

ОБЪЯСНЕНИЕ АНОМАЛЬНОЙ ВСПЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ КОМЕТЫ 29P/SCHWASSMANN-WACHMANN 1. ГИПОТЕЗА О НАЛИЧИИ У КОМЕТЫ КРУПНЫХ СПУТНИКОВ

© 2023 г. Ю. Д. Медведев^{1*}, С. Р. Павлов¹

¹Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 22.06.2023 г.

После доработки 25.07.2023 г.; принята к публикации 11.08.2023 г.

Аномальную вспышечную активность кометы 29P/Schwassmann-Wachmann 1 мы объясняем наличием у кометы спутников, соприкасающихся с поверхностью ядра кометы в перицентрах своих орбит. Предполагается, что спутники движутся по вытянутым орбитам, и в результате столкновений с пылевым слоем ядра выбрасывается большое количество пыли, отражение от которой вызывает периодические вспышки яркости (БАА, 2023). В зависимости от глубины проникновения спутников в пылевой слой происходит увеличение яркости кометы различной интенсивности. Улучшение орбиты кометы с привлечением позиционных наблюдений позволяет определить преимущественное направление выброса вещества по смещению фотоцентра, которое мы интерпретируем как направление вектора скорости наибольшего спутника в перицентре. Результаты математического моделирования выброса и последующего движения пылевых частиц, вызванного контактом спутника с пылевым слоем ядра кометы, объясняют образование наблюдаемых в комете структур: пылевых джетов и их зеркальной симметрии, а также протяженность области выброса вещества с поверхности ядра кометы.

Ключевые слова: комета 29P/Schwassmann-Wachmann 1, вспышечная активность комет, пылевые джеты, смещение фотоцентра.

DOI: 10.31857/S032001082308003X, **EDN:** YDDFUK

ВВЕДЕНИЕ

Долгие годы внимание ученых привлекает комета 29P/Schwassmann-Wachmann 1. Объект принадлежит классу кентавров, его орбита целиком лежит за орбитой Юпитера приблизительно на расстоянии 6 а.е. Несмотря на почти круговую, свойственную более астероидам, чем кометам, орбиту, за свою непрекращающуюся с момента открытия в 1927 г. вспышечную активность объект получил кометное обозначение. Широкое внимание комета 29P заслужила нерегулярностью и разной интенсивностью своих вспышек. С октября 2007 г. Британская астрономическая ассоциация (БАА) инициировала миссию, посвященную изучению комет с непредсказуемой вспышечной активностью, а начиная с 2014 г. за кометой 29P ведутся регулярные фотометрические наблюдения. Основные наблюдательные данные сейчас аккумулируются на отдельной web-странице, посвященной комете, на сайте БАА (2023).

В среднем за год наблюдается семь мощных вспышек с периодичностью от 55 до 60 сут и

увеличением блеска на четыре и более звездных величин (Кочергин и др., 2021). Яркие вспышки перемежаются менее яркими со слабо выраженной периодичностью в 9–14 а.е. (рис. 1). Кроме того, обнаружены формирующиеся после вспышки пылевые облака, в расположении которых отмечают наличие зеркальной симметрии (Майлс и др., 2016; Триго-Родригес и др., 2010). Скорости вещества у поверхности ядра небольшие, по наблюдениям телескопа Хаббл на расстояниях менее 1200 км от ядра скорость пыли составляет 17 м/с (Майлс и др., 2016), при этом они отмечают, что форма областей, с которых происходит выброс вещества, не точечная, а вытянута вдоль поверхности ядра кометы.

Ядро кометы большое, диаметр ядра оценивают в 60.4 км (ЛРД, 2023), альbedo — порядка 0.033 (Байер, 2013). Предполагается, что поверхность ядра покрыта толстым слоем пыли. Поляриметрические исследования, проведенные Кочергиным и др. (2021), показали, что наблюдаемое после вспышки свечение является, скорее всего, результатом рассеяния света на пылинках микронного размера, а не излучением молекул газа. Оценки пе-

*Электронный адрес: medvedev@iaaras.ru

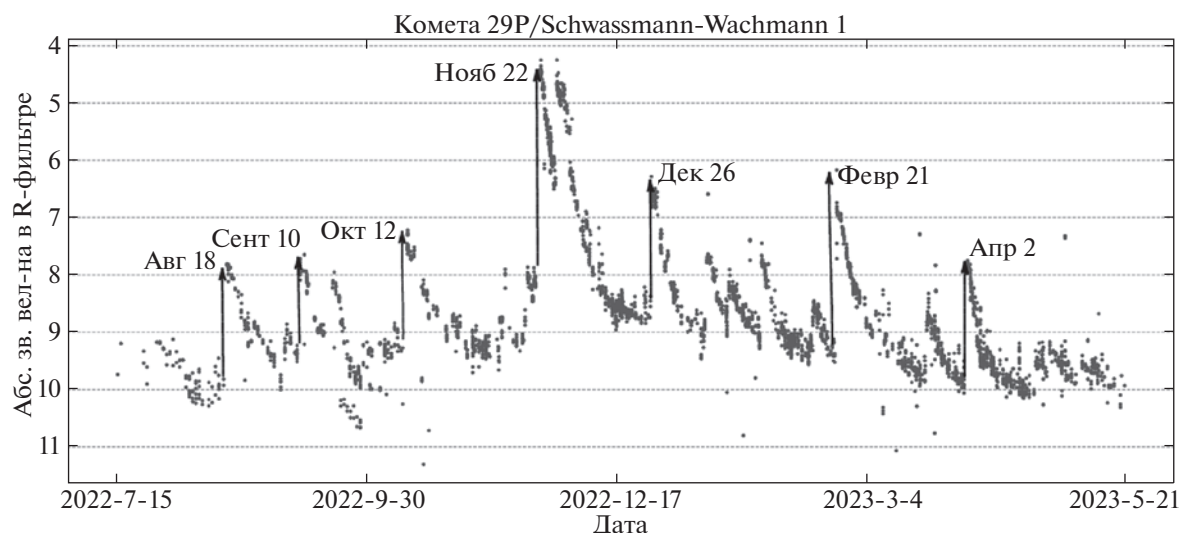


Рис. 1. Кривая блеска кометы 29P/Schwassmann-Wachmann 1 с июля 2022 г. по май 2023 г.

риода обращения кометы вокруг собственной оси по разным источникам рознятся и составляют от 6 ч до 60 а.е., что связано с различными подходами, применяемыми авторами (Триго-Родригес и др., 2010; Иванова и др., 2012; Шубина и др., 2023; Джевитт, 1990; Мич и др., 1993).

К сегодняшнему дню выдвинуто множество гипотез, пытающихся объяснить причины наблюдаемых вспышек кометы 29P. Наибольшее употребление находит объяснение, предполагающее наличие под поверхностью кометы каверн, содержащих льды метана и угарного газа. Выброс вещества в таком случае является следствием сублимации льдов летучих соединений, находящихся с солнечной стороны и провоцирующих взрыв (Майлс и др., 2016). Другие гипотезы предполагают столкновение астероида с метеороидными потоками (Гронковски, 2004) или фрагментацию ядра кометы в результате внутренних напряжений (Неслусан, 2014). Некоторые из выдвинутых гипотез были опровергнуты самими авторами, другие еще нуждаются в проверке. Так или иначе, вопрос о причинах наблюдаемых у кометы 29P вспышек остается открытым, активно обсуждаемым и требующим своего окончательного разрешения.

ФОРМУЛИРОВКА ГИПОТЕЗЫ

Поскольку все опубликованные предположения о вспышечной активности кометы имеют те или иные изъяны в интерпретации наблюдательных данных, мы предлагаем свое объяснение выше перечисленным особенностям кометы. Мы предполагаем, что в результате распада кометы, произошедшего из-за тесного сближения кометы с Юпитером

или другого физического процесса, у кометы появились спутники. Для того чтобы оценить область, в которой возможно длительное существование спутников, мы вычислили радиус сферы действия тяготения ядра кометы по формуле (Абалакин и др., 1978): $r_d = r_s \sqrt[5]{(m_c/m_\odot)^2}$, где r_s — гелиоцентрическое расстояние от кометы до Солнца, m_c — масса ядра кометы, $m_\odot$ — масса Солнца. Полагая, что ядро кометы — сфера радиусом $r = 30.2$ км и плотностью $\rho = 10^3$ кг/м³, а $r_s = 5.78$ а.е. — гелиоцентрическое расстояние кометы в перигелии; мы получили, что радиус сферы действия кометы $r_d = 4385$ км. Это достаточно большая область пространства, допускающая орбиты спутников с периодами вплоть до 80 а.е. Наблюдаемые вспышки можно объяснить наличием одного или нескольких крупных спутников километровых размеров, которые движутся по вытянутым орбитам с перигелическими расстояниями, позволяющими им касаться пылевого слоя, покрывающего ядро кометы. Столкновение спутников с пылевым слоем может происходить со скоростями вплоть до второй космической — 22.6 м/с. При прохождении перигелия спутник наподобие плуга поднимает с поверхности кометы пылевые частицы, вызывающие увеличение яркости. Различная интенсивность вспышек объясняется различной глубиной проникновения спутников в пылевую оболочку ядра кометы, размерами спутников, а также вращением и неровностью поверхности ядра кометы. Мощность пылевого слоя в результате таких контактов не подвержена значительному истощению, так как после каждой вспышки значительная часть пыли оседает обратно на поверхность ядра кометы.

ВЫЧИСЛЕНИЯ

Было проведено совместное численное моделирование движения ядра кометы и его спутников. При моделировании учитывались взаимные гравитационные возмущения ядра и спутника, а также возмущения со стороны Солнца и Юпитера. В случае соприкосновения спутника с ядром учитывалось тормозящее ускорение, которое считалось пропорциональным глубине проникновения спутника в поверхностный пылевой слой.

Численные эксперименты показали, что орбиты спутников с периодами 55–60 сут (значения больших полуосей орбит 1640–1740 км) нестабильны. Из-за возмущений со стороны Солнца и Юпитера у них наблюдаются изменения перицентральных расстояний, причем в сторону уменьшения. Это приводит к столкновению не только с пылевым слоем, но и с твердой частью ядра кометы. Орбиты с периодами 27–30 сут показывают ощутимо меньшие изменения орбитальных элементов. Однако наиболее стабильно движение спутников с периодами 12–14 сут (значения больших полуосей 590–660 км). В этом случае изменения перицентральных расстояний незначительны даже на столетних интервалах. Наибольшим изменениям подвержены большие полуоси, поскольку кинетическая энергия спутников тратится на взаимодействие с пылевым слоем. Эксцентриситеты таких орбит равны приблизительно 0.95, а скорости, развиваемые спутниками в перигеетре, достигают 22.3 м/с.

Пренебрегая энергией, расходуемой на тепло, т.е. считая взаимодействие спутника с пылевым слоем упругим, мы оценили величину кинетической энергии, расходуемой спутником на выброс пыли. Хосек и др. (2013) определили, что во время вспышки в мае 2011 г. с поверхности кометы выброшено порядка $2.6 \pm 0.3 \times 10^8$ кг пыли. Если считать, что спутник разгоняет пылевые частицы до скорости $v_0 = 20$ м/с, то кинетическая энергия, требуемая для разгона такого количества пыли, составит $E = 5.20 \times 10^{10}$ Дж. А в среднем для семи таких вспышек за год $E_{\text{год}} = 3.64 \times 10^{11}$ Дж.

Найдем разницу энергий спутника радиусом $r_{\text{спутн}} = 1$ км и плотностью 10^3 кг/м³ на орбите с большой полуосью $a = 600$ км и эксцентриситетом $e = 0.95$, и на круговой орбите с большой полуосью равной радиусу ядра кометы $a = 30.2$ км. Она равна $\Delta E = 0.53 \times 10^{15}$ Дж. Время жизни километрового спутника, если годовой расход энергии меняться не будет, и он не врежется в твердую составляющую ядра и не разрушится, составит $t = \Delta E / E_{\text{год}} \approx 1500$ лет.

Мы предположили, что выброс пылевых частиц при контакте наибольшего спутника с ядром кометы приводит к систематическому смещению фотоцентра кометы в направлении скорости спутника в

перигеетре. Для обнаружения этого эффекта мы провели совместное улучшение координат, компонент скорости и трех компонент вектора смещения фотоцентра кометы 29P на эпоху 17 июня 2015 г. по всем имеющимся позиционным наблюдениям с 1927 по 2023 г. В процессе улучшения были использованы наблюдения, взятые с сайта МПЦ (2023). Смещение фотоцентра определялось на нескольких интервалах по 5 дней с момента выброса, пока хвост еще не был сильно развернут солнечным давлением. Даты выбросов мы определяли по световым кривым и выбрали следующие моменты с наибольшими изменениями яркости: 2023.04.02, 2023.02.21, 2022.12.26, 2022.11.29, 2022.11.21, 2021.03.31, 2021.01.14, 2020.07.26, 2019.08.03, 2019.05.11.

Полученные значения параметров орбиты и смещения позволили представить наблюдения со среднеквадратической ошибкой 0.56 угл. сек. В улучшении использовалось 61 908 условных уравнений. Векторы положения, компонент скорости и смещения фотоцентра кометы в позиционных наблюдениях на эпоху 17 июня 2015 г. приведены в табл. 1.

Проведено моделирование образования и эволюции облака пылинок в результате столкновения спутника кометы с пылевым слоем, покрывающим поверхность ядра кометы. В уравнения движения пылевых частиц мы включили гравитационные притяжения со стороны ядра кометы, Солнца, Юпитера и солнечное давление.

Таблица 1. Координаты, компоненты скорости и величины смещений фотоцентра кометы 29P/Schwassmann-Wachmann 1 в экваториальной системе координат и их ошибки

Параметр	Значение	Ошибка
X, а.е.	−0.517504003	0.194×10^{-6}
Y, а.е.	−5.185826952	0.929×10^{-7}
Z, а.е.	−3.041518160	0.114×10^{-6}
$\dot{X}$, а.е./сут	0.006931788	0.938×10^{-10}
$\dot{Y}$, а.е./сут	−0.000690218	0.154×10^{-9}
$\dot{Z}$, а.е./сут	0.000572751	0.140×10^{-9}
ΔX , км	−1045	58
ΔY , км	1611	91
ΔZ , км	268	62

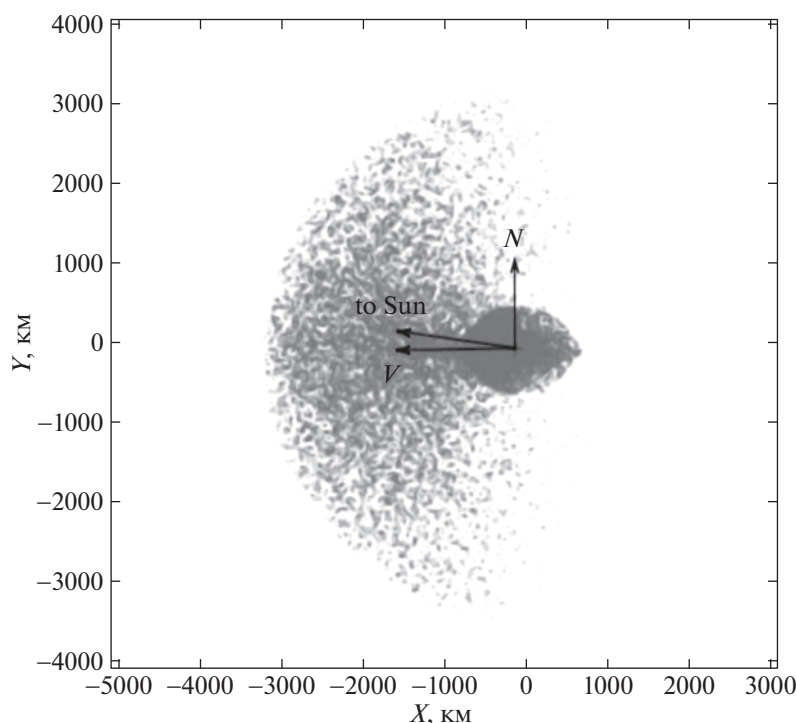


Рис. 2. Распределение пылинок на седьмой день после столкновения спутника с пылевым слоем ядра кометы 29P/Schwassmann Wachmann 1. Вид картинной плоскости для земного наблюдателя.

Выброс пылинок моделировался с дуги контакта спутника с поверхностью кометы. Для расчетной орбиты спутника: $a = 600$ км и $e = 0.95$, и при заглублении спутника на 0.2 км под поверхность пылевого слоя ядра кометы, длина дуги контакта составит приблизительно 1.6 км. Мы разбили дугу контакта на 200 точек. С каждой точки моделировался выброс 250 пылинок с начальными скоростями, взятыми из бета-распределения с параметрами $\beta(20, 1)$ в пределах от 0 до 22 м/с. Для каждой пылинки случайным образом задавались два угла, определяющих направление ее начальной скорости. Угол в плоскости, касательной к поверхности кометы, выбирался из пирамидального распределения в пределах $[-90^\circ; +90^\circ]$ от направления вектора скорости спутника. Угол из плоскости выбирался из равномерного распределения в пределах $[0^\circ; 36^\circ]$. Размер пылинок выбирался из равномерного распределения; каждой пылинке назначался радиус в пределах от 0.3 до 1 мкм, что соответствует результатам исследований Кочергина и др. (2021).

На рис. 2 приведены результаты моделирования пылевого облака, образовавшегося в результате контакта спутника со слоем пыли на поверхности ядра. На нем представлен вид картинной плоскости для земного наблюдателя на седьмой день после столкновения. Ось X , приведенная на рисунке,

параллельна, и ось Y перпендикулярна плоскости орбиты кометы. На рисунке также указаны векторы, параллельные нормали к плоскости орбиты кометы (вектор N), радиус-вектору кометы (вектор to Sun) и вектору скорости спутника в перигеяре (вектор V). На рисунке заметно образование двух джетов, зеркальных относительно оси X , характерных для крупномасштабных фотографий комы кометы 29P.

Моделирование образования пылевого облака показывает, что в течение нескольких дней после выброса преимущественное направление движения пылинок совпадает с направлением скорости спутника. Поэтому мы предположили, что вектор смещения фотоцентра, определенный в экваториальной системе $Oxyz$ с центром в ядре кометы, совпадает с направлением скорости спутника кометы в момент прохождения перигеяра:

$$\vec{v}_s = -1045\vec{x} + 1611\vec{y} + 268\vec{z} \text{ (км)}.$$

Из предположения, что в момент прохождения перигеяра спутник касается поверхности кометы, следует, что модуль радиус-вектора орбиты спутника в этот момент времени равен сумме радиусов кометы и спутника за вычетом глубины проникновения спутника в приповерхностный слой ядра кометы: $|\vec{r}_s| = 30.2 + 1 - 0.2 = 31$ км.

Таблица 2. Элементы гипотетического спутника

Элементы	Прямое движение	Ретроградное движение
a	600 км	600 км
e	0.95	0.95
i	0°	0°
Ω	0°	0°
ω	83.04°	263.04°

Вектор скорости спутника в перигеяре является нормалью к плоскости, пересечение которой с поверхностью ядра кометы составляет большую окружность. В одной из точек этой окружности находится перигеяре орбиты спутника. Пусть плоскость орбиты спутника совпадает с плоскостью орбиты кометы. Пересечение плоскости орбиты спутника с большой окружностью даст две точки на поверхности ядра кометы, соответствующие положению перигеяра в случае прямого и ретроградного движений спутника. Введем локальную систему координат с началом отсчета, совпадающим с центром ядра кометы. Ось $\bar{Z}$ направим перпендикулярно из плоскости орбиты кометы, так чтобы комета двигалась против часовой стрелки, если смотреть с конца вектора (прямое движение). Ось $\bar{X}$ сонаправим с направлением на восходящий узел орбиты кометы. Ось $\bar{Y}$ определим до правой тройки векторов. Тогда элементы орбиты спутника, определенные в этой локальной системе координат, связанной с орбитой кометы, в случае его прямого и ретроградного движений будут иметь значения, приведенные в табл. 2.

Приведенные элементы позволяют предсказывать положение спутника и дают возможность предпринять попытку обнаружить крупный спутник кометы оптическими средствами. Наиболее благоприятными интервалами обнаружения гипотетического спутника являются моменты его нахождения в апоцентре своей орбиты. Если считать, что момент прохождения через перигеяре соответствует началу вспышки, то апоцентра он будет достигать через 6–7 дней с момента вспышки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы объясняем аномальную вспышечную активность кометы 29/Schwassmann-Wachmann 1, предположив, что у нее имеются спутники, способные в перигеяре проходить вплотную к ядру кометы и поднимать с поверхности облако пыли. Объем выброса в таком случае зависит от глубины

проникновения спутника в пылевую оболочку и его размера. Мы рассчитали объем пыли, обеспечивающий наблюдаемое увеличение яркости кометы, и посчитали, на сколько лет хватит запаса энергии километровой спутника в случае сохраняющейся среднегодовой интенсивности вспышек.

В пользу данной гипотезы свидетельствует то, что в процессе улучшения орбиты спутника по наблюдениям, взятым с MPC (2023), мы получили меньшие значения среднеквадратического отклонения при совместном улучшении орбиты и трех компонент вектора смещения в фиксированной системе координат (XYZ), чем в случае, когда мы улучшали радиальную, трансверсальную и нормальную компоненты вектора смещения. Мы считаем, что данный факт свидетельствует о наличии выделенного направления в пространстве, соответствующего преимущественному направлению выбросов. Мы связываем это с инерциальными свойствами гравитирующих тел: спутника и кометы, а не с относительным положением кометы и Солнца.

Мы также провели математическое моделирование процесса разлета и последующей динамики пылинок в результате столкновения крупного спутника с пылевым слоем на поверхности кометы. Моделирование позволило получить структуры, схожие с наблюдаемыми после выброса джетами, и объяснить протяженность области выброса вещества на поверхности ядра. Из обработки позиционных наблюдений определена величина смещения фотоцентра относительно ядра кометы. Предположив, что направление выброса вещества совпадает с направлением скорости наиболее крупного спутника в перигеяре, оценены элементы его орбиты.

Таким образом, мы предполагаем, что комета представляет собой многоспутниковую систему, которая находится в процессе образования тесной пары (ядро и наибольший спутник).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абалакин В.К. и др., *Справочное руководство по небесной механике и астродинамике* (М.: Наука, 1976), с. 864.
2. БАА (British Astronomical Association); [Электронный ресурс] URL: https://britastro.org/section_information_/comet-section-overview/mission-29p-2 (дата обращения 13.06.2023).
3. Байер и др. (J.M. Bauer, T. Grav, E. Blauvelt, A.K. Mainzer, J.R. Masiero, R. Stevenson, E. Kramer, Y.R. Fernández, et al.), *Astrophys. J.* **773**, 22 (2013).
4. Гронковски (P. Gronkowski), *MNRAS* **354**, 142 (2004).
5. Джевитт и др. (D. Jewitt), *Astrophys. J.* **351**, 277 (1990).

6. Иванова и др. (A. Ivanova, V. Afanasiev, P. Korsuna, A.R. Baranskii, M.V. Andreev, and V.A. Ponomarenko), *Solar System Res.* **46**, 313 (2012).
7. Кочергин и др. (A. Kochergin, E. Zubko, E. Chornaya, M. Zheltobryukhov, G. Videen, G. Kornienko, and S.S. Kim), *Icarus* **366**, 114536 (2021).
8. ЛРД (Jet Propulsion Laboratory): [Электронный ресурс] URL: https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=29p (дата обращения 13.06.2023).
9. Майлс и др. (R. Miles, G.A. Faillace, S. Mottola, et al.), *Icarus* **272**, 327 (2016).
10. Майер (R. Miles), *Icarus* **272**, 387 (2016).
11. Мич и др. (K.J. Meech, M.J.S. Belton, B.E.A. Mueller, M.W. Dicksion, and H.R. Li), *Astron. J.* **106**, 1222 (1993).
12. МПЦ (Minor Planet Center): [Электронный ресурс] URL: https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?utf8=%E2%9C%93&object_id=29p (дата обращения 13.06.2023).
13. Неслусан (L. Neslusan), *Planet. Space Sci.* **101**, 162 (2014).
14. Триго-Родригаз и др. (J.M. Trigo-Rodríguez, D.A. García-Hernández, and A. Sánchez), *MNRAS* **409**, 1682 (2010).
15. Хосек и др. (M.W. Hosek, R.C. Blaauw, W.J. Cooke, and R.M. Suggs), *Astron. J.* **145**, 122 (2013).
16. Шубина и др. (O. Shubina, V. Kleshchonok, O. Ivanova, I. Luk'yanyk, and A. Baransky), *Icarus* **391**, 115340 (2023).