

## ЛУННИ ЛАВОВИ ПЕЩЕРИ: НАБЛЮДЕНИЯ, ДОКУМЕНТИРАНЕ И ЕКСПЛОАТАЦИЯ

**Алексей Стоев, Пенка Мъглова, Огнян Огнянов**

*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките  
e-mail: stoev52@abv.bg*

**Ключови думи:** лунен вулканизъм, лунен релеф, лавови пещери, спелеология в лавови пещери на Луната

**Резюме:** Наблюдаваните върху повърхността на Луната (в избрани вулканични региони) срутващи се ивици и отвори често се тълкуват като ерозирани лавови тръби. В доклада е показана възможността да се създават подповърхностни линейни кухини в зоните на лунен вулканизъм. Гравиметрични и радарни изследвания са потвърдили оптичните наблюдения на отворите им и негативните релефни следи. Засега все още няма ясно разбиране за тяхната морфология и генетичните процеси на образуването им. В доклада е описан резултата от сравнителен морфометричен анализ на верижки и отвори от срутени лавови тръби на Луната. Измерването на лунни вериги и отвори върху сателитни изображения, позволяват да се определят размерите на тръбата, дълбочината на залягане, ексцентритета и няколко други морфометрични параметъра. Получените данни показват, че лунните лавови тръби са с до 3 порядъка по-обемни, отколкото тези на Земята. Това прави Луната изключителна цел за подповърхностно спелеолошко изследване и потенциално заселване в широките защитени и стабилни среди на лавовите тръби.

## LUNAR LAVA CAVES: OBSERVATIONS, DOKUMENTATION AND EXPLOITATION

**Alexey Stoev, Penka Muglova, Ognyan Ognyanov**

*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences  
e-mail: stoev52@abv.bg*

**Keywords:** Lunar volcanism, Lunar relief, Lava caves, Speleology in lava caves on the Moon

**Abstract:** Collapse streaks and vents observed on the surface of the Moon (in selected volcanic regions) are often interpreted as eroded lava tubes. The report shows the possibility of creating subsurface linear cavities in areas of lunar volcanism. Gravimetric and radar studies have confirmed optical observations of their openings and negative relief traces. So far, there is still no clear understanding of their morphology and the genetic processes of their formation. The report describes the result of a comparative morphometric analysis of chains and holes from collapsed lava tubes on the Moon. Measurement of lunar chains and apertures on satellite images allows determination of tube dimensions, embayment depth, eccentricity, and several other morphometric parameters. The obtained data show that the lunar lava tubes are up to 3 orders of magnitude more voluminous than those on Earth. This makes the Moon an outstanding target for subsurface speleological exploration and potential settlement in the vast protected and stable environments of lava tubes.

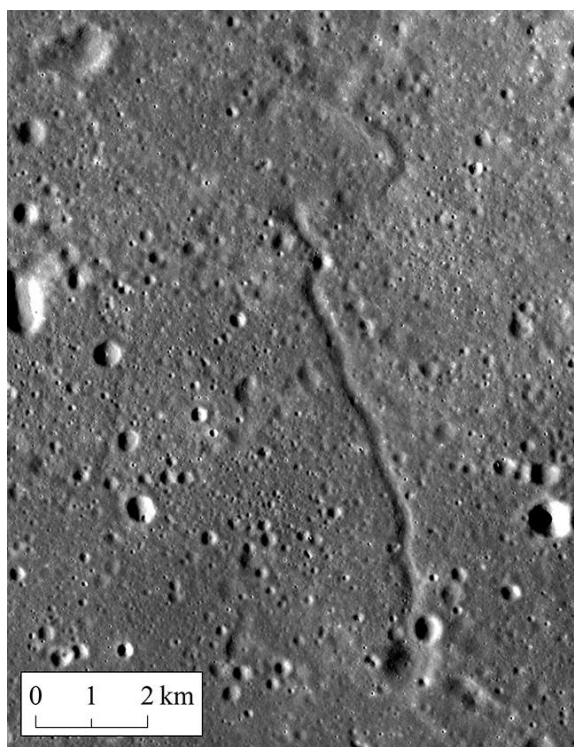
### **Въведение**

През последното десетилетие се наблюдава засилен интерес в изследването на Луната, с множество публикации свързани с лунната геология, базирани на изображения и данни, получени от спътници. От друга страна, сравнителната планетология позволява анализ и интерпретация на геоложки характеристики на различни планети и техните естествени спътници. Сравнителния анализ може да се направи както към морфологични структури, така и към процеси които ги образуват. При това се отчитат разликите в планетарните параметри като

гравитация, температура, налягане, плътност и състав на атмосферата, геоложка история. На съвременния етап повърхностите на планетите от земен тип са документирани с висока разделителна способност, мултиспектрални камери, както и мисии на роувъри. Въпреки това, много малко е информацията за наличието на структури и образувания под повърхността им, както и на кухини в кората на нашият естествен спътник - Луната.

### Теоретични постановки

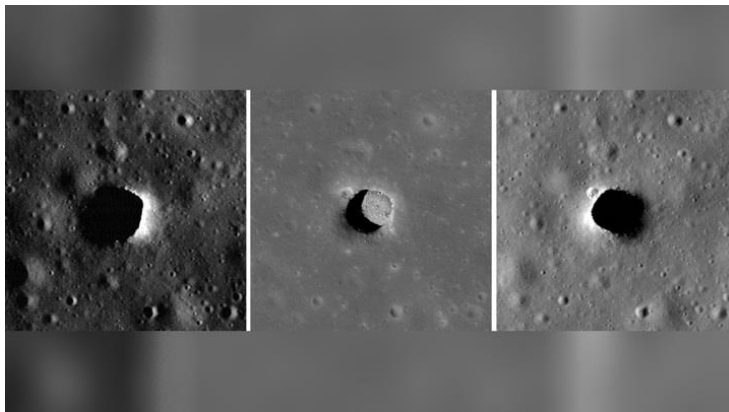
Още преди повече от петдесет години планетарни геолози са идентифицирали особени морфологични структури, подобни на понори, в няколко вулканични области на Луната (Carr, 1973). Тъй като, тези образувания нямат характерния по-висок ръб на кратера и отлагания от изхвърлени частици (които обикновено се свързват с кратери, получени при космически удар), се смята, че те представляват срутвания на подповърхностни кухини. Понеже повечето от тези образувания се намират върху потоци от лава или по стените на вулканични конуси, те много рано са били свързани с предполагаемото присъствие на „лавови тръби“. Тръбите от лава са добре познати от земните вулкани благодарение на вулканологични и спелеологични изследвания (Theinat K., et al., 2020). Идеята за срутване на лавовата тръба е предложена едновременно от няколко автори, за да се обясни образуването на криволичещи лунни бразди. Паралелно с това, същите автори са показали, че на Луната не всички понори могат да бъдат пряко свързани с лавовите тръби. Вероятно наличието на други вулканични и тектонични процеси водят до образуването на тези интересни релефни образувания (Sauro F., et al., 2020). Следователно потенциалното присъствие на все още непокътнати тръби от лава под повърхността на Луната се дебатират малко повече от петдесет години.



Сн. 1. Криволичещи лунни бразди, чийто произход е свързан със срутването на лавови тръби под повърхността на Луната *Фотография: NASA/GSFC/Arizona State University.*

Получени са изображения с висока разделителна способност на повърхността на Луната от една от камерите на Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC NAC, с разделителна способност 0,5 м/пиксел). Това позволи идентифицирането на особени отвори, характеризирани се с вертикални или надвиснали стени, наречени „обеци“, често предлагани като кандидати за „вход в пещера“ (Coombs, C. R., & Hawke, B. R., 1992). Повече от 300 от тези потенциални пещерни входи са идентифицирани на Луната. Някои от тях се намират в изолирани райони, но други са свързани с вълнообразни релефни линии на Луната. Докато в понорите остатъците от срутването могат да възпрепятстват достъпа до непокътнатата лавова тръба, то тези линии предоставят директен достъп до тавана на прилежащите и все още цели лавови тръби. Такива входи са разположени във вулканичното

плато на Marius Hills на Луната (Ashley, J., et al., 2011). Използването на роботизирани технологии ще позволи да се изследват стратиграфски профили на лавовите потоци от отвори. Така ще могат да се съберат нови данни за образуването на базалтовите плата на Луната. Отворени сегменти от лавови тръби биха могли да осигурят стабилни убежища за човешките местообитания, защитени от космическа радиация и микрометеоритни удари върху Луната. Тези кухини могат да имат размери, подходящи за организиране на постоянна лунна база, осигуряваща потенциален достъп до няколко ресурса, включително летливи вещества и евентуално воден лед, уловен в пещерни седименти.



Сн. 2. Лунната пещера в района на Marius Hills. Снимката е направена от орбиталната сонда LRO  
*Фотография: NASA/GSFC/Arizona State University.*

Неодавна група учени се опитаха да оценят размерите на непокътнати фрагменти от лавова тръба под повърхността на Луната, използвайки радарна система (Qiu X., Ding C., 2023). Други ги оцениха по дефицита на гравитационна маса чрез мисията Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) (Spudis P. D., 2015). Изследванията потвърждават, че подповърхностните кухини със сигурност съществуват, но наличната ограничена разделителна способност на инструментите е позволила да се извлече само частична информация за техния размер, дълбочина и форма. От друга страна - на Земята - няколко морфологични и генетични изследвания са извършени върху тръби от лава в сухоземни щитови вулкани. Стотици километри лавови тръби и свързаните с тях срутвания и отвори са картографирани от спелеологични организации. Подробни морфологични описания и топографски проучвания на километрични тръби са достъпни благодарение на спелеологичните проучвания на Хавай (САЩ) (Bunnell, 2008), Канарските острови (Испания), Исландия, Сицилия (Италия) и много други лавови полета в света (Tomasi I., 2022). Това огромно количество данни може да се използва за сравнителни планетологични изследвания, за да се направят изводи за размерите и морфологията на лавовите тръби на други планети и техни спътници (в частност Луната).

Въпреки че има морфологичните прилики на няколко срутени вериги от лавови тръби и отвори по тях на Луната с литографските характеристики на земната лава, до днес подробно морфологично и морфометрично сравнение между двете планетарни тела все още не е правено. Като се има предвид пряката генетична връзка между срутванията, отворите и лавовите тръби, морфометричният анализ може да се използва за оценка на размерите и общата морфология на непокътнати участъци от тръбата по същата линия на веригата на срутване.

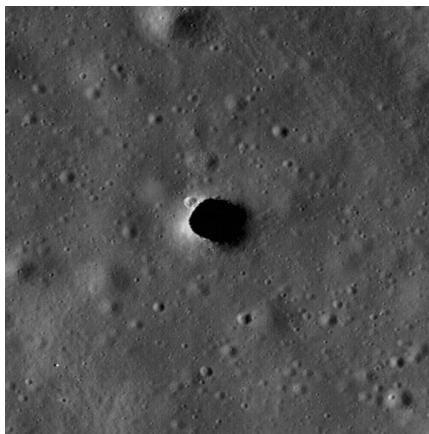
Този преглед и свързаният с него сравнителен анализ показват, че има обективни данни за размера, дълбочината и морфологията на кандидатите за лунни лавови тръби. Той, също така, предоставя нова информация за техните генетични връзки с вулканологията и възможността за бъдещо обитаване. Тези данни съставят основата за планиране на бъдещи роботизирани и човешки мисии за изследване на тези подповърхностни лунни обеми.

### **Генетични механизми и морфологии на лавовата тръба на Земята**

Лавовата тръба, известна още като пиродукт (Werker J. C., 2012), се дефинира като „покрита тръба (тръбопровод) с течаща лава, който може да бъде: активен, дрениран или запушен“. Дължините на лавовите тръби на Земята варират от няколко метра до десетки километри. Тяхната ширина и височина варира от 0,5 m до 30 m, като се развиват от няколко сантиметра под повърхността до дълбочина от няколко десетки метра. Тръбите от лава в повечето случаи са подпаралелни на самата повърхност.

### Напречни сечения на лунните лавови тръби

Напречните сечения на пропадания и отвори, свързани с кандидати за лавови тръби на Луната са определени чрез оптични, лазерни и радарни измервания. Повечето от тях се наблюдават като криволичещи валове и понори във вулканични лунни терени. Термините „колапс“ или „яма“ обикновено се използват в литературата по планетарна геология за дефиниране на лунни морфологии, характеризиращи се с потъващи кръгли или елиптични релефни вдлъбнатини, които нямат издигнатия ръб на кратера и отлагания от изхвърляне, типични за удар от метеорит по лунната повърхност.

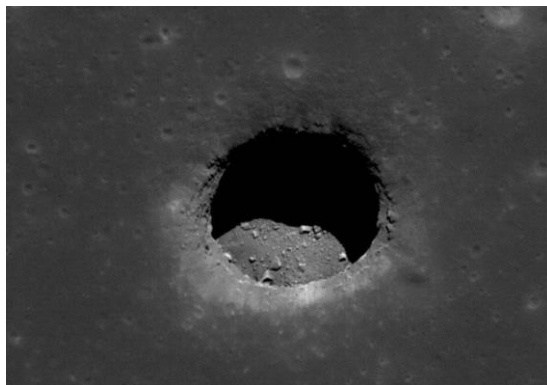


Сн. 3. Отвор в повърхността на Луната, който може да доведе до голяма естествена пещера образувана в лавовия поток *Фотография: NASA/GSFC/Arizona State University.*

Група учени от университета в Аризона дори разработиха специален алгоритъм PitScan, който полуавтоматично търси пещерни отвори на повърхността на Луната, като в хода на наблюденията чрез него бяха открити повече от двеста от тях. Те могат да бъдат разделени на три условни групи:

- повреди на канали от лава, изтичащи по време на вулканични изригвания;
- кухни от лава, образувани от стопилка, появила се в големи кратери от падането на големи астероиди върху повърхността на Луната;
- кухни в лунната кора.

Отвора в предполагаемата тръба от лава можеше да се види на хълмовете на вулканичната планина Мариус, близо до лунния екватор. От лунен орбитален спътник ясно се вижда канал от поток от лава, който се простира от кратера на вулкана на десетки километри. На около 25 km от кратера се вижда отвор в застиналия поток. Възможната хипотеза предполага: а) предизвикан от падането на метеорит или лунотресение, или б) „покривът“ на тръбата се е срутил от само себе си, като сега се вижда дупка с ширина 80 m и дълбочина 45 m. Ширината на потока на мястото на дупката достига 800 m, а нагоре по течението достига почти един километър, така че може да има тунел, който е гигантски по земните стандарти на вулканичните пещери.



Сн. 4. Лунна вертикална тръба в лава (Повърхностната кора на потока от лава се втвърдява, но движението на лавата продължава вътре. В крайна сметка се образува каменна тръба, която може да се простира на няколко километра. При намалена гравитация тръбите могат да бъдат по-дълги и по-просторни, отколкото на Земята.)

## **Морфология на пропаданията, свързани със стабилността на лавовата тръба и механизмите на образуването ѝ**

Примери от земен вулканизъм могат да помогнат за определяне на морфометричната връзка между веригите на пропадане на тръбата и непокътнатите сегменти от лавови тръби на Луната. При земните лавови тръби (при поглед отгоре), те се виждат като елипси, удължени по посока на развитие на лавовата тръба и тяхната ширина ( $A$ ) се доближава до средната ширина на подлежащата лавова тръба ( $A_1$ ) на непокътнатите сектори. Въпреки това, в случай на преплетени лавови тръби, веригите на срутване следват развитието на най-плитката част на лавовата тръба и са свързани с морфометрични параметри на ямата/понора която се наблюдава. През последните години морфометрията се използва и като инструмент за сравняване на генетично свързани характеристики на различни планетарни тела (De Toffoli et al., 2019).

### **Морфометрия на земни случаи на срутени лавови тръби**

Лавовите тръби, измерени върху сухоземни щитови вулкани, имат елипсовидна форма с дълга ос, успоредна на посоката на развитие на подповърхностните тръби. По протежение на същата верига, малките оси на и отворите (перпендикулярни на развитието на подповърхностната тръба) показват сравнима  $A$ , която е представителна за ширината на подлежащата тръба от лава. Морфометричните данни за  $A$  показват среден размер от 7,3 m. Морфометричните характеристики на срутени вериги над лавови тръби са израз на основните процеси и параметри, съществуващи при образуването на лавовата тръба. Това са скоростта на изтичане, наклонът, реологията и движещите сили като гравитацията или газово налягане. Независимо от това, известно е от наземни примери, че възникват важни морфологични разлики между образуването на кора над лавовия канал или плитките/дълбоките надувни тръби от лава (Coombs, C. R., & Hawke, B. R., 1992).



Сн. 5. Лавова тръба в щата Калифорния, САЩ (вижда се характерната слоистост и минерализация на стените на тръбата, отзвук от движението на лавата в тръбата)

### **Бъдещи космически мисии за откриване и изследване на тръби от лава**

Сравнителният анализ и морфологичните прилики, представени в този кратък преглед, показват голям потенциал за изследване на огромните лавови тръби на Луната. Тези резултати обаче се основават главно на сравнение с наземни случаи на вулканизъм, докато преки доказателства за съществуването им на Луната все още не са получени. Освен радарните сигнали и гравитационните аномалии, открити от GRAIL (Chappaz et al., 2017), все още нямаме ясно разбиране за лавовата тръба на Луната като геолошко образование, микро и макро релеф и методи и средства за физическото им проучване.

### **Изводи**

В заключение, трябва да кажем че морфометричните изследвания на лавовите тръби показват срутванията на земните вериги от лавови тръби и поразителните морфологични прилики с тези, предложени от редица изследователи като кандидати за лавови тръби на Луната. Въпреки това, размерите и морфометричните параметри, както и съотношението ширина/дълбочина  $A-H$  имат специфичен диапазон, всеки от които се отнася до Земята или Луната. Обемите на срутванията, отворите и свързаните с тях тръби показват нарастващи

размери при преместването ни от Земята на Луната. Това показва, че проблемът за тяхното откриване, картиране, каталогизиране и физическо изследване е актуален и със сериозна перспектива за спелеоложски проучвания при бъдещите лунни мисии.

### Литература:

1. Carr, M., Volcanism on Mars., *Journal of Geophysical Research* , Volume 78, Issue 20 p. 4049–4062
2. Theinat, K., Modiriasari A., Bobet A., Melosh H., Dyke Sh., Julio Ramirez J., Amin Maghareh A., Gomez D., Lunar lava tubes: Morphology to structural stability., *Icarus.*, Volume 338, 1 March 2020, 113442
3. Sauro, F., Pozzobon R., Massiron M., Berardinis P., Santagata T., Waele J., Lava tubes on Earth, Moon and Mars: A review on their size and morphology revealed by comparative planetology., *Earth-Science Reviews.*, Volume 209, October 2020, 103288
4. Coombs, C. R., & Hawke, B. R. (1992). A Search for Intact Lava Tubes on the Moon: Possible Lunar Base Habitats. *The Second Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century* (pp. 219–229). Houston, Texas: NASA.
5. Ashley, J., Robinson, M., Hawke, B., Boyd, A., Wagner, R., & Speyerer, E. (2011). Lunar Caves in Mare Deposits Imaged by the LROC Narrow Angle Cameras. *First International Planetary Cave Research Workshop*. Carlsbad, NM.
6. Qiu X., Ding C., Radar Observation of the Lava Tubes on the Moon and Mars. *Remote Sens.* 2023, 15, 2850. <https://doi.org/10.3390/rs15112850>
7. Kaku, T.; Haruyama, J.; Miyake, W.; Kumamoto, A.; Ishiyama, K.; Nishibori, T.; Yamamoto, K.; Crites, S.T.; Michikami, T.; Yokota, Y.; et al. Detection of Intact Lava Tubes at Marius Hills on the Moon by SELENE (Kaguya) Lunar Radar Sounder. *Geophys. Res. Lett.* 2017, 44, 10155–10161.
8. Spudis, P. D., Chapter 39—Volcanism on the Moon. In *The Encyclopedia of Volcanoes*, 2nd ed.; Sigurdsson, H., Ed.; Academic Press: Amsterdam, The Netherlands, 2015; pp. 689–700.
9. Bunnell, D., *Caves of Fire: Inside America's Lava Tubes.*, Published by National Speleological Society (2008) ISBN 10: 1879961318
10. Tomasi, I., Massironi, M., Meyzen, C. M., Pozzobon, R., Sauro, F., Penasa, L., et al. (2022). Inception and evolution of La Corona lava tube system (Lanzarote, Canary Islands, Spain). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127, e2022JB024056. <https://doi.org/10.1029/2022JB024056>
11. Werker, J. C., Welch, S. M., Thompson, S. L., Sprungman, B., Hildreth-Werker, V., Frederick, R. D., et al. (2003). *Extraterrestrial caves: Science, habitat, and resources (a NIAC phase I study)*. Environmental Sustainability Publications.
12. Barbara DeTofoli, Riccardo Pozzobon, Francesco Mazzarini, Csilla Orgel, Matteo Massironi, Lorenza Giacomini, Nicolas Mangold, Gabriele Cremonese., Estimate of depths of source fluids related to mound fields on Mars., *Planetary and Space Science.*, Volume 164, 1 December 2018, pp. 164–173
13. Coombs, C. R., & Hawke, B. R. (1992). A Search for Intact Lava Tubes on the Moon: Possible Lunar Base Habitats. *The Second Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century* (pp. 219–229). Houston, Texas: NASA.
14. Chappaz, L., R. Sood, H. J. Melosh, K. C. Howell, D. M. Blair, C. Milbury, and M. T. Zuber (2017), Evidence of large empty lava tubes on the Moon using GRAIL gravity, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 105–112, doi:10.1002/2016GL071588. American Geophysical Union.