

Лунная база, полярная вода и опасность лунотрясений

доктор геолого-минералогических наук А.Т.Базилевский

Институт геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского РАН (Москва, Россия)

Полярные районы Луны представляют интерес как возможное место создания лунной базы. Их преимущество — наличие запасов льда воды, накопившихся в так называемых холодных ловушках. База должна защищать своих обитателей от высокого вакуума, слишком высоких (днем) и слишком низких (ночью) температур, космических лучей и метеоритной бомбардировки. В последние годы стала выявляться еще одна потенциальная опасность лунной среды, которую надо учитывать, — лунотрясения. Их действие было обнаружено достаточно давно по наблюдениям 1969–1977 гг. в рамках программы «Аполлон», но как фактор риска для лунной базы они не обсуждались. Магнитуда зарегистрированных лунотрясений — от 1.6 до 4.2 по шкале Рихтера, но возможность более сильных сотрясений исключить нельзя. Анализ недавно полученных снимков лунной поверхности очень высокого (~0.5 м) разрешения привел к обнаружению на лунных материках (в том числе и в полярных районах) более 3000 уступов, вероятно, созданных очень молодыми (<50 млн лет) тектоническими надвигами. Такие процессы должны были сопровождаться лунотрясениями. Удобный для изучения земной аналог этого явления — землетрясение с магнитудой 6.9, случившееся 14 ноября 1968 г. вблизи городка Мекеринг в Западной Австралии, которое сопровождалось образованием надвигового уступа и катастрофическими разрушениями городских построек. Очевидно, что лунотрясения могут приводить к серьезным механическим напряжениям и даже разрушениям в помещениях лунной базы и элементах ее инфраструктуры. Этот фактор риска должен изучаться и учитываться.

Ключевые слова: лунная база, полюса Луны, полярная вода, уступ, надвиг, лунотрясение.

Луна — самый близкий космический сосед Земли. Она активно изучается рядом стран с помощью автоматических космических аппаратов. Обсуждаются и планы создания на Луне обитаемой базы, которую можно использовать для изучения различных характеристик нашего спутника в стационарных лабораториях и в маршрутных исследованиях, для наблюдений за далекими космическими объектами, а также как перевалочный и заправочный пункт при полетах к другим объектам Солнечной системы. В качестве перспективного места для создания лунной базы рассматриваются полярные районы [1, 2]. Они привлекательны тем, что Солнце там стоит очень низко над горизонтом, и даже в середине лунного дня температуры поверхности невысокие, а в зонах вечной тени и в некоторых других местах в лунном рыхлом грунте содержится заметная примесь льда воды [3, 4]. Вода же нужна для жизнеобеспечения базы и как сырье при производстве ракетного топлива для полетов к другим космическим объектам.

База должна защищать своих обитателей от неблагоприятных составляющих лунной среды: высокого вакуума, слишком высоких (днем) и слишком низких (ночью) температур, космических лучей и метеоритной и микрометеоритной бомбардировки. В последние годы стала выяв-

ляться еще одна потенциальная опасность, которую надо учитывать при создании базы на Луне, — сейсмическая активность, или, проще говоря, лунотрясения.

О том, что на Луне есть сейсмическая активность, стало ясно еще в 1969–1977 гг. в результате наблюдений с помощью сейсмометров, установленных в местах посадки космических кораблей «Аполлон-12, -14–16» [5, 6]. Тогда было зарегистрировано довольно большое количество сейсмических сотрясений, как глубинных, так и приповерхностных. Но как фактор, который должен учитываться при освоении нашего спутника, лунотрясения, насколько нам известно, не рассматривались. По-видимому, это связано с тем, что в результате исследований в 60–80-х годах прошлого века была установлена высокая вулканическая и тектоническая активность на Луне, проявлявшаяся примерно 3 млрд лет назад, а потом практически прекратившаяся.

Однако в последние годы был проведен анализ огромного массива снимков лунной поверхности, которые получили камеры LROC NAC (Lunar Reconnaissance Orbiter Camera Narrow Angle Camera) с разрешением около 0.5 м, установленные на космическом аппарате «Lunar Reconnaissance Orbiter». В результате были обнаружены формы рельефа, возникшие при очень молодой (<50 млн лет) вулканической и тектонической активности [7–9]. Эти образования сравнительно небольшие и рас-

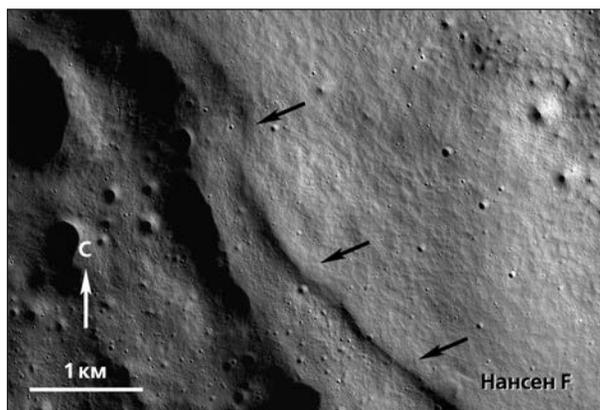
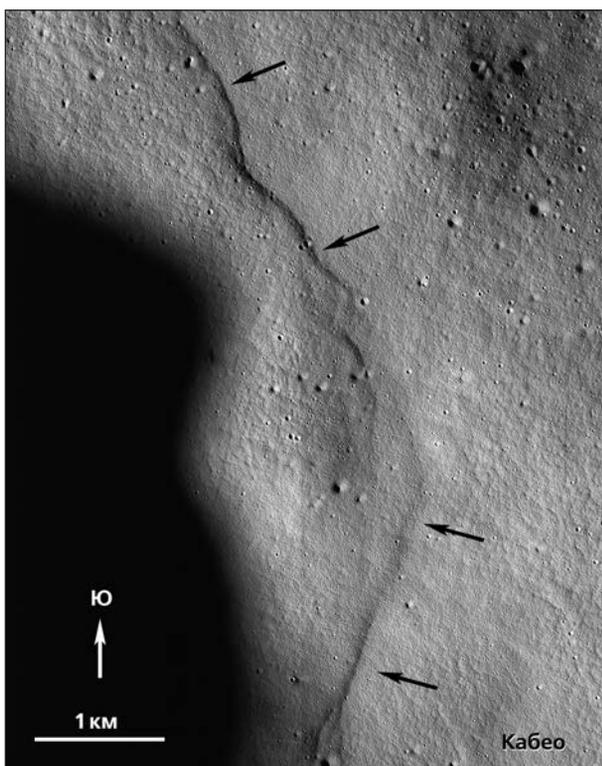
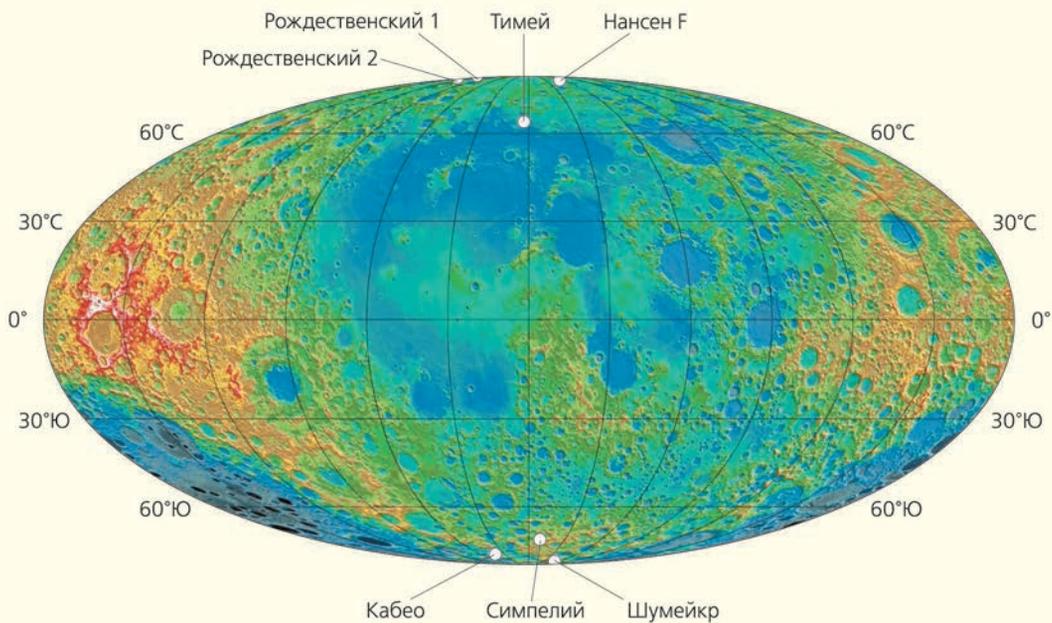


Рис.1. Топографическая карта Луны с местами, где расположены надвиговые уступы в полярных областях (вверху) и изображения надвиговых уступов (показаны черными стрелками) вблизи кратеров Кабео и Нансен F (внизу).

полагаются очень локально. Но стало ясно, что и вулканическая и тектоническая активность в современную геологическую эпоху на Луне есть. Проведенный анализ снимков, в частности, выявил более 3000 уступов поверхности, по-видимому, созданных тектоническими надвигами [9]. Т.Р.Воттерс с коллегами связывают образование таких надвигов с лунотрясениями [10]. Эти авторы,

используя упоминавшиеся данные сейсмических наблюдений в местах посадки космического корабля «Аполлон», определили магнитуды (от 1.6 до 4.2 по шкале Рихтера) и местоположения эпицентров 25 из 28 зарегистрированных приповерхностных лунотрясений. Оказалось, что одно из них, входящее в категорию относительно сильных, произошло вблизи южного полюса Луны, 19 слу-

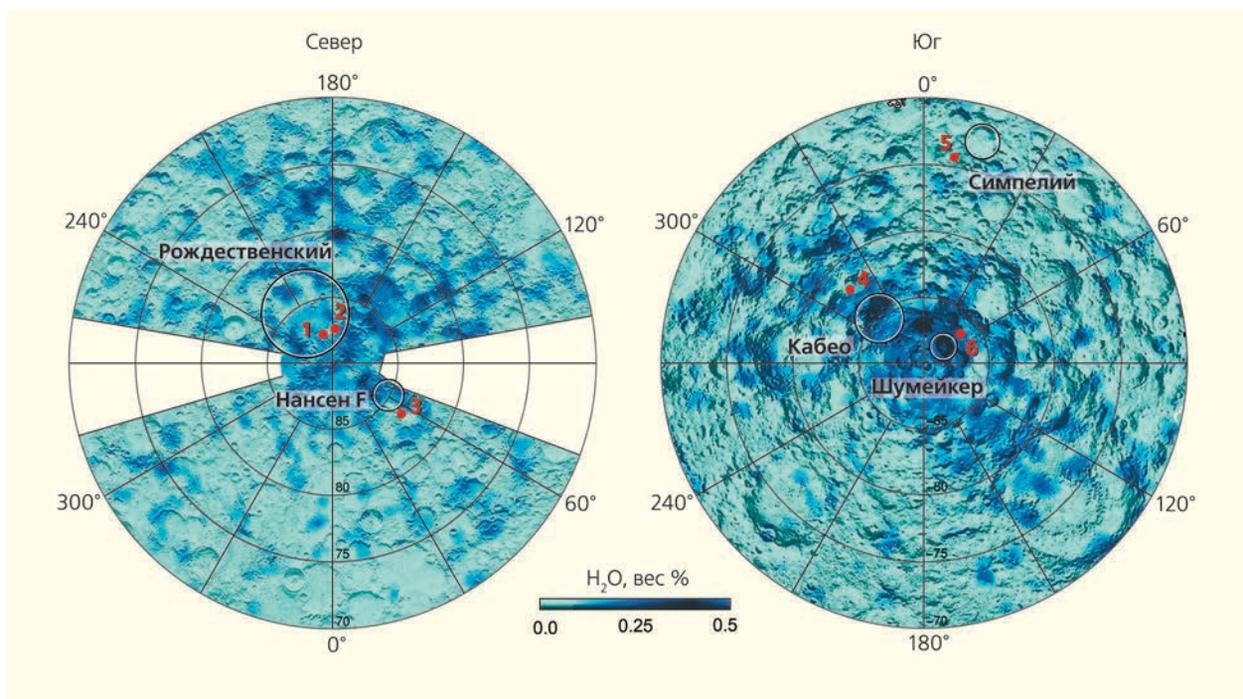


Рис.2. Карты содержания льда воды в верхнем слое толщиной 1 м [4, с изменениями]. Красные точки показывают местоположения надвиговых уступов: 1 — Рождественский 1; 2 — Рождественский 2; 3 — Нансен F; 4 — Кабео; 5 — Симпелий; 6 — Шумейкер.

чились, когда Луна была близка к апогею ее орбиты, а 9 — к перигею.

Мы кратко рассмотрим примеры уступов тектонических надвигов в полярных районах Луны (севернее 70°с.ш. и южнее 70°ю.ш.) [8], их соотношения с другими геологическими образованиями, а также уступ Мекеринг (Meckering) — земной аналог подобных образований в Австралии [11].

Воттерс с коллегами описали три надвиговых уступа в северной полярной области и три уступа в южной [8]. Это, соответственно, уступы Рождественский 1 и 2, Нансен F и уступы Кабео, Симпелий и Шумейкер. Все они названы по ближайшим крупным кратерам. Скорее всего, в полярных областях еще существуют и другие надвиговые уступы, но там значительные площади затенены, и они на снимках не видны. Длина уступов составляет от нескольких до 10–15 км, а высота может достигать десятков метров [12]. Это свидетельствует о значительной энергетике создавших их лунотрясений.

На рис.1 видны надвиговые уступы Нансен F и Кабео, имеющие мягкие очертания, что может указывать на некоторое сглаживание их поверхности малыми метеоритными ударами и склоновыми процессами. А возможно, это и их первичная характеристика, связанная с рыхлым сложением вовлеченного в деформацию материала. Поверхность выше уступов и перед ними осложнена пологосклонными извилистыми в плане грядами протяженностью до сотен метров и шириной не-

сколько десятков метров. Если такие гряды — результат сейсмического сотрясения при образовании надвига, то это говорит об относительной молодости лунотрясений.

Полярные области Луны — местность материкового типа с многочисленными нередко пересекающимися кратерами диаметром десятки километров и более [13, 14]. Район южного полюса приходится на вал самого крупного и, по-видимому, самого древнего ударного бассейна Южный полюс — Эйткен диаметром примерно 2500 км. Описываемые уступы осложняют эту испещренную кратерами поверхность. Так, уступ Кабео (см. рис.1) «взбирается» на 10–15-градусный внутренний склон кратера диаметром около 40 км.

В полярных областях Луны в зонах вечной тени (и не только в них) в поверхностном слое присутствует примесь льда воды и некоторых других летучих соединений.

Из рис.2 видно, что одни надвиги (Кабео и Шумейкер) находятся около мест высоких концентраций H₂O, другие (Рождественский 1 и 2) — в местах с умеренными концентрациями, а третьи (Нансен F и Симпелий) — в районах без заметной концентрации H₂O. Надвиговые разломы вряд ли могут быть источником полярной воды, хотя в работах последних лет установлено, что недра Луны не так безводны, как это представлялось раньше [15, 16]. Спектроскопические наблюдения за облаком ударного пара в эксперименте LCROSS (Lunar Crater Observation and Sensing Satellite), когда ступ-



Рис.3. Фото надвигового уступа Мекеринг.

www.aees.org.au/gallery/1968-meckering



Рис.4. Искривление рельсов железной дороги в Мекеринге.

www.aees.org.au/gallery/1968-meckering

пень ракеты была сброшена на место выявленной по нейтронной спектроскопии аномально высокой концентрации водорода в кратере Кабео, показали: кроме пара воды в облаке присутствовали CO , CO_2 , H_2 , H_2S , SO_2 , NH_3 , C_2H_4 , CH_3OH и CH_4 [17]. По некоторым оценкам, такой набор летучих соединений лучше всего согласуется с привнесением их кометами и астероидами, бомбардирующими поверхность Луны [18].

Сейсмические сотрясения, сопровождавшие образование надвигов, по-видимому, могут вызывать в полярных областях сублимацию и последующую потерю льда из порового пространства поверхностного материала. На примере шести обсуждаемых надвигов это вероятное явление достоверно исследовать невозможно, но его следует иметь в виду в последующих работах.

Упомянутый земной аналог лунных надвигов — надвиг близ городка Мекеринг (Meckering) в западной Австралии образовался 14 ноября 1968 г., когда там произошло землетрясение с магнитудой 6.9 по шкале Рихтера [11]. Оно продолжалось 40 сек и привело к образованию уступа-надвига (рис.3) и к разрушению городских построек и участков железной дороги (рис.4, 5).

Высота уступа Мекеринг достигает 3 м (т.е. он ниже, чем рассматриваемые лунные уступы), а его протяженность (с ответвлениями) — примерно 40 км (по этому параметру он не уступает лунным аналогам). Анализ сейсмограмм показал, что надвиговый разлом Мекеринг начался на глубине 1.5 км от поверхности и распространился на глубину не более 6 км [19]. Землетрясение вызвало и появление трещин растяжения шириной около 1 м, которые, по всей вероятности, уместно сопоставлять с небольшими грабнями, описанными в ассоциации с некоторыми лунными надвигами [10].

Надвиговый разлом произошел в песчано-алевритовых аллювиальных отложениях и местами сопровождался сухой флюидизацией песка, похожей на явление, описанное в работе Н.Мелоша [20]. Песок, подвергавшийся флюидизации, залегал на глубине около 1 м под суглинистым почвенным слоем. Во время землетрясения он прорывался на поверхность через слабые зоны в почве — в местах сгнивших корней деревьев [21]. Не исключено, что достаточно сильные лунотрясения могут вызывать подобную сухую флюидизацию лунного грунта. Подобное явление требует специального изучения.



Рис.5. Катастрофическое разрушение жилого дома в Мекеринге.

static.panoramio.com

Итак, из приведенного материала следует, что в полярных областях Луны (так же как и на других территориях) наблюдаются геологически молодые уступы, по-видимому, созданные тектоническими надвигами. Их образование сопровождалось лунотрясениями. Наблюдения 1969–1977 гг. с помощью сейсмометров в местах посадки космических кораблей «Аполлон-12, -14–16» подтверждают существование современной сейсмической активности на Луне. Одно из зарегистрированных неглубоких лунотрясений, которое относится к категории относительно сильных, произошло недалеко от южного полюса. Полярные области

Луны рассматриваются как места, перспективные для создания лунной базы, в том числе из-за наличия там ресурсов льда воды в поверхностном рыхлом слое. Очевидно, что лунотрясения вблизи базы могут приводить к серьезным механическим напряжениям в жилых и технических помещениях и в элементах ее инфраструктуры. Этот фактор риска должен специально изучаться, что очевидно, потребует развертывания на Луне новой сети сейсмических наблюдений. И если будет установлено, что лунотрясения представляют реальную опасность, то при постройке базы это должно обязательно учитываться. ■

Работа поддержана Российским научным фондом (проект 17-17-01149).

Литература / References

1. *Burke J.D.* Merits of lunar polar base location. *Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century*. Ed. W.W.Mendel. Houston. 1985; 77–84.
2. *Zelenyi L.* Milestones of the Russian space science program for the decade 2016–2025. The Seventh Moscow Solar System Symposium 7m-s3, Space Research Institute, Moscow, Russia, October 10–14, 2016. Moscow, 2016; 7MS3-OS-01.
3. *Feldman W.C., Lawrence D.J., Elpbic R.C. et al.* Polar Hydrogen Deposits on the Moon. *J. Geophys. Res. Planets*. 2000; 105(E2): 4175–4195.
4. *Sanin A.B., Mitrofanov I.G., Litvak M.L. et al.* Hydrogen distribution in the lunar polar regions. *Icarus*. 2017; 283: 20–30.
5. *Nakamura Y., Latham G.V., Dorman H.J. et al.* Shallow moonquakes — Depth, distribution and implications as to the present state of the lunar interior. *Proceedings 10th Lunar and Planetary Science Conference*. Houston, 1979; 2299–2309.

- Научные сообщения
6. Nakamura Y. Shallow moonquakes: How they compare with earthquakes. Proceedings, 11th Lunar and Planetary Science Conference. Houston, 1980; 1847–1853.
 7. Braden S.E., Stopar J.D., Robinson M.S. et al. Evidence for basaltic volcanism on the Moon within the past 100 million years. Nature Geoscience. 2014; 7: 787–791.
 8. Watters T.R., Robinson M.S., Beyer R.A. et al. Evidence of recent thrust faulting on the Moon revealed by the Lunar Reconnaissance Orbiter Camera. Science. 2010; 329: 936–940.
 9. Watters T.R., Robinson M.S., Collins G.C. et al. Global thrust faulting on the Moon and the influence of tidal stresses. Geology. 2015; 43(10): 851–854.
 10. Watters T.R., Weber R.C., Collins G.C., Johnson C.L. Shallow lunar seismic activity and the current stress state of the Moon. Lunar and Planetary Science XLVIII Conference. Houston, 2017; 2569.
 11. Everingham I.B. Preliminary report on the 14 October 1968 earthquake at Meckering, Western Australia. Bureau of Mineral Resources, Geology and Geophysics, Department of Natural Development, Commonwealth of Australia. 1968; 142.
 12. Базилевский А.Т., Иванов М.А., Красильников С.С. и др. Молодые тектонические деформации в южной полярной области Луны. Астрономический вестник. 2017. В печати. [Bazilevsky A.T., Ivanov M.A., Krasilnikov S.S. et al. Young tectonic deformation at South Polar Region of the Moon. Solar System Research. 2017. In press.]
 13. Wilhelms D.E. The geologic history of the Moon. US Geological Survey Spec. Pap. 1987; 1348.
 14. Ivanov M.A., Hiesinger H., Abdrakhimov A.M. et al. Landing site selection for Luna-Glob mission in crater Boguslawsky. Planetary and Space Science. 2015; 117: 45–63.
 15. Saal A.E., Hauri E.H., Cascio M.L. et al. Volatile content of lunar volcanic glasses and the presence of water in the Moon's interior. Nature. 2008; 454(7201): 192–195.
 16. Hauri E.H., Weinreich T., Saal A.E., et al. High pre-eruptive water contents preserved in lunar melt inclusions. Science. 2011; 333(6039): 213–215.
 17. Colaprete A., Schultz P., Heldmann J. et al. Detection of water in the LCROSS ejecta plume. Science. 2010; 330(463): 463–468.
 18. Bereznoi A.A., Kozlova E.A., Sinitsyn M.P. et al. Origin and stability of lunar polar volatiles. Advances in Space Research. 2012; 50: 1638–1646.
 19. Langston C.A. Depth of faulting during the 1968 Meckering, Australia, earthquake sequence determined from waveform analysis of local seismograms. J. of Geophys. Res. 1987; 92(B11,11): 561–574.
 20. Melosh H.J. Acoustic fluidization: A new geologic process. J. of Geophys. Res. 1979; 84(B13): 7513–7520.
 21. Collins C., Cummins P., Clark D. et al. Paleoliquefaction studies in Australia to constrain earthquake hazard estimates. Proceedings of 2004 NZSEE Conference, Rotorua, 19–24 March 2004. Rotorua, 2004; 50: 1–7.

Lunar base, polar water and danger of the moonquakes

A.T.Basilevsky

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, RAS (Moscow, Russia)

Polar areas of the Moon are interesting as possible place for building of lunar base. Their advantage is a resource of water ice accumulated in so-called cold traps. The base should protect its inhabitants from high vacuum, too high (at day time) and too low (at night) temperatures, cosmic rays, and meteorite bombardment. And in recent years one more potential danger of lunar environment, which should be taken into account in the base building, became evident. These are moonquakes. They were registered rather long time ago in the Apollo program observations at 1968–1977, but as factor of risk for lunar base were not discussed. Magnitude of the registered moonquakes is 1.6 to 4.2 in Richter scale, but possibility of the stronger quakes is not excluded. Analysis of recently gained images of lunar surface of very high (~0.5 m) resolution led to discovery in lunar highlands, including polar areas, of more than 3000 scarps, probably formed by very young (<50 Ma) tectonic thrust faults, that should be accompanied by moonquakes. Convenient for study terrestrial analog of this phenomenon is earthquake with magnitude 6.9 happened on November 14, 1968 in the vicinity of small town Meckering, Western Australia, which accompanied by formation of thrust scarp and catastrophic destruction of the town houses. It is obvious that moonquakes can lead to serious mechanical stress and even destructions in the lunar base buildings and in the elements of its infrastructure. This is a factor of risk which should be studied and taken into account in the building of the base.

Keywords: Lunar base, poles of the Moon, polar water, scarp, thrust fault, moonquake.