

Научная статья

УДК 53.092

DOI: 10.18384/2949-5067-2025-2-55-65

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ УДАРНЫХ ВОЛН В СЫПУЧЕМ И МОНОЛИТНОМ АНДЕЗИТЕ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Зиборов В. С.^{1*}, Ростилев Т. А.¹, Дольников Г. Г.²

¹ Объединённый институт высоких температур Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

² Институт космических исследований Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

*Корреспондирующий автор, e-mail: ziborov.vs@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.02.2025

Принята к публикации 18.02.2025

Аннотация

Цель – характеристики андезита, минерала вулканического происхождения по структуре и химическому составу близкого к лунному реголиту, в условиях ударного сжатия при скоростях нагружения до 800 м/с.

Процедура и методы. Плоские образцы андезита подвергнуты одномерному удару ударником, получившим ускорение в пневматической метательной установке. Методом лазерной доплеровской интерферометрии измерены профили скорости свободной поверхности образцов при выходе на неё волны ударного сжатия в диапазоне давлений от 0,5 до 1,9 ГПа. Измерено время прохождения волны сжатия в образцах заданной толщины.

Результаты. Впервые получены адиабаты Гюгонио для сыпучих образцов (со средним размером зерна (80–90) микрон, с размерами зёрен от 400 микрон до нескольких сотен нанометров) и монолитного андезита при относительно малых скоростях удара от 250 до 800 м/с. Получены профили скорости поверхности на границе 'образец – диагностическое окно' в момент выхода волны ударного сжатия. Проведено сравнение с аналогом марсианского реголита. Обнаружено, что при массовых скоростях менее 350 м/с возникает область адиабатического сжатия, в которой имеет место только деформация вещества без фазовых переходов в нём. При давлении 1,9 ГПа обнаружен предвестник, что характерно для области упругого деформирования.

Теоретическая и/или практическая значимость. Полученные результаты важны для разработки инженерных и численных моделей свойств лунных грунтов при взаимодействии с ними спускаемых аппаратов в предстоящих экспедициях.

Ключевые слова: аналог лунного грунта, андезит, пластическая деформация, предвестник, ударная адиабата, профиль скорости, VISAR

Благодарности и источники финансирования. Исследование было выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание № 075-01129-23-00).

Для цитирования.

Зиборов В. С., Ростиллов Т. А., Дольников Г. Г. Исследование структуры ударных волн в сыпучем и монолитном андезите методом лазерной интерферометрии // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-математика. 2025. № 2. С.55–65. <https://doi.org/10.18384/2949-5067-2025-2-55-65>

Original research article

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE OF SHOCK WAVES IN LOOSE AND MONOLITHIC ANDESITE BY LASER INTERFEROMETRY

V. Ziborov¹, T. Rostilov¹, G. Dolnikov²*

¹ Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

² Space Research Institute, Moscow, Russian Federation

Received by the editorial office 05.02.2025

Accepted for publication 18.02.2025

Abstract

Aim is to characterize andesite, a volcanic mineral similar in structure and chemical composition to lunar regolith, under shock compression conditions at loading speeds of up to 800 m/s.

Methodology. Flat andesite samples were subjected to a one-dimensional impact by a striker accelerated in a pneumatic throwing device. The laser Doppler interferometry method was used to measure the velocity profiles of the free surface of the samples when a shock compression wave was released onto it in the pressure range from 0.5 to 1.9 GPa. The time of compression wave passage in samples of a given thickness was measured.

Results. For the first time, Hugoniot adiabats were obtained for bulk samples (with an average grain size of (80–90) microns, with grain sizes from 400 microns to several hundred nanometers) and monolithic andesite at relatively low impact velocities from 250 to 800 m/s.

The surface velocity profiles at the 'sample – diagnostic window' boundary at the moment of the shock compression wave exit were obtained. A comparison with the Martian regolith analogue was made. It has been found that at mass velocities less than 350 m/s, a region of adiabatic compression occurs, in which only deformation of the substance without phase transitions in it takes place. At a pressure of 1.9 GPa, an elastic precursor was detected, which is typical for the region of elastic deformation.

Research implications. The results obtained are important for the development of engineering and numerical models of the properties of lunar soils in the interaction of landers with them in upcoming expeditions.

Keywords: analog of lunar soil, andesite, plastic deformation, precursor, shock adiabatic, velocity profile, VISAR

Acknowledgments. The study was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state assignment No. 075-01129-23-00).

For citation.

Ziborov, V. S., Rostilov, T. A., & Dolnikov, G. G. (2025). Investigation of the structure of shock waves in loose and monolithic andesite by laser interferometry. In: *Bulletin of Federal State University of Education. Series: Physics and Mathematics*, 2, pp.55–65. <https://doi.org/10.18384/2949-5067-2025-2-55-65>

Введение

Широкий интерес к изучению лунного грунта связан с возможностью получить фундаментальные знания о происхождении Вселенной, а также с предполагаемым наличием ископаемых ресурсов в количестве и виде на Земле недоступном или нецелесообразном для разработки в силу экологических причин. Так, по некоторым оценкам [1] содержание редкого на Земле изотопа He^3 хватило бы для обеспечения топливом термоядерных электростанций человечества на всю обозримую перспективу. Хотя имеются образцы лунного реголита, доставленные советскими и китайскими автоматическими станциями (сотни граммов), американскими экспедициями «Аполлон» (килограммы), для всесторонних исследований реголита недостаточно, учитывая разрушение материала в экспериментах с распространением ударных волн. В этой связи развивается моделирование его свойств [2; 3], исследуются вулканические породы, близкие по химическому составу и структуре. По имеющимся данным поверхность Луны выстлана монолитным реголитом и продуктами его разрушения метеоритами. Преобладающий размер песка (0,05-0,8) мм [1].

Целью данной работы является экспериментальное исследование свойств одного из аналогов лунного реголита, андезита, в наименее изученной области, области относительно малых скоростей удара – (250-800) м/с, в которой размеры, пористость и иные физические параметры сыпучего андезита важны для расчёта конструкций и режимов прилунения спускаемых аппаратов.

Приготовление образцов

Образцы изготавливались в виде таблеток, высотой 2 мм и более, диаметром 21 мм. Сыпучий андезит был получен из кусков, измельчённых на шаровой мельнице до размеров в десятки – сотни микрометров (рис. 1). Размолотый андезит был просеян через калиброванные сита и тонкими слоями методом выпаривания наносился в полость сборки известных размеров (рис. 2).

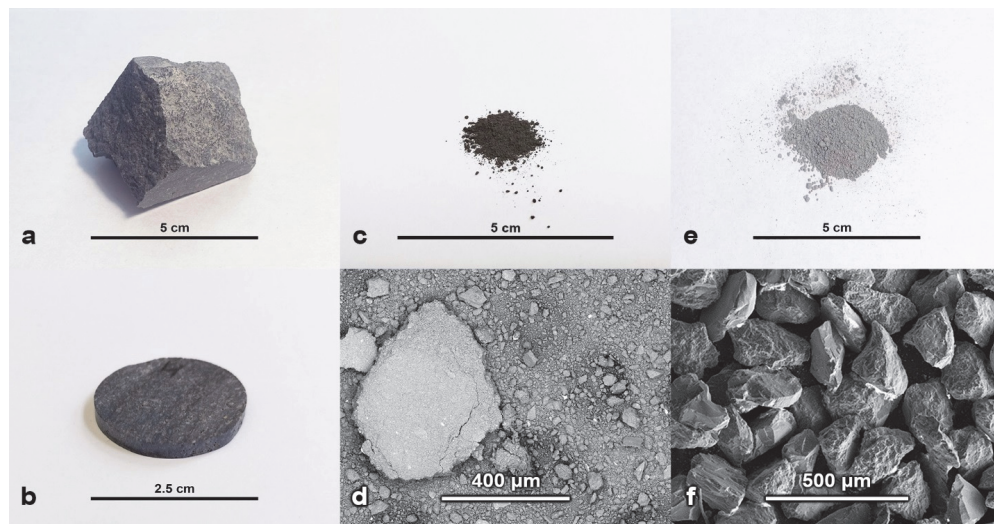


Рис. 1 / Fig. 1. Андезит на разных стадиях измельчения /
Andesite at different stages of grinding

Источник: данные авторов

Монолитный андезит разрезался на пластины заданной толщины. Максимальная разница высоты таблетки образца, измеренной на краях, не превышала 2 мкм. Образцы сыпучих фракций были двух типов: с частицами от ~10 до 200 мкм, средним размером частицы 80-90 мкм и начальной плотностью 1,34 г/см³ и с частицами от нескольких сотен нанометров до 400 мкм и начальной плотностью 1,16 г/см³. Типичная сборка, внутри которой помещался образец, показана на рис. 2. В случае сыпучих фракций лицевая поверхность образца совмещена с внутренней поверхностью экрана из алюминиевого сплава Д16Т толщиной 2 мм. Плоскость тыльной стороны образца совмещена с плоскостью алюминиевой фольги толщиной 7 мкм, наклеенной на окно из оргстекла. Для образцов из монолита экран не применялся, в ряде экспериментов использовалось водяное окно. Алюминиевая фольга наклеивалась на тыльную поверхность образца.

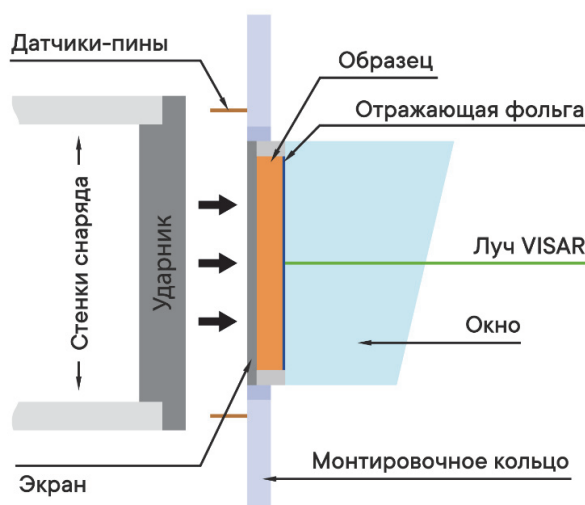


Рис. 2 / Fig. 2. Схема эксперимента со сборкой образца сыпучего андезита /
Experimental scheme for assembling a sample of loose andesite

Источник: составлено авторами

Химический состав реголита (автоматическая станция «Луна-16») и реголита (экспедиция «Аполлон-11») различаются между собой, эти различия соизмеримы с их отличием от состава андезита (рис. 3). В реголите присутствует окись железа, в андезите Fe_2O_3 [4].

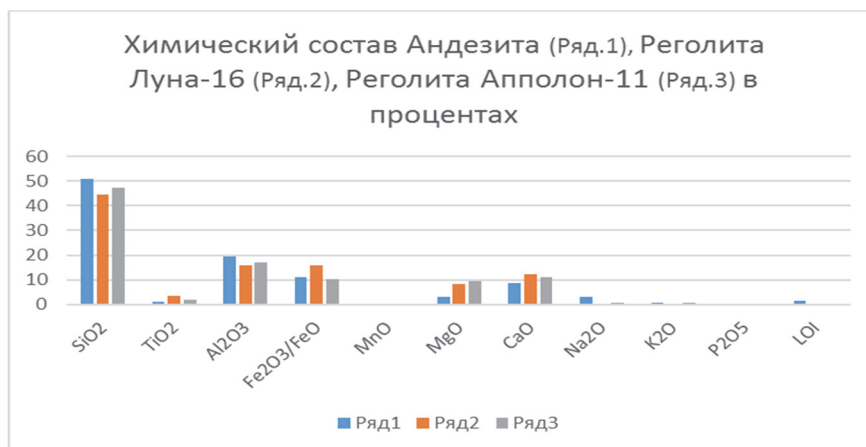


Рис. 3 / Fig. 3. Диаграмма сравнения химического состава андезита и лунного реголита, доставленного экспедициями «Луна-16» и «Аполлон-11» / Comparison diagram of the chemical composition of andesite and lunar regolith delivered by the Luna-16 and Apollo-11 expeditions.

Источник: [4]

Методика измерений

Исследования проведены на установке «Стрела-2М», газовой пушке калибром 57 мм. Плоский ударник из алюминиевого сплава Д16Т толщиной 10 мм ускорялся потоком сжатого газа до скоростей от 250 до 800 м/с в стволе пушки. В измерительной камере вблизи среза ствола он взаимодействовал с плоскостью сборки, в которую заподлицо был вмонтирован образец. Ствол пушки, камера измерений и приёмная камера вакууммировались. Остаточное давление газа не превышало 1 мм рт. ст. Скорость ударника определялась с помощью датчиков контактного типа по известному расстоянию между парами датчиков и измеренному времени их замыкания [5]. Использование пар датчиков, установленных перпендикулярно плоскости образца во взаимно перпендикулярных плоскостях, позволяло определить ещё и угол перекоса ударника относительно образца. Точность измерения скорости не хуже 1%.

Профили скорости границы «образец-окно» для сыпучего андезита и свободной поверхности для монолитного измерены с использованием неравноплечего доплеровского интерферометра типа VISAR, имеющего временное разрешение 1 нс. Более подробно метод и способ получения профилей из осциллограмм интерферометра дан в [5; 6]. В общем случае профили имеют сложную форму, которая зависят от множества параметров, в частности, вязких свойств материала, его неоднородности, пористости и т.д. [7, 8].

Результаты измерений

Характерные профили скорости, полученные в экспериментах с монолитным и сыпучим андезитом, показаны на рис. 5 и 6. Профили ударных волн в неоднородных материалах имеют сложную структуру [5–8]. Выделяют волну-предвестник и волну пластической деформации (пластическую ударную волну).

Хорошо видно, что в сыпучих образцах волна упругого предвестника не наблюдается. В монолитном андезите предвестник присутствует, что позволяет сделать вывод о наличии диапазона давлений ударного сжатия, при которых андезит сохраняет упругость, не разрушается. Крутизна нарастания профиля скорости в андезите больше, чем в аналоге марсианского реголита, что, по-видимому, связано с различием в структуре сравниваемых материалов. Для детального анализа требуются измерения в образцах разной толщины и более широком диапазоне давлений.

Адиабата как зависимость максимальной скорости поверхности от массовой скорости показана на рис. 7, там же приведены имеющиеся литературные данные (работы Т. Дж. Аренса [9; 11; 12], В. С. Зиборова [10]). Точки, полученные в данной работе, лежат в диапазоне малых скоростей удара, ранее не исследованных.

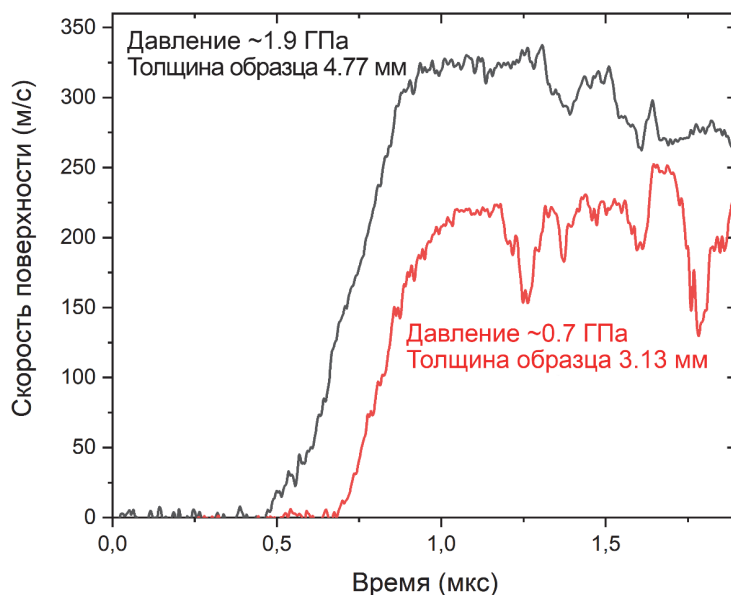


Рис. 5 / Fig. 5. Профили скорости границы монолитного андезита и водяного окна при выходе на неё ударной волны / Velocity profiles of the solid andesite – water window interface at the moment of shock wave arrival

Источник: составлено авторами

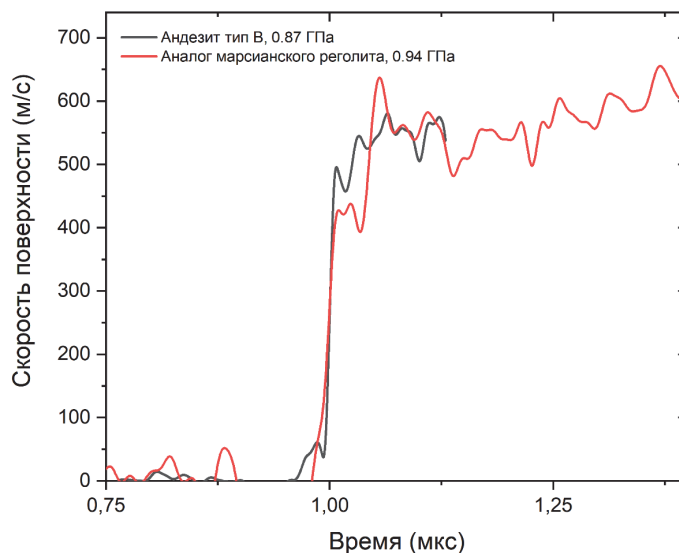


Рис. 6 / Fig. 6 Профили массовой скорости молотого андезита и аналога марсианского реголита / Particle velocity profiles of powdered andesite and Martian regolith analog

Источник: составлено авторами

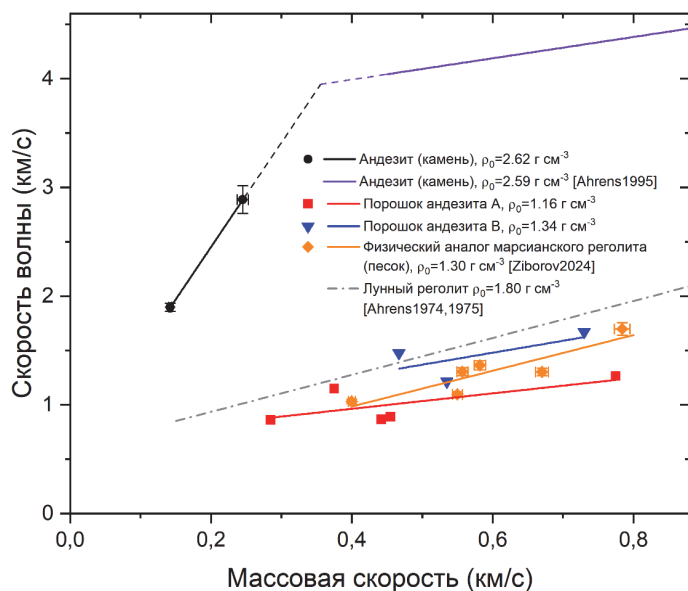


Рис. 7 / Fig. 7. Ударные адиабаты / Impact Adiabats

Источник: составлено авторами, в т. ч. с использованием [9–12].

Адиабаты отличающихся размером фракций сыпучего андезита имеют одинаковый наклон, совпадающий с данными из [9], но имеют разное положение по оси ординат: чем меньше начальная плотность материала (т.е. чем больше начальная пористость), тем ниже положение адиабаты по оси ординат. По-видимому, это связано с тем, что значительная часть энергии удара идёт на уплотнение пор или разрушение частиц. Большой угол наклона адиабаты в монолитном андезите при массовых скоростях меньше 350 м/с, вероятно, показывает, что в этой области не происходит фазовых превращений компонентов материала (т.е. происходит только деформация вещества). Область, где начинаются фазовые превращения, инициированные ударным сжатием, начинается после 350 м/с [9].

Заключение

Проведённое исследование позволило дополнить имеющиеся в литературе данные о свойствах андезита, одного из аналогов некоторых типов лунного грунта, в условиях ударного сжатия в области малых скоростей удара. Показано, что при давлении ударного сжатия 1.9 ГПа на профиле ударной волны монолитного андезита, вероятно, формируется упругий предвестник. В координатах массовая скорость – скорость ударной волны ударные адиабаты образцов дробленого андезита лежат ниже, чем адиабата сплошного андезита, что в первую очередь связано с затратой энергии удара на закрытие пор. При этом адиабата дробленого андезита с более узким распределением частиц и

большей насыпной плотностью лежит выше адиабаты дробленого андезита другого типа, что согласуется с известными сведениями по пористым средам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Игнатова А. М., Игнатов М. Н. Использование ресурсов реголита для освоения лунной поверхности // Международный журнал экспериментального образования. 2013. № 11-2. С. 101–110.
2. Ломоносов И. В. Уравнение состояния реголита и хондрита при высоких давлениях // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2024. Т. 515. № 1. С. 9–12. DOI: 10.31857/S2686740024020023.
3. Preparation and characterization of a specialized lunar regolith simulant for use in lunar low gravity simulation / Ruilin Li, Guoqing Zhou, Kang Yan, Jun Chen, Daqing Chen, Shangyue Cai, Pin-Qiang Mo // International Journal of Mining Science and Technology. 2022. Vol. 32. Iss. 1. P. 1–15. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.09.003.
4. Chemical features of the Luna 16 regolith sample / N. J. Hubbard, N. E. Nyquist, J. M. Rhodes, B. M. Bansal, H. Wiesmann, S. E. Church // Earth and Planetary Science Letters. 1972. Vol. 13. Iss. 2. P. 423–428. DOI: 10.1016/0012-821X(72)90119-7.
5. Зиборов В. С., Канель Г. И., Ростилев Т. А. Экспериментальное исследование характера деформации сферопластиков при ударном сжатии // Физика горения и взрыва. 2020. Т. 56. № 2. С. 124–129. DOI: 10.15372/FGV20200215.
6. Barker L. M., Hollenbach R. E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface // Journal of Applied Physics. 1972. Vol. 43. Iss. 11. P. 4669–4675. DOI: 10.1063/1.1660986.
7. Медведев А. Б., Трунин Р. Ф. Ударное сжатие пористых металлов и силикатов // Успехи физических наук. 2012. Т. 182. № 8. С. 829–846. DOI: 10.3367/UFNr.0182.201208b.0829.
8. Effect of porosity on rapid dynamic compaction of nickel nanopowder / T. Rostilov, V. Ziborov, A. Dolgoborodov, M. Kuskov // Physical Chemistry Chemical Physics. 2024. Vol. 26. Iss. 2. P. 848–855. DOI: 10.1039/D3CP04985J.
9. Ahrens T. J., Johnson M. L. Shock Wave Data for Minerals // Mineral Physics & Crystallography: A Handbook of Physical Constants. Vol. 2 / ed. T. J. Ahrens. Washington DC: American Geophysical Union, 1995. P. 143–184 (Series: AGU Reference Shelf). DOI: 10.1029/RF002p0143.
10. Impact response of physical analog of Martian regolith / V. Ziborov, T. Rostilov, E. Kronrod, I. Kuznetsov, G. Dolnikov // International Journal of Impact Engineering. 2024. Vol. 188. Article no. 104949. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2024.104949.
11. Ahrens T. J., Cole D. M. Shock compression and adiabatic release of lunar fines from Apollo 17 // Proceedings of Fifth Lunar Science Conference (Houston, Tex., March 18–22, 1974). Vol. 3. New York: Pergamon Press, Inc., 1974. P. 2333–2345.
12. Ahrens T. J. Compaction by impact of unconsolidated lunar fines // Moon. 1975. Vol. 14. P. 291–299.

REFERENCES

1. Ignatova, A. M. & Ignatov, M. N. (2013). Use of resources for regolith exploration of the lunar surface. In: *International Journal of Experimental Education*, 11-2, 101–110 (in Russ.).
2. Lomonosov, I. V. (2024). Equatons of state for regolith and chondrite at high pressure. In: *Doklady Physics*, 515 (1), 9–12. DOI: 10.31857/S2686740024020023 (in Russ.).
3. Li, Ruilin, Zhou, Guoqing, Yan, Kang, Chen, Jun, Chen, Daqing, Cai, Shangyue & Mo, Pin- Qiang (2022). Preparation and characterization of a specialized lunar regolith simulant for use in lunar low gravity simulation. In: *International Journal of Mining Science and Technology*, 32 (1), 1–15. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.09.003.
4. Hubbard, N. J. Nyquist, E. N., Rhodes, J. M., Bansal, B. M., Wiesmann, H. & Church, S. E. (1972). Chemical features of the Luna 16 regolith sample. In: *Earth and Planetary Science Letters*, 13 (2), 423–428. DOI: 10.1016/0012-821X(72)90119-7.
5. Ziborov, V. S., Kanel', G. I. & Rostilov, T. A. (2020). Experimental Study of deformation of spheroplastics under shock compression. In: *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 56 (2), 124–129. DOI: 10.15372/FGV20200215 (in Russ.).
6. Barker, L. M. & Hollenbach, R. E. (1972). Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface. In: *Journal of Applied Physics*, 43 (11), 4669–4675. DOI: 10.1063/1.1660986.
7. Medvedev, A. B. & Trunin, R. F. (2012). Shock compression of porous metals and silicates. In: *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*, 182 (8), 829–846. DOI: 10.3367/UFNr.0182.201208b.0829 (in Russ.).
8. Rostilov, T., Ziborov, V., Dolgoborodov, A. & Kuskov, M. (2024). Effect of porosity on rapid dynamic compaction of nickel nanopowder. In: *Physical Chemistry Chemical Physics*, 26 (2), 848–855. DOI: 10.1039/D3CP04985J.
9. Ahrens, T. J. & Johnson, M. L. (1995). Shock Wave Data for Minerals. In: Ahrens, T. J. (ed.). *Mineral Physics & Crystallography: A Handbook of Physical Constants. Vol. 2*. Washington DC: American Geophysical Union, pp. 143–184 (Series: AGU Reference Shelf). DOI: 10.1029/RF002p0143.
10. Ziborov, V., Rostilov, T., Kronrod, E., Kuznetsov, Il. & Dolnikov G. (2024). Impact response of physical analog of Martian regolith. In: *International Journal of Impact Engineering*, 188, article no. 104949. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2024.104949.
11. Ahrens, T. J. & Cole, D. M. (1974). Shock compression and adiabatic release of lunar fines from Apollo 17. In: *Proceedings of Fifth Lunar Science Conference (Houston, Tex., March 18-22, 1974). Vol. 3*. New York: Pergamon Press, Inc., pp. 2333–2345.
12. Ahrens, T. J. (1975). Compaction by impact of unconsolidated lunar fines. In: *Moon*, 14, 291–299.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зиборов Вадим Серафимович (г. Москва) – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории № 6.2. – ударно-волновых воздействий Объединённого института высоких температур Российской академии наук;
e-mail: ziborov.vs@yandex.ru

Ростилов Тимофей Андреевич (г. Москва) – кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник Лаборатории № 6.2. – ударно-волновых воздействий Объединённого института высоких температур Российской академии наук;
<https://orcid.org/0000-0003-1175-2374>; e-mail: t.rostilov@yandex.ru

Дольников Геннадий Геннадиевич (г. Москва) – кандидат физико-математических наук, ведущий инженер отдела физики планет и малых тел Солнечной системы Института космических исследований Российской академии наук;
<https://orcid.org/0000-0003-0001-7462>; e-mail: dolnikov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vadim S. Ziborov (Moscow) – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher; Laboratory No. 6.2. – Shock Wave Effects, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences;
e-mail: ziborov.vs@yandex.ru

Timofei A. Rostilov (Moscow) – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Research Assistant, Laboratory No. 6.2. – Shock Wave Effects, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences;
<https://orcid.org/0000-0003-1175-2374>; e-mail: t.rostilov@yandex.ru

Gennadiy Gen. Dolnikov (Moscow) – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Engineer, Department of Physics of Planets and Small Bodies of the Solar System, Space Research Institute;
<https://orcid.org/0000-0003-0001-7462>; e-mail: dolnikov@mail.ru