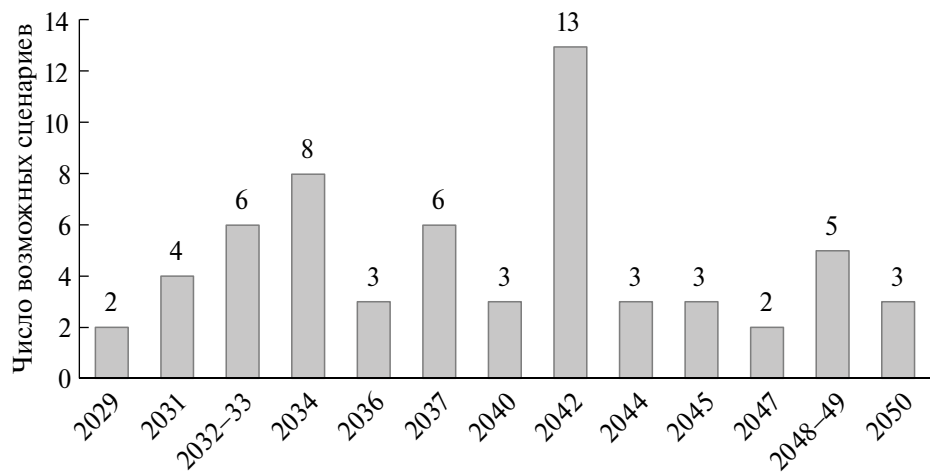


Рис. 2. Распределение числа астероидов, достижимых на участке траектории КА Венера–Венера, по возможным годам запуска миссии.

приводятся величина стартового импульса ΔV_0 , высота облета Венеры H_p , относительная скорость аппарата при пролете астероида $V_{r,ast}$ и асимптотическая скорость КА после возвращения к Венере V_r .

Анализ длительности перелета КА на участке Венера–астероид–Венера

Ранее в разделе “Методика расчета траекторий...” мы ввели критерий (п. 8) выбора таких траекторий КА, которые позволяют после

облета Венеры и астероида повторно сблизиться с Венерой в той же точке ее орбиты, в которой и был произведен гравитационный маневр. Этот критерий основывался на суммировании времени перелета КА на участках Венера—астероид и астероид—Венера, при этом длительность полета КА на этих участках определялась из условия минимума функционала ΔV_{Σ} (раздел “Методика расчета траекторий...”, п. 7). Однако, как показали расчеты, в том случае, когда данный критерий не применялся, оптимальными по ΔV_{Σ} и при этом удовлетворяющими условиям по безымппульсности все равно оказывались траектории, для которых длительность участка Венера—Венера составляла один венерианский год.

Установление данного обстоятельства при многократном моделировании позволило выдвинуть гипотезу о том, что безымппульсный облет астероида вне плоскости орбиты Венеры происходит в том лишь случае, если КА движется по гелиоцентрической резонансной $1:n$ орбите. Напротив, если пролет астероида происходит в плоскости орбиты Венеры, то гелиоцентрическая орбита КА не является резонансной к орбите Венеры, и встреча с последней происходит в другой точке ее орбиты, отличной от той, в которой был совершен гравитационный маневр.

Данная гипотеза подтверждается проведенными расчетами. Так, например, облет кометы 2P/Энке в 2042 г. происходит, когда КА находится на резонансной $1:2$ орбите; другой пример — это встреча с астероидом 6063 Ясон (1984 KB) при старте в 2034 г., тогда полет происходит по нерезонансной траектории, длительность полета между двумя сближениями с Венерой составляет 309 сут. (рис. 3).

Выдвинутую гипотезу можно объяснить тем, что КА, совершив гравитационный маневр у Венеры и перейдя затем на траекторию полета к малому небесному телу (не обязательно лежащую в плоскости венерианской орбиты), фактически движется по невозмущенной кеплеровской траектории до следующего сближения с планетой.

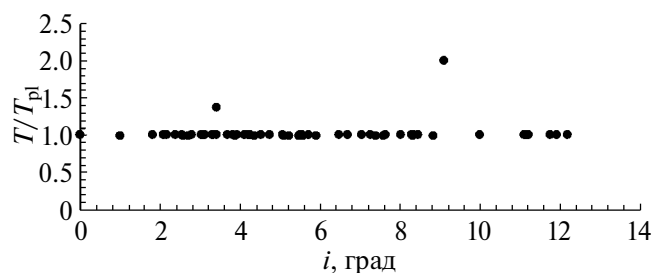


Рис. 3. Длительность перелета на участке Венера—астероид—Венера по отношению к периоду планеты в зависимости от угла наклона плоскости орбиты перелета КА на участке Венера—астероид к эклиптике.

При этом необходимо, чтобы в момент этого сближения как КА, так и планета оказались в точке пересечения своих орбит в одно и то же время t_3 , что возможно только при резонансе между орбитальными периодами КА и планеты. В тех же случаях, когда плоскость движения КА совпадает с плоскостью орбиты Венеры, аппарат может встретиться с планетой в различных точках ее орбиты (Суханов, 1993), вследствие чего время перелета будет определяться исключительно исходя из критерия минимума суммарной характеристической скорости.

Далее нетрудно объяснить причину, по которой время полета КА на участке траектории Венера—астероид—Венера равно величине орбитального периода Венеры. Переход на орбиты резонанса $1:n$ при $n > 1$ требует, с одной стороны, высокой скорости пролета Венеры в момент времени t_1 , а с другой стороны, возможность поворачивать плоскость орбиты КА во время облета Венеры напрямую зависит от величины этой же скорости. Кроме того, переход на орбиты с резонансным отношением $m:n$ при $m < n$ требует либо облета Венеры в направлении против вектора ее орбитальной скорости, что затруднительно при старте с Земли и полете во внутреннюю для Земли область гелиосферы, либо возможности поворачивать вектор асимптотической скорости КА во время облета Венеры на углы, превышающие 90° , что возможно за несколько гравитационных маневров, как, например, было показано в работах (Боровин и др., 2013; Голубев и др., 2017) для увеличения гелиоцентрического наклона результирующей орбиты КА проекта “Интергелиозонд”.

Таким образом, переход на резонансную $1:1$ орбиту для пролета и Венеры, и астероида может быть объяснен как наименее затратный с энергетической точки зрения переход, покрывающий при этом достаточно большие диапазоны по γ , что обеспечивает возможность изменения плоскости полета КА на гелиоцентрическом участке после облета Венеры в достаточно широком диапазоне.

Пример построения траектории перелета от Земли к Венере с попутным облетом астероида 2002 SY50

Приведем наглядный пример с анализом траектории полета КА к Венере с облетом астероида 2002 SY50 при старте в мае—июне 2031 г., что соответствует окрестности минимума как характеристической скорости старта, так и относительной скорости пролета Венеры. Выбранный в качестве примера астероид 2002 SY50 вызывает интерес по нескольким причинам: во-первых, его период вращения оценивается в 4.823 ч. (Warner

и др., 2009), что позволяет отнести этот астероид к классу быстровращающихся; кроме того, согласно (Carru и др., 2016), данный астероид относится к спектральному классу К. Кроме того, указанный астероид также относят к потенциально опасным объектам с прогнозируемым минимальным расстоянием сближения с Землей 10541109 км (на дату 15.05.2025 г.) (<https://www.spacereference.org/asteroid/154276-2002-sy50> (дата обращения 05.11.2023)).

Отметим, что в данном примере конечные координаты точки посадки будут выступать свободными величинами и выбираться из условия безымпulsности пролета выбранного астероида.

На первоначальном этапе анализа, согласно методике, описанной в разделе “Выбор целевых...”, определяются дата старта и моменты времени, соответствующие максимальному сближению КА, движущегося по резонансной орбите, с астероидом. На рис. 4 показаны найденные минимальные расстояния сближения КА с астероидом во время полета КА на участке Венера–Венера.

Анализируя рис. 4, можно заметить, что для некоторых резонансных орбит, характеризующихся значением γ в диапазоне от 50° до 68° , КА сближается с астероидом 2002 SY50 на расстоянии от 130 тыс. км до 2 млн км. Максимальное сближение достигается при $\gamma \approx 68^\circ$ и составляет $\min(\Delta r_{\min}) \approx 130$ тыс. км при старте 07.06.2031 г.

Проведем оценку изменения потребной характеристической скорости для реализации схемы полета Земля–Венера–(2002 SY50)–Венера в зависимости от даты старта и функционала, используемого для оптимизации траекторий перелета (рис. 5).

Как видно на рис. 5а, величина ΔV_0 варьируется в зависимости от даты старта в выбранном

нами интервале в пределах от 0 до 220 м/с при сравнении с перелетом без облета астероида и оптимизацией только по ΔV_0 . Если в качестве критерия используется минимум $\Delta V_0 + V_r$, то разница между ΔV_0 в схемах с облетом астероида и без облета (для кривых DV02 и DV03, см. рис. 5б) уменьшается примерно в два раза в худшем случае, т. е. для интервала дат старта с 03.06.2031 г. по 12.06.2031 г. В интервале дат с 20.05.2031 г. по 03.06.2031 г. кривые DV01 и DV02 практически совпадают, а максимальная разница между DV02 и DV03 достигает 100 м/с (19.05.2031 г.).

Отметим еще одну особенность. При поиске максимальных сближений КА и астероида (т. е. на первом этапе расчетов) было обнаружено, что абсолютный минимум на всем множестве рассматриваемых траекторий перелета Земля–Венера–астероид–Венера достигается для $\gamma \approx 68^\circ$, а уже в процессе уточнения траекторий облета на втором этапе оказалось, что полученные траектории с безымпulsным облетом и Венеры, и астероида соответствуют решениям для $\gamma \approx 70^\circ \pm 2^\circ$ и $\gamma \approx 133^\circ \pm 2^\circ$ (данный случай характерен для начала окна старта), что является близким к обнаруженному на первом этапе поиска значению. Однако, несмотря на близость полученных решений, возрастание ΔV_0 приходится приблизительно на те даты старта, когда сближение КА и астероида максимально (см. рис. 4а, 4б).

Последнее может быть объяснено следующим обстоятельством: при изменении даты старта и приближении даты максимального сближения (06.06.2031 г.) асимптотическая скорость пролета КА Венеры в сценарии с пролетом астероида не изменяется (кривая DV02 на рис. 5б) или возрастает (кривая DV01 на рис. 5б), при этом асимптотическая скорость в сценарии без пролета уменьшается (кривая DV03 на рис. 5б). Таким образом,

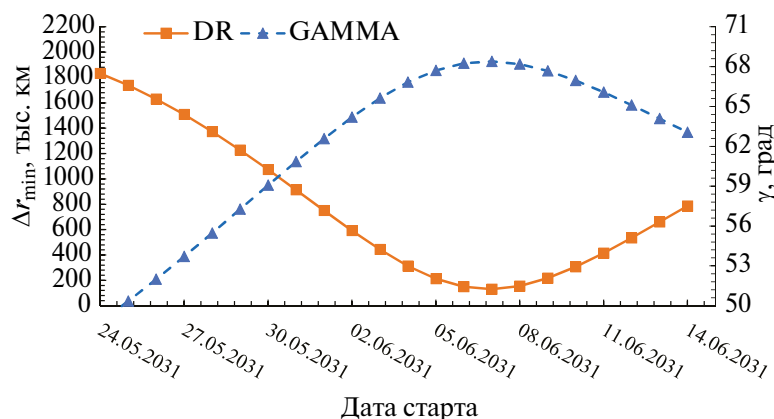


Рис. 4. Минимальное расстояние сближения с астероидом (2002 SY50) и γ в зависимости от даты старта. Диапазон дат старта находится в интервале с 24.05 по 14.06 (2031 г.). Символами DR и GAMMA обозначены, соответственно, минимальное расчетное расстояние между астероидом и КА, а также соответствующее значение угла γ , определяющее резонансную орбиту, при движении по которой достигается упомянутое минимальное расстояние. Результаты приведены для траекторий, оптимизированных по критерию $\Delta V_0 + V_r$.

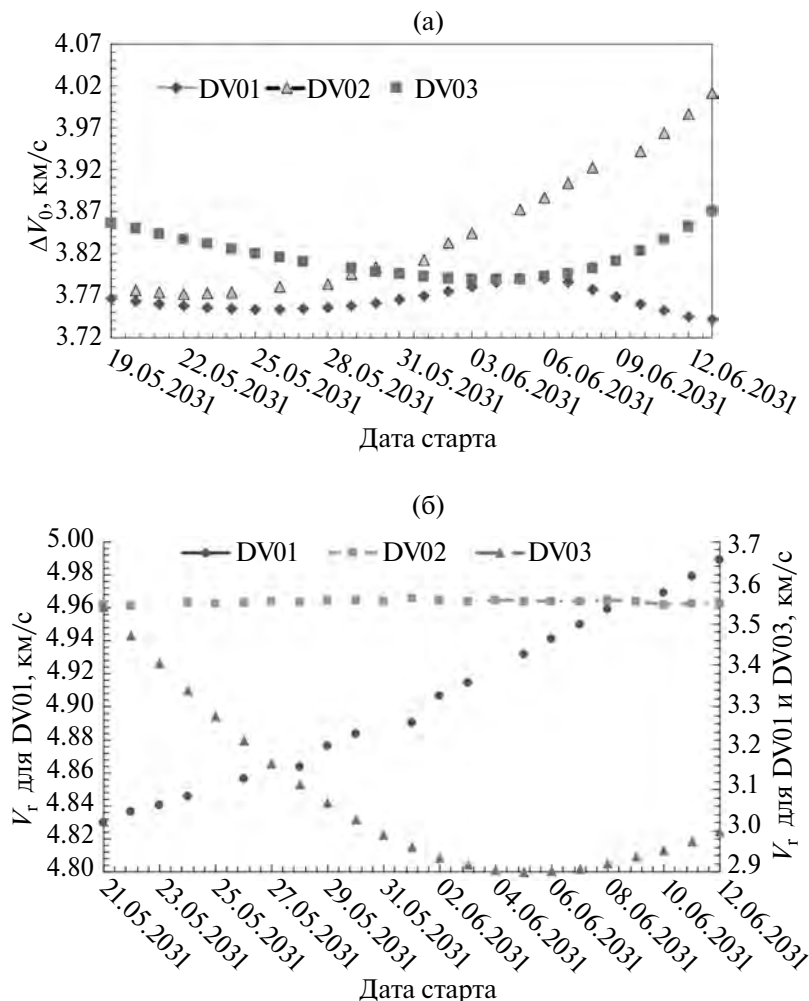


Рис. 5. Зависимость характеристик траекторий перелета КА к Венере с облетом астероида 2002 SY50 от даты старта: (а) – ΔV_0 ; (б) – V_l . DV01 и DV02 соответствуют ΔV_0 при полете к Венере без облета астероида и оптимизации траекторий по критерию минимума ΔV_0 и с последующим облетом 2002 SY50, DV03 соответствует ΔV_0 , полученной при оптимизации траекторий по критерию $\Delta V_0 + V_l$.

необходимость совершать пролет Венеры с более высокими, по сравнению со сценарием без пролета, значениями асимптотической скорости естественным образом приводит к возрастанию потребной характеристической скорости старта для перелета к Венере.

Проанализируем доступные для посадки области на поверхности планеты при полете КА по сценарию Земля–Венера–(2002 SY50)–Венера. В качестве номинального сценария рассматривается перелет от Земли к Венере с ее облетом, переходом на резонансную 1:1 орбиту и с последующей посадкой в области Велламо–Юг 164°E; 29°N, как в работах (Zubko, 2022; 2023b).

В упомянутых работах было показано, что, в отличие от классического подхода, т. е. прямого перелета от Земли к Венере, сценарий с гравитационным маневром и полетом по резонансной орбите обеспечивает посадку в заданном регионе поверхности при: 1) любой дате старта в пре-

делах окна; 2) сохранении начального значения потребной характеристической скорости для реализации такого полета; 3) применении методики в широком интервале углов входа и, как следствие, в широком интервале максимальных перегрузок.

При рассматриваемом сценарии, включающем попутный облет астероида, на траекторию КА накладываются дополнительные ограничения, что приводит к уменьшению достижимых областей посадки. Еще одним отличием от ранее упомянутых работ является используемый для оптимизации траекторий перелета КА функционал. В данной работе, в отличие от предыдущих, минимизируется функционал, записанный в разделе “Методика расчета...”, п. 6, тогда как в работах (Eismont и др., 2022a; Zubko, 2022) минимизируется сумма характеристической скорости КА, потребной для старта от Земли, и относительной скорости пролета Венеры. Используемый в настоящей работе

функционал позволяет получить дополнительное преимущество в выборе доступных регионов посадки на поверхности Венеры.

Анализ достижимых областей посадки удобно производить, введя понятие окружности посадки (Боровин и др., 2018; Eismont и др., 2021). Под окружностью посадки будем понимать пересечение трубки подлетных гиперболических траекторий с поверхностью Венеры. Каждая траектория, принадлежащая трубке, является реализуемой, если на границе сферы действия Венеры КА сообщается импульс, требуемый для перехода от центральной (т. е. стремящейся к центру планеты) траектории к заданной (т. е. с требуемой длиной b перпендикуляра, опущенного из центра планеты на асимптоту гиперболы; величина b является энергетической характеристикой гиперболической траектории). На поверхности Венеры такую окружность удобно характеризовать ее радиусом, который может быть вычислен, согласно (Боровин и др., 2018; Eismont и др., 2021), по формуле

$$\psi = \arccos\left(\frac{\mu}{\mu + r_p(V_r)^2}\right) + \arcsin\frac{\tan\theta_{ent}p}{er_{ent}} + L/R_{pl},$$

где r_p , p , e — радиус перицентра (км), фокальный параметр (км) и эксцентриситет подлетной гиперболической орбиты КА, θ_{ent} , r_{ent} — угол входа в атмосферу (угл. град) и планетоцентрическое расстояние (км) от центра планеты до точки входа

КА в атмосферу; L — продольное смещение точки посадки относительно точки входа в атмосферу (км), $R_{pl} = 6051$ — средний радиус Венеры (км). Величина L/R_{pl} определяется путем численного интегрирования уравнений движений спускаемого аппарата в плотных слоях атмосферы Венеры. В данной работе атмосферный участок траектории интегрировался методом Рунге—Кутты (8) 9 порядка, модель атмосферы была взята из работы (Petrooulos, 1988), модель движения КА сферической формы в плотных слоях атмосферы взята из (Боровин и др., 2018). Типичное продольное смещение, выраженное в градусах, варьировалось от 1° до 7° в зависимости от угла входа: чем угол больше, тем L меньше.

На рис. 6 показаны окружности посадки, соответствующие рассматриваемому сценарию перелета Земля—Венера—(2002 SY50)—Венера. Радиус окружностей посадки в среднем составил $\psi \approx 77^\circ$. В табл. 2 и 3 приведены некоторые характеристики траекторий перелета к Венере в рамках рассматриваемого сценария с облетом астероида 2002 SY50.

Красные и синие окружности посадки на карте (см. рис. 6) представляют собой множество точек посадки, доступных при перелете к Венере по схеме с пролетом астероида 2002 SY50. Как можно увидеть из рисунка, облет астероида 2002 SY50 является предпочтительным при полете КА к области Велламо—Юг. Однако отметим, что полученный результат не является общим,

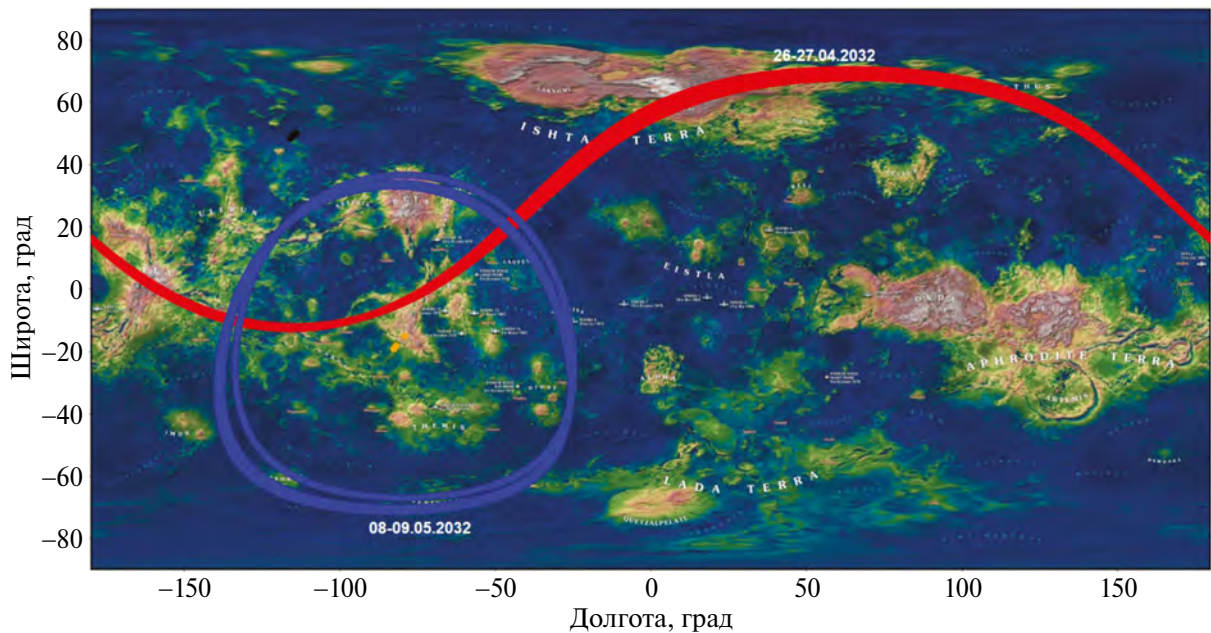


Рис. 6. Окружности посадки, получаемые в рамках рассмотренного сценария полета к Венере с пролетом астероида 2002 SY50. Интервал рассматриваемых дат старта — с 24.05.2031 г. по 13.06.2031 г. Синие кривые обозначают окружности посадки, соответствующие траекториям, полученным при использовании в качестве начального приближения траекторий, оптимизированных по функционалу $\Delta V_0 + V_r$, красные — по функционалу ΔV_0 . Угол входа в атмосферу принимался равным 12° , как в работе (Zubko, 2022).

поскольку пролет астероида уже в каком-то смысле задает траекторию перелета КА, поэтому выбирать место посадки так же свободно, как это делалось в статье (Eismont и др., 2022a), невозможно. Однако здесь стоит подчеркнуть, что сокращение достижимых районов посадки при рассмотренном сценарии полета можно компенсировать за счет: а) поиска другого подходящего астероида, пролет которого будет удовлетворять условиям попадания в заданный регион поверхности; б) использования других траекторий для начального приближения, как в рассмотренном примере; в) совершения повторного гравитационного маневра у Венеры с повторным возвращением к ней через еще один венерианский год, так что время перелета между первым гравитационным маневром и окончательной посадкой составит около 449 сут.; г) введения компромиссного функционала, обеспечивающего одновременно попадание в окрестность заданной точки поверх-

ности и пролет астероида на допустимом для проведения наблюдений расстоянии; д) изменения угла входа в атмосферу за счет изменения требований к максимальной допустимой перегрузке.

Стоит отметить, что упомянутое выше сокращение числа доступных в результате гравитационного маневра точек посадки происходит из-за того, что траектория перелета КА на участке Венера—астероид уже задает траекторию перелета на участке Венера—астероид—Венера вследствие необходимости встречи с астероидом в заданный (оптимальный) момент времени (колонка 2 в табл. 2 и табл. 3). Изменение этого момента времени приводит к росту импульса, сообщаемого КА при пролете Венеры. Согласно оценкам авторов, изменение даты пролета астероида на 1–1.5 сут. приводит к тому, что величина необходимого для такого перелета импульса изменяется от 0 (в оптимальном случае) до 300 м/с (при изменении даты пролета).

Таблица 2. Некоторые характеристики траекторий полета к Венере с облетом астероида 2002 SY50 на участке Венера—Венера для дат старта с 20.05.2031 г. по 10.06.2031 г. Траектории, использованные в качестве опорных (начального приближения), оптимизированы по функционалу $\Delta V_0 + V_r$

t_1 (UTC)	t_2 (UTC)	t_3 (UTC)	t_4 (UTC)	ΔV_0 , км/с	V_r , км/с	H_p , 10 ³ км	i_p , град	λ_{cent} , град	Φ_{cent} , град
24.05.2031	27.09.2031	25.12.2031	09.05.2032	3.836	3.551	15.0	35.72	−82.1	−18.5
26.05.2031	27.09.2031	25.12.2031	09.05.2032	3.842	3.553	15.6	34.52	−82.2	−18.6
26.05.2031	27.09.2031	25.12.2031	09.05.2032	3.847	3.558	16.2	33.52	−82.4	−18.9
27.05.2031	27.09.2031	25.12.2031	09.05.2032	3.852	3.56	16.7	32.43	−82.4	−19.0
28.05.2031	27.09.2031	25.12.2031	09.05.2032	3.857	3.56	17.2	31.32	−82.4	−19.0
29.05.2031	27.09.2031	25.12.2031	09.05.2032	3.862	3.559	17.7	30.24	−82.4	−19.0
31.05.2031	27.09.2031	25.12.2031	09.05.2032	3.868	3.562	18.1	29.36	−82.5	−19.1
31.05.2031	27.09.2031	25.12.2031	09.05.2032	3.873	3.559	18.5	28.20	−82.4	−18.9
02.06.2031	27.09.2031	25.12.2031	09.05.2032	3.879	3.562	18.8	27.48	−82.5	−19.1
03.06.2031	27.09.2031	25.12.2031	09.05.2032	3.885	3.561	19.1	26.53	−82.5	−19.1
03.06.2031	27.09.2031	25.12.2031	09.05.2032	3.892	3.558	19.3	25.51	−82.4	−18.9
05.06.2031	27.09.2031	25.12.2031	09.05.2032	3.9	3.561	19.5	24.88	−82.5	−19.0
05.06.2031	27.09.2031	25.12.2031	09.05.2032	3.907	3.559	19.7	24.05	−82.4	−19.0
07.06.2031	27.09.2031	25.12.2031	09.05.2032	3.916	3.555	19.8	23.08	−82.3	−18.8
07.06.2031	27.09.2031	25.12.2031	09.05.2032	3.925	3.554	19.9	22.31	−82.2	−18.7
09.06.2031	27.09.2031	25.12.2031	09.05.2032	3.935	3.555	20.0	21.78	−82.2	−18.7
10.06.2031	27.09.2031	25.12.2031	09.05.2032	3.946	3.553	20.0	21.07	−82.2	−18.6
10.06.2031	27.09.2031	25.12.2031	09.05.2032	3.958	3.55	19.9	20.35	−82.0	−18.5
11.06.2031	27.09.2031	25.12.2031	09.05.2032	3.97	3.551	19.8	19.91	−82.1	−18.5
13.06.2031	27.09.2031	25.12.2031	09.05.2032	3.984	3.545	19.7	19.04	−81.8	−18.2

Примечание. H_p , i_p — высота перицентра и наклонение гиперболической траектории КА в момент пролета Венеры, λ_{cent} — долгота центра окружности посадки; Φ_{cent} — широта центра окружности посадки; долгота и широта центра окружности посадки приведены в гелиоцентрической фиксированной системе координат (система координат вращается вместе с поверхностью Венеры) в момент времени t_4 . Отметим, что $\mathbf{V}_r^+(t_2) = \mathbf{V}_r^-(t_4)$.

Таблица 3. Некоторые характеристики траекторий полета к Венере с облетом астероида 2002 SY50 на участке Венера–Венера для дат старта с 20.05.2031 г. по 10.06.2031 г. Траектории, использованные в качестве опорных (начального приближения), оптимизированы по функционалу ΔV_0

t_1 (UTC)	t_2 (UTC)	t_3 (UTC)	t_4 (UTC)	ΔV_0 , км/с	V_r , км/с	H_p , 10 ³ км	i_p , град	λ_{cent} , град	Φ_{cent} , град
24.05.2031	14.09.2031	28.12.2031	26.04.2032	3.774	4.846	13.4	59.8	−115.7	48.6
25.05.2031	14.09.2031	28.12.2031	26.04.2032	3.777	4.852	13.0	60.1	−115.7	48.6
26.05.2031	14.09.2031	28.12.2031	26.04.2032	3.78	4.857	12.6	60.3	−115.6	48.7
28.05.2031	14.09.2031	28.12.2031	26.04.2032	3.784	4.864	12.2	60.6	−115.5	48.8
30.05.2031	14.09.2031	28.12.2031	26.04.2032	3.796	4.877	11.4	61.1	−115.4	48.9
01.06.2031	14.09.2031	28.12.2031	26.04.2032	3.812	4.891	10.7	61.5	−115.2	49.0
02.06.2031	14.09.2031	28.12.2031	26.04.2032	3.822	4.899	10.4	61.7	−115.1	49.1
03.06.2031	14.09.2031	28.12.2031	26.04.2032	3.832	4.907	10.0	61.9	−115.1	49.2
04.06.2031	14.09.2031	28.12.2031	26.04.2032	3.844	4.915	9.7	62.1	−115.0	49.3
05.06.2031	14.09.2031	28.12.2031	26.04.2032	3.857	4.923	9.4	62.2	−114.9	49.4
05.06.2031	14.09.2031	28.12.2031	26.04.2032	3.872	4.932	9.1	62.4	−114.8	49.5
06.06.2031	14.09.2031	28.12.2031	26.04.2032	3.887	4.941	8.7	62.5	−114.7	49.6
07.06.2031	14.09.2031	28.12.2031	26.04.2032	3.904	4.95	8.4	62.7	−114.6	49.6
08.06.2031	14.09.2031	28.12.2031	26.04.2032	3.922	4.959	8.1	62.8	−114.5	49.7
10.06.2031	14.09.2031	28.12.2031	26.04.2032	3.942	4.969	7.8	62.9	−114.4	49.8
11.06.2031	14.09.2031	28.12.2031	26.04.2032	3.964	4.979	7.6	63.0	−114.3	49.9
12.06.2031	15.09.2031	28.12.2031	26.04.2032	3.986	4.989	7.3	63.1	−114.2	50.0
13.06.2031	15.09.2031	28.12.2031	26.04.2032	4.011	5	7.0	63.2	−114.1	50.1

*Анализ результатов по достижимым
точкам посадки в рамках рассмотренных
сценариев*

Рассмотрим более подробно полученные результаты с точки зрения обеспечения посадки спускаемого аппарата в требуемое место на поверхности Венеры. Для этого проанализируем доступные для посадки места на поверхности Венеры, которые могут быть достигнуты при полете по траекториям, включающим безымпulseный пролет астероида.

Приведем в табл. 4 некоторые характеристики перелета КА к Венере с облетом астероида для дат старта с 2029 по 2040 гг.

Из табл. 4 видно, что число доступных астероидов увеличивается для дат старта с 2032 по 2038 гг. по сравнению с запуском в 2029 и 2031 гг., при этом максимальное число возможных сценариев (7) может быть реализовано при запуске КА в пределах окна старта в 2034–2035 гг. При этом особый интерес вызывает самый крупный из астероидов, первоначально отобранных для анализа — астероид 5731 Зевс (диаметр 5.23 км, для сравнения, самыми крупными объектами из выбранных 120 по каталогу JPL являются астероид 7092 Cadmus (6.32 км)

и ядро кометы 96P/Machholz 1 (6.4 км)), перелет к которому возможен при старте 03.06.2036 г.; пролет этого астероида происходит 27.10.2036 г., при этом относительная скорость пролета составляет ~14 км/с (табл. 1).

Приведем на рис. 7 суммарную достижимую область посадки на поверхности Венеры для дат старта с 2029 по 2040 гг., построенную с учетом данных табл. 4 для величины угла входа в атмосферу — 12°. На рис. 7 приведены координаты центров окружностей посадки, получаемые при реализации полученных в данном исследовании траекторий перелета КА к Венере с облетом астероида в окна старта с 2029 по 2040 гг. Можно увидеть, что большая часть поверхности Венеры может быть достигнута при реализации траекторий полета КА с облетом и Венеры, и астероида. Отдельно отметим, что большая часть центров окружностей посадки лежит в пределах $-180 \leq \lambda \leq 0$ по долготе (град) и $0 \leq \varphi \leq 90$ по широте (град).

Основываясь на рис. 7, можно утверждать, что практически в любое окно старта для полета к Венере можно найти такую траекторию перелета КА в рамках сценария с гравитационным маневром, которая будет включать безымпulseную встречу с астероидом.

Таблица 4. Параметры окружностей посадки, получаемых при полете КА по траектории, сопровождающейся безымпulsным облетом астероида (при старте в 2029–2040 гг.)

Год	Астероид	Дата посадки на Венеру	V_r , км/с	λ_{cent} , град	Φ_{cent} , град	V_{ent} , км/с	ψ , град			
							$\theta_{\text{ent}} = -6^\circ$,	$\theta_{\text{ent}} = -12^\circ$,	$\theta_{\text{ent}} = -24^\circ$,	$\theta_{\text{ent}} = -27^\circ$,
2029	2000 WB1	12.09.2030	6.16	−143.6	16.1	11.97	64	73	90	95
	2006 KE89	27.09.2030	4.31	−100.0	10.1	11.13	53	63	82	87
2031	2004 TG10	31.03.2032	6.12	−133.3	61.4	11.98	64	73	91	95
	4341 Poseidon	25.06.2032	6.19	−95.2	8.1	10.86	47	57	78	83
	1996 FG3	04.07.2032	5.61	165.4	−10.3	11.69	61	70	88	93
	2002 SY50	09.05.2032	3.56	−82.5	−19.1	14.32	78	86	101	105
2032–2033	6063 Jason	13.03.2034	3.97	−156	1	11.00	50	60	80	85
	1685 Toro	12.11.2033	8.29	−173	−14	13.19	73	81	97	101
	9162 Kwiila	04.12.2033	4.63	−110	0	11.26	55	65	84	88
	2P/Encke	04.03.2034	6.70	−20	−38	12.25	66	75	92	97
	2003 UC20	19.03.2034	7.73	24	−17	12.85	71	79	96	100
	139289	13.01.2034	8.84	160	78	13.54	75	83	98	102
2034–2035	1998 KN3	26.06.2035	4.62	19	−32	11.25	55	65	84	88
	141484	12.07.2035	3.17	68	−13	10.74	44	54	75	80
	308043	13.08.2035	3.85	155	75	10.96	49	60	79	84
	1865 Cerberus	12.06.2035	8.86	166	−6	13.56	75	83	98	102
	9162 Kwiila	20.07.2035	6.85	−78	−38	12.34	67	76	93	97
	163243	18.08.2035	5.59	15	66	11.69	61	70	88	93
	4544 Xanthus	12.10.2035	7.52	−10	1	12.72	70	79	95	99
2036	159686	29.01.2037	7.70	−156	27	12.83	71	79	96	100
	5731 Zeus	05.05.2037	7.15	−52	−47	12.51	68	77	94	98
	154035	02.06.2037	8.19	33	20	13.13	72	81	97	101
2037–2038	139289	22.10.2038	5.33	−11	36	11.56	59	69	87	92
	154276	18.09.2038	4.97	−114	−35	11.40	57	67	85	90
	141484	14.11.2038	4.91	−128	41	11.38	57	66	85	90
	194268	14.12.2038	6.20	−36	−9	11.99	64	73	91	95
	4197 Morpheus	28.12.2038	7.02	4	1	12.43	68	77	94	98
	184990	27.12.2038	6.99	4	−6	12.42	68	76	93	98
2040	1686 Toro	11.11.2041	7.93	−167	−19	12.97	71	80	96	100
	3554 Amun	16.11.2041	6.81	−152	65	12.31	67	76	93	97

Примечание. θ_{ent} , V_{ent} – угол и скорость КА в момент входа в атмосферу планеты.

Для окон старта КА в 2029 и 2031 гг. в табл. 4 приведены параметры окружностей посадки. Данные окна старта выбраны в первую очередь из-за того, что в 2029–2031 гг. запланирован запуск КА в рамках миссии “Венера-Д”. В рамках данного проекта может быть реализован сценарий с гравитационным маневром для обеспе-

чения посадки в требуемой области на поверхности планеты (Eismont и др., 2022a; 2022b). На рис. 8 приведена карта поверхности Венеры с отображенными на ней окружностями посадки, которые могут быть достигнуты при полете КА с пролетом астероида. Окружности посадки построены для угла входа -12° (табл. 3).

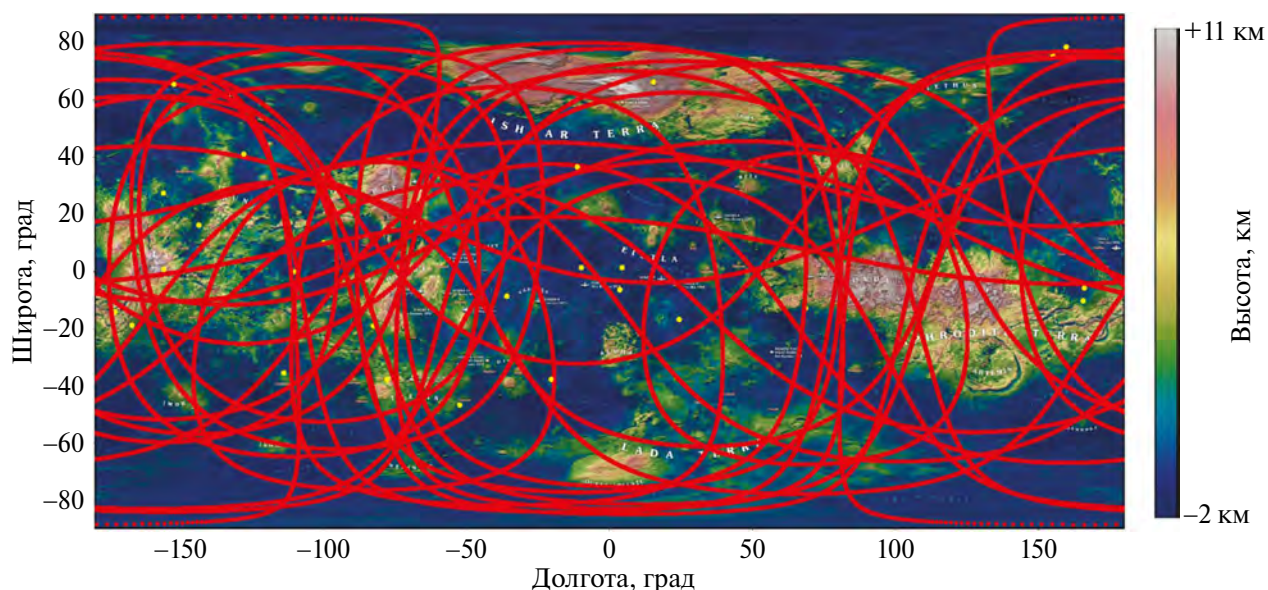


Рис. 7. Суммарная достижимая область посадки (совокупность красных линий) при полете по траекториям, включающим облет Венеры, облет астероида и последующий возврат к Венере (по данным табл. 4, даты старта в период с 2029 по 2040 гг.).

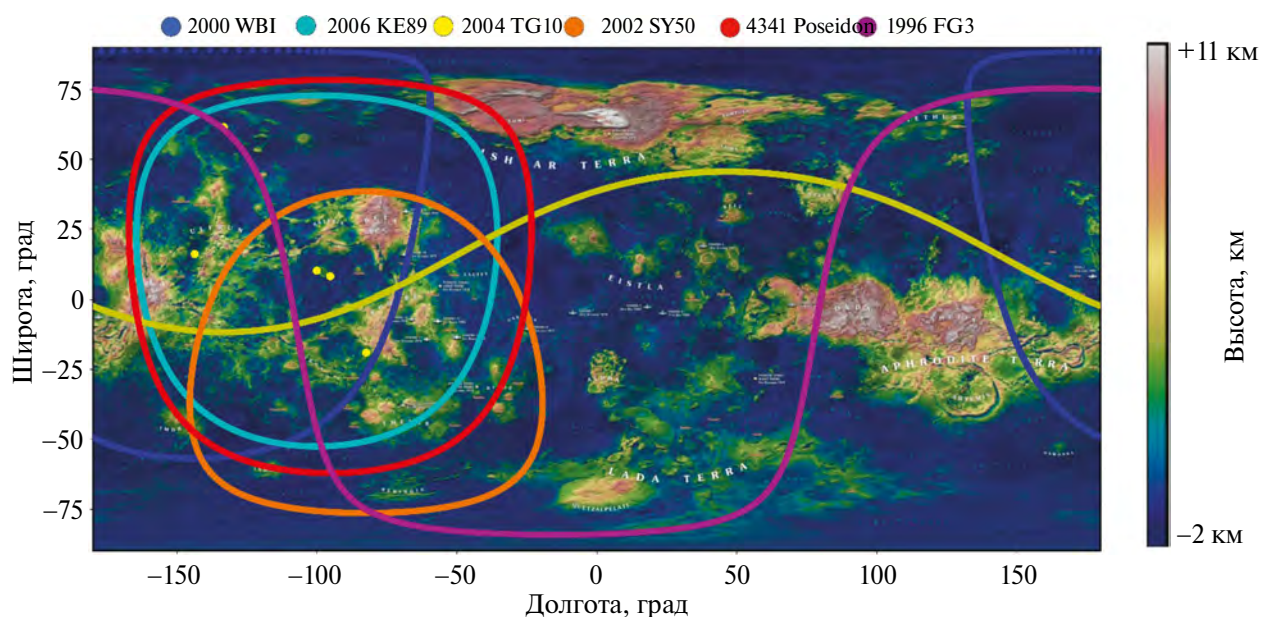


Рис. 8. Окружности посадки, получаемые при полете КА на витке резонансной 1:1 орбиты, обеспечивающей безымпультный облет астероида или кометы; рассматриваются окружности посадки для траекторий полета КА в окна старта 2029 и 2031 гг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрена задача построения схемы полета к Венере с последующей посадкой на ее поверхность и с попутным пролетом астероида. Полученные результаты позволили сделать следующие выводы.

1. В ходе исследования на всем выбранном интервале дат старта с 2029 по 2050 гг. не удалось обнаружить ни одной возможной траектории КА, включающей безымпультный облет астероида на

участке Земля–Венера. Этот факт можно объяснить тем, что исследуемые траектории перелета КА к Венере имеют малое наклонение к плоскости эклиптики (не более 8°), в то время как большая часть тех астероидов, с которыми предполагалось сближение, имеют орбиты с большим наклонением, при этом гелиоцентрические расстояния точек пересечения этих орбит с эклиптикой находятся на существенном удалении от орбит и Земли, и Венеры.

2. В рамках сценария полета к Венере с гравитационным маневром и последующим витком по резонансной 1:1 гелиоцентрической орбите было обнаружено 39 астероидов и 62 сценария полета, в рамках которых удовлетворяются требования к безымпulseности пролета Венеры и астероида, а также последующего возврата КА к Венере.

3. Более подробное исследование полета к Венере с пролетом астероида 2002 SY50 показало, что вследствие изменения требований к траектории КА введение требований к безымпulseному пролету астероида и Венеры приводит к возрастанию стартового импульса ΔV_0 , причем это возрастание происходит в пределах от 0 м/с (19.05.2031 г., наилучший случай) до 220 м/с (12.06.2031 г., наихудший случай). Такое изменение можно объяснить тем, что в оптимальном с точки зрения ΔV_0 сценарии без пролета астероида асимптотическая скорость КА относительно Венеры во время их первого сближения убывает, а в сценарии с пролетом астероида потребная скорость возрастает в силу необходимости удовлетворения вышеобозначенных требований.

4. Анализ достижимых районов посадки при реализации траекторий полета КА к Венере с безымпulseной встречей с астероидом показал, что накладываемое требование к безымпulseности пролета и Венеры, и астероида значительно сокращает достижимые районы посадки. При этом преимущества подхода с гравитационным маневром, по сравнению с прямым перелетом, сохраняются, поскольку возможен поворот вектора асимптотической скорости, что позволяет изменить район посадки при последующем сближении КА с Венерой. Анализ же достижимых районов посадки с 2029 по 2040 гг. в сценарии с пролетом астероида показал, что в каждое из окон старта можно найти такой астероид, пролет которого возможен при незначительном изменении места посадки.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Боровин Г.К., Голубев Ю.Ф., Грушевский А.В., Заславский Г.С., Захваткин М.В., Корянов В.В., Лавренов С.М., Морской И.М., Симонов А.В., Степаньянц В.А., Тучин А.Г., Тучин Д.А., Ярошевский В.С. Баллистико-навигационное обеспечение полетов автоматических космических аппаратов к телам Солнечной системы. Химки: Изд-во НПО им. С.А. Лавочкина, 2018. 336 с.
- Боровин Г.К., Голубев Ю.Ф., Грушевский А.В., Корянов В.В., Тучин А.Г. Полеты в системе Юпитера с использованием гравитационных маневров около галилеевых спутников // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2013. № 1. С. 32–72.
- Голубев Ю.Ф., Грушевский А.В., Киселева И.П., Корянов В.В., Лавренов С.М., Тучин А.Г., Тучин Д.А. Баллистическое проектирование полетов к Венере в эпоху 2021–2028 гг. Области достижимости при посадке // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2018. № 76. С. 1–28.
- Голубев Ю.Ф., Грушевский А.В., Киселева И.П., Корянов В.В., Тучин А.Г., Тучин Д.А. Методика формирования больших наклонений орбит космических аппаратов с использованием гравитационных маневров // Докл. Академии наук. 2017. Т. 472. С. 403–406.
- Засова Л.В., Горинов Д.А., Эйсмонт Н.А., Коваленко И.Д., Аббакумов А.С., Бобер С.А. ВЕНЕРА-Д – проект автоматической станции для исследования Венеры // Вестн. НПО им. С.А. Лавочкина. 2018. Вып. 3. С. 13–17.
- Симонов А.В., Ковалева С.Д., Гордиенко Е.С., Поль В.Г., Косенкова А.В. Особенности проектирования траекторий перспективных космических аппаратов для исследования Венеры // Инженерный журнал: наука и инновации. 2021. № 10 (118). С. 7–30.
- Суханов А.А. Астродинамика. М.: Изд-во Институт космических исследований РАН, 2010. 202 с.
- Суханов А.А. Двойные облеты планеты. М.: Изд-во ИКИ РАН, 1993. 32 с.
- Эйсмонт Н.А., Засова Л.В., Симонов А.В., Коваленко И.Д., Горинов Д.А., Аббакумов А.С., Бобер С.А. Сценарий и траектория миссии “Венера-Д” // Вестн. НПО им. С.А. Лавочкина. 2018. Вып. 4. С. 11–18.
- Baskaran G., Bonthalapati A.S., Lewis J.D., Malone K.J., Ved H.M., Lyne J.E. A Survey of Mission Opportunities to Trans-Neptunian Objects – Part IV // AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conf. / Eds: Broschart S.B., Turner J.D., Howell K.C., Hoots F.R. Virginia: Am. Inst. Aeronautics and Astronautics, 2014. V. 64. 296 p.
- Belton M.J.S., Chapman C.R., Klaasen K.P., Harch A.P., Thomas P.C., Veverka J., McEwen A.S., Pappalardo R.T. Galileo’s encounter with 243 Ida: An overview of the imaging experiment // Icarus. 1996. V. 120. № 1. P. 1–19.
- Bolin B.T., Noll K.S., Caiazzo I., Fremling C., Binzel R.P. Keck and Gemini spectral characterization of Lucy mission fly-by target (152830) Dinkinesh // Icarus. 2023. V. 400 id. 115562.
- Carry B., Solano E., Eggl S., DeMeo F.E. Spectral properties of near-Earth and Mars-crossing asteroids using Sloan photometry // Icarus. 2016. V. 268. P. 340–354.
- DellaGiustina D., Golish D.R., Guzewich S., Moreau M., Nolan M.C., Polit A.T., Simon A.A. Osiris-APEX: A proposed OSIRIS-REx extended mission to Apophis // LPI Contrib. 2022. V. 2681. P. 2011.
- León J., Licandro J., Pinilla-Alonso N., Moskovitz N., Karenta T., Popescu M. Characterisation of the new target of the NASA Lucy mission: Asteroid 152830 Dinkinesh

- (1999 VD57) // *Astron. and Astrophys.* 2023. V. 672. id. A174.
- Eismont N.A., Zasova L.V., Simonov A.V., Kovalenko I.D., Gorinov D.A., Abbakumov A.S., Bober S.A. 2019. Venera-D mission scenario and trajectory // *Sol. Syst. Res.* 2019. V. 53. № 7. P. 578–585.
- Eismont N.A., Nazirov R.R., Fedyaev K.S., Zubko V.A., Belyaev A.A., Zasova L.V., Gorinov D.A., Simonov A.V. Resonant orbits in the problem of expanding accessible landing areas on the Venus surface // *Astron. Lett.* 2021. V. 47. № 5. P. 316–330.
- Eismont N., Kovalenko I., Nazarov V., Korotkov F., Pupkov M., Zubko V., Poghodin A., Mzhelskiy P., Mikhailov E., Ditrikh A. Orbital and attitude control of Spectr-RG observatory under technical constraints // *Space Operations.* 2022a. P. 541–558.
- Eismont N., Zubko V., Belyaev A., Fedyaev K., Zasova L., Gorinov D., Simonov A., Nazirov R. Expansion of landing areas on the Venus surface using resonant orbits in the Venera-D project // *Acta Astronaut.* 2022b. V. 197. P. 310–322.
- Garvin J.B., Getty S.A., Arney G.N., Johnson N.M., Kohler E., Schwer K.O., Sekerak M., Bartels A., Saylor R.S., Elliott V.E., and 29 co-authors. Revealing the mysteries of Venus: The DAVINCI mission // *Planet. Sci. J.* 2022. V. 3. № 5. id. 117 (17 p.).
- Glaze L.S., Wilson C.F., Zasova L.V., Nakamura M., Limaye S. Future of Venus research and exploration // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. № 5. id. 89.
- Hirabayashi M., Mimasu Y., Sakatani N., Watanabe S., Tsuda Y., Saiki T. Hayabusa2 extended mission study group. Hayabusa2 extended mission: New voyage to rendezvous with a small asteroid rotating with a short period // *Adv. Space Res.* 2021. V. 68. № 3. P. 1533–1555.
- Kikuchi S., Mimasu Y., Takei Y., Saiki T., Scheeres D.J., Hirabayashi M., Wada K., Yoshikawa M., Watanabe S.-i., Tanaka S., Tsuda Y. Preliminary design of the Hayabusa2 extended mission to the fast-rotating asteroid 1998 KY26 // *Acta Astronautica.* 2023. V. 211. P. 295–315.
- Levison H.F., Olkin C.B., Noll K.S., Marchi S., Bell III J.F., Bierhaus E., Binzel R., Bottke W., Britt D., Brown M., and 15 co-authors. Lucy mission to the Trojan asteroids. Science goals // *Planet. Sci. J.* 2021. V. 2. № 5. id. 171 (13 p.).
- Lauretta D.S., Balram-Knutson S.S., Beshore E., Boynton W.V., Drouet d'Aubigny C., DellaGiustina D.N., Sandford S.A., Enos H.L., Golish D.R., Hergenrother C.W., Howell E.S., and 38 co-authors. OSIRIS-REx: sample return from asteroid (101955) Bennu // *Space Science Reviews.* 2017. V. 212. P. 925–984.
- Neugebauer M., Gloeckler G., Gosling J.T., Rees A., Skoug R., Goldstein B.E., Armstrong T.P., Combi M.R., Makinen T., McComas D.G. and 5 co-authors. Encounter of the Ulysses spacecraft with the ion tail of comet McNaught // *Astrophys. J.* 2007. V. 667. № 2. P. 1262–1266.
- Olkin C.B., Levison H.F., Vincent M., Noll K.S., Andrews J., Gray S., Good P., Marchi S., Christensen P., Reuter D., and 12 co-authors. Lucy mission to the Trojan asteroids: Instrumentation and encounter concept of operations // *Planet. Sci. J.* 2021. V. 2. № 5. id. 172 (14 p.).
- Petropoulos B. Physical parameters of the atmosphere of Venus // *Earth, Moon, and Planets.* 1988. V. 42. № 1. P. 29–40.
- Porco C.C., Baker E., Barbara J., Beurle K., Brahic A., Burns J.A., Charnoz S., Cooper N., Dawson D.D., Del Genio A.D., and 20 co-authors. Cassini imaging science: Initial results on Phoebe and Iapetus // *Science.* 2005. V. 307. № 5713. P. 1237–1242.
- Smrekar S., Dyar M., Hensley S., Helbert J., Hensley S., Nunes D., Whitten J. VERITAS (Venus Emissivity, Radio Science, In SAR, Topography And Spectroscopy): A proposed discovery mission // *AAS/Division for Planet. Sci. Meeting Abstracts.* 2016. V. 48. P. 207–216.
- Stern S.A., Weaver H.A., Spencer J.R., Elliott H.A., and the New Horizons Team. The New Horizons Kuiper Belt extended mission // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. № 4. P. 379–394.
- Sukhanov A.A. Trajectory design for the mission 'Hannes' // *Acta Astronaut.* 1996. V. 39 P. 25–34.
- Veverka J., Thomas P., Harch A., Clark B., Bell III J.F., Carcich B., Joseph J., Murchie S., Izenberg N., and 5 co-authors. NEAR encounter with asteroid 253 Mathilde: Overview // *Icarus.* 1999. V. 140. № 1. P. 3–16.
- Veverka J., Thomas P., Harch A., Clark B., Bell J.F., Carcich B., Joseph J., Chapman C., Merline W., Robinson M., and 6 co-authors. NEAR's flyby of 253 Mathilde: Images of a C asteroid // *Science.* 1997. V. 278. № 5346. P. 2109–2114.
- Vorontsov V.A., Lokhmatova, M. G., Martynov, M. B., Pichkhadze, K. M., Simonov, A. V., Khartov, V. V., Zasova L.V. and 2 co-authors. Prospective spacecraft for Venus research: Venera-D design // *Sol Syst. Res.* 2011. V. 45. P. 710–714.
- Straume-Lindner, A. G., Schulte, M., Voirin, T., Pacros, A., Widemann, T., Bruzzone, L., and the EnVision Team. Science objective and status of the EnVision Mission to Venus // *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts.* 2023. V. 55. № 8, P. 507–05.
- Warner B.D., Harris A.W., Pravec P. The asteroid lightcurve database // *Icarus.* 2009. V. 202. № 1. P. 134–146.
- Zasova L.V., Gorinov D.A., Eismont N.A., Kovalenko I.D., Abbakumov A.S., Bober S.A. Venera-D: A design of an automatic space station for Venus exploration // *Sol. Syst. Res.* 2019. V. 53. № 7. P. 506–510.
- Zubko V.A. Possible flight trajectories to Venus with landing in a given region // *Astron. Lett.* 2022. V. 48. № 12. P. 761–774.
- Zubko V. Analysis of prospective flight schemes to Venus accompanied by an asteroid flyby // *Acta Astronaut.* 2023a. V. 210. P. 56–70.
- Zubko V.A., Eismont N.A., Fedyaev K.S., Belyaev A.A. A method for constructing an interplanetary trajectory of a spacecraft to Venus using resonant orbits to ensure landing in the desired region // *Adv. Space Res.* 2023b. V. 72. № 2. P. 161–179.

УДК 521.1; 523.3

ОСОБЕННОСТИ МИГРАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА В СИСТЕМЕ ЗЕМЛЯ–ЛУНА

© 2024 г. Т. В. Сальникова*, Е. И. Кугушев**

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: tatiana.salnikova@gmail.com

**e-mail: kugushevei@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.11.2023 г.

После доработки 05.12.2023 г.

Принята к публикации 17.01.2024 г.

Рассматривается возможность захвата и выброса космических масс в рамках плоской гиперболической задачи трех тел, а также в рамках плоской параболической задачи трех тел. Предлагается математическая модель, которая позволяет объяснить образование несферических спутников планет, подобных марсианским спутникам Фобосу и Деймосу, за счет перехвата или обмена космическими массами, а также позволяет понять, почему отсутствует космический мусор внеземного происхождения в околоземном и окололунном пространстве. Изучается эффект накопления искусственного мусора в системе Земля–Луна. Настоящее исследование базируется на численном и аналитическом анализе некоторых схем классификации Шази финальных движений в задаче трех тел. Рассмотрена краевая задача трех тел, показана возможность существования решения этой задачи и получены условия финальной гиперболо-эллиптичности движения. Аналитические результаты проиллюстрированы численным моделированием.

Ключевые слова: задача трех тел, классификация Шази, гиперболо-эллиптическое движение, области Хилла, космический мусор

DOI: 10.31857/S0320930X24030088, **EDN:** NDXAWN

ВВЕДЕНИЕ

Задача трех тел представляет значительный интерес для современной астронавтики не только в теоретическом, но и в прикладном аспекте (Маров, Ипатов, 2023). Важным вопросом является изучение эволюции небесных тел и их финальных движений. Классификация финальных движений задачи трех тел по Шази (Chazy, 1929) имела симметрию в прошлом и будущем и не допускала возможность захвата и обмена космическими массами. Численные примеры, появившиеся позднее у ряда авторов, утверждали возможность обмена и захвата в асимметричном случае. Наконец, В.М. Алексеев качественными методами доказал, что существует открытое множество начальных условий положительной меры, приводящих к обмену для систем как с положительной, так и с отрицательной полной энергией: гиперболо-эллиптические движения имеют разные тела, уходящие на бесконечность в прошлом и в будущем. Впервые к проблеме финальных движений В.М. Алексеев обратился в 1954 г., когда А.Н. Колмогоров предложил ему в качестве темы курсовой работы рассмотреть вопрос об

обмене в задаче трех тел (Алексеев, 1999; 2017). О ненулевой вероятности обмена в общем случае следует говорить отдельно в конкретных реальных ситуациях.

В настоящем исследовании рассмотрим краевую задачу трех тел и существование решения этой задачи, а также обсудим достаточные условия финальной гиперболо-эллиптичности движения. Пусть два массивных тела движутся по своим гиперболическим или параболическим траекториям под действием взаимного гравитационного притяжения. Спутник в прошлом вращался вокруг первого тела по эллиптической орбите. В момент наибольшего сближения массивных тел он выходит на эллиптическую орбиту вокруг второго тела. Это возможно, если скорость спутника относительно второго тела в момент наибольшего сближения окажется меньше параболической, что реализуется, если скорость спутника противоположна скорости первого тела. Мы называем такую схему обмена перехватом. Требуется показать, что существует достаточно много возможных начальных условий, при которых происходит перехват как в ограниченной, так и в неограниченной постановке задачи.

С помощью принципа наименьшего действия в форме Гамильтона для регулярного случая — гладкой ограниченной функции потенциальной энергии, и в форме Якоби для сингулярных потенциалов доказывается существование движения, при котором точки системы из любого заданного начального положения при соответствующем выборе начальной скорости перейдут в любое заданное конечное положение. Для финальной гиперβολо-эллиптичности в задаче трех тел достаточные условия устойчивости финальной конфигурации позволят уверенно утверждать, что если в некоторый момент времени абсолютные величины изменения оскулирующих параметров орбиты наименьшего тела, которое изначально двигалось по эллиптической орбите вокруг первого тела, удовлетворяют приведенным условиям, то оно останется на эллиптической орбите относительно второго тела. То есть эллиптическое движение спутника относительно второго тела не разрушается при отлете первого по гиперболической траектории.

Численное моделирование начинается с ограниченной задачи трех тел с нулевой массой спутника. При переходе к неограниченной задаче трех тел с учетом гравитационного притяжения спутника достаточно малой массы эффект перехвата сохраняется. Параболо-эллиптический случай является предельным случаем гиперβολо-эллиптического.

Статья организована следующим образом. В разделе “Мобильность в задаче N тел” доказывается существование движения, при котором точки системы из любого заданного начального положения при соответствующем выборе начальной скорости перейдут в любое заданное конечное положение. В разделе “Достаточные условия гиперβολо-эллиптичности” приводится соответствующая теорема. В разделе “Численный анализ” приводятся результаты моделирования.

МОБИЛЬНОСТЬ В ЗАДАЧЕ N ТЕЛ

Пусть есть N материальных точек, на которые действуют потенциальные силы. Докажем существование движения, при котором точки системы из любого заданного начального положения перейдут в любое заданное конечное положение при соответствующем выборе начальных скоростей точек. Первый случай — регулярный, в котором потенциальная энергия системы является гладкой ограниченной функцией. Второй случай — классическое ньютоновское гравитационное взаимодействие. В этой постановке запрещены сингулярные движения, при которых в какие-то моменты времени положения разных точек системы совпадают.

Введем радиусы-векторы системы материальных точек $\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N$, обозначим $n = 3N$, $x = (\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N) \in R^n$, $L(x, \dot{x}) = T(\dot{x}) - V(x)$ — функция Лагранжа, где T — кинетическая энергия, а для потенциальной энергии рассмотрим два случая:

$V(x) \in C^1(R^n)$, $V(x) < 0$, $x \in R^n$ — регулярный потенциал — первый случай;

$V = -\sum_{j < i} \gamma \frac{m_i m_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|}$ — гравитационный потенциал (сингулярный) — второй случай.

Теорема 1

Пусть рассматривается система с регулярным потенциалом $V(x) \in C^1(R^n)$, $V(x) < 0$, $x \in R^n$, заданы некоторые положения x_1 и x_2 и интервал времени $0 \leq t \leq a$ ($a > 0$).

Тогда для некоторых начальных скоростей $\dot{x}(0) = \dot{x}_1$ существует решение $x(t)$, такое, что $x(0) = x_1$ и $x(a) = x_2$.

Доказательство использует принцип наименьшего действия в форме Гамильтона, традиционно показывается, что на множестве околных траекторий функционал действие по Гамильтону достигает минимума на отрезке $[0, a]$ в классе гладких функций и для минимизирующей траектории выполняются уравнения Лагранжа.

Теорема 2

Назовем множество точек конфигурационного пространства, для которых совпадают радиусы-векторы и не определена потенциальная энергия, сингулярным множеством. Сингулярное множество есть объединение конечного числа $(n-3)$ -мерных гиперплоскостей в пространстве R^n .

Для произвольно выбранных начальной и конечной точек x_1 и x_2 почти всегда отрезок $D = \{x : x = x_1 + \lambda(x_2 - x_1), 0 \leq \lambda \leq 1\}$ не будет содержать сингулярных точек. В этом случае возможны движения, переводящие систему из начального положения x_1 в конечное положение x_2 .

Доказательство

1. Линейной заменой координат $\sqrt{\frac{m_i}{2}} \mathbf{r}_i \rightarrow \mathbf{r}_i$, $i = 1, \dots, n$ перейдем к системе, в которой кинетическая энергия имеет вид $T(\dot{x}) = \|\dot{x}\|^2 = \dot{x}_1^2 + \dots + \dot{x}_n^2$. Зафиксируем константу h интеграла энергии. Пусть $x(\tau)$, $\tau_1 \leq \tau \leq \tau_2$ — некая кривая γ в кон-

фигурационном пространстве, лежащая в области возможности движения $\{h - V(x) > 0\}$. Определим для нее функционал действие по Якоби

$$J[x(\tau)] = \int_{\tau_1}^{\tau_2} 2\sqrt{(h - V(x))\Sigma \dot{x}_i^2} d\tau.$$

В соответствии с принципом наименьшего действия в форме Якоби кривая γ является траекторией движения с энергией h тогда и только тогда, когда она является экстремалью функционала действие. Пусть $h > 0$. Введем еще один функционал

$$\tilde{J}[x(\tau)] = h^{-1/2} J[x(\tau)] = \int_{\tau_1}^{\tau_2} 2\sqrt{(1 - h^{-1}V(x))\Sigma \dot{x}_i^2} d\tau -$$

это действие по Якоби для системы с потенциальной энергией $\tilde{V}(x) = h^{-1}V(x)$ на единичном уровне полной механической энергии. Очевидно, что экстремали обоих потенциалов совпадают и верно следующее утверждение:

кривая $x(\tau), \tau_1 \leq \tau \leq \tau_2$ является траекторией движения системы с потенциальной энергией $V(x)$ на уровне полной энергии h тогда и только тогда, когда она является траекторией движения системы с потенциальной энергией $\tilde{V}(x) = h^{-1}V(x)$ на единичном уровне полной механической энергии. Обычно этот факт формулируется так, что при больших энергиях траектории системы выпрямляются (Fejoz и др., 2021).

2. Обозначим $\varepsilon = h^{-1}$ и рассмотрим движение системы с потенциалом $\tilde{V}(x) = \varepsilon V(x)$ при малых значениях ε .

Пусть $\varepsilon = 0$, тогда $\tilde{V}(x) = 0$ и движение происходит по инерции. Введем единичный вектор

$$\mathbf{e} = \frac{x_2 - x_1}{\|x_2 - x_1\|}.$$

Так как отрезок D не содержит сингулярных точек, то $x_0(t) = x_1 + \mathbf{e}t, 0 \leq t \leq t_2 = \|x_2 - x_1\|$ — это движение по инерции из точки x_1 в точку x_2 с единичной энергией и скоростью $\dot{x}_0 = \mathbf{e}$.

Пусть теперь $\varepsilon > 0$ и мало. Рассмотрим движение $x(t, \varepsilon, f)$ из точки x_1 с некоторой начальной скоростью f на интервале времени $0 \leq t \leq \|x_2 - x_1\|/\|f\|$.

Обозначим через $g(\varepsilon, f)$ положение системы в момент времени t_2 .

В силу теоремы о непрерывной зависимости решений обыкновенного дифференциального уравнения от начальных условий и параметров при малых ε и малых отличиях f от $\mathbf{e}$ траекто-

рия движения $x(t, \varepsilon, f)$ будет мало отличаться от $x_0(t)$. Поэтому на траектории движения $x(t, \varepsilon, f)$ не будет сингулярных точек. При этом функция $g(\varepsilon, f) = x(t_2, \varepsilon, f)$ будет гладкой.

3. Поскольку при $\varepsilon = 0$ движение происходит по инерции, то $x(t, 0, f) = x_1 + tf$ и $g(0, f) = x_1 + t_2 f$. Следовательно,

$$\left. \frac{\partial g}{\partial f} \right|_{\varepsilon=0} = t_2 E, \quad (1)$$

где E — единичная матрица $n \times n$.

Рассмотрим уравнение

$$\Phi(\varepsilon, f) = g(\varepsilon, f) - x_2 = 0.$$

При $\varepsilon = 0$ оно имеет решение $f = \mathbf{e}$.

Поскольку выполнено (1), то по теореме о неявной функции существует гладкая функция $f(\varepsilon)$, такая, что $f(0) = \mathbf{e}$, и движение системы, начавшись в момент времени $t = 0$ в точке x_1 со скоростью $f(\varepsilon)$, в момент времени $t = t_2$ окажется в положении x_2 . При этом полная механическая энергия системы равна

$$\tilde{h} = f(\varepsilon)^2 - \varepsilon V(x_1).$$

Тогда движение системы с потенциальной энергией $V^*(x) = \tilde{h}^{-1}\varepsilon V(x)$, начавшись в момент $t = 0$ в точке x_1 со скоростью $\tilde{h}^{-1}f(\varepsilon)$, в момент времени $t = \tilde{h}^{-1/2}t_2$ окажется в положении x_2 . При этом полная механическая энергия системы равна единице. Теорема доказана.

ДОСТАТОЧНЫЕ УСЛОВИЯ ГИПЕРБОЛО-ЭЛЛИПТИЧНОСТИ

Пусть материальные точки с массами m_i , ($i = 1, 2, 3$) движутся под действием взаимного гравитационного притяжения. Через $\mathbf{r}_i$ обозначим радиусы-векторы точек в системе Кенига, $\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i$, сила, с которой точка j действует на точку i :

$$\mathbf{F}_{ij} = -\gamma \frac{m_i m_j \mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}^3},$$

где γ — гравитационная постоянная. Считаем, что полная механическая энергия h положительна. Нас интересуют некоторые начальные движения системы, для которых далее при $t \rightarrow +\infty$ расстояние между точками 1 и 2 неограниченно возрастает, а точки 1 и 3 не сталкиваются и расстояние между ними ограничено. Введем неинерциальную систему координат K_{13} , которая движется поступательно, но ее начало расположено в центре масс системы точек 1 и 3. Считаем, что в этой системе координат точек 1 и 3 движутся, как в зада-

че двух тел, а неинерциальность системы координат и гравитационное притяжение к точке 2 будем рассматривать как возмущения. Задача двух тел сводится к возмущенной задаче Кеплера для точки 3:

$$m_3 \ddot{\mathbf{r}} = -\gamma \frac{m_0 m_3 \mathbf{r}}{r^3} + \mathbf{F},$$

$$\mathbf{F} = \gamma \frac{m_1 m_2 m_3}{m_1 + m_3} \left(\frac{\mathbf{r}_{12}}{r_{12}^3} - \frac{\mathbf{r}_{32}}{r_{32}^3} \right), \quad m_0 = \frac{m_1^3}{(m_1 + m_3)^2}.$$

Пусть в некоторый момент времени $t = 0$ положения и скорости точек системы известны – в системе K_{13} оскулирующая орбита точки 3 – эллиптическая. Сохранится ли эллиптичность орбиты в этой системе при $t \rightarrow +\infty$?

Теорема 3

Пусть в момент времени $t = 0$ известны положения $\mathbf{r}_i$ и скорости $\dot{\mathbf{r}}_i$ всех трех материальных точек в системе Кенига. По этим данным определены параметры оскулирующей орбиты точки 3 в системе K_{13} – эксцентриситет и фокальный параметр e_0, p_0 , а также определены полная механическая энергия h в системе Кенига трех точек, центральный момент инерции $I(0)$ и скорость его изменения $\dot{I}(0)$ в момент $t = 0$

$$I(0) = \sum_{i=1}^3 m_i r_i^2, \quad \dot{I}(0) = 2 \sum_{i=1}^3 m_i r_i \dot{r}_i.$$

Пусть выполнены неравенства

$$e_0 < 1, \quad p_0 > 0, \quad h > 0, \quad I(0) > 0, \quad \dot{I}(0) > 0.$$

Положим

$$c_e = \frac{1 + e_0}{2}, \quad c_p^- = \frac{p_0}{2}, \quad c_p^+ = 4p_0, \quad m = m_1 + m_2 + m_3.$$

Тогда для финальной гиперболо-эллиптичности движения достаточно выполнения неравенств

$$\Delta e < \frac{1 - e_0}{2}, \quad \Delta p < \frac{p_0}{2}.$$

Здесь

$$\Delta e \leq \frac{32 p_0^{3/2}}{(1 - e_0) \sqrt{\mu}} G_0, \quad \Delta p = \frac{2 \sqrt{p_0}}{\sqrt{\mu}} \left(\frac{4 - 2e_0}{1 - e_0} \right) G_0;$$

$$G_0 = \frac{2}{\sqrt{-D}} \left(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{b}{\sqrt{-D}} \right) \text{ при } D < 0;$$

$$G_0 = \frac{2}{\sqrt{D}} \left(\ln \frac{b + \sqrt{D}}{b - \sqrt{D}} \right) \text{ при } D > 0;$$

$$G_0 = \frac{2}{b} \text{ при } D = 0 \quad (D = b^2 - 4ac);$$

$$a = \left(\gamma \frac{2m_1 m_2 m_3}{m_1 + m_3} \right)^{-1} \left(\frac{3}{2m} 2h \right),$$

$$b = \left(\gamma \frac{2m_1 m_2 m_3}{m_1 + m_3} \right)^{-1} \left(\frac{3}{2m} \dot{I}(0) \right);$$

$$c = \left(\gamma \frac{2m_1 m_2 m_3}{m_1 + m_3} \right)^{-1} \left(\frac{3I(0)}{2m} - \frac{(m_1 + m_3)^2}{m_1^2} \frac{c_p^{+2}}{(1 - c_e)^2} \right).$$

Доказательство приведено в статье (Salnikova и др., 2024).

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ

В качестве приложения рассмотрим два аспекта финальных движений в задаче трех тел в рамках нашей модели: это возможное объяснение образования несферических спутников в планетных системах, типа спутников Марса Фобоса и Деймоса, а также анализ наличия или отсутствия космического мусора искусственного и естественного происхождения в системе Земля–Луна.

Образование несферических спутников

В рамках плоской ограниченной задачи трех тел рассмотрим случай парабола-эллиптического движения. Пусть два массивных тела с массами m_1 и m_2 сближаются по параболическим траекториям, третье тело пренебрежимо малой массы m_3 движется по эллиптической орбите относительно тела 2, его траектория в абсолютном пространстве до перехвата показана на рис. 1, финальное движение тела 3 после перехвата показано на рис. 2. В работе (Salnikova и др., 2023) показано, что имеется достаточно много начальных условий в системе, когда перехват наблюдается. Например,

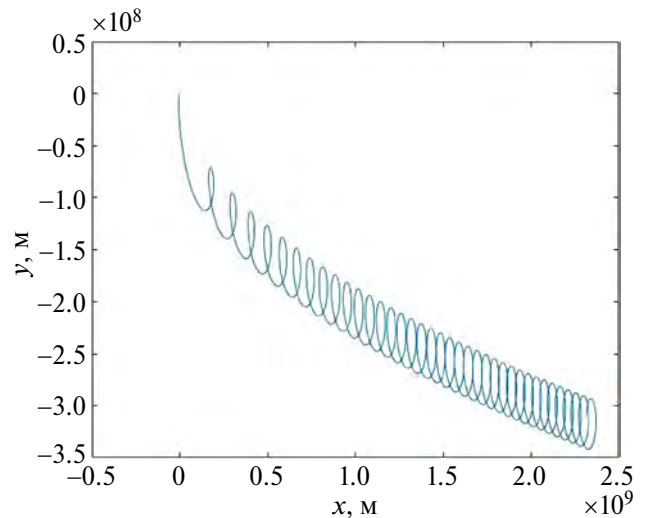


Рис. 1. Траектория тела 3 до перехвата.

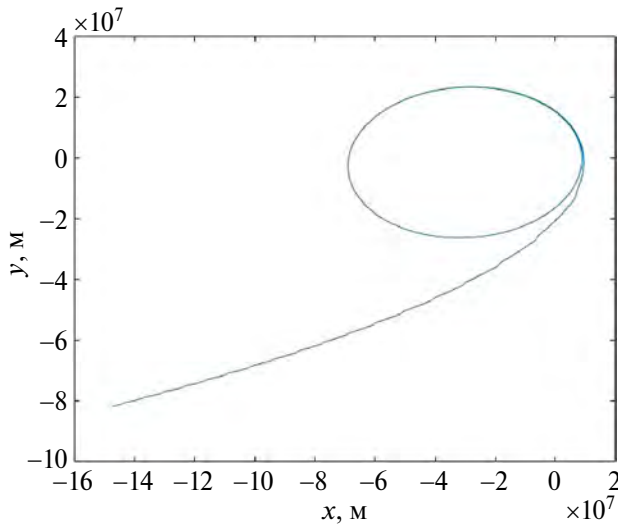


Рис. 2. Финальное движение тела 3 относительно тела 1.

численное моделирование движения 500 не взаимодействующих между собой одинаковых частиц, первоначально равномерно распределенных по круговой орбите относительно тела 2, показало, что около 40% из них после момента наибольшего сближения по параболическим траекториям массивных тел переходят на эллиптические орбиты в окрестности тела 1. Из оставшихся частиц некоторые продолжают двигаться в окрестности тела 2, а остальные улетают на бесконечное расстояние от каждого массивного тела. Для гиперболических траекторий двух главных тел перехват имеет место, однако процент перехвата существенно уменьшается с ростом величины гиперболической скорости, а для скоростей, превышающих величину параболической скорости более чем в полтора раза, перехват не происходит совсем. При переходе к неограниченной постановке при условии достаточной малости третьей массы эффект перехвата сохраняется.

Однако численные эксперименты для различных отношений масс главных тел, различных гиперболических и параболических орбит главных тел, а также для различных начальных эллиптических орбит спутников одного из главных тел показали, что вероятность перехвата спутника не превосходит трех процентов.

Тем не менее рассматриваемая модель обосновывает гипотезу образования несферических спутников планет в результате перехвата, что обсуждается в многочисленных работах, среди которых (Nesvorný и др., 2007).

ЭВОЛЮЦИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА В СИСТЕМЕ ЗЕМЛЯ–ЛУНА

Пусть космическое тело в окружении движущихся по эллиптическим траекториям частиц приближается к Земле по параболической относительно нее либо гиперболической траекториям. Вероятность того, что частицы перейдут в окрестность Земли чрезвычайно мала. Если масса Земли в 1000 раз больше массы космического тела, то из 1000 спутников только 20 были перехвачены Землей. Процент перехвата увеличивается, когда масса Земли больше массы тела в 100 раз. Но появление такого объекта с гиперболической скоростью вблизи Земли крайне маловероятно. Так что в рамках предлагаемой модели накопление космического мусора внеземного происхождения в окрестности Земли не имеет места, как и обратная ситуация — удаление находящегося на орбите Земли искусственного мусора, накопившегося с начала космической эры, посредством перехвата пролетающим с гиперболической скоростью космическим телом.

Теперь рассмотрим возможность вылета искусственного космического мусора, находящегося на круговых или эллиптических орбитах

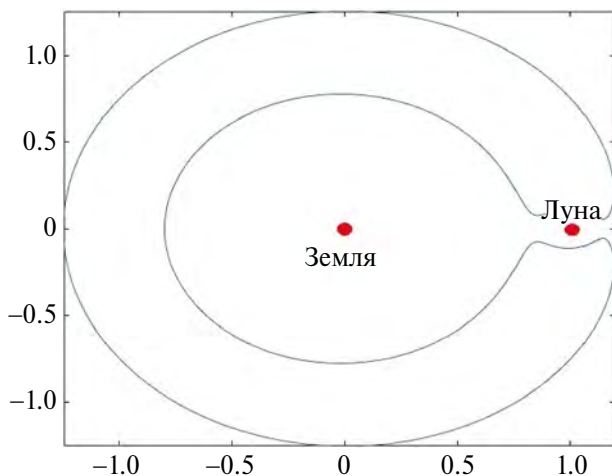


Рис. 3. Разомкнутая область Хилла.

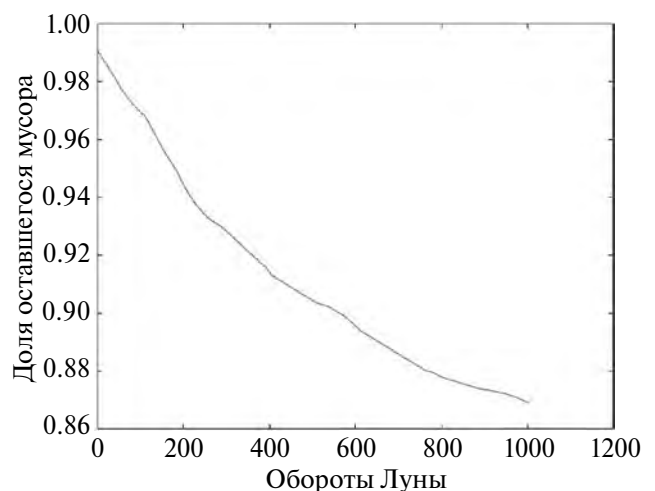


Рис. 4. Околоземный мусор, радиус орбиты 238700 км.

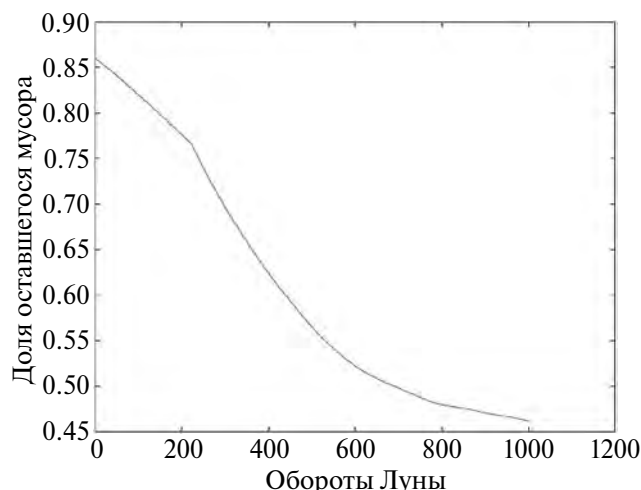


Рис. 5. Околоземный мусор, радиус орбиты 269500 км.

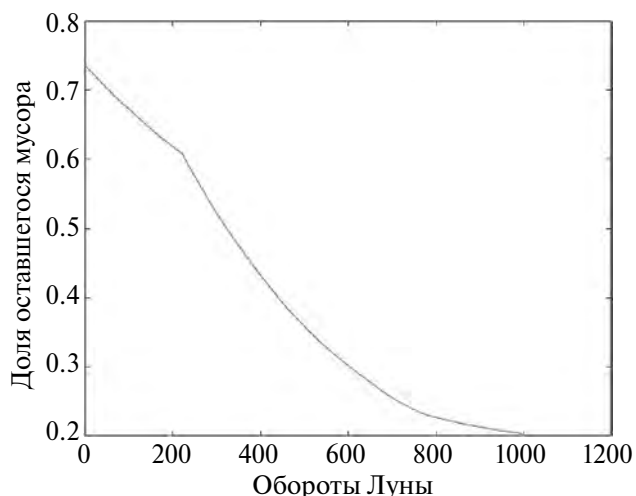


Рис. 6. Околоземный мусор, радиус орбиты 308000 км.

относительно Земли, принимая во внимание возмущение Луны, масса которой в 81 раз меньше массы Земли. Финальная гиперболо-эллипτικότητα будет заключаться в том, что частицы мусора получают относительную гиперболическую скорость. Для этого области Хилла возможного движения частицы должны быть не замкнуты (рис. 3).

Если изначально радиус орбиты частицы на вращающейся плоскости в плоской ограниченной круговой задаче трех тел был мал, то область возможного движения замкнута и вылет невозможен. При увеличении радиуса орбиты граница области размыкается и частица получает возможность вылета. Для Земли это происходит для радиусов, превосходящих 88500 км. Однако вылет наблюдается только при радиусах орбит $r \geq 238700$ км, или 0.62 расстояния между Землей и Луной. С течением времени уменьшается число частиц на соответствующей орбите Земли. На рис. 4, 5, 6 показано, что в течение 1000 оборотов Луны доля вылетевших частиц увеличивается с увеличением радиуса: для радиуса орбиты $r = 238700$ км доля примерно 0.15; для радиуса орбиты $r = 269500$ км доля примерно 0.54; для радиуса орбиты $r = 308000$ км доля примерно 0.8.

В численных экспериментах, если скорость частицы вследствие влияния Луны превысила величину параболической скорости, считалось, что частица вылетела из окрестности Земли. Для уверенности, что в дальнейшем частица не вернется, необходимо проверять условия теоремы 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрен вопрос эволюции и возможности выброса космического околоземного мусора из пространства системы

Земля—Луна либо при пролете внешних астероидных тел в околоземном пространстве, либо под действием возмущения Луны.

Доказанная в разделе “Мобильность в задаче N тел” теорема о мобильности в задаче N тел обосновывает возможность реализации предлагаемых типов движений.

Возможный способ устранения околоземного мусора — это вывод мусора на достаточно высокие орбиты. Под влиянием Луны мусор с большой вероятностью в течение короткого промежутка времени покинет систему Земля—Луна. С использованием свойств областей Хилла проведен численный анализ характера такой эволюции. Показано, что до высот орбит, составляющих 0.62 радиуса орбиты Луны, эволюция облака частиц не приводит к их выбросу за пределы системы Земля—Луна. На больших радиусах орбит падение количества остающихся в системе частиц имеет экспоненциальный характер.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В. М. Лекции по небесной механике. Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 1999. 160 с.
- Алексеев В. М. Избранные труды. М.: МЦНМО, 2017. 352 с.
- Маров М. Я., Инамов С. И. Процессы миграции в Солнечной системе и их роль в эволюции Земли и планет // Успехи физич. наук. 2023. Т. 193. № 1. С. 2—32.
- Chazy J. Sur l'allure finale du mouvement dans le problème des trois corps // J. Math. Pures et Appl.. 1929. V. 8. P. 353—380.

- Fejoz J., Knauf A., Montgomery R.* Classical n-body scattering with long-range potentials // *Nonlinearity*. 2021. V. 34. № 11. P. 8017–8054.
- Nesvorny D., Vokrouhlicky D., Morbidelli A.* Capture of irregular satellites during planetary encounters // *Astrophys. J.* 2007. V. 133. № 5. P. 1962–1976.
- Salnikova T., Kugushev E., Pestrikov A.* Possible appearing of the asteroid origin celestial bodies in near-Earth orbits // *Acta Astronautica*. 2023. V. 204. P. 912–919.
- Salnikova T., Kugushev E., Pestrikov A.* Cosmic masses escape from the vicinity of a massive body under the influence of external gravitational perturbation // *Acta Astronautica*. 2024. V. 214. P. 46–52.

УДК 523.44

GAIA DATA RELEASE 3: РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ГРУПП АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ

© 2024 г. М. П. Щербина^{a, b, *}, Д. А. Ковалёва^a, Б. М. Шустов^a

^a Институт астрономии РАН (ИНАСАН), Москва, Россия

^b МГУ им. М.В. Ломоносова, Астрономический ин-т им. П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ), Москва, Россия

*e-mail: mpshcherbina@inasan.ru

Поступила в редакцию 23.11.2023 г.

После доработки 19.12.2023 г.

Принята к печати 18.01.2024 г.

На основе данных третьего выпуска каталога КА Gaia, содержащих спектры отражения астероидов, были проведены исследования астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ). Спектры отражения около 100 представителей групп Атона, Аполлона и Амура были использованы для определения их спектрального класса. Для 47 астероидов такая оценка была сделана впервые. Для удобства классы были сгруппированы в более широкие спектральные группы (по Толену). Распределение по спектральным группам (в среднем 60% S-группа, 20% C-группа, 20% другие) соответствует результатам, полученным ранее с использованием других данных по большей выборке объектов. Такое распределение остается похожим на то, что известно для АСЗ разных размеров. Несмотря на численное преобладание в выборке АСЗ астероидов группы S, астероиды примитивных типов (группы C) обнаруживаются и на очень малых перигелийных расстояниях, что косвенно может подтверждать массовость явления сублимационной активности астероидов.

Ключевые слова: астероиды, спектрофотометрия, химико-минеральный состав вещества, Gaia, Gaia Data Release 3, АСЗ

DOI: 10.31857/S0320930X24030098, **EDN:** NDWYQV

ВВЕДЕНИЕ

Астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ) – важный класс объектов, изучение которого важно для уточнения (прояснения) картины динамической и химической эволюции малых тел Солнечной системы. Кроме того, АСЗ могут представлять потенциальную угрозу для человечества, что делает их изучение не только научно значимым, но и практически важным. С другой стороны, в некоторой отдаленной перспективе такие объекты могут рассматриваться в качестве потенциальных источников внеземных природных ресурсов, что усиливает интерес к ним (National Research Council, 2010; Hein и др., 2018).

За последние три десятилетия прямое исследование астероидов *in situ* с помощью космических аппаратов (КА), включая доставку образцов на Землю (см., например, McMahon и др., 2018; Fujiwara и др., 2006), позволило получить детальные данные о некоторых из них. Конечно, исходный отбор этих объектов для космических миссий основывался на данных, полученных при помощи дистанционных методов, что подчеркивает весомый вклад таких исследований в успешность

космических программ. Благодаря накопленному большому объему данных наблюдений астероидов, полученному дистанционными методами, с одной стороны, мы имеем возможность оценки основных параметров конкретных астероидов в короткие сроки и с минимальными затратами, а с другой – можем применять статистические методы. Учитывая многочисленность открытых и/или вновь наблюдаемых астероидов с помощью КА (таких, как WISE, Gaia), можно отметить, что космические миссии дают существенный вклад, позволяющий применять статистические методы исследований. Естественно – сравнить результаты таких исследований, проведенных наземными и космическими средствами. Данные, полученные на КА WISE, позволили существенно уточнить распределения физических характеристик астероидов (см. Masiero и др., 2014; Mainzer и др., 2012), в том числе АСЗ (Grav и др., 2013).

Определенные надежды вызвал и проект Gaia, в котором астероидам уделено существенное внимание. Особый интерес представляют наблюдательные данные, опубликованные в недавнем релизе Gaia Data Release 3 о спектрах наблюдаемых астероидов, в том числе АСЗ.

Более десяти лет ИНАСАН совместно с ГАИШ МГУ ведут работу по спектрофотометрическим исследованиям астероидов, в том числе и сближающихся с Землей, с целью оценки спектрального класса, а значит, определения основного типа минералогии поверхностного вещества. Наблюдения проводятся в обсерватории Пик Терскол с помощью 2-метрового телескопа Zeiss на спектрометре низкого разрешения (с разрешающей силой $R \approx 100$) и в обсерватории КГО ГАИШ МГУ фотометрическими методами с помощью 2.5-метрового телескопа. Для части объектов, вошедших в данную наблюдательную программу, спектральный класс был определен впервые (см., например, Щербина и др., 2017; 2019). Имея опыт работы со спектрофотометрическими данными, полученными наземными средствами, мы решили определить спектральные классы астероидов, спектры отражения которых представлены в базе Gaia Data Release 3, а конкретно для AC3.

В данной работе в разделе “Спектральные данные по наблюдениям AC3” проведено краткое описание набора спектральных данных об астероидах (AC3), приведенных в Gaia Data Release 3, дополненных нашими результатами, полученными в предыдущих работах. В разделе “Результаты” представлены результаты краткого статистического анализа этого набора.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ AC3

Проект ESA KA Gaia, на основе наблюдений с помощью КА, запущенного в 2013 г., находится сейчас на этапе третьего релиза данных — Gaia Data Release 3 (Gaia DR3) (Gaia Collaboration, 2023).

Каталог GDR3 включает фотометрические наблюдения объектов Солнечной системы (SSO), собранные во время работы Gaia с 5 августа 2014 г. по 28 мая 2017 г. В каталоге представлены спектры отражения для 60518 объектов — пронумерованных астероидов: большинство которых находятся в Главном поясе, а также околоземных астероидов, троянцев и астероидных семейств Венгрии, Хильды (https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR3/Data_analysis/chap_cu4sso/sec_cu4sso_processingsteps/ssc_cu4sso_spectrophotometryprocessing.html). На рис. 1 представлено распределение по орбитам астероидов, спектры отражения которых были получены в ходе работы KA Gaia.

Расчет спектров отражения в GDR3. Солнечные аналоги

Используя описанные в (Bus, Binzel, 2002) методики, спектральные коэффициенты отражения астероидов мы определяли путем деления значений интенсивности отраженного излучения от астероида на каждой длине волны на среднее значение интенсивности спектров группы звезд, аналогичных Солнцу. Такие звезды-аналоги обладают физическими свойствами, схожими с солнечными (масса, металличность, температура, возраст), и их спектры напоминают солнечные. Чтобы избежать неопределенностей, связанных с неточным знанием величины покраснения, звезды с покрасневшими спектрами не используются как аналоги Солнца. Соответствующая нормировка дает значения отражательной способности астероида на данной длине волны. При наземных наблюдениях обычно выбирается одна звезда-аналог Солнца, находящаяся в непосредственной

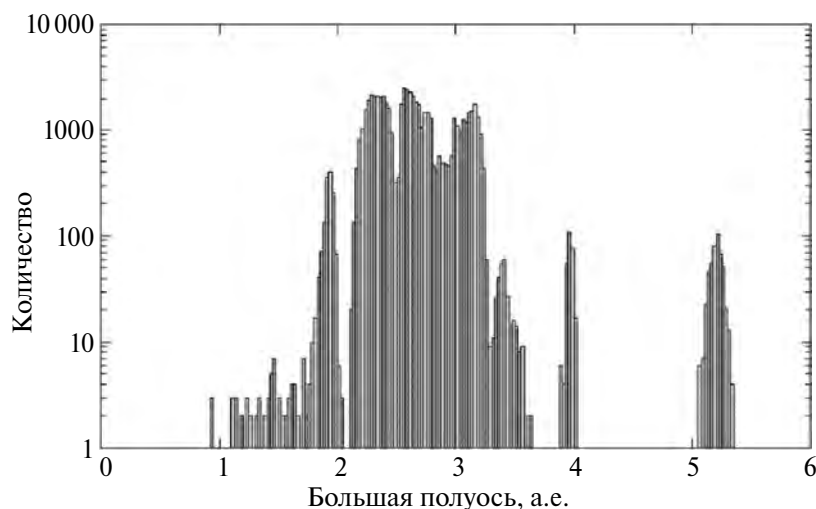


Рис. 1. Орбитальное распределение астероидов, для которых получены спектрофотометрические спектры отражения из Gaia DR3 (рисунок взят с сайта gea.esac.esa.int, полный доступ указан в тексте выше).

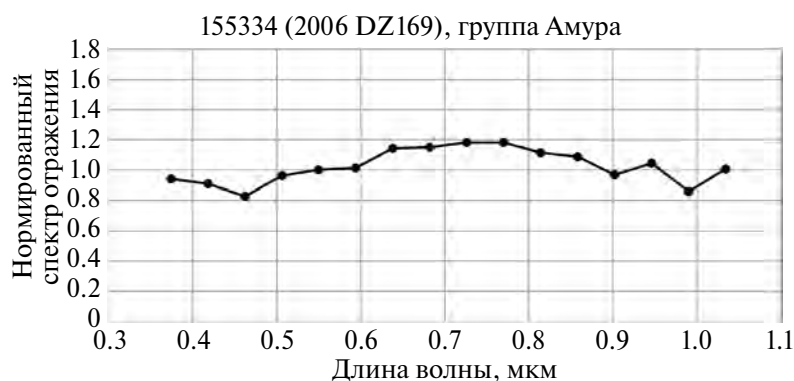


Рис. 2. Спектр отражения астероида 155334 (2006 DZ169) группы Амуре из каталога GDR3.

близости к астероиду на небесной сфере. В связи с временной стабильностью оборудования КА Gaia и тем фактом, что наблюдения проводятся за пределами земной атмосферы, было принято решение использовать метод, основанный на делении спектра каждого астероида на усредненный спектр группы достоверных солнечных аналогов. Это в принципе должно уменьшать шум, вызванный мелкими различиями между отдельными звездами-аналогами Солнца.

Полученные спектры отражения были нормированы по отражательной способности на длине волны 0.55 мкм. Затем они были разложены на 16 отдельных спектральных каналов в диапазоне от 374 до 1034 нм ($\lambda=374, 418, 462, 506, 550, 594, 638, 682, 726, 770, 814, 858, 902, 946, 990$ и 1034 нм).

Пример спектра отражения астероида показан на рис. 2 (спектр отражения астероида 155334).

Рассматриваемый набор АСЗ

В настоящем исследовании в основном рассматриваются астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ). Эти объекты имеют перигелийные дистанции, равные или меньшие 1.3 а. е. Напомним, что АСЗ разделяют на группы. Группировка АСЗ проводится по наименованиям типичных представителей: (1221) Амур, (1862) Аполлон, (2062) Атон, орбиты схематично представлены на рис. 3.

- Тип Амуре. Не заходят внутрь орбиты Земли, так как перигелийные расстояния представителей данного типа больше, чем афелийное расстояние Земли.

- Тип Аполлона. Могут проникать внутрь орбиты Земли. Большие полуоси орбит больше, чем у Земли, а перигелийные расстояния меньше, чем афелийное расстояние Земли.

- Тип Атона. Находятся в основном внутри орбиты Земли, лишь в окрестности афелиев выходят за ее пределы. Афелийные расстояния таких астероидов больше перигелийного расстояния Земли, а большие полуоси меньше, чем у Земли.

АСЗ, траектории которых позволяют им сближаться с орбитой Земли до 0.05 а. е. или менее в настоящий момент и имеющие абсолютную звездную величину не более 22.0, классифицируются как потенциально опасные астероиды (ПОА). Такое ограничение по величине соответствует размерам объектов в 140 м и более, поскольку предполагалось, что более мелкие тела не несут серьезной угрозы для Земли. Однако в последние годы, после Челябинского события (падение астероида 15 февраля в 2023 г.), опасными считаются астероиды деkamетрового и более размеров (см. Шустов, 2019).

В каталоге Gaia Data Release 3 представлены спектры отражения АСЗ для следующих групп: 4 объекта относятся к группе Атона, 49 — к группе

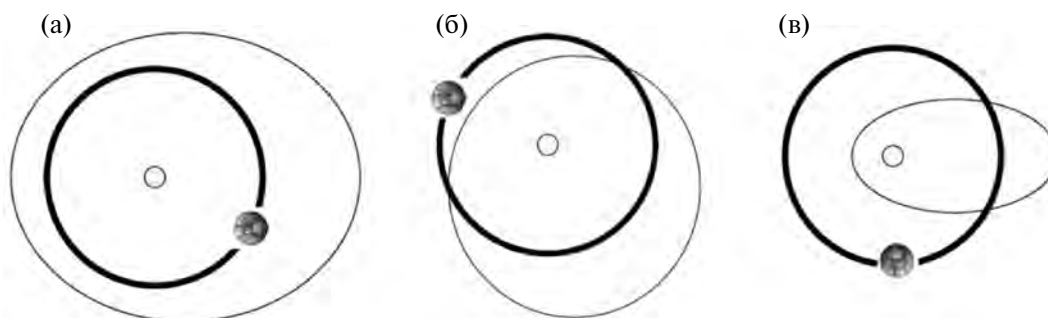


Рис. 3. Приблизительные орбиты астероидов: (а) — (1221) Амуре; (б) — (1862) Аполлона; (в) — (2062) Атона. Орбита Земли обозначена жирной линией.

Аполлона, 37 — к группе Амура, в сумме 90 астероидов. Нами для обеспечения статистической значимости выборки были включены данные о спектральных классах АСЗ, полученные в результате спектрофотометрии, проведенной в обсерватории Пик Терскол с 2013 г. Таким образом, к анализу были добавлены дополнительные объекты: 3 из группы Атона, 8 из группы Аполлона и 6 из группы Амура, всего 107 астероидов.

В рассматриваемом массиве данных, дополненном информацией, полученной в обсерватории Пик Терскол, удалось подтвердить, уточнить или впервые определить принадлежность к спектральным классам для 24 ПОА, включая 4 астероида из группы Атона, 19 из группы Аполлона и одного из группы Амура.

Определение спектрального класса астероидов

В рамках данного исследования был проведен сбор дополнительных параметров для каждого астероида, включающих геометрическое альbedo, период обращения и диаметр, которые имеют вспомогательное значение при определении спектрального класса. Спектральная классификация проводилась в соответствии с таксономиями Толена или Баса–Бинзеля (SMASSII), применяемыми к данным из базы NASA (<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/>), если таковые были доступны. Проведено сопоставление результатов с предыдущими исследованиями, выполненными методом спектрофотометрии низкого разрешения ИНАСАН в сотрудничестве с ГАИШ МГУ в обсерватории Пик Терскол с 2013 г., большинство оценок класса подтвердилось.

Опишем процедуру определения (присвоения) спектрального класса для каждого данного астероида. Эта процедура, предложенная в работе (Савелова и др., 2022), получила название “построение спектрофотометрического коридора”. Вкратце она заключается в следующем. Ис-

Таблица 1. Количество использованных для построения “спектрофотометрических коридоров” спектров отражения из базы SMASS II, принадлежность к спектральному классу взята из статьи (Bus, Binzel, 2002)

Класс	Количество спектров	Класс	Количество спектров	Класс	Количество спектров
A	16	K	23	Sr	4
B	30	L	19	T	6
C	80	R	2	V	8
Cb	13	S	176	X	79
Cg	6	Sa	10	Xc	35
Cgh	8	Sk	8	Xe	19
Ch	95	Sl	22	Xk	29
D	2	Sq	17		

пользуя работу (Bus, Binzel, 2002), из базы данных SMASS II были извлечены спектры отражения астероидов с номерами до примерно 2000 для распределения по спектральным классам. Определялись максимальные и минимальные значения отражательной способности для каждой длины волны, создавая таким образом “диапазон” возможных значений для каждого класса. Количество астероидных спектров, использованных для конструирования этого “диапазона”, представлено в табл. 1.

Оценка принадлежности к спектральным классам проводилась на основе альbedo, спектрального градиента, наличия выраженных полос поглощения и соответствия спектра астероида созданным шаблонам отражательных спектров. Например, как показано на рис. 4, астероид 155334 идеально соответствует “диапазону” отражательной способности астероидов класса S, а его геометрическое альbedo также соответствует классу S. Отметим, что сходные классы и подклассы

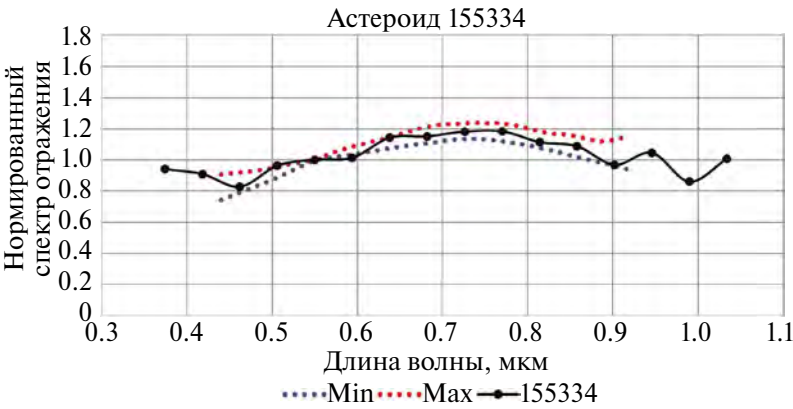


Рис. 4. Спектр отражения астероида 155334 (2006 DZ169) группы Амура из каталога GDR3.

(или промежуточные классы, обозначены двумя буквами, например, Сb является промежуточным вариантом между классом С и В) имеют схожие границы “спектрофотометрического коридора”, порой пересекаясь, схожие значения альbedo, различаясь порой только полосами поглощения. Поэтому в случае неоднозначности оценки принадлежности к тому или иному классу, астероиду присуждалось значение нескольких классов (например, С, Сb, В), в особенности в тех случаях, когда характерные для классов полосы поглощения не определялись однозначно.

Использование подобной методики создания “спектрофотометрического коридора” подробно описано в работе (Савелова и др., 2022).

Ввиду некоторой условности определения подклассов и возможности ситуации соответствия астероида сразу нескольким классам с близким минеральным составом (что вполне объяснимо, учитывая особенности данных, на довольно разреженном наборе значений в 16 точках), спектральные классы традиционно делятся на крупные группы по их характеристикам:

- С-группа охватывает классы В, С, Сb, Сg, Ch, Cgh, что также коррелирует с классами В и F в таксономии Толена и отражает спектры, схожие со спектрами углистых хондритов CI и CM.

- S-группа включает классы S, A, Q, R, K, L и промежуточные Sa, Sq, Sr, Sk, Sl, представляющие спектры, близкие к железокремнистым метеоритам, обыкновенным хондритам и ахондритам.

- X-группа состоит из классов X, M, E, P, по классификации Толена, и промежуточных Xe, Xc, Xk.

В малые группы входят редкие классы Ld, T, D, V, O.

Отдельные астероиды могут демонстрировать признаки, характерные как для высокотемпературных, так и для низкотемпературных классов (S и C соответственно), что может свидетель-

ствовать о сложном ударном прошлом этих астероидов.

Деление на более крупные группы позволяет говорить в общих чертах о преобладающей минералогии поверхностного вещества астероида, не вдаваясь в подробности (низкотемпературная минералогия представителей С-группы; высокотемпературная минералогия S-группы; преобладание металлов X-группы; достаточно эксклюзивный состав вещества, но представленный малым числом астероидов в принципе — так называемые малые группы; а также особые астероиды смешанной минералогии). Такое деление на более крупные группы традиционно при спектрофотометрических исследованиях астероидов, особенно при использовании спектров отражения низкого разрешения, и часто используется для общей оценки распределения химико-минералогических свойств астероидов, при этом позволяя обойти некоторые неточности или сомнения в определении близких классов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Отметим, что для почти половины объектов оценка спектрального класса была дана нами впервые. Была определена принадлежность к определенному спектральному классу для 22 астероидов группы Аполлона, 23 астероидов группы Амура и 5 группы Атона, итого 47 астероидов.

Результаты представлены в виде табл. 2 и диаграмм на рис. 5.

Приведенная статистика, к сожалению, построена на небольшом наборе данных. Мы все же попытались построить некоторые статистические зависимости от параметров AC3. Сведения о диаметре, значении большой полуоси и перигелийном расстоянии брались из базы данных NASA (<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/>).

Таблица 2. Распределение спектральных групп астероидов, сближающихся с Землей, по данным базы GDR3 + дополнение результатами спектрофотометрических наблюдений, полученными в обсерватории Пик Терскол

Группа астероидов AC3	Общее количество	С-группа	S-группа	X-группа	Малые группы	Смешанная минералогия
	Из них ПОА	Из них ПОА	Из них ПОА	Из них ПОА	Из них ПОА	Из них ПОА
Атона	7	3	1	1	1	1
	4	2	0	0	1	1
Аполлона	57	12	36	1	3	5
	19	4	12	0	0	3
Амура	43	8	28	0	6	1
	1	0	1	0	0	0
Общее количество	107	23	65	2	10	7
	24	6	13	0	1	4

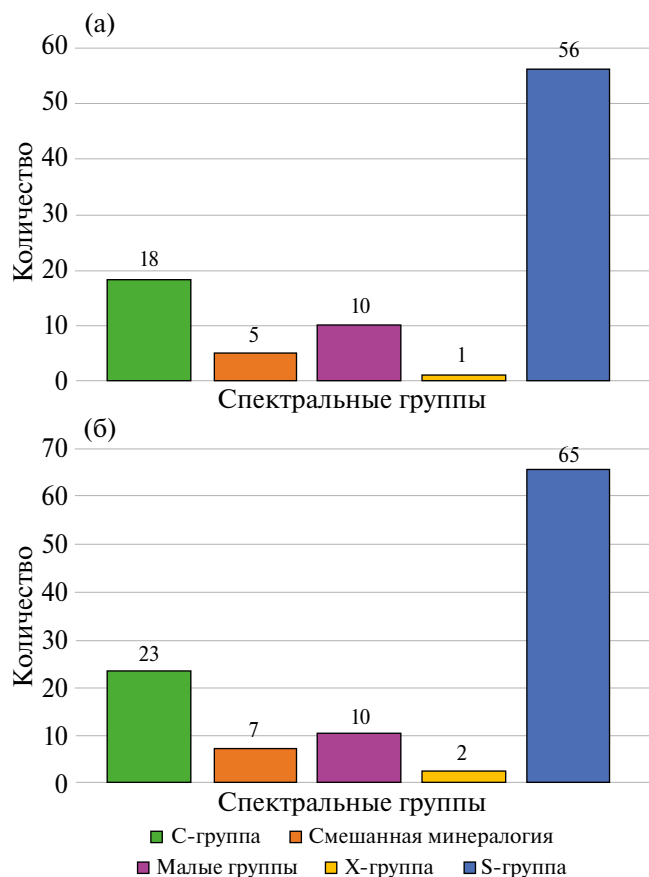


Рис. 5. Распределение спектральных групп астероидов, сближающихся с Землей: (а) – GDR3 (90 AC3); (б) – GDR3 + дополнение результатами спектрофотометрических наблюдений, полученными в обсерватории Пик Терскол (107 AC3).

На рис. 6 показано, что относительная доля S-типов остается во всем интервале размеров (50–60% от числа выборки).

Результаты хорошо согласуются с работой (Binzel и др., 2019), в которой представлена выборка из более 1000 AC3, включая марс-кроссеры. Как отмечают авторы работы, долевые распределения основных таксономических классов (60% S, 20% C, 20% другие) кажутся удивительно постоянными в интервале размеров порядка величины (от 10 км до 100 м), что составляет восемь порядков величины по массе.

На рис. 7 представлено распределение астероидов разных спектральных групп по большой полуоси и перигелийному расстоянию орбит. Интервалы значений большой полуоси рассматриваемых спектральных групп AC3 перекрываются, причем распределение астероидов C-типа охватывает почти весь интервал значений большой полуоси. Максимум же числа астероидов S-типов смещен к внутреннему краю Главного пояса, что логично, так как данный тип предполагает высокотемпературную минералогия

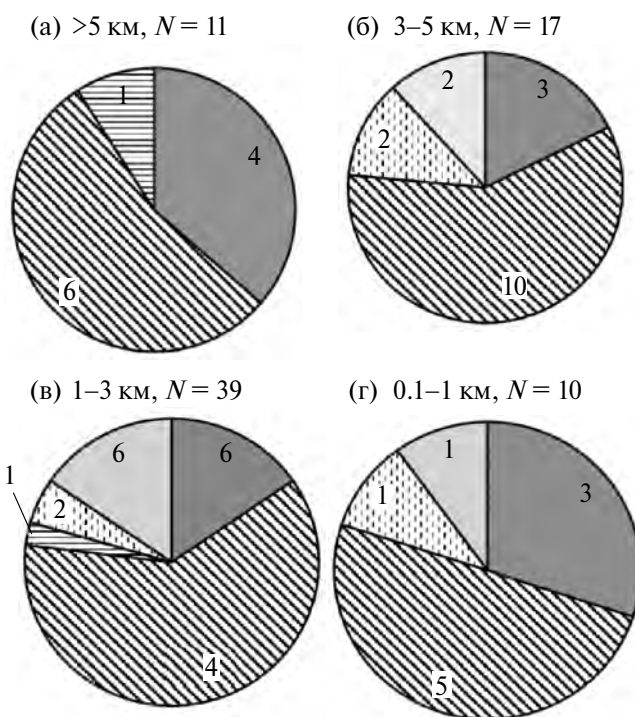


Рис. 6. Распределение AC3 из базы GDR3 + дополнения по спектральным классам астероидов различных размеров (значения диаметров взяты из базы NASA). Легенда диаграмм: косая штриховка соответствует S-группе, горизонтальная штриховка – X-группе, вертикальная прерывистая штриховка – смешанной минералогии; темная заливка – малые группы. Внутри каждого сектора указано число астероидов, вошедших в распределение: (а) – распределение по спектральным группам AC3, чей диаметр более 5 км; (б) – распределение по спектральным группам AC3, чей диаметр от 3 до 5 км; (в) – распределение по спектральным группам AC3, чей диаметр от 3 до 1 км; (г) – распределение по спектральным группам AC3, чей диаметр менее 1 км.

поверхностного вещества (см. рис. 7а). Обратим внимание на то, что, несмотря на численное преобладание в выборке AC3 астероидов группы S, астероиды примитивных типов (C-группа) имеются и на очень малых перигелийных расстояниях (см. рис. 7б). Возможно, что наличие таких астероидов в этой зоне является фактором, позволяющим объяснить явление сублимационной активности астероидов примитивных типов, что подтверждается сериями работ (см., например, Busarev и др., 2022; 2023), в которых отмечена корреляция активности астероидов с прохождением перигелийной зоны.

ВЫВОДЫ

1. В результате анализа спектров отражения астероидов, полученных с КА Gaia, были определены их спектральные классы, причем около половины – 47 объектов – получили оценку

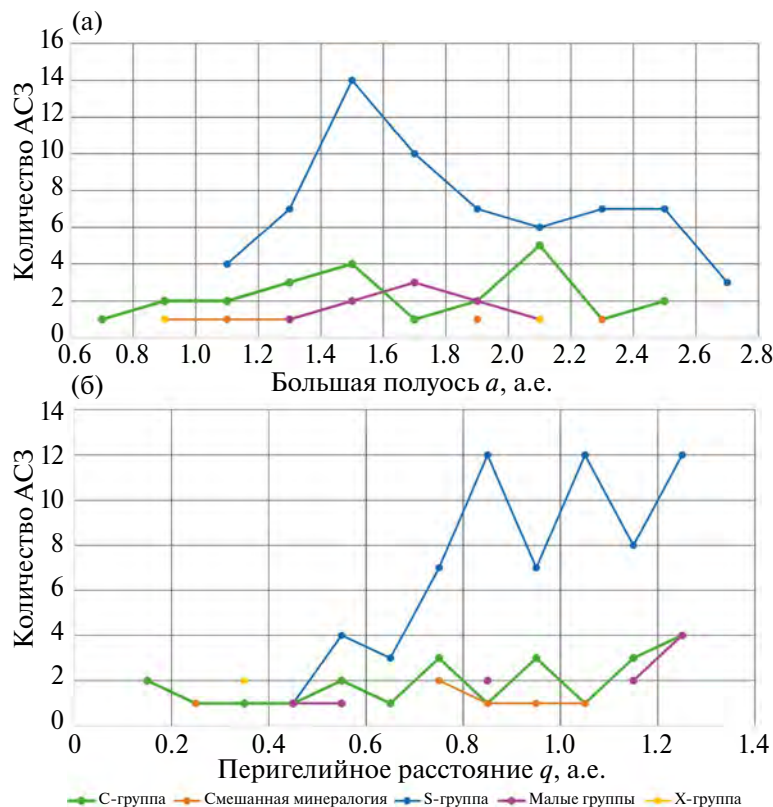


Рис. 7. Распределение количества AC3 данного спектрального класса: (а) — по большой полуоси; (б) — в зависимости от перигелийного расстояния.

спектрального класса впервые. Для астероидов, спектральные классы которых были определены ранее другими авторами (и занесены в базу JPL NASA), получено подтверждение или уточнение принадлежности к тому или иному классу.

2. Оценка принадлежности к спектральному классу делалась комбинированным методом: с помощью “спектрофотометрического коридора”, построенного по минимальным и максимальным значениям нормированной отражательной способности на каждой длине волны, по значению альбедо, спектральному градиенту, наличию выраженных полос поглощения. Использование в качестве одного из фильтров отбора “спектрофотометрического коридора” значительно ускоряет процесс оценивания спектрального класса. В случае неопределенного результата (если подходят несколько близких по своему химико-минералогическому составу классов) присуждались несколько классов.

3. Для последующего анализа все классы были разделены на несколько традиционных групп (С-группа, S-группа, X-группа, малые группы и группа смешанной минералогии). Такое деление позволяет делать общий анализ распределения преобладающего типа минералогии в данном случае астероидов, сближающихся с Землёй, не заостряя внимание на более тонких

различиях внутри каждой группы, а также избегая спорных моментов принадлежности к схожим классам.

4. Статистика распределения спектральных групп данной выборки астероидов совпадает с результатами наземных наблюдений с большим количеством объектов (Binzel и др., 2019), а именно 60% — представители S-группы, 20% — С-группы, 20% — других групп.

5. Подобная статистика примерно сохраняется и при рассмотрении в определенных интервалах диаметров. Подобную закономерность также отмечали авторы работы (Binzel и др., 2019).

6. При анализе распределения спектральных групп по значениям большой полуоси и перигелийному расстоянию орбит астероидов отмечаем, что представители С-группы охватывают большой диапазон значений большой полуоси, а также присутствуют на достаточно малых перигелийных расстояниях. Косвенно это может служить подтверждением гипотезы, объясняющей сублимационно-пылевую активность астероидов примитивных типов (С-группы) кометоподобным механизмом.

Авторы (Щербина М.П., Шустов Б.М.) выражают благодарность Российскому научному фонду (грант № 22–12–00115) за поддержку этой работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Савелова А.А., Бусарев В.В., Щербина М.П., Барабанов С.И. Использование шаблонов спектральных типов астероидов для уточнения минералогии этих тел и обнаружения признаков сублимационно-пылевой и солнечной активности // Научн. труды Института астрономии РАН. 2022. Т. 7. С. 143–148.
- Шустов Б.М. О роли науки в изучении и парировании космических угроз // Вестн. Российск. акад. наук. 2019. Т. 89. № 8. С. 777–799.
- Щербина М.П., Бусарев В.В., Барабанов С.И. Спектрофотометрия астероидов в 2016 г. и интерпретация их спектров отражения // Экологич. вестн. научн. центров Черноморского экономического сотрудничества (ЧЭС). 2017. Т. 2. № 4. С. 148–156.
- Щербина М.П., Бусарев В.В., Барабанов С.И. Спектрофотометрические исследования астероидов, сближающихся с Землей, и Главного пояса // Вестн. Московск. университета. Сер. 3: Физика, астрономия. 2019. № 6. С. 93–96.
- Binzel R.P., DeMeo F., Turtelboom E.V., Bus S.J., Tokunaga A., Burbine T.H., Lantz C., Polishook D., Carry B., Morbideli A., and 13 co-authors. Compositional distributions and evolutionary processes for the near-Earth object population: Results from the MIT-Hawaii Near Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS) // Icarus. 2019. V. 324. P. 41–76.
- Bus S.J., Binzel R.P. Phase II of the small Main-Belt asteroid spectroscopic survey: A feature-based taxonomy // Icarus. 2002. V. 158. № 1. P. 146–177.
- Busarev V.V., Savelova A.A., Shcherbina M.P., Barabanov S.I. Spectral signs of simultaneous sublimation activity and the appearance of a dust exosphere on eight asteroids of the Main Belt near perihelion // Sol. Syst. Res. 2022. V. 56. № 2. P. 84–99.
- Busarev V.V., Petrova E.V., Shcherbina M.P., Kuznetsov S.Y., Burlak M.A., Ikonnikova N.P., Savelova A.A., Belinski A.A. Search for signs of sublimation-driven dust activity of primitive-type asteroids near perihelion // Sol. Syst. Res. 2023. V. 57. № 5. P. 449–466.
- Fujiwara A., Kawaguchi J., Yeomans D.K., Abe M., Mukai T., Okada T., Saito J., Yano H., Yoshikawa M., Scheeres D.J., and 12 co-authors. The rubble-pile asteroid Itokawa as observed by Hayabusa // Science. 2006. V. 312. № 5778. P. 1330–1334.
- Gaia Collaboration. Gaia Data Release 3-Summary of the content and survey properties // Astron. and Astrophys. 2023. V. 674. id. A1 (22 p.).
- Grav T., Mainzer A.K., Bauer J.M., Masiero J.R., Stevenson R., Carolyn N., and NEOWISE Team. The WISE survey of the near-Earth asteroids (NEOWISE) // Am. Astron. Soc. Meeting Abstracts. 2013. V. 222, id.402.01.
- Hein A.M., Saidani M., Tollu H. Exploring potential environmental benefits of asteroid mining // arXiv preprint arXiv:1810.04749. 2018.
- Mainzer A., Grav T., Masiero J., Bauer J., Cutri R.M., McMillan R.S., Wright E.L. Physical parameters of asteroids estimated from the WISE3-band data and NEOWISE post-cryogenic survey // Astrophys. J. Lett. 2012. V. 760. № 1. L. 12.
- Masiero J.R., Grav T., Mainzer A.K., Nugent C.R., Bauer J.M., Stevenson R., Sonnett S. Main-belt asteroids with WISE/NEOWISE: Near-infrared albedos // Astrophys. J. 2014. V. 791. № 2. P. 121.
- McMahon J.W., Scheeres D.J., Hesar S.G., Farnocchia D., Chesley S., Lauretta D. The OSIRIS-REx radio science experiment at Bennu // Space Sci. Rev. 2018. V. 214. P. 1–41.
- National Research Council (NRC) Defending Planet Earth: Near-Earth-Object Surveys and Hazard Mitigation Strategies // Washington, DC: The National Academies Press. 2010. — 134 p.