

## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

EDN: <https://elibrary.ru/jnoije>DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-2-78-87>

УДК 613.6.02:613.633:614.771:629.786:523.34

© Коллектив авторов, 2023

Гавришин А.И.<sup>1</sup>, Иванов И.В.<sup>2,3</sup>**О влиянии микроэлементного состава реголитов на безопасность труда космонавтов на Луне**<sup>1</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет (Новочеркасский политехнический институт) имени М.И. Платова, ул. Просвещения, 132, Новочеркасск, 346428;<sup>2</sup>ФГБУ «Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины» Минобороны России, ул. Лесопарковая, 4, Санкт-Петербург, 195043;<sup>3</sup>ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», пр-т Будённого, 31, Москва, 105275

**Введение.** Проблема использования околоземного пространства для удовлетворения различных потребностей человечества, в том числе освоения полезных ископаемых, особенно на Луне, становится актуальной, что повышает значимость исследований по обеспечению безопасности труда в этих условиях.

**Цель исследования** — изучение микроэлементного состава реголитов в сравнении с земными породами и его значения для безопасности труда космонавтов на поверхности Луны.

**Материалы и методы.** Оценка микроэлементного состава реголитов выполнена путём расчёта коэффициентов концентрации и коэффициента падения качества. При выделении однородных классов реголитов по концентрациям 38 химических элементов использована компьютерная технология классификации многомерных наблюдений в условиях самоорганизации.

**Результаты.** Установлено, что концентрации многих микроэлементов в реголитах значительно превышают их концентрации в земных почвах. Рассчитанный для морских реголитов Луна-16 и 24 и для Аполлон-11 и 12 коэффициент падения качества изменяется от 27 до 100, что соответствует категории «кризис». Это свидетельствует о том, что содержание микроэлементов в реголитах колеблется от слабо критической (27 для реголита Луна-16) до сильно критической (100 для реголита Аполлон-12). Определены микроэлементы, концентрации которых в лунных реголитах значительно превышают их концентрации в земных почвах: Cr, Be, Co, Sc, Ho, Se, Ni, Au, Ag, Er, Tm, Y, Sm, Gd, Tb, Dy, Yb, Lu, Cd, Zr, Sr, Ce, Pr, Nd, Eu. Эти микроэлементы входят в группу веществ, обладающих аллергенным, фиброгенным и канцерогенным действием и могут оказывать негативное влияние на здоровье будущих лунных колонистов.

**Ограничения исследования.** Исследование проведено для состава реголита на поверхности Луны и не охватывало аспекты защиты человека от лунной пыли космическими станциями, сооружениями, скафандрами и специальным оборудованием.

**Заключение.** При оценке влияния факторов окружающей среды на безопасность труда космонавтов при колонизации Луны следует уделять внимание токсикологическим аспектам условий труда, в частности микроэлементному составу реголитов и лунной пыли.

**Ключевые слова:** лунная пыль; реголит; микроэлементный состав; лунные колонисты; безопасность труда; состояние здоровья

**Для цитирования:** Гавришин А.И., Иванов И.В. О влиянии микроэлементного состава реголитов на безопасность труда космонавтов на Луне. *Мед. труда и пром. экол.* 2023; 63(2): 78–87. <https://elibrary.ru/jnoije> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-2-78-87>

**Для корреспонденции:** Иванов Иван Васильевич, ведущий научный сотрудник ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда им. академика Н.Ф. Измерова», д-р мед. наук, проф. E-mail: [Ivanov-iv@yandex.ru](mailto:Ivanov-iv@yandex.ru)

**Участие авторов:**

Гавришин А.И. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных, написание текста, редактирование;

Иванов И.В. — концепция и дизайн исследования, написание текста, редактирование

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Дата поступления: 19.01.2023 / Дата принятия к печати: 02.02.2023 / Дата публикации: 25.02.2023

**Введение.** Медицина труда охватывает всё новые области деятельности человека. В настоящее время актуальной становится проблема использования околоземного пространства для удовлетворения различных потребностей человечества, в том числе освоения полезных ископаемых и прежде всего на Луне. Опубликовано множество работ, в которых излагаются проекты освоения Луны, Марса и других планет, строительства там производственных, жилых, складских помещений из местных материалов, в качестве приоритетного направления рассматривается добыча различных полезных ископаемых [1–7]. Освоение Луны планируют космические агентства многих стран (Россия, Китай, США, Япония, Индия, ЕС и другие).

Пребывание космонавтов на Луне связано с высоким риском для здоровья вследствие ряда неблагоприятных факторов: отсутствие газовой атмосферы и кислорода, резкие перепады температуры (от –170 до +130°C), гипогравитация, высокие уровни галактического излучения и солнечной радиации и др. [6, 8, 9]. Существенное отрицательное воздействие на здоровье космонавтов может оказывать контакт с лунной пылью [10] и другими фракциями лунного грунта — реголита с разнообразным микроэлементным составом.

**Цель исследования** — изучение микроэлементного состава реголитов в сравнении с земными породами и его значения для безопасности труда космонавтов на поверхности Луны.

**Материалы и методы.** При выполнении исследования использованы кларковые концентрации микроэлементов в земной почве [11, 12] и в реголитах, доставленных космическими экспедициями «Луна» и «Аполлон» [1–4, 13–16]: «Луна-16» (L-16) — северо-восточная часть Моря Изобилия (*Mare Foecunditatis*), «Луна-24» (L-24) — юго-восточная часть Моря Кризисов (*Mare Crisium*), «Аполлон-11» (A-11) — Море Спокойствия (*Mare Tranquillitatis*), «Аполлон-12» (A-12) — Океан Бурь (*Oceanus Procellarum*).

Оценка качества химического состава реголитов и возможного влияния микроэлементов в высоких концентрациях на состояние здоровья космонавтов выполнена с применением известного в геохимии и геоэкологии метода расчёта коэффициента концентрации ( $K_i$ ) и коэффициента падения качества ( $P_C$ ) [17, 18], при этом выделяют пять уровней (категорий) опасности содержания химических веществ: норма, риск, кризис, бедствие и катастрофа. Коэффициент концентрации  $i$ -го компонента рассчитывается по следующей формуле:

$$K_i = C_i / C_K \quad (1),$$

где  $C_i$  — концентрация компонента в реголите,  $C_K$  — кларковая концентрация компонента в земной почве.

Качество реголитов по  $n$  компонентам оценивается по коэффициенту падения качества ( $P_C$ ):

$$P_C = \sum_i K_i - (n-1) \quad (2).$$

Разработанный [17, 18] коэффициент падения качества ( $P_C$ ) даёт возможность оценить любые типы природных и техногенных объектов (почв, воздуха, вод, горных пород, продуктов, растений и т. п.) по их химическому составу. Градациям этого коэффициента соответствуют уровни опасности содержания микроэлементов лунного грунта в процессе труда колонистов при непосредственном контакте с лунной пылью (**табл. 1**).

Изучая новую информацию, каждый исследователь сталкивается с необходимостью классификации наблюдений, которые охарактеризованы множеством признаков. Применительно к химическому составу лунных реголитов использована оригинальная инновационная компьютерная технология — G-метод [19] классификации многомер-

Таблица 1

### Уровни (категории) опасности содержания микроэлементов лунного грунта в процессе труда колонистов

Коэффициент падения качества ( $P_C$ )	Уровни опасности
<2	Норма
≥2–16	Риск
≥16–128	Кризис
≥128–1024	Бедствие
≥1024	Катастрофа

ных наблюдений (выделения однородных совокупностей). Этот метод позволяет осуществлять построение классификации при отсутствии априорных сведений о таксономической структуре наблюдений (задача самоорганизации без учителя); неограниченное соотношение между числом признаков ( $M$ ) и числом наблюдений ( $N$ ); использование независимых признаков; выделение таксономических структур различных уровней (типы, классы и т. д.).

**Результаты и обсуждение. Характеристика классов микроэлементов.** По величине коэффициента концентрации  $K_i$  с помощью компьютерной технологии G-метод, выделены однородные классы микроэлементов в реголитах, доставленных космическими экспедициями Луна-16, Луна-24, Аполлон-11 и Аполлон-12. Коэффициент показывает во сколько раз концентрация микроэлемента в лунном образце больше его концентрации в земной почве [11, 12, 22]. В **таблице 2** приведены результаты классификации микроэлементов с выделением однородных классов по коэффициенту концентрации.

Всего выделено 10 классов химических элементов в зависимости от уровня их концентрации в реголитах. В первых четырёх классах концентрации микроэлементов в реголитах (14 микроэлементов) не превышают их концентрации в земной почве. В шести следующих классах 25 микроэлементов характеризуются высокой концентрацией, вследствие чего состав такой лунной пыли может оказывать негативное влияние на здоровье будущих лунных колонистов. Элемент хром имеет очень большое значение  $K_i$  и поэтому выделен в класс с аномально высокой концентрацией. По результатам классификации проведена градация качества лунного реголита исходя из концентраций 25 «критических»

Таблица 2

### Однородные классы микроэлементов по величине $K_i$

Класс	L-16	L-24	A-11	A-12	Микроэлементы	Уровень концентрации
1	0,03	0,02	0,03	0,15	Cs, Rb, As	Очень низкий
2	0,3	0,12	0,31	0,15	Zn, Ga, Pb	Низкий
3	0,7	0,1	0,3	0,5	Cu, Sn, Sb, W, La	Умеренно низкий
4	0,45	0,58	0,53	0,78	Ba, V, W	Умеренно низкий
5	1,1	0,3	1,0	1,4	Cd, Zr, Sr, Ce, Pr, Nd, Eu	Умеренно высокий
6	2,4	0,7	3,6	4,2	Y, Sm, Gd, Tb, Dy, Yb, Lu	Высокий
7	3,4	0,9	2,9	4,8	Ag, Er, Tm	Высокий
8	5,85	3,9	6,7	6,2	Be, Co, Sc, Ho	Очень высокий
9	3,8	9,2	5,5	4,2	Se, Ni, Au	Очень высокий
10	29,6	31,4	26,1	32,5	Cr	Аномально высокий

микроэлементов 5–10 классов: *Cr, Be, Co, Sc, Ho, Se, Ni, Au, Ag, Er, Tm, Y, Sm, Gd, Tb, Dy, Yb, Lu, Cd, Zr, Sr, Ce, Pr, Nd, Eu*.

**Оценка качества лунных реголитов.** На Луне из реголитов и в реголитах планируется сооружение жилых, производственных и складских помещений, по их поверхности будут перемещаться космонавты, из них в основном планируется добыча полезных ископаемых. Всё это обуславливает необходимость оценки качества реголитов путём расчёта уровней опасности содержания химических веществ по суммарному показателю снижения качества РС. В **таблице 3** проведён расчёт этого показателя по величине коэффициента концентрации для 25 «критических» микроэлементов. Например, по хрому этот коэффициент достигает значения 33,4, по бериллию — 8,3, по никелю — 14,0 и т. д. (**табл. 3**).

По результатам расчётов коэффициента падения качества (*Pic*) для отдельных микроэлементов (**табл. 1 и 3**) к категории «кризис» отнесены концентрации 6 микроэлементов (*Cr, Be, Co, Sc, Ho, Ni*), к категории «риск» — концентрации 14 элементов (*Au, Ag, Er, Tm, Y, Sm, Gd, Tb, Se, Dy, Yb, Nd, Pr, Lu*), к категории «норма» — 5 элементов (*Cd, Zr, Sr, Ce, Eu*).

Рассчитанный для экспедиций Луна-16 и 24, Аполлон-11 и 12 коэффициент падения качества РС реголитов соответствует категории «кризис» и изменяется от 27 до 100. Это свидетельствует о том, что по микроэлементному составу лунной пыли содержание микроэлементов (**табл. 1 и 3**) колеблется от слабо критических (27 для реголита Луна-16) до сильно критических (100 для реголита Аполлон-12) уровней.

**Реголит, лунная пыль и жизнедеятельность космонавтов.** Полученные данные указывают на возможность негативного влияния на здоровье и безопасность труда космонавтов на Луне микроэлементов, концентрации которых в реголитах значительно превышают их концентрации в земных почвах. Так известно, что на здоровье человека значительно влияет недостаток, избыток или дисбаланс микроэлементов в окружающей среде, и новые научные дисциплины «Медицинская геология» и «Медицинская геохимия» призваны изучать возможные заболевания, связанные с высокими концентрациями микроэлементов в породах на поверхности как земли, так и других космических тел [20–22]. Как видно, это вполне актуально для реголитов и лунной пыли. Например, все шесть микроэлементов, отнесённые к

Таблица 3

## Оценка качества реголитов по микроэлементному составу

Элемент	Коэффициенты концентрации $K_i$ в реголитах					$P_{ic}$
	L-16	L-24	A-11	A-12	Сумма	
Cr	28,6	33,4	26,1	32,5	121	118
Be	8,30	3,30	7,00	5,67	24	21
Co	5,13	6,25	3,40	5,19	20	17
Sc	5,30	4,70	8,70	5,30	24	21
Ho	4,67	1,50	7,57	8,67	22	19
Se	0,90	12,0	0,24	0,77	14	11
Ni	8,50	8,00	14,0	10,0	41	38
Au	2,00	7,50	2,10	1,80	13	10
Ag	5,60	0,800	2,00	3,40	12	9
Er	2,90	1,25	4,75	7,90	17	14
Tm	1,61	0,500	2,00	3,00	7	4
Y	1,45	0,620	3,25	3,40	9	6
Sm	3,00	0,500	2,40	2,90	9	6
Gd	2,90	1,00	5,10	4,50	14	11
Tb	1,84	0,760	4,15	6,15	13	10
Dy	3,10	0,880	4,25	5,05	13	10
Yb	1,97	0,670	2,77	3,53	9	6
Lu	2,75	0,80	3,25	3,75	11	8
Cd	1,50	0,430	0,86	0,47	3	0
Zr	0,89	0,33	1,50	1,60	4	1
Sr	0,73	0,33	0,59	0,47	2	0
Ce	0,68	0,20	0,78	1,43	3	0
Pr	1,23	0,20	0,71	2,42	5	2
Nd	1,08	0,30	1,42	2,18	5	2
Eu	1,47	0,40	1,26	1,20	4	1
$P_C$	27	58	87	100	—	—

Примечание:  $P_{ic}$  — коэффициент падения качества отдельных микроэлементов;  $P_C$  — коэффициент падения качества микроэлементного состава реголитов.

категории «кризис», токсичны, генотоксичны и канцерогенны. При хроническом воздействии в повышенных концентрациях они могут приводить к развитию специфических заболеваний — бериллиозу, дерматиту, язве желудка, саркоме, астме и другим. Все лантаниды, обнаруженные в реголитах, также относятся к токсичным элементам.

В обзорных работах [8, 23] всесторонне охарактеризованы свойства лунной пыли и рассмотрены различные аспекты её потенциальной опасности. Более 95% массы реголита составляют частицы менее 1 мм. Частицы менее 100 мкм относятся к лунной пыли. Средний размер лунной пыли от 40 до 100 мкм, и эти частицы составляют около половины массы реголита. Форма пылевых частиц разнообразна с ярко выраженными заострёнными краями, что обуславливает их очень высокую проникающую способность. Оказалось, что скорость вращения левитирующих микронных и субмикронных частиц на Луне могут составлять миллионы оборотов в секунду. Эта особенность обуславливает высокую агрессивность воздействия на поверхности приборов, способность проникать сквозь герметические уплотнители и потенциальную опасность для космонавтов в процессе их труда на Луне. Так, пылевые вихри в сочетании с абразивными свойствами пыли приводили к тому, что циферблаты многих приборов за короткое время были настолько поцарапаны, что было невозможно прочитать показания.

Недостаточно изученным фактором труда на поверхности Луны остаётся влияние лунной пыли на состояние здоровья человека. Все астронавты отмечали резкий специфический запах пыли, напоминающий порох, жаловались на слезоточивость, першение в горле, кашель и единодушно утверждали, что проблема пыли — это проблема номер один в процессе пребывания на Луне.

В аналитической статье [10] детально рассмотрена токсикология лунной пыли в аспекте возможной профессиональной патологии при освоении Луны. В работе обобщены обширные литературные данные о токсичности лунной пыли, в том числе общей токсичности, пульмонотоксичности, кардиотоксичности, местному раздражающему действию, отдельным специфическим видам токсичности, а также о биодоступности и кинетике частиц пыли в организме. Систематизация этих данных свидетельствуют о том, что в качестве возможных ближайших эффектов от воздействия лунной пыли могут рассматриваться аллергические реакции, раздражение глаз, слизистых носоглотки и дыхательных путей. В качестве отдалённых эффектов возможны нарушения внешнего дыхания, умственной и физической работоспособности. В качестве отдалённых эффектов возможно развитие онкологических и нейроде-

генеративных заболеваний. Показано, что при ингаляции лунной пыли лёгкие являются органом-мишенью первого уровня, головной мозг рассматривается в качестве органа-мишени второго уровня, сердце — в качестве органа-мишени третьего уровня [10].

Важно отметить, что большинство экспериментальных исследований токсичности лунной пыли выполнено на измельчённых базальтах — земных аналогах лунного грунта, которые называют имитаторами или симуляторами лунной пыли. Средний диаметр частиц имитаторов составлял 86 мкм. Однако, наибольшую опасность для космонавтов на Луне представляют частицы размером 5–10 мкм, которые осаждаются в средних отделах лёгких, а более мелкие (0,5–5 мкм) проникают в альвеолы. В связи с этим поставлен вопрос о необходимости создания российского имитатора лунной пыли [24], в том числе для медико-биологических исследований [25].

**Заключение.** В настоящее время во многих странах уделяется большое внимание проблеме использования космических природных ресурсов и прежде всего полезных ископаемых на Луне, предложены многочисленные проекты освоения лунной поверхности. В то же время на Луне в процессе труда космонавтов ожидается контакт с рядом негативных факторов, в том числе с лунной пылью. Изучение физико-механических и токсикологических свойств лунных реголитов, микроэлементного состава лунной пыли чрезвычайно актуально для оценки безопасности труда космонавтов в ходе колонизации Луны. Установлено, что концентрации многих микроэлементов в реголитах значительно превышают их концентрации в земных почвах и это может негативно влиять на самочувствие и здоровье колонистов.

В результате проведённого исследования выполнена оценка качества химического состава лунных реголитов, произведена классификация микроэлементов по их концентрации в морских реголитах космических экспедиций Луна и Аполлон по инновационной компьютерной технологии, определены потенциально опасные микроэлементы, проанализировано их возможное влияние на возникновение патологических отклонений в состоянии здоровья и заболеваний в процессе труда космонавтов на Луне. В качестве возможных мультисистемных последствий воздействия лунной пыли на космонавтов могут рассматриваться аллергические реакции, раздражение глаз, слизистых носоглотки, дыхательных путей, нарушения функций внешнего дыхания, умственной и физической работоспособности. Это определяет необходимость разработки и проведения мероприятий по защите космонавтов от лунной пыли как негативного производственного фактора.

### Список литературы

1. Barabash S., Futaana Y. *A mission to study lunar environment and surface interaction. European Lunar Symposium.* Germany: Münster; 2017: 37–8.
2. Berezhnoy A.A. *Behavior of volatile elements during impact events on the moon. European Lunar Symposium.* Germany: Münster, 2017: 45–6.
3. Hendrickson D.H. *Astrobotics' service: a new model for lunar science missions. European Lunar Symposium.* Germany: Münster, 2017: 101–2.
4. Nekvasil H., Lindsley D.H., Catalano T., Schaub D., Di Francesco N.J. *Making the Lunar Anorthositic Crust and Its Root: Exploring the Implications of the Pseudo-Azeotrope. Forty-Eighth Lunar and Planetary Science Conferences.* Texas, USA: The Woodlands; 2017.
5. Жданова Д.Н., Шмарин Н.В. Луна — проблемы и перспективы связанные с освоением. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики.* 2018; 3(4(14)): 555–6.
6. Плеханов Н.С., Летунова О.В. Освоение космоса: цели, задачи и перспективы. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики.* 2018; 3(4(14)): 719–20.
7. Бобин В.А., Бобина А.В. Проект создания простейших поселений на этапе разведки недр луны. *Воздушно-космическая сфера.* 2020; 2(103): 54–61.
8. Захаров А.В., Зеленый Л.М., Попель С.И. Лунная пыль: свойства, потенциальная опасность. *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы.* 2020; 54(6): 483–507.
9. Плетнер К.В. Олег Орлов: медицина на службе космической мечты. *Воздушно-космическая сфера.* 2020; 2: 16–25.

10. Баринов В.А., Ушаков И.Б. Токсикология лунной пыли в аспекте возможной профессиональной патологии космонавтов — участников экспедиции на Луну. *Мед. труда и пром. экол.* 2022; 62(2): 72–92.
11. Kabata-Pendias A., Pendias H. *Trace Elements in the Biological Environment*. Warsaw: Wyd. Geol.; 1979.
12. Головин А.А. *Временные рекомендации к геохимическому обеспечению геологосъемочных работ, завершающихся созданием Госгеолкарты-200*. М.: Изд-во МПР; 1999.
13. *Fourth Lunar Science conference*. USA. Houston; 1973.
14. Costello E.S., Ghent R.R., Lucey P.G. A Refreshed Model for the Mixing Rate of Lunar Regolith. *Forty-Eighth Lunar and Planetary Science Conferences*. Texas, USA: The Woodlands; 2017.
15. Jordan A.P., Stubbs T.J., Wilson J.K., Hayne P.O., Schwadron N.A. et al. How Dielectric Breakdown May Weather the Lunar Regolith and Contribute to the Lunar Exosphere. *Forty-Eighth Lunar and Planetary Science Conferences*. Texas, USA: The Woodlands; 2017.
16. Wu Y.Z., Wang Z.C., Zhang X.Y. In situ spectra of the moon. *European Lunar Symposium*. Germany: Münster, 2017: 235–6.
17. *Методические рекомендации по геохимической оценке источников загрязнения окружающей среды*. М.: Изд-во ИМГРЭ; 1982.
18. Гавришин А.И. Сравнительный анализ двух методов оценки качества вод. *Геоэкология*. 2021; 2: 57–66.
19. Гавришин А.И. Применение цифровой классификационной технологии при анализе техногенных изменений окружающей среды. *Известия высших учебных заведений. Технические науки*. 2020; 1: 11–7.
20. Баранов В.М., Катунцев В.П., Баранов В.М., Шпаков А.В., Тарасенков Г.Г. Вызовы космической медицины при освоении человеком Луны: риски, адаптация, здоровье, работоспособность. *Ульяновский медико-биологический журнал*. 2018; 3: 109–23.
21. Орлов В.П., Фаррахов Е.Г., Вольфсон И.Ф., Алексеев В.М., Прозорова М.В. Современное состояние и перспективы медицинской геологии (к итогам VII конференции международной медико-геологической ассоциации мед-гео-2017). *Разведка и охрана недр*. 2018; 1: 3–7.
22. Шопина О.В. Медицинская геохимия ландшафтов. Влияние особенностей элементного состава окружающей среды на здоровье населения. *Российский журнал восстановительной медицины*. 2019; 4: 47–67.
23. Новиков А.С. *Космическое материаловедение*. М.: Макс Пресс; 2014.
24. Слюта Е.Н. Физико-механические свойства лунного грунта (обзор). *Астрономический вестник*. 2014; 5: 358–82.
25. Pohlen M., Carroll D., Prisk G.K., Sawyer A.J. Overview of lunar dust toxicity risk. *NPJ Microgravity*. 2022; 8(1): 55. <https://doi.org/10.1038/s41526-022-00244-1>