Создание физической модели спутника Сатурна Энцелада с использованием данных миссии „Кассини“

© Р.Р. Мубаракшина,[1] Л.А. Нефедьев,[1] А.О. Андреев,[2] Ю.А. Нефедьев,[1] Е.А. Чухланцева[1]

[1]Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008 Казань, Россия,
[2]Казанский государственный энергетический университет,
420066 Казань, Россия
e-mail: mubarakshinaregina3@gmail.com, andreev.alexey93@gmail.com

Поступило в Редакцию 5 мая 2025 г.
В окончательной редакции 7 июля 2025 г.
Принято к публикации 15 июля 2025 г.

Рассмотрена задача создания структурной модели спутника Сатурна Энцелада. Построение модели выполнено на основе оптических наблюдений космической миссией Кассини-Гюйгенс и с использованием разложения данных по сферическим функциям и гармонического анализа. Анализ 3D-модели спутника показал наличие трех типов поверхности и с учетом других наблюдаемых геохимических процессов позволил подтвердить, что по космическим меркам данное небесное тело было сформировано недавно.

Ключевые слова: спутник Сатурна Энцелад, гармоническое моделирование, структурный анализ.

DOI: 10.61011/JTF.2025.12.61797.244-25

Сатурн шестая по удаленности от Солнца планета и вторая по размерам в Солнечной системе, имеющая наиболее выраженное внешнее кольцо. На сегодняшний день известно о существовании по крайней мере 146 естественных спутников Сатурна, среди них особый научный интерес представляет Энцелад (рис. 1), поскольку существуют свидетельства того, что данный спутник имеет на своей поверхности гейзеры [1], выбрасывающие в космическое пространство на высоту до нескольких сотен километров воду в различных формах, молекулярный водород, органические соединения и другие вещества. Важной особенностью этого спутника Сатурна является то, что под его поверхностью, согласно современным гравиметрическим данным, находится слой жидкой воды толщиной порядка нескольких километров [2]. Специфический состав выбросов и наличие слоя жидкой воды позволяют предположить, что на нижней границе последнего сформированы условия, пригодные для существования примитивных форм жизни [3]. С морфологической точки зрения поверхность Энцелада крайне сложна, на основании фотоматериалов можно идентифицировать три наиболее характерных типа рельефа: в южной приполярной области выделяются глубокие трещины протяженностью более ста километров, есть древние области со следами многочисленных ударных событий, а третий тип поверхности — участки, характеризующиеся малой степенью кратерированности, выровненные, вероятно, вследствие высокой интенсивности внутренних геологических процессов. Традиционно такое разделение связывают с приливными воздействиями центрального тела на спутник. В настоящей работе были проанализированы данные оптических наблюдений Энцелада (ОНЭ), полученные космической миссией Кассини-Гюйгенс [4], что позволило создать структурную модель Энцелада.

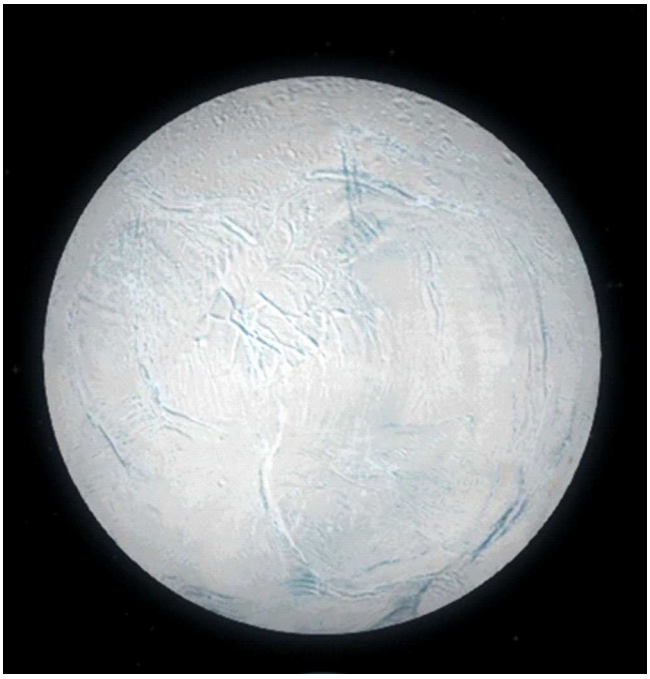

Рис. 1. Спутниковый снимок спутника Сатурна Энцелада.

Двенадцать наблюдательных инструментов орбитального аппарата Кассини использовались для выполнения сложного научного эксперимента. За период выполнения своей миссии Кассини произвел ряд сближений с Энцеладом за период 2004–2017 гг. При этом получены разнородные типы данных, включая радиометрические и оптические наблюдения. Первые в дальнейшем применялись для изучения гравитационного поля, вторые — для исследования поверхности спутника и определения

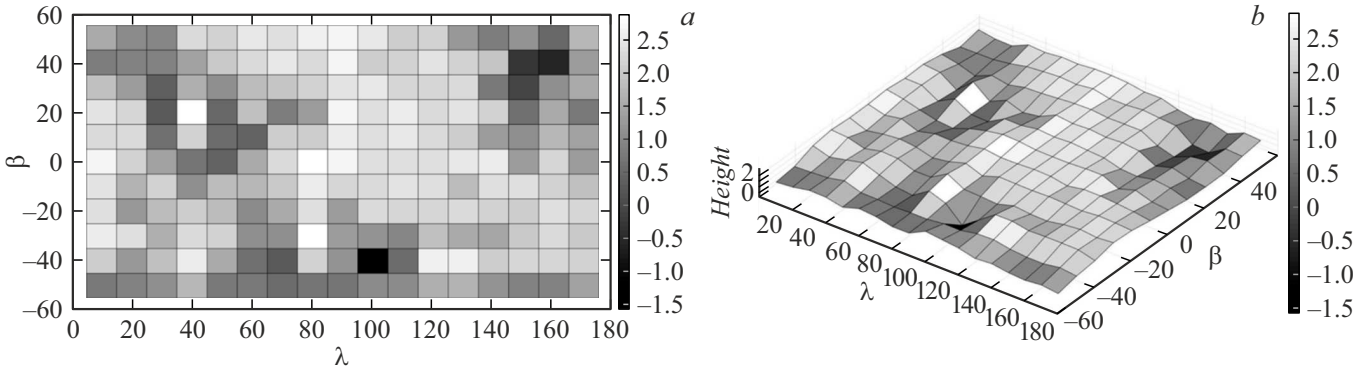

Рис. 2. Рельеф поверхности Энцелада при усреднении высот с шагом $10 \times 10^\circ$ в $2D$- и $3D$-форматах от 0° до 180° по долготе и от 60° до -60° по широте.

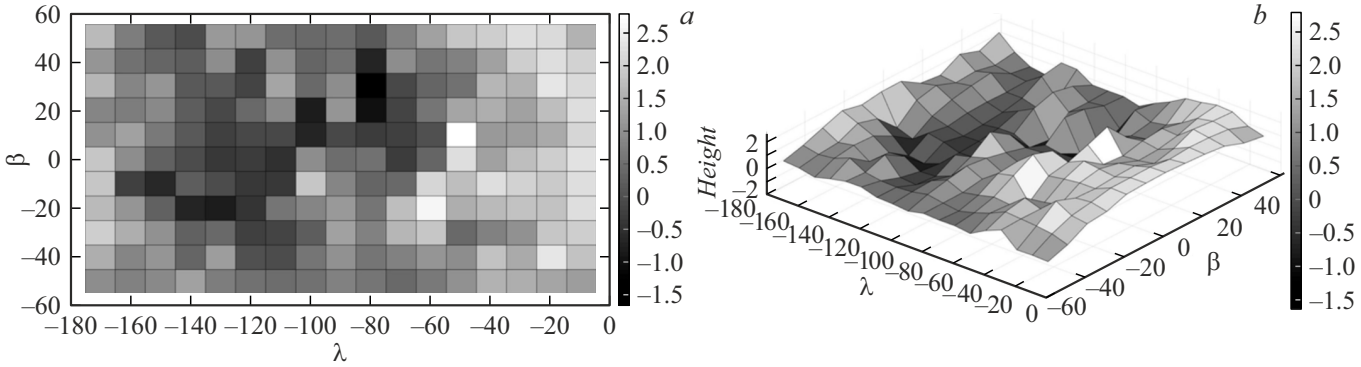

Рис. 3. Рельеф поверхности Энцелада при усреднении высот с шагом $10 \times 10^\circ$ в $2D$- и $3D$-форматах от -180° до 0° по долготе и от 60° до -60° по широте.

параметров его вращения [5]. Оптические снимки были получены монохроматической узкоугольной камерой (NAC) и широкоугольной камерой (WAC) с пиксельным масштабом поверхности от 3 до 14 km. Мы использовали топографию Энцелада, полученную в [5] и сведенную с помощью стереофотоклинометрии в единую систему итеративным методом. Дальнейшие этапы исследования альтиметрии включали следующее. В качестве модели, описывающей топографические особенности Энцелада, альтиметрическая функция представлялась в виде ряда сферических функций в регрессионной форме [6]:

$$h(\lambda,\beta)=\sum_{n=0}^{N}\sum_{m=0}^{n}\left(\bar{C}_{nm}\cos m\lambda+\bar{S}_{nm}\right)\sin m\lambda\cdot\bar{P}_{nm}(\cos\beta)+\varepsilon, \tag{1}$$

где λ, β — сферические селенографические координаты долгота и широта; C_{ik}, S_{ik} — нормированные амплитуды гармоник; P_{ik} — функции Лежандра; ε — случайная ошибка регрессии.

Решение системы (1) для модели макрофигуры Энцелада выполнено с помощью регрессионного моделирования. При оценке коэффициентов C_{ik}, S_{ik} использовались робастные статистические показатели. При редукции данных использовался контроль соблюдения основных условий метода наименьших квадратов, и выполнялись процедуры адаптации в случае их нарушения. Как базовый математический подход использовались методы Хаусхолдера и Гаусса–Жордана. В результате с использованием программного пакета SURFER построена макромодель Энцелада.

На рис. 2 и 3 приводятся двухмерные и трехмерные диаграммы, демонстрирующие средние значения высот для областей размером $10^\circ \times 10^\circ$.

Структурный анализ $3D$-модели поверхности в пределах от 0° до 180° по долготе и от 60° до -60° по широте позволил выделить высотные максимум и минимум: $H_{\max} = 2.88$ km (координаты точки по селенографической широте и долготе: $\beta = -30^\circ$, $\lambda = 80^\circ$) и $H_{\min} = -1.58$ km (координаты точки по селенографической широте и долготе: $\beta = -40^\circ$, $\lambda = 100^\circ$).

Структурный анализ $3D$-модели (рис. 3) поверхности Энцелада в пределах от -180° до 0° по долготе и от 60° до -60° по широте выделил максимум и минимум по высоте в км $H_{\max} = 2.7900$ (координаты точки по селенографической широте и долготе: $\beta = 10^\circ$, $\lambda = -50^\circ$) и $H_{\min} = -1.69$ (координаты точки по селенографической широте и долготе: $\beta = -40^\circ$, $\lambda = 80^\circ$).

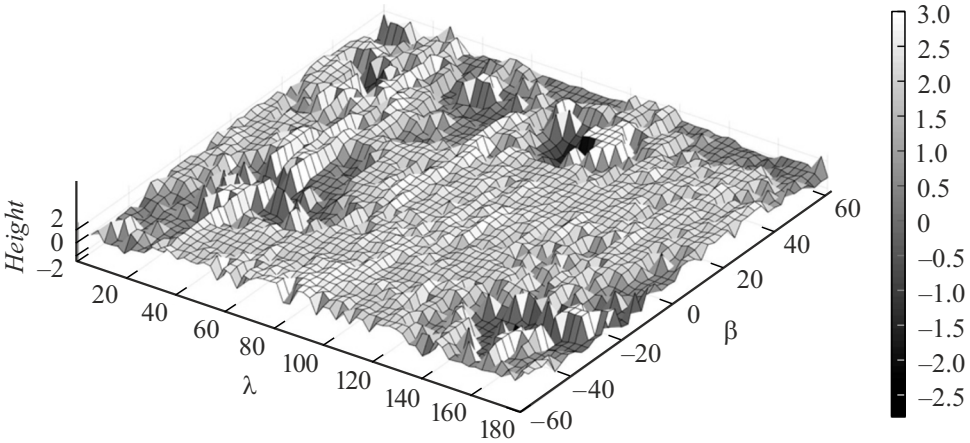

Рис. 4. 3*D*-модель спутника Сатурна Энцелада.

На рис. 4 приведена 3*D*-модель спутника Сатурна, созданная с использованием программного алгоритма, основанного на разложении альтиметрических данных спутниковых наблюдений по сферическим функциям.

Проведя анализ 3*D*-модели спутника Сатурна Энцелада (рис. 4), можно видеть, что в областях от 0° до 40° и от −60° до 0° по долготе и широте соответственно, а также от 0° до 80° и от 20° до 60° и от 140° до 180° и от −60° до 0° наблюдается неровная горная структура местности, в остальных регионах распространен более спокойный и ровный рельеф.

Следует отметить, что 3*D*-модели, приведенные на рис. 2–4, отличаются степенью детализации и рис. 2 и 4 охватывают другой диапазон поверхности в отличие от рис. 3.

По результатам исследования приведенных в работе диаграмм можно рекомендовать как наиболее благоприятную для посадки на спутник Сатурна область, которая находится в пределах от 15° до 25° широты и от −115° до 125° долготы. Безопасная посадка космического аппарата также может быть произведена в области, заключенной между широтами от −30° до −55° и долготами от −148° до 155°.

Подводя итоги, необходимо отметить, что:

1) Энцелад является шестым по величине естественным спутником Сатурна и очень близок по размеру к Титану. Следует напомнить, что Титан является крупнейшим спутником Сатурна, имеющим атмосферу, и единственным, кроме Земли, телом в Солнечной системе на котором имеется жидкостная составляющая. Также Энцелад имеет самую большую отражательную поверхность среди всех небесных тел Солнечной системы, поэтому слабо нагревается под действием солнечного излучения. Поверхность спутника имеет достаточно разноплановую структуру: области с кратерами, массивы, подобные горным, и выровненные по рельефу зоны;

2) для осуществления геологических экспериментов непосредственно на поверхности Энцелада необходим более продвинутый уровень научного оборудования, проведение подобных исследований ведущими космическими агентствами в данный момент не планируется;

3) опираясь на полученные результаты, можно отметить, что вариации рельефа Энцелада, а также распределение топографических особенностей, ассоциированных с импактными событиями, служат подтверждением гипотезы о его относительно молодом периоде образования.

На основе результатов исследования поверхность Энцелада можно разделить на три категории: области, содержащие ударные кратеры (что следует из анализа спутниковых изображений рис. 1), зоны с неровным рельефом и участки с минимальными неровностями. Полученные результаты подтверждают комплексность структуры поверхности спутника: значительные перепады высот и разломы могут свидетельствовать о сравнительно недавнем формировании некоторых форм рельефа и эволюционном обновлении поверхности.

3*D*-модель Энцелада будет использована для изучения астрофизических параметров [7,8] и структуры спутника при разработке миссий к Энцеладу и для построения теорий эволюции системы Сатурна и Солнечной системы в целом.

Финансирование работы

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета („ПРИОРИТЕТ-2030“).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] C.C. Porco, P. Helfenstein, C. Thomas, A.P. Ingersoll, J. Wisdom, R. West, G. Neukum, T. Denk, R. Wagner, T. Roatsch, S. Kieffer, E. Turtle, A. McEwen, T.V. Johnson, Rathbun, J. Veverka, D. Wilson, J. Perry, J. Spitale, A. Brahic, J.A. Burns, A.D. DelGenio, L. Dones, C.D. Murray, S. Squyres. Science, **311** (5766), 1393 (2006). DOI: 10.1126/science.1123013

[2] S. Iess, D.J. Stevenson, M. Parisi, D. Hemingway, R.A. Jacobson, J.I. Lunine, F. Nimmo, J.W. Armstrong, S.W. Asmar, M. Ducci, P. Tortora. Science, **344** (6179), 78 (2014) DOI: 10.1126/science.1250551

[3] J.H. Waite, C.R. Glein, R.S. Perryman, B.D. Teolis, B.A. Magee, G. Miller, J. Grimes, M.E. Perry, K.E. Miller, A. Bouquet, J.I. Lunine, T. Brockwell, S.J. Bolton. Science, **356** (6334), 155 (2017). DOI: 10.1126/science.aai8703

[4] D.L. Matson, L.J. Spilker, J.P. Lebreton. Space Sci. Rev., **104** (1−4), 1 (2002). DOI: 10.1023/a:1023609211620

[5] R.S. Park, N. Mastrodemos, R.A. Jacobson, A. Berne, A.T. Vaughan, D.J. Hemingway, E.J. Leonard, J.C. Castillo-Rogez, C.S. Cockell, J.T. Keane, A.S. Konopliv, F. Nimmo, J.E. Riedel, M. Simons, S. Vance. J. Geophys. Research: Planets, **129** (1), e2023JE008054 (2024). https://doi.org/10.1029/2023JE008054

[6] A.O. Andreev, Yu.A. Nefedyev, N.Yu. Demina, L.A. Nefediev, N.K. Petrova, A.A. Zagidullin. Astronom. Reports, **64** (9), 795 (2020). https://doi.org/10.1134/S1063772920100017

[7] A.O. Andreev, E.N. Akhmedshina, L.A. Nefedyev, Yu.A. Nefedyev, N.Yu. Demina. Astronomy Reports, **65** (5), 435 (2021). DOI: 10.1134/S1063772921060019

[8] M.V. Sergienko, M.G. Sokolova, Y.A. Nefedyev, A.O. Andreev. Astron. Rep., **64**, 1087 (2020). DOI: 10.1134/S1063772920120124