Анализ планетофизических параметров астероида Рюгу с использованием методов фрактальной геометрии

© Е.Н. Ахмедшина,[1] Л.А. Нефедьев,[1] А.О. Андреев,[2] Ю.А. Нефедьев,[1] А.П. Корчагина[1]

[1] Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008 Казань, Россия
[2] Казанский государственный энергетический университет,
420066 Казань, Россия
e-mail: andreev.alexey93@gmail.com

Поступило в Редакцию 4 мая 2026 г.
В окончательной редакции 18 августа 2026 г.
Принято к публикации 23 октября 2026 г.

Проведено исследование особенностей поверхностной структуры астероида (162173) Рюгу. В ходе исследования разработан авторский подход, направленный на изучение безатмосферных малых тел Солнечной системы и позволяющий анализировать пространственную неоднородность их поверхности. На основе проведенного анализа установлено наличие самоподобных участков, формирование которых связано с действием схожих эволюционных процессов, которые определили особенности формирования поверхности и структуры небесного тела. Предлагаемый подход может быть адаптирован для исследования процессов формирования и эволюции других малых безатмосферных тел Солнечной системы.

Ключевые слова: фрактальные методы исследования, анализ самоподобных структур, астероид (162173) Рюгу.

DOI: 10.61011/JTF.2026.12.64043.303-26

Введение

В настоящее время значительное внимание исследователей привлекает околоземный астероид Рюгу, имеющий необычную ромбовидную форму. В рамках космической миссии „Hayabusa2“ на Землю были доставлены образцы его вещества [1]. Метеориты, обнаруживаемые на нашей планете, загрязняются при контакте с атмосферой, водой и органикой, в то время как образцы Рюгу можно считать относительно чистым материалом. Анализ доставленных образцов позволяет исследовать происхождение воды, органических соединений и минералов, из которых были сформированы небесные тела, а также уточнить возможную роль астероидов в их наличии на Земле. Считается, что Рюгу содержит первородное вещество Солнечной системы [2], а сам он представляет собой скопление каменных фрагментов, сформировавшееся из обломков некоего родительского астероида [3]. Наша работа основана на материале, который получен миссией „Hayabusa2“ и содержит данные лазерной альтиметрии поверхности Рюгу. Такие данные позволяют судить о структуре астероида и особенностях его эволюционного развития. На основе наблюдательных данных, полученных в ходе миссии „Hayabusa2“, стало возможным построить модель формирования и ранних этапов эволюции родительского тела астероида, описать процесс его разрушения в результате внешнего ударного события, а также последующую реаккрецию вещества и более поздние этапы космического выветривания летучих соединений.

1. Фрактальная геометрия

Одним из перспективных направлений исследования структуры, материалов и свойств разнородных природных объектов является фрактальная геометрия. Основное свойство фрактальных объектов — подобие при масштабировании. Описание экспериментальных данных с помощью фракталов позволяет рационально представлять их. Одна из целей исследования состоит в определении фрактальной размерности множества экспериментальных данных и пределов, в которых структура проявляет фрактальные свойства, а также в установлении того, какие характеристики физического процесса приводят к образованию фрактальной структуры. Поскольку фрактал — это структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому, одним из основных свойств фрактала является самоподобие. Таким образом, множество экспериментальных данных можно описать соответствующей фрактальной размерностью (размерностями) и коэффициентом самоподобия S_f.

Количественной мерой, характеризующей распределение структуры в пространстве, является фрактальная размерность D. Исследования фрактальной размерности позволяют изучать не только структуру, но и связь между структурой и процессами ее формирования. Фрактальные структуры были обнаружены и в динамических системах. В частности, методы фрактального анализа позволяют количественно описать модели поверхностей небесных тел. Методы распознавания и сравнения фрактальных структур используются для исследования свойств неоднородных поверхностей, нахождения их сходства по некоторым известным параметрам. Иссле-

дование фрактальной размерности позволяет изучать и сравнивать структуры поверхностей различных объектов или различных областей на поверхности одного объекта. При этом наибольшей чувствительностью обладают фрактальные размерности по нескольким свойствам исследуемых структур. Физический смысл коэффициентов самоподобия заключается в том, что данные области наиболее полно соответствуют фрактальной логарифмической зависимости, в свою очередь, близость параметра SRGB (площадь цветовых фрактальных размерностей в красной, зеленой и синей областях) для двух областей подтверждает структурное подобие этих областей. Области, имеющие одинаковые значения параметра SRGB и максимальные значения коэффициента самоподобия S_f, обладают самоподобными свойствами, не зависящими от масштабирования, и именно эти области, по всей видимости, имеют и сходное эволюционное происхождение. Следует отметить, что параметр SRGB характеризует структурное подобие двух областей, а максимальное значение коэффициента подобия S_f говорит об их фрактальном самоподобии. Таким образом, если для определенного значения параметра SRGB выбираются области с максимальным значением коэффициента самоподобия, то мы получаем области, которые с большой долей вероятности были эволюционно сформированы при действии одинаковых физических процессов. При этом, согласно работе [4], параметр SRGB имеет бóльшую чувствительность к изменению структуры поверхности небесного тела, чем просто классические фрактальные оценки.

2. Метод исследования структуры астероида Рюгу

Фрактально оцененная цифровая модель распределения высот поверхности Рюгу может быть использована в имитационной модели для определения координат поверхности астероида, для тестирования точности их определения, при исследовании планетных ударников, выполнения работ по структурному и вещественному строению Рюгу. Все это является важным фактором для выбора площадки для посадки на астероид в будущих космических миссиях.

Исследование структуры астероида Рюгу основывалось на последовательной обработке альтиметрических данных, полученных лазерным альтиметром LIDAR, установленным на космическом аппарате „Hayabusa2“ [5]. Данный прибор обеспечивал измерение дальности в достаточно широком диапазоне от 30 m до 25 km, что позволило использовать его как в целях навигации, так и для построения топографической модели и оценки формы астероида. Анализ топографических срезов показал, что поверхность Рюгу неоднородна, края ряда крупных ударных структур различаются по высоте. Например, у кратеров Урасима, Колобок и Кинтаро разница между западным и восточным краями составляет около 10 m, а у кратера Сандрийон — около 30 m. Вероятной причиной формирования таких особенностей является высокая скорость вращения родительского тела, его импактное разрушение и последующее повторное объединение вещества [6].

На первом этапе формировалась цифровая модель поверхности в результате разбиения исходного массива высотных данных на пиксели с характерным угловым размером 5". Полученные данные стали основой для построения цифровой трехмерной модели поверхности Рюгу, что позволило выделить наиболее крупные морфологические структуры и провести анализ распределения высот в пространстве.

В основе рассматриваемого подхода лежал анализ цифровой топографической модели поверхности астероида Рюгу с использованием набора цветовых признаков. В качестве исходных функций $\Phi_i(s)$ принимались значения цветовых пикселей цифрового представления поверхности, где $i = 1, 2, 3$ соответствует красной, зеленой и синей компонентам. Каждый из указанных цветов соотносится с альтиметрическими характеристиками исследуемых участков поверхности. Для каждого компонента вычислялась соответствующая фрактальная размерность $D_f^{(i)}$, характеризующая степень пространственной неоднородности структуры поверхности. Массив полученных значений рассматривался как координатное описание поверхности.

На следующем этапе с использованием этих параметров строились треугольники, для которых определялись площади SRGB. Полученные величины использовались в качестве показателя, чувствительного к изменениям высотной составляющей рельефа, и стали основой для проведения сравнительного анализа структурных особенностей поверхности Рюгу. Распределение SRGB по поверхности астероида представлено на рис. 1.

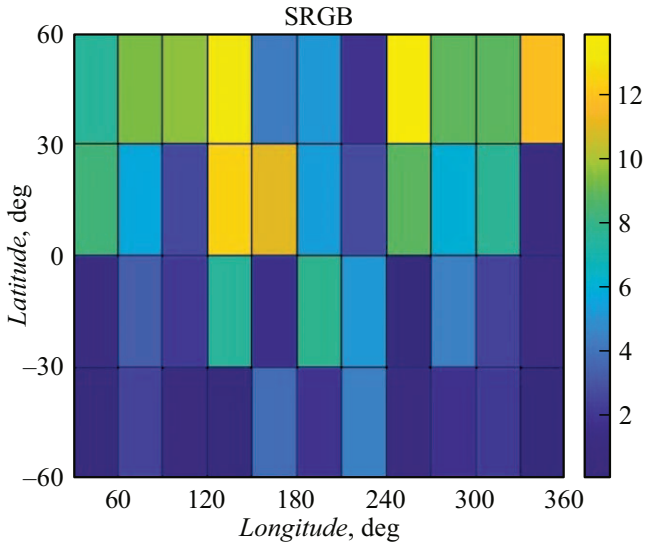


Рис. 1. Пространственное распределение площадей SRGB, в вершинах которых расположены $D_f^{(i)}$ $(i = 1, 2, 3)$.

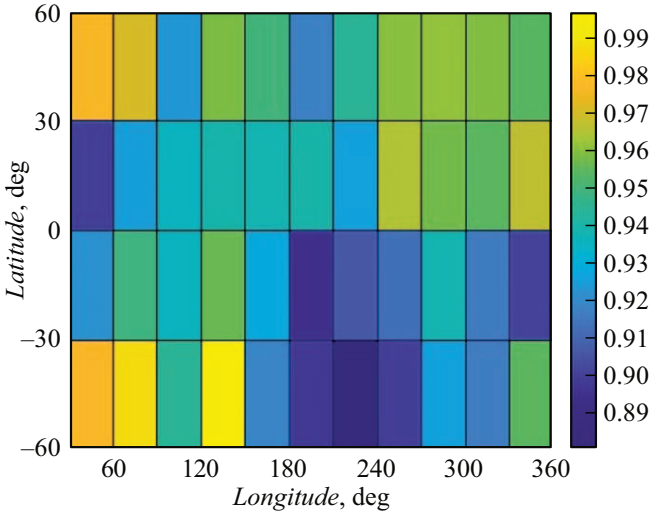


Рис. 2. Пространственное распределение показателя S_f.

Для выделенных участков поверхности на следующем этапе вычислялась фрактальная размерность D_f. Расчет выполнялся по следующему выражению [4]:

$$D_f = \frac{1}{M-1}\sum_{k=1}^{M-1}\omega_k \frac{\ln C(\rho_{k+1})\ln C(\rho_k)}{|\ln\Lambda(\rho_{k+1})| - |\ln\Lambda(\rho_k)|},$$

где $C(\rho_k)$ — количество покрывающих поверхность элементов, необходимых для описания выбранной области поверхности при масштабе ρ_k, $\Lambda(\rho_k)$ — функция, задающая соответствующую масштабную характеристику покрытия; ω_k — весовой множитель для каждого интервала разбиения; M — число интервалов.

Тогда итоговый цветовой фрактальный параметр может быть записан в виде

$$SRGB = \frac{\Pi}{2}\left(2D_f^{(2)} - D_f^{(1)} - D_f^{(3)}\right),$$

где Π — масштабный коэффициент.

Далее для количественной оценки степени самоподобия вводился показатель коэффициента самоподобия S_f, определяемый как отношение опорной фрактальной размерности D_f^{ref} к фрактальной размерности исследуемой структуры D_f:

$$S_f = \frac{D_f^{\text{ref}}}{D_f}.$$

3. Результаты и выводы

На рис. 2 приведена карта пространственного распределения показателя S_f по поверхности Рюгу. К самоподобным относятся те области, для которых характерны одинаковые значения S_f.

Анализ пространственного распределения показателя S_f позволяет выделить на поверхности астероида несколько зон с близкими значениями данного параметра, которые можно с высокой вероятностью интерпретировать как самоподобные. К ним в первую очередь относятся следующие области:

1) область в диапазоне широт $30^\circ - 60^\circ$ и долгот $240^\circ - 330^\circ$;

2) область в диапазоне широт $0^\circ - 30^\circ$ и долгот $120^\circ - 210^\circ$;

3) область в диапазоне широт $-30^\circ - -60^\circ$ и долгот $30^\circ - 90^\circ$.

Таким образом, на основе проведенного в работе анализа оптических данных, полученных миссией „Hayabusa2“, и с использованием методов фрактальной геометрии были определены самоподобные области, и представлено их распределение по поверхности малой планеты. Наличие самоподобных областей согласуется с данными дистанционного зондирования и анализа образцов Рюгу, которые указывают на высокую спектральную однородность существенной части поверхности и на важную роль процессов водной переработки и космического выветривания.

Следует отметить, что подтверждение устойчивости метода получено в работах [4,7]. При этом в последней работе также проведен анализ корреляционных связей параметра самоподобия для таких моделей спутника Сатурна Титана, как модель распределения излучательной способности Титана на длине волны 2 cm, полученная в ходе миссии „Кассини“, моделей гравитационного поля и макрофигуры спутника. В результате в работе [7] получено, что гравитационное поле коррелирует с коэффициентом самоподобия хуже, чем в случае с двумя другими моделями. С учетом того, что параметр SRGB, как было сказано выше, характеризует структурные особенности поверхности, а коэффициент самоподобия — фрактальные свойства, в настоящем исследовании нами была выполнена визуализация сопоставления параметра SRGB с картой распределения градиента гравитационного поля Рюгу и картой распределения отклонения гравитации от модели точечной массы, построенных в работе [8], а также с картой распределения цветового спектра поверхности астероида, построенной в работе [9]. Полученный результат приведен на рис. 3.

Как видно из рис. 3, для большинства поверхностных областей наблюдается достаточно хорошее соответствие между распределением параметра SRGB и представленными моделями.

Заключение

В качестве дополнительного результата выполненной работы можно рассматривать и практическое качественное согласование теоретических выводов, сделанных в работе [10], о том, что в случае Рюгу в южном полушарии астероида под воздействием солнечного температурного градиента могут протекать процессы выброса частиц с поверхности малой планеты и их последующее

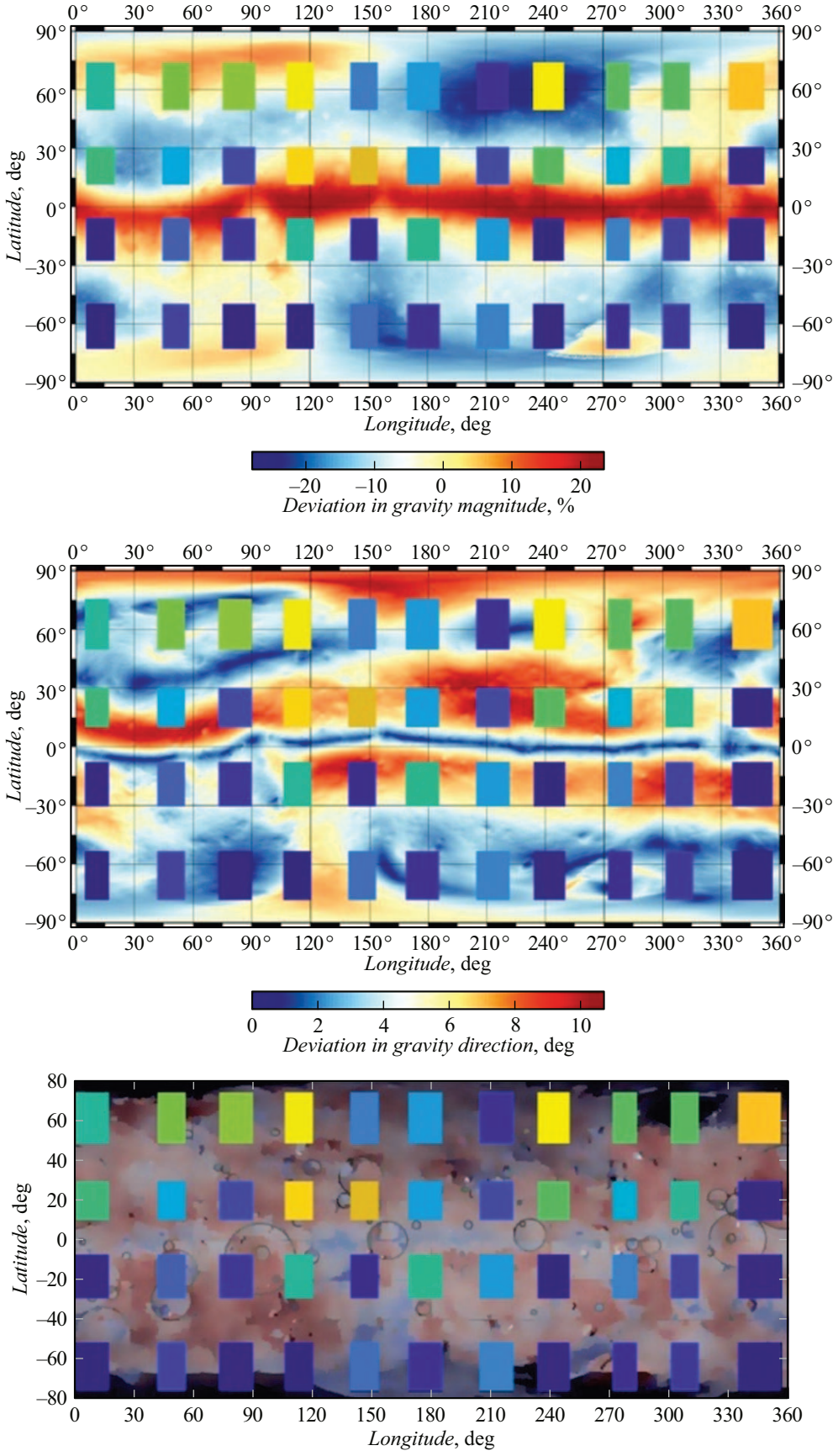


Рис. 3. Визуализация сопоставления параметра SRGB с картой распределения градиента гравитационного поля Рюгу (*a*), картой распределения отклонения гравитации от модели точечной массы, построенных в работе [8] (*b*), и картой распределения цветового спектра поверхности астероида, построенной в работе [9] (*c*).

накопление в области экватора. При этом орбиты частиц характеризуются устойчивой формой, и образуется экваториальная выпуклость, обеспечивающая ромбовидную форму Рюгу. Также был качественно согласован факт, описанный в [11], что астероид испытал достаточно сильный солнечный нагрев, и под действием эффекта Ярковского существенно изменил свою орбиту.

Финансирование работы

Работа поддержана Российским научным фондом, грант 22-72-10059-П.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] C. Pilorget, T. Okada, V. Hamm, R. Brunetto, T. Yada, D. Loizeau, L. Riu, T. Usui, A. Moussi-Soffys, K. Hatakeda, A. Nakato, K. Yogata, M. Abe, A. Aléon-Toppani, J. Carter, M. Chaigneau, B. Crane, B. Gondet, K. Kumagai, Y. Langevin, C. Lantz, T. Le Pivert-Jolivet, G. Lequertier, L. Lourit, A. Miyazaki, M. Nishimura, F. Poulet, M. Arakawa, N. Hirata, K. Kitazato, S. Nakazawa, N. Namiki, T. Saiki, S. Sugita, S. Tachibana, S. Tanaka, M. Yoshikawa, Y. Tsuda, S. Watanabe, J.-P. Bibrin. Nature Astronomy, **6** (2), 221 (2022). DOI: 10.1038/s41550-021-01549-z

[2] T. Le Pivert-Jolivet, R. Brunetto, C. Pilorget, D. Baklouti, J.-P. Bibring, J. Carter, V. Hamm, K. Hatakeda, T. Jiang, C. Lantz, D. Loizeau, M. Mahlke, A. Nakato, T. Okada, L. Riu, T. Usui, T. Yada, K. Yogata, J. De León, Y. Hitomi, K. Kumagai, J. Licandro, A. Myazaki, K. Nagashima, A. Nakano, M. Nishimura, T. Ojima, Y. Sugiyama, R. Tahara, T. Saiki, S. Tanaka, S. Watanabe, Y. Tsuda. AA, **695**, Art. Num. A168 (2025). DOI: 10.1051/0004-6361/202453270

[3] T. Nakamura, M. Matsumoto, K. Amano, Y. Enokido, M.E. Zolensky, T. Mikouchi, H. Genda, S. Tanaka, M.Y. Zolotov, K. Kurosawa, S. Wakita, R. Hyodo, H. Nagano, D. Nakashima, Y. Takahashi, Y. Fujioka, M. Kikuiri, E. Kagawa, M. Matsuoka, A.J. Brearley, A. Tsuchiyama, M. Uesugi, J. Matsuno, Y. Kimura, M. Sato, R.E. Milliken, E. Tatsumi, S. Sugita, T. Hiroi, K. Kitazato, D. Brownlee, D.J. Joswiak, M. Takahashi, K. Ninomiya, T. Takahashi, T. Osawa, K. Terada, F.E. Brenker, B.J. Tkalcec, L. Vincze, R. Brunetto, A. Aléon-Toppani, Q.H.S. Chan, M. Roskosz, J.-C. Viennet, P. Beck, E.E. Alp, T. Michikami, Y. Nagaashi, T. Tsuji, Y. Ino, J. Martinez, J. Han, A. Dolocan, R.J. Bodnar, M. Tanaka, H. Yoshida, K. Sugiyama, A.J. King, K. Fukushi, H. Suga, S. Yamashita, T. Kawai, K. Inoue, A. Nakato, T. Noguchi, F. Vilas, A.R. Hendrix, C. Jaramillo-Correa, D.L. Domingue, G. Dominguez, Z. Gainsforth, C. Engrand, J. Duprat, S.S. Russell, E. Bonato, C. Ma, T. Kawamoto, T. Wada, S. Watanabe, R. Endo, S. Enju, L. Riu, S. Rubino, P. Tack, S. Takeshita, Y. Takeichi, A. Takeuchi, A. Takigawa, D. Takir, T. Tanigaki, A. Taniguchi, K. Tsukamoto, T. Yagi, S. Yamada, K. Yamamoto, Y. Yamashita, M. Yasutake, K. Uesugi, I. Umegaki, I. Chiu, T. Ishizaki, S. Okumura, E. Palomba, C. Pilorget, S.M. Potin, A. Alasli, S. Anada, Y. Araki, N. Sakatani, C. Schultz, O. Sekizawa, S.D. Sitzman, K. Sugiura, M. Sun, E. Dartois, E. De Pauw, Z. Dionnet, Z. Djouadi, G. Falkenberg, R. Fujita, T. Fukuma, I.R. Gearba, K. Hagiya, M.Y. Hu, T. Kato, T. Kawamura, M. Kimura, M.K. Kubo, F. Langenhorst, C. Lantz, B. Lavina, M. Lindner, J. Zhao, B. Vekemans, D. Baklouti, B. Bazi, F. Borondics, S. Nagasawa, G. Nishiyama, K. Nitta, J. Mathurin, T. Matsumoto, I. Mitsukawa, H. Miura, A. Miyake, Y. Miyake, H. Yurimoto, R. Okazaki, H. Yabuta, H. Naraoka, K. Sakamoto, S. Tachibana, H.C. Connolly Jr, D.S. Lauretta, M. Yoshitake, M. Yoshikawa, K. Yoshikawa, K. Yoshihara, Y. Yokota, K. Yogata, H. Yano, Y. Yamamoto, D. Yamamoto, M. Yamada, T. Yamada, T. Yada, K. Wada, T. Usui, R. Tsukizaki, F. Terui, H. Takeuchi, Y. Takei, A. Iwamae, H. Soejima, K. Shirai, Y. Shimaki, H. Senshu, H. Sawada, T. Saiki, M. Ozaki, G. Ono, T. Okada, N. Ogawa, K. Ogawa, R. Noguchi, H. Noda, M. Nishimura, N. Namiki, S. Nakazawa, T. Morota, A. Miyazaki, A. Miura, Y. Mimasu, K. Matsumoto, K. Kumagai, T. Kouyama, S. Kikuchi, K. Kawahara, S. Kameda, T. Iwata, Y. Ishihara, M. Ishiguro, H. Ikeda, S. Hosoda, R. Honda, C. Honda, Y. Hitomi, N. Hirata, N. Hirata, T. Hayashi, M. Hayakawa, K. Hatakeda, S. Furuya, R. Fukai, A. Fujii, Y. Cho, M. Arakawa, M. Abe, S. Watanabe, Y. Tsuda. Science, **379** (6634), eabn8671 (2022). DOI: 10.1126/science.abn8671

[4] A.O. Andreev, E.N. Akhmedshina, L.A. Nefediev, Y.A. Nefedyev, N.Y. Demina. Astron. Rep., **65** (5), 435 (2021). DOI: 10.1134/S1063772921060019

[5] T. Okada, K. Righter, R. Brunetto, T. Yada, H.C. Connolly Jr. Earth, Planets and Space, **77**, 84 (2025). DOI: 10.1186/s40623-025-02210-z

[6] N. Hirata, N. Namiki, F. Yoshida, K. Matsumoto, H. Noda, H. Senshu, T. Mizuno, F. Terui, Yo. Ishihara, R. Yamada, K. Yamamoto, Sh. Abe, R. Noguchi, N. Hirata, Yu. Tsuda, S.-I. Watanabe. Icarus, **354**, 114073 (2021). DOI: 10.1016/j.icarus.2020.114073

[7] A. Andreev, Y. Nefedyev, C. De La Morena, E. Ahmedshina, N. Demina. Proceed. 2021 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS, 395 (2021). DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9580988

[8] Sh. Kikuchi, S.-I. Watanabe, T. Saiki, H. Yabuta, S. Sugita, T. Morota, N. Hirata, N. Hirata, T. Michikami, Ch. Honda, Ya. Yokota, R. Honda, N. Sakatani, T. Okada, Yu. Shimaki, K. Matsumoto, R. Noguchi, Yu. Takei, F. Terui, N. Ogawa, K. Yoshikawa, G. Ono, Yu. Mimasu, H. Sawada, H. Ikeda, Ch. Hirose, T. Takahashi, A. Fujii, T. Yamaguchi, Yo. Ishihara, T. Nakamura, K. Kitazato, K. Wada, Sh. Tachibana, E. Tatsumi, M. Matsuoka, H. Senshu, Sh. Kameda, T. Kouyama, M. Yamada, K. Shirai, Yu. Cho, K. Ogawa, Yu. Yamamoto, A. Miura, T. Iwata, N. Namiki, M. Hayakawa, M. Abe, S. Tanaka, M. Yoshikawa, S. Nakazawa, Yu. Tsuda. Space Sci. Rev., **216** (7), Art. Num. 116 (2020). DOI: 10.1007/s11214-020-00737-z

[9] T. Morota, S. Sugita, Y. Cho, M. Kanamaru, E. Tatsumi, N. Sakatani, R. Honda, N. Hirata, H. Kikuchi, M. Yamada, Y. Yokota, S. Kameda, M. Matsuoka, H. Sawada, C. Honda, T. Kouyama, K. Ogawa, H. Suzuki, K. Yoshioka, M. Hayakawa, N. Hirata, M. Hirabayashi, H. Miyamoto, T. Michikami, T. Hiroi, R. Hemmi, O.S. Barnouin, C.M. Ernst, K. Kitazato, T. Nakamura, L. Riu, H. Senshu, H. Kobayashi, S. Sasaki, G. Komatsu, N. Tanabe, Y. Fujii, T. Irie, M. Suemitsu, N. Takaki, C. Sugimoto, K. Yumoto, M. Ishida,

H. Kato, K. Moroi, D. Domingue, P. Michel, C. Pilorget, T. Iwata, M. Abe, M. Ohtake, Y. Nakauchi, K. Tsumura, H. Yabuta, Y. Ishihara, R. Noguchi, K. Matsumoto, A. Miura, N. Namiki, S. Tachibana, M. Arakawa, H. Ikeda, K. Wada, T. Mizuno, C. Hirose, S. Hosoda, O. Mori, T. Shimada, S. Soldini, R. Tsukizaki, H. Yano, M. Ozaki, H. Takeuchi, Y. Yamamoto, T. Okada, Y. Shimaki, K. Shirai, Y. Iijima, H. Noda, S. Kikuchi, T. Yamaguchi, N. Ogawa, G. Ono, Y. Mimasu, K. Yoshikawa, T. Takahashi, Y. Takei, A. Fujii, S. Nakazawa, F. Terui, S. Tanaka, M. Yoshikawak, T. Saikik, S. Watanabek, Y. Tsuda. Science, **368** (6491), 654 (2020). DOI: 10.1126/science.aaz6306

[10] H. Chen, K. Willner, R. Ziese, X. Hu, Q. Huang, H. Xiao, Ph. Glser, W. Neumann, J. Oberst. AA, **696**, A212 (2025). DOI: 10.1051/0004-6361/202452844

[11] M. Kanamaru, Sh. Sasaki, T. Morota, Y. Cho, E. Tatsumi, Y. Shimaki, S. Sugita, M. Hirabayashi, N. Hirata, H. Senshu, N. Sakatani, S. Tanaka, T. Okada, T. Usui, S. Watanabe. J. Geophys. Res.: Planets, **126**, e2021JE006863 (2021). DOI: 10.1002/essoar.10506731.1