

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2023.i2.05>

## On the use of the finite element method in the study of the stress-strain state of the contour of the Annie Cave on Mount Arsia

R.B. Baymakhan<sup>1</sup>, A.N. Muta<sup>1\*</sup>, A. Tileikhan<sup>1</sup>, K.C. Kozhogulov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kazakh National Women's Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Institute of Geomechanics and Subsoil Development of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan

\*Corresponding author: [mutita@mail.ru](mailto:mutita@mail.ru)

**Abstract.** People who have visited the surface of Mars for the first time cannot survive in conditions of such dangers as radiation, micrometeorites and dust storms. But we offer the caves found on this Mars as a way to use them as a natural refuge from these environmental hazards. The gravitational field on the surface of Mars is about three times weaker than on Earth, and the magnetic field is too weak. Therefore, creatures that have left Earth, including humans, can live on the surface of Mars for only 30-40 seconds. Even the most powerful spacesuit can save a person's life for just a few hours. Martian caves weaken solar radiation almost three times and do not let it inside. Therefore, the study of Martian caves, conducting scientifically based research to make them the first habitat, is an urgent problem today. Therefore, it is advantageous to use the mountain caves of Mars as an underground habitat. Since atmospheric protection is minimal at high altitudes, scientific studies of the strength and stability of the inner edges to Martian gravity are carried out to turn these caves into living quarters, such as mines, tunnels. Under the influence of various forces (gravitational, temperature, low-current, tectonic, etc.) of such structures on Mars, a mechanical and mathematical model is being developed to study the strength of cave dwellings, habitats.

**Keywords:** Mars, rover, cave, soil, threshold element method, deformed state under stress.

### 1. Введение

Мы знаем, что наши первые предки появились на земле два миллиона лет назад. Исследование археологов показало, что древние люди укрывались в пещерах. Однако пещера использовалась не только для укрытия, но и для защиты от внешней среды, в частности, от ветра, дождя и снега, а также при необходимости для укрытия от хищников и врагов.

Политика освоения и прямой колонизации Марса насчитывает более 10 лет. Главой небольшой частной голландской организации Mars One, выступившей с идеей освоения Марса, взявшей на себя реализацию, стал Бас Лансдорп. Согласно плану Mars One, дорожный билет для тех, кто собирается на Марс, будет продаваться только в одном направлении. Билет на возвращение на землю пока не предусмотрен. Тем не менее, количество посетителей превысило 2000 человек. Однако 15 января 2019 года этот проект был приостановлен в связи с принятием решения суда о банкротстве коммерческой компании.

В настоящее время над этим проектом работает руководитель частной космической компании SpaceX Илон Маск. Пообещав доставить первых жителей на Марс к 2030 году, он поделился планом строительства первого марсианского города. Количество первых посещений составляет 200 человек. Билет только в одну сторону.

На поверхности Марса невозможно выжить в условиях таких опасностей, как радиация, микрометеориты и пыльные бури. Но теперь пещеры, обнаруженные на Марсе, планируется использовать в качестве естественного убежища от этих экологических опасностей. Грави-

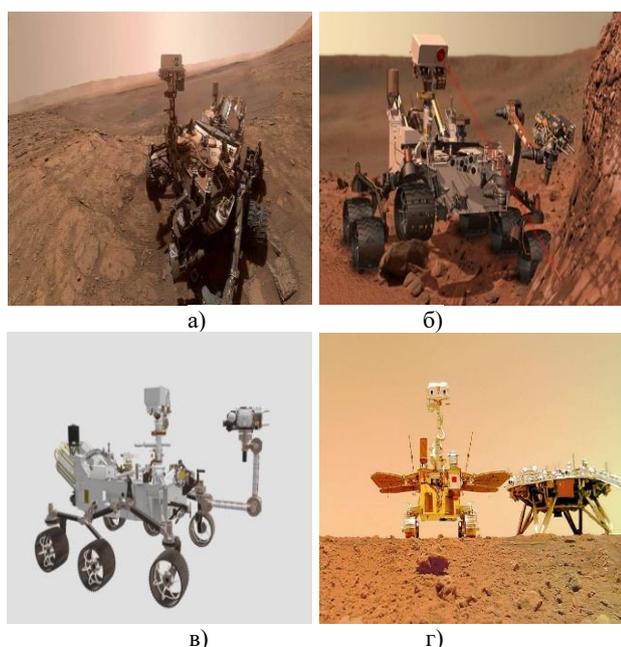
тационное поле на поверхности Марса примерно в три раза слабее, чем на Земле, а магнитное поле слишком слабое. Существа, покинувшие землю, в том числе люди, могут жить на поверхности Марса всего 30-40 секунд. Даже самый мощный скафандр может спасти жизнь человека всего на несколько часов. Марсианские пещеры почти втрое ослабляют солнечную радиацию и не пропускают ее внутрь. Изучение марсианских пещер, проведение научно обоснованных исследований, чтобы сделать их первой средой обитания, является актуальной проблемой сегодня [1].

### 2. Марсоходы и посадочные модули на Марсе

На Марсе в настоящее время работают 3 марсохода: Curiosity, Perseverance и Zhurong (рисунок 1а, в, г). Красная планета привлекательна по многим причинам: ее история похожа на историю Земли: гравитация на Марсе составляет 38% Земли, что достаточно для адаптации людей и имеет защитную атмосферу, даже если она тонкая.

Прежде чем отправиться на Марс, мы должны знать, что нужно, чтобы разбить лагерь и прожить там долгое время. Чтобы собрать эту информацию, астрономы отправили марсоходы, посадки и орбиты, которые сканируют атмосферу Марса. Они собирают и анализируют поверхностный материал Марса, чтобы объединить его прошлое, а также его потенциал для жизни и выживания.

Поскольку связь между Марсом и Землей занимает от 4 до 20 минут, ученым пришлось внедрить искусственный интеллект в этих роботов, чтобы чувствовать препятствия и плавно перемещаться по местности.



**Рисунок 1.** а) Марсоход НАСА Curiosity, б) Художественная концепция Curiosity, которая стреляет лазером в марсианский камень, в) Марсоход НАСА Perseverance, г) Марсоход Zhurong с посадочным модулем. **Источник:** [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/msl/images/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/msl/images/index.html)

Давайте углубимся в текущие миссии по исследованию Марса, а также в предыдущие марсоходы, которые приземлились на Красной планете.

Curiosity - это марсоход размером с автомобиль, который был запущен со станции ВВС на мысе Канаверал 26 ноября 2011 года и приземлился на Марсе 6 августа 2012 года.

Основной причиной отправки Curiosity на Марс было понимание потенциала микробной жизни Марса. С поверхности Марса были отправлены рыхлые почвы и бури, марсианские породы, для анализа их структуры и состава. Прямоугольная «голова» Curiosity-это лазер Curiosity, который он научился использовать автономно. Сам выбирает камень, стреляет острым лазером и анализирует полученный пар (рисунок 1б).

Curiosity обнаружил, что 3.5 миллиарда лет назад в кратере Гейла могла существовать жизнь, когда на Красной планете была более плотная атмосфера, чем сегодня. Марсоход также обнаружил, что остатки древнего озера, известного как Йеллоунайф-Бэй, не были слишком кислыми или слишком солеными [2].

Что Curiosity еще не обнаружил, так это обилие метана. Но марсоход пережил пыльную бурю, которая охватила всю планету и уменьшила количество солнечного света на 97%, поэтому есть еще большие надежды на множество открытий.

Последним марсоходом НАСА в марсианском мире является марсоход Perseverance, запущенный 30 июля 2020 года и приземлившийся на Марс 18 февраля 2021 года.

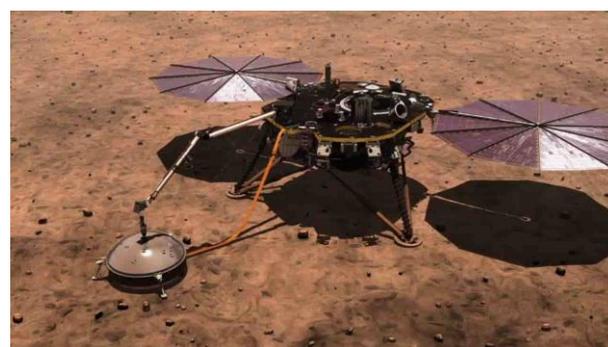
Поиск признаков прошлой жизни на Марсе, а также сканирование Красной планеты на предмет пригодности для жизни людей были основной целью миссии марсохода. Для достижения этой цели Perseverance тестирует свою способность добывать кислород из марсианской

атмосферы и находить потенциальные области подземных вод для будущих человеческих экспедиций.

Хотя важных научных открытий марсохода Perseverance еще нет, марсоход записал 16-минутный звук движения Марса.

22 мая 2021 года марсоход «Zhurong» приземлился на поверхности Марса (равнина Утопия). Это первая успешная миссия Китая на Марс. Марсоход оснащен комплектом оборудования для изучения состава поверхности Красной планеты, ее магнитного поля, геологических особенностей, а также распределения ледяной воды. Короче говоря, марсоход Zhurong пытается узнать больше о том, как Марс выглядел раньше. Zhurong оснащен лазером, который сжигает близлежащие камни для оценки химического состава.

В то время как предыдущие миссии на Марс изучали особенности поверхности Марса, посадочный модуль НАСА InSight провел «первое тщательное обследование» с момента его появления на планете (рисунок 2). Запущенный 5 мая 2018 года и приземлившийся на Марсе 26 ноября того же года, InSight не проанализировал образцы грунта, а внимательно посмотрел на Марс — его кору, ядро и мантию.



**Рисунок 2.** Посадочный модуль НАСА InSight на поверхности Марса. **Источник:** <https://mars.nasa.gov/insight/>

InSight также отслеживал тектоническую активность на Марсе, чтобы обнаружить «марсианские землетрясения» и удары метеоритов.

Цель InSight состояла в том, чтобы понять, как скалистые небесные тела, такие как 4 внутренние планеты нашей Солнечной системы, эволюционировали с момента их образования, изучая "жизненные признаки" планеты, такие как сейсмология и температура.

В первый год InSight обнаружил около 450 марсианских землетрясений. Поскольку на Красной планете нет тектонических плит, как на Земле, ученые считали, что они вызваны вулканически активными регионами.

Хотя магнитное поле Марса, которое когда-то было сильным, сегодня не существует, InSight обнаружил, что магнитное поле в 10 раз сильнее, чем ожидалось, в намагниченных поверхностных породах с момента ранней истории Марса.

### 3. Характер марсианских горных пещер и подземных местообитаний

На Красной планете самый высокий вулкан Солнечной системы - Вулкан Олимп (рисунок 3а). Его высота составляет 26 км. Начиная с миссии космического корабля «Маринер-9» в 1972 году, ученые знали, что вулканические

частицы рельефа покрывают значительную часть поверхности Марса. Эти частицы включают крупномасштабные потоки лавы, обширные лавовые равнины и самые большие из всех известных вулканов Солнечной системы. Вулканическому возрасту Марса около 3.7 миллиарда лет. Кроме того, в вулканических земных районах часто встречаются подземные полости — купола и трубки, выходящие из лавы. В отличие от карстовых пещер, которым тысячи или миллионы лет, вулканические пещеры образовались очень быстро во время извержений и активных разливов лавы [3].

Группа ученых, изучающих фотографии космических кораблей, обнаружила на Марсе пещеры вулканического происхождения, лавовые трубки, которые также встречаются на Земле. Ученые НАСА изучили изображения, сделанные аппаратом Марс Одиссей, и выделили семь структур, которые могут быть пещерами по бокам вулкана Арсия. Ширина входа составляет от 100 до 250 метров; считалось, что глубина достигает не менее 73-96 м (рисунок 3б, в, г, д, е). Неофициально были обнаружены Дена, Хлоя, Венди, Энни, Эбби и Никки, Жанна. Поскольку свет не достигает дна большинства пещер, их глубина может превышать приведенные выше оценки. Дно тела было отмечено глубиной около 130 м. В результате повторного изучения изображений были обнаружены новые «колодцы» [4].

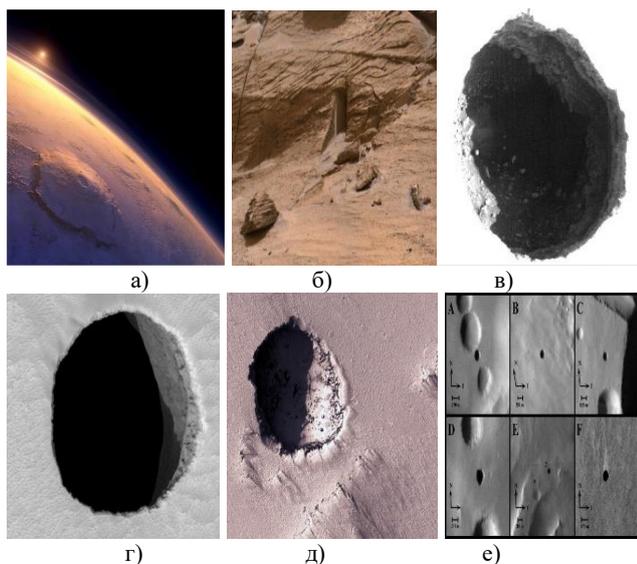


Рисунок 3. а - вулкан Олимп; б, в, г, д, е - горные пещеры Марса, найденные в вулкане Олимп и других сверхвысоких горах Арсия к югу от экватора. Источник: <https://www.jpl.nasa.gov/images/pia09930-temperature-behavior-of-possible-cave-skylight-on-mars>

Поскольку наши планеты похожи, жизнь на Земле и Марсе также возникла в одном сценарии, а это означает, что живые организмы на Земле и Марсе также должны быть похожи друг на друга и иметь одинаковые условия жизни. Если бы Земля потеряла магнитное поле, как Марс, никто не выжил бы, а это означает, что космические радиоактивные лучи уничтожили бы все. Горные пещеры Марса-последняя надежда на настоящий момент. Тонкая атмосфера Красной планеты не может защитить от излучения. Поверхность Марса подвергается воздействию ультрафиолетового излучения Солнца и бомбардируется космическими заряженными частицами, поэтому малове-

роятно, что в верхних слоях грунта есть микробная жизнь или даже сложные органические соединения. Горные пещеры Марса защищают от таких пагубных воздействий, поэтому шансы найти здесь хотя бы живого человека резко возрастут [5].

Марсианская пыль облучалась тысячи лет, и даже в бункере от нее будет трудно спрятаться, потому что ее мельчайшие частицы легко проникают в любую трещину. Во время пылевых бурь он попадает в пещеры и уносит с собой радиоактивные частицы в подземный мир [6].

Итак, на Марсе есть несколько рекомендуемых типов строительных технологий, которые подходят для долгосрочной жизни. Рассматриваются два основных типа: подземная среда обитания Марса и поверхностная среда обитания Марса (таблица 1).

Таблица 1. Сравнение понятий среды обитания

Преимущества	Недостаток
<b>Природные пещеры</b>	
доступные радиационные защита	определенное место
раскопки не нужны	ограничение по площади посадки
легкий, быстрый дизайн	ограничение мобильности и доступа к наземным ресурсам
структурная стабильность	фиксированный вход
научный труд	требуется предварительная миссия
расширяется в сети пещер	
доступ к подземным ресурсам	
возможность глубокого бурения	
постоянная температура окружающей среды	
<b>Бункеры ручной работы</b>	
гибкость позиционирования	потребность в толстом реголите/бериллие, который трудно защитить от радиации
легко расширяется	трудоемкость
легкая конструкция	операции высокого риска
модульные секции	угроза разрушения среды обитания из-за снижения давления
	высокие затраты из-за большой массы

Для сравнения здесь рассматриваются бункеры, изготовленные из бериллея для радиационной защиты наземных местообитаний. Но это требует больших средств. Очевидно, что из-за дорогостоящего проекта это займет годы. Поэтому выгодно использовать горные пещеры Марса в качестве подземной среды обитания. Из-за низкой атмосферной защиты на больших высотах ведутся научные исследования прочности и устойчивости внутренних краев этих пещер к марсианской гравитации, чтобы превратить их в жилую среду, такую как шахта, туннель. Будет разработана механико - математическая модель исследования прочности пещерных жилищ, местообитаний под влиянием различных сил (гравитационных, температурных, хотя и слабых тектонических и др.) таких сооружений [7].

Это исследование показывает, что вполне возможно использовать естественные пещеры для первого марсианского поселения. Исследования Марса людьми и роботами, как для жилых, так и для научных целей, играют большую роль в пещерах. Несколько типов горных пещер Марса, большинство из которых являются доступ-

ным вариантом для жилых помещений. Он также обеспечивает достаточный объем для размещения среды обитания, известные свойства, понятные из исследования, простую структуру, термическую стабильность, доступность и предсказуемое местоположение.

Преимущества использования марсианских горных пещер включают защиту от радиации, пыльных бурь и поверхностных опасностей крошечных метеоритов при заселении первых людей. Следовательно, возможно использование тонкостенных и легких конструкций среды обитания, таких как надувные конструкции, а также более широкий доступ к системам, требующим дополнительной защиты на поверхности.

#### 4. Об использовании метода конечных элементов при изучении напряженно-деформированного состояния контура пещеры Энни на горе Арсия

Рядом с горой Арсия, одним из самых больших вулканов на планете Марс, были обнаружены пещеры с отверстиями шириной от 100 до 250 метров. Эти горные пещеры на Марсе могут стать средой обитания для первых людей или могут быть единственной структурой, которая хранит свидетельства микробной жизни прошлого или настоящего.

Люди, впервые посещающие марс, приземляются возле экватора. Это потому, что температура там колеблется от +20 днем и до -60 ночью. В остальных местах от -100, а в окрестностях Южного и Северного полюсов до -180. Жить при такой температуре, фантазировать о работе-это само по себе излишне.

В то время как в северном полушарии вблизи экватора находятся горы Олимп, самая высокая гора во всей Солнечной системе, в Южном полушарии находятся горы Арсия и горные системы, которые в полтора раза выше Эверста Гималаев, совсем близко к экватору. У них уже было обнаружено около 10 естественных пещер, и даже 6 были названы.

Впервые изучение устойчивости и сплоченности пещеры Энни на этой горе Арсия с помощью современного математико-механического моделирования физики.

Методы и модели результатов научных исследований, получаемых на пути исследования прочности и устойчивости марсианских горных пещер, сравниваются с результатами, полученными методами механико-математических исследований изученных подземных сооружений на поверхности земли. Основные ключевые отличия заключаются в том, что на Марсе величина гравитации в 3.2 раза меньше, чем на Земле, тектонические силы также намного меньше. Алгоритмы, которые создаются компьютерные программы также доказываются путем многократного получения результатов, полученных на Земле в качестве тестов.

В модельном плане для изучения напряженных деформационных состояний марсианских пещер используются модели С.Г. Лехницкого, Ж.С. Жанова, Ш.М. Айталиева, Ж.К. Масанова и Р.Б. Баймаханова, которые усовершенствовали область их применения для других направлений. Внутренние поперечные изображения и порталные части марсианских пещер моделируются математически современным сверхмощным численным методом-методом конечных элементов.

Для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) из рисунка 3 выберем варианта пещеры 3г, где четко показаны порталная часть пещеры эллипсoidalного профиля (рисунок 4).

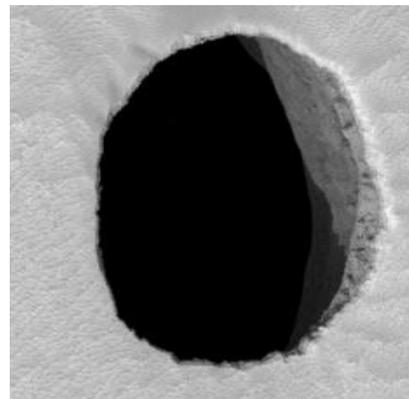


Рисунок 4. Контур марсианской пещеры

Глубина этой пещеры пока неизвестно. Но вдали от портала через несколько метров, можно предположить, что для такого плоского контура выполняется условие плоской деформации. Поэтому мы в первом приближении задачу определения НДС, можем решить, как плоской задачи.

Приведем в матричной форме из основного алгоритма конечноэлементного решения задачи по работе [8]. На контур относительно горизонтальной плоскости основания: будет действовать сила гравитационного веса  $F^{гп}$ , направленный вертикально вниз. Так как эти пещеры находятся в экваториальной области Марса, пока пренебрегаем температурными напряжениями.

Равновесное состояние контура и горный массив пещеры описывается системой линейных алгебраических уравнений в конечноэлементном представлении в виде

$$[R]\{U\} = \{F^{гп}\} \quad (1)$$

где  $[R]$  – матрица жесткости системы;  $\{U\}$  – вектор перемещений узловых точек; компоненты тензора деформации вычисляются внутри каждого изопараметрического элемента в гауссовых точках интегрирования  $i, j$  с помощью следующих выражений.

$$\{\varepsilon_{ij}\} = [B]_{i,j}\{U\}, \quad (2)$$

Где  $\{\varepsilon_{ij}\}^T = \{\varepsilon_x, \varepsilon_z, \gamma_{xz}\}$ ,  $\{U_{ij}\}^T = \{u_{ij}, v_{ij}, \dots\}$ ,  $[B]$  – матрица базисных функции и  $[D]$  – матрица упругих характеристик.  $i=1,2,3$ ;  $j=1,2,3$  - внутренние точки интегрирования.

$$\{\sigma_{ij}\}^T = [D]\{\varepsilon_{ij}\} \quad (3)$$

Здесь  $[D]$  – является матрицей упругих характеристик.

Способы использования этих моделей алгоритмизированы, создаются компьютерные ориентиры.

Деформация  $\varepsilon_n(\varepsilon_x, \varepsilon_z, \gamma_{xz})$  и напряжений в краях поперечного изображения (контура) пещеры Энни на горе Арсия Марса и в соединяющихся породах определяют величины  $\sigma_n(\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz})$  закономерности образования Пучков опасных напряжений ( $\sigma_{n\theta}, \tau_{n\theta}$ , где  $\theta$  - полярный угол), которые могут разрушаться. На следующем этапе исследования по приведенным выше алгоритмам (1) - (3) создаются компьютеризированные ориентиры и выпол-

няются обширные вычисления для определения контура пещеры и зон концентрации напряжений в массиве ближнего и дальнего зарубежья.

## 5. Заключение

В общей сложности 11 роботов (6 марсоходов и 5 посадок), отправленных на Марс, имеют разную продолжительность миссии и приземляются в разных регионах Марса, все они имеют общую цель: оценить пригодность Марса для жизни. Эти марсоходы сканируют, сверлят и путешествуют по марсианскому миру, чтобы собрать знания о Красной планете от нашего имени.

Преимущества использования марсианских горных пещер, обнаруженных с помощью этих марсоходов, защищают от радиации, пыльных бурь и поверхностных опасностей крошечных метеоритов при заселении первых людей. Следовательно, возможно использование тонкостенных и легких конструкций среды обитания, таких как надувные конструкции, а также более широкий доступ к системам, требующим дополнительной защиты на поверхности.

Это исследование показывает, что вполне возможно использовать естественные пещеры для первого марсианского поселения. Исследования Марса людьми и роботами, как для жилых, так и для научных целей, играют большую роль в пещерах. Несколько типов горных пещер Марса, большинство из которых являются доступным вариантом для жилых помещений. Он также обеспечивает достаточный объем для размещения среды обитания, известные свойства, понятные из исследова-

ния, простую структуру, термическую стабильность, доступность и предсказуемое местоположение.

## Литература / References

- [1] Hussein, Al A., Apeldoorn, J., Ashford, K. Jr., Bennell, K.M., De Carufel, G., Haider, O., Hirmer, T., Jivănescu, E.I., Pegg, C.J., Shaghghi, Varzeghani A., Shimmin, R., Suresh, R., Mar Vaquero Escribano T., Vargas Muñoz M., Winetraub, Y., Gallardo, B., Fernández-Dávila, A., Zavaleta, J. & Laufer, R. (2009). The Role of Caves and Other Subsurface Habitats in The Future Exploration of Mars. *International Astronautical Congress, Daejeon, South Korea*
- [2] Urbain, T. (2023). How many rovers and landers are currently on Mars? Retrieved from: <https://starlust.org/how-many-rovers-are-on-mars/>
- [3] Baimahan, R.B., Muta, A.N. Mars turaly biz ne bilemiz? *Geomexanikalыk zhane komp'yuterlik matematikalыk model'deu okitudin zamanui maseleleri atty halykaralыk-praktikalыk konferenciya*
- [4] Seven Possible Cave Skylights on Mars. (2007). Retrieved from: <https://www.jpl.nasa.gov/images/pia09929-seven-possible-cave-skylights-on-mars>
- [5] Ksanfomaliti, L.V. (1997). *Parad planet. M.: Nauka. Fizmatlit*
- [6] Kuz'min, R.O., Galkin, I.N. (1989). *Kak ustroen Mars. M.: Znaniye*
- [7] Demidov, N.Je., Bazilevskij, A.T., Kuz'min, R.O. (2015). Grunt Marsa: raznovidnosti, struktura, sostav, fizicheskie svoystva, burimost' i opasnosti dlja posadochnyh apparatov. *Astronomicheskij vestnik, 49(4), 243-261*
- [8] Baimahan, R.B. (2002). Raschet sejsmonaprazhennogo sostojaniya podzemnyh sooruzhenij v neodnorodnoj tolshhe metodom konechnyh jelementov. *Almaty*

## Арсия тауындағы Энни үңгірі контурының кернеулі деформацияланған күйін зерттеуде шекті элементтер әдісін қолдану туралы

Р.Б. Баймахан<sup>1</sup>, А.Н. Мүтә<sup>1\*</sup>, А. Тилейхан<sup>1</sup>, К.Ч. Кожоголов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>ҚР ҰҒА Геомеханика және жер қойнауын игеру институты, Бішкек, Қырғызстан

\*Корреспонденция үшін автор: [mutita@mail.ru](mailto:mutita@mail.ru)

**Аңдатпа.** Марс бетінде радиация, микрометеориттер және шанды дауылдар сияқты қауіптер жағдайында алғашқы барған адамдар өмір сүре алмайды. Бірақ біз осы Марста табылған үңгірлерді осы экологиялық қауіптерден табиғи баспана ретінде пайдалану жолы ретінде ұсынып отырмыз. Марс бетіндегі гравитациялық өріс Жерге қарағанда шамамен үш есе әлсіз, ал магнит өрісі тым әлсіз. Сондықтан жерден кеткен тіршілік иелері, соның ішінде адамдар Марс бетінде 30-40 секунд қана өмір сүре алады. Тіпті ең қуатты скафандр адамның өмірін бірнеше сағатқа ғана сақтай алады. Марс үңгірлері Күн радиациясын үш есе дерлік әлсіретеді және оны ішке кіргізбейді. Сондықтан Марс үңгірлерін зерттеу, оларды алғашқы тіршілік ету ортасына айналдыру үшін ғылыми негізделген зерттеулер жүргізу бүгінгі күнгі өзекті мәселе болып табылады. Сондықтан жер асты тіршілік ету ортасы ретінде Марстың тау үңгірлерін пайдалану тиімді. Жоғары биіктікте атмосфералық қорғаныс аз болатындықтан, осы үңгірлерді шахта, тоннель секілді тұрғын мекен жайға айналдыру үшін оның ішкі жиектерінің Марс гравитациясына шыдас беруі, беріктігі жайлы ғылыми зерттеу жұмыстары жүргізіледі. Марс астылық осындай құрылыстардың түрлі күштер (гравитациялық, температуралық, әлсіз болса да тектоникалық, т.б.) әсерінен үңгірлік тұрғын, мекен жайлардың беріктігін зерттеудің механика - математикалық моделі жасалынады.

**Негізгі сөздер:** Марс, ровер, үңгір, Олимп, Арсия таулары, тау жыныстары, шекті элементтер әдісі, кернеулі деформацияланған күй.

## Об использовании метода конечных элементов при изучении напряженно-деформированного состояния контура пещеры Энни на горе Арсия

Р.Б. Баймахан<sup>1</sup>, А.Н. Мута<sup>1\*</sup>, А. Тилейхан<sup>1</sup>, К.Ч. Кожогулов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Институт геомеханики и освоения недр Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызстан

\*Автор для корреспонденции: [mutita@mail.ru](mailto:mutita@mail.ru)

**Аннотация.** Люди, которые впервые побывали на поверхности Марса, не могут выжить в условиях таких опасностей, как радиация, микрометеориты и пыльные бури. Но мы предлагаем пещеры, найденные на этом Марсе, как способ использовать их в качестве естественного убежища от этих экологических опасностей. Гравитационное поле на поверхности Марса примерно в три раза слабее, чем на Земле, а магнитное поле слишком слабое. Поэтому существа, покинувшие землю, в том числе люди, могут жить на поверхности Марса всего 30-40 секунд. Даже самый мощный скафандр может спасти жизнь человека всего на несколько часов. Марсианские пещеры почти втрое ослабляют солнечную радиацию и не пропускают ее внутрь. Поэтому изучение марсианских пещер, проведение научно обоснованных исследований, чтобы сделать их первой средой обитания, является актуальной проблемой на сегодняшний день. Поэтому выгодно использовать горные пещеры Марса в качестве подземной среды обитания. Поскольку на больших высотах атмосферная защита минимальна, для превращения этих пещер в жилые помещения, такие как шахты, туннели, проводятся научные исследования прочности и устойчивости внутренних краев к марсианской гравитации. Под влиянием различных сил (гравитационных, температурных, слабых, тектонических и т.д.) таких сооружений на Марсе разрабатывается механико - математическая модель исследования прочности пещерных жилищ, местобитаний.

**Ключевые слова:** Марс, марсоход, пещера, грунт, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние.

Received: 03 January 2023

Accepted: 14 April 2023

Available online: 30 April 2023