АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК, 2021, том 55, № 4, с. 291–315

УДК 523

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ЛУННОГО ГРУНТА ПО ГЛУБИНЕ КОЛЕИ КОЛЕС ЛУНОХОДОВ

© 2021 г. А. Т. Базилевский[a, *], М. И. Маленков[b], В. А. Волов[b], А. М. Абдрахимов[a], Н. А. Козлова[a, c], А. Э. Зубарев[c], И. Е. Надеждина[c]

[a] *Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия*

[b] *АО НТЦ "РОКАД", Санкт-Петербург, Россия*

[c] *Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия*

**E-mail: atbas@geokhi.ru*

Поступила в редакцию 15.02.2021 г.
После доработки 22.03.2021 г.
Принята к публикации 30.03.2021 г.

В работе описываются результаты измерения глубины колеи, оставленной колесами Луноходов-1 и -2, а по глубине оценивалась прочность верхнего слоя лунного грунта на сжатие. Измерения проведены в 13 местах по маршруту Лунохода-1 и в 13 местах по маршруту Лунохода-2. Они оказались равными 9–49 мм (среднее 24 мм) для Лунохода-1, и 12–32 мм (среднее 21 мм) для Лунохода-2, то есть близки друг к другу. Естественно ожидать, что, чем прочнее грунт, тем меньше глубина колеи, и приведенные в статье расчеты подтвердили это. Использованная методика учитывала специфику колес луноходов: у них были металлосетчатые обода с высокими грунтозацепами. Разброс значений прочности по трассе Лунохода-1 оказался равным 9.8–23.4 кПа (среднее 16.9 кПа), а по трассе Лунохода-2 – 13.5–22.4 кПа (среднее 14.3 кПа). Ввиду идентичности конструкций ободов колес советских и китайских луноходов оказалось возможным применить разработанную методику для расчета прочности лунного грунта по трассе движения Yutu и Yutu-2, привлекая литературные данные о глубине колеи колес Yutu (2.5–9.3 мм) и Yutu-2 (2.3–7.8 мм), и с учетом их меньшей, чем у советских луноходов, массы. Результаты оценки прочности грунта по маршруту этих аппаратов: 10.0–19.4 и 10.9–20.2 кПа соответственно. В работе также выполнен расчетно-теоретический анализ взаимозависимости измерений прочности грунта конусно-лопастным штампом бортового прибора оценки проходимости (ПрОП) советских луноходов и условными колесными штампами луноходов. Установлена линейная зависимость между измерениями и расчетами прочности лунного грунта этими двумя методами и раскрыты причины различий.

Ключевые слова: лунный грунт, колея колес лунохода, прочность на сжатие

DOI: 10.31857/S0320930X21040010

ВВЕДЕНИЕ

В планах космических исследований разных стран и космических агентств важная роль отводится передвижным аппаратам типа луноходов и марсоходов (см., например, Zelenyi, 2019; Litvak и др., 2019; Литвак и др., 2020; Artemis plan, 2020; Wan и др., 2020; Witze, 2020). Эффективность их использования зависит от их проходимости, а она, в том числе, зависит от физико-механических свойств грунта, по которому движется аппарат. Для их измерения на Луноходах-1 и -2 был установлен прибор оценки проходимости (ПрОП), с помощью которого по маршруту движения аппаратов было выполнено около тысячи измерений несущей способности и сопротивления вращательному срезу верхних 50–100 мм грунта (см., например, Леонович и др., 1971; 1978). Были выявлены значительные вариации этих свойств, в определенной мере коррелирующиеся с присутствием склонов поверхности различной крутизны, связанных с кратерами различного размера и разного возраста (см., например, Базилевский и др., 1984). Следует, однако, иметь в виду, что измерения на маршрутах Луноходов – 9.9 км у Лунохода-1 (Карачевцева и др., 2012) и 39.1 км у Лунохода-2 (Karachevtseva и др., 2017) – в масштабах Луны (рис. 1), конечно, недостаточно представительны и должны дополняться измерениями в других районах.

Возможный способ увеличения данных о физико-механических свойствах лунного грунта в других районах Луны – это наблюдения в миссиях Chang'e-3 и Chang'e-4, включавших луноходы Yutu и Yutu-2, и в будущих миссиях с луноходами. На доступных изображениях, полученных в миссиях Chang'e-3 и Chang'e-4, видны следы, остав-

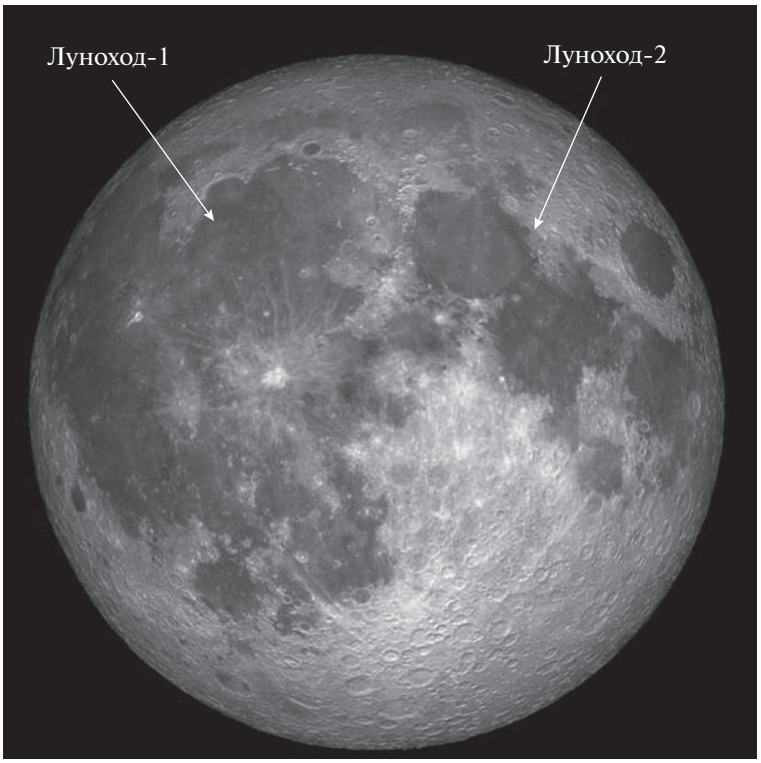


Рис. 1. Места работы Луноходов-1 и -2 на изображении видимой части Луны. Фото Luc Viator, https://lucnix.be/.

ленные колесами Yutu-1 и Yutu-2, которые можно использовать для оценки прочности грунта. Это, в частности, было сделано в работе Tang и др. (2020), в которой по изображениям, полученным ТВ-камерами этих луноходов, и построенным по ним цифровым моделям рельефа была определена глубина колеи, оставленной колесами этих луноходов. Полученные данные использовались для расчетов других физико-механических свойств.

В настоящей работе мы измерили глубину колеи, оставленной колесами Лунохода-1 и Лунохода-2, и оценили несущую способность грунта в местах измерений. Полученные результаты сравниваются со сделанными ранее измерениями прибором ПрОП и могут быть использованы для анализа глубин колей подвижных аппаратов уже реализованных и будущих лунных и марсианских миссий.

МЕСТА ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерения глубины колеи, оставляемой колесами Лунохода-1 и Лунохода-2, использовались изображения, полученные панорамными телевизионными камерами, установленными на правом и левом бортах аппарата (см., например, Селиванов и др., 1971). В процессе работы были просмотрены все изображения, полученные панорамными камерами Луноходов-1 и -2. Для дальнейшего изучения выбирались фрагменты панорам, на которых хорошо видны колея, ее ширина и глубина (рис. 2).

Всего были выбраны для измерений 13 фрагментов панорам, полученных Луноходом-1, и 13 – полученных Луноходом-2. Список этих панорам приведен в табл. 1, а места, где были получены эти панорамы, показаны на картах маршрутов на рис. 3 и 4.

Сначала мы пытались использовать наблюдаемую на панорамах ширину колеи, а известно, что она равна 200 мм, в качестве линейного масштаба для определения глубины колеи. Однако быстро убедились, что из-за плохого знания трехмерной ориентировки линии этой ширины результаты измерений глубины содержат большие ошибки и поэтому мы перешли к фотограмметрической процедуре, описанной в следующем разделе.

ИЗМЕРЕНИЯ ГЛУБИН КОЛЕИ

17 ноября 1970 г. АМС Луна-17 доставила на поверхность Луны первый в мире управляемый дистанционно с Земли планетоход Луноход-1, а 15 января 1973 г. АМС Луна-21 доставила на Луну Луноход-2. Для решения навигационных и научных задач оба лунохода были оборудованы идентичными камерами двух типов: малокадровой те-

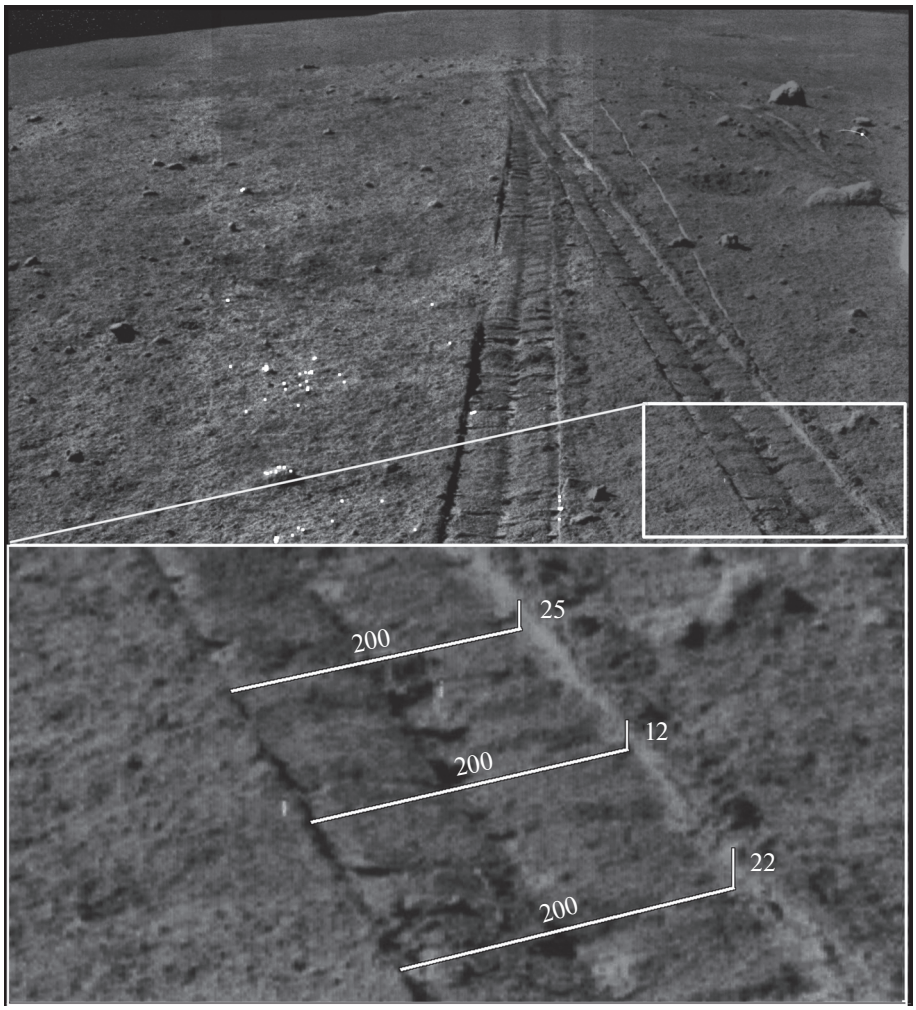


Рис. 2. Пример изображения колеи Лунохода-1, по которому определялась глубина колеи (значения в миллиметрах). Фрагмент панорамы L1_D02_S05_P20g (номер в системе сайта МИИГАиК – http://cartsrv.mexlab.ru/geoportal/), полученной в 600 м к югу–юго-востоку от места посадки аппарата Луна-17, который доставил Луноход-1 на Луну.

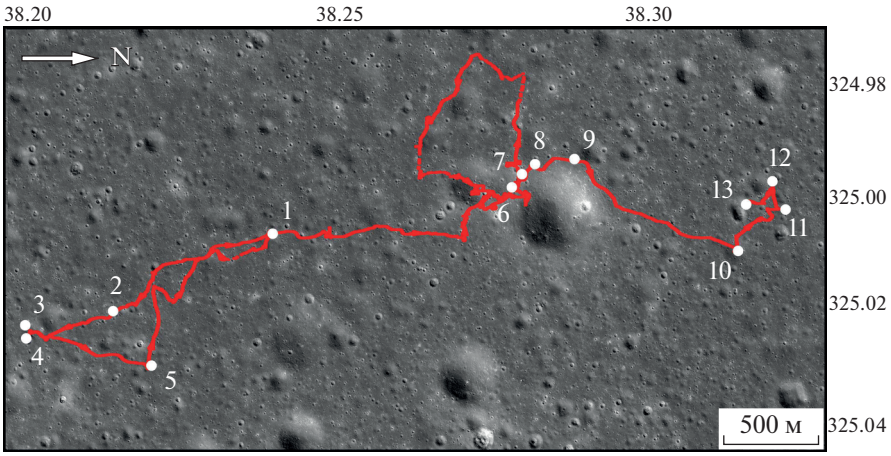


Рис. 3. Маршрут движения Лунохода-1 и места, где были получены ТВ-панорамы, использованные в настоящей работе. Мозаика снимков LROC NAC.

Таблица 1. Номера изображений панорам Луноходов, использованных для оценки глубины колеи. Первое число соответствует номеру панорамы в базе данных http://cartsrv.mexlab.ru/geoportal/, L1 – означает Луноход-1, D01 – первый (лунный) день работы, S03 – порядковый номер сеанса, P05 – порядковый номер панорамы

Номер п/п	Луноход-1	Луноход-2
1	100_L1_D01_S03_P05m	375_L2_D01_S04_P12M
2	132_L1_D02_S05_P20g	383_L2_D01_S05_P20m
3	153_L1_D02_S10_P33g	387_L2_D02_S02_P02m
4	160_L1_D03_S01_P02m	394_L2_D02_S05_p10m
5	171_L1_D03_S05_P10	408_L2_D02_S12_p24m
6	253_L1_D07_S04_P08	412_L2_D02_S13_P29m
7	271_L1_D08_S03_P06m	428_L2_D03_S04_P11m
8	272_L1_D08_S03_P07m	429_L2_D03_S05_P12m
9	274_L1_D08_S04_P09m	436_L2_D03_S11_P18m
10	281_L1_D08_S07_P16m	441_L2_D04_S01_P01m
11	287_L1_D08_S11_P25m	446_L2_D04_S04_P06m
12	307_L1_D09_S05_P10	448_L2_D04_S11_P08m
13	330_L1_D11_S02_P08	455_L2_D05_S02_P01m

левизионной системой (МКТВ) (рис. 5, N5–6) и панорамными телефотометрами (рис. 5, N1–4) (Селиванов и др., 1971).

Основная функция камер МКТВ – навигационная. Установленные в передней части Лунохода они позволяли водителю, управляющему аппаратом с Земли, принимать решения по выбору маршрута передвижения. Изображения, полученные с МКТВ, имеют сравнительно низкое качество (угловое разрешение 0.12°) и почти не применялись для исследований морфологии поверхности Луны. Телефотометры (разрешение 0.06°), установленные по бортам луноходов, обеспечивали получение панорам двух видов: круговые панорамы в вертикальной плоскости (рис. 5, N1 и N3) и в плоскости со слабым наклоном к гори-

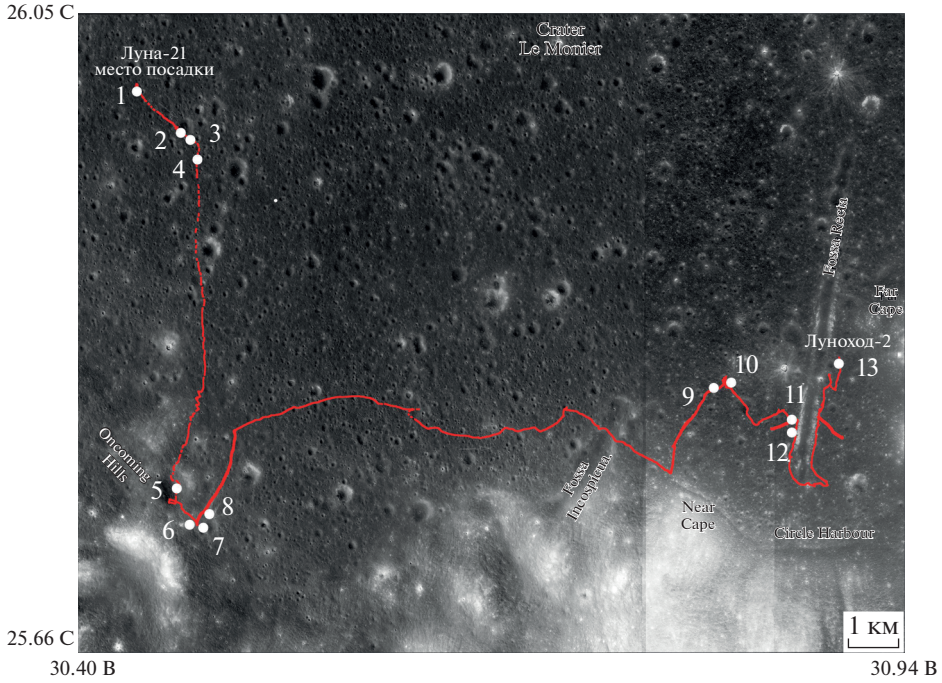


Рис. 4. Маршрут движения Лунохода-2 и места, где были получены ТВ-панорамы, использованные в настоящей работе. Мозаика снимков LROC NAC.

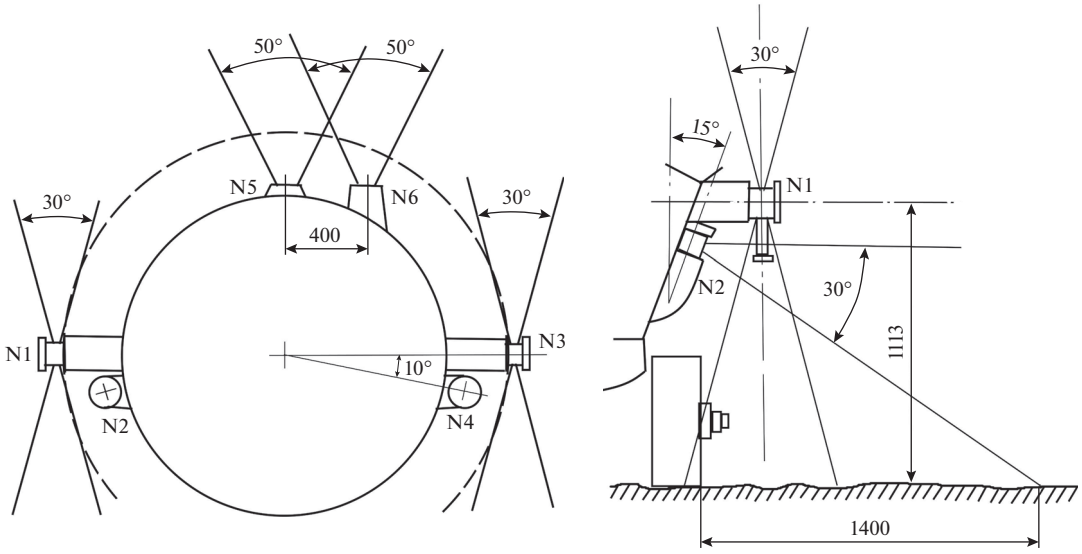


Рис. 5. Схема установки ТВ-камер на Луноходе-1: слева вид сверху; справа – вид спереди (Селиванов и др., 1971).

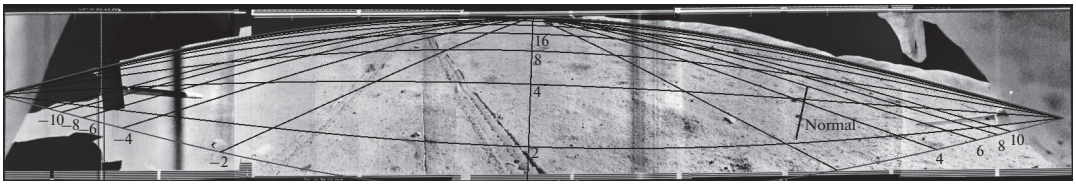


Рис. 6. Сетка дальностей и пример восстановления нормали к поверхности Луны на панорамном снимке L2_D02_S05_P10 Лунохода-2.

зонту (рис. 5, N2 и N4). Последние обеспечивали съемку поверхности с охватом горизонта чуть более 180°. На вертикальных камерах был установлен специальный прибор – оптический датчик лунной вертикали, по которому определялся наклон Лунохода в момент съемки панорамы, что позволяло рассчитывать географические координаты данного места. Горизонтальные панорамы позволяют различать детали поверхности размером до нескольких см (рис. 6) вблизи планетохода. Однако технические особенности камер (сферическая проекция изображения) и отсутствие информации об элементах ориентирования (как внешних, так и внутренних) затрудняют обработку панорамных снимков и их использование. Подробно сложности и методика фотограмметрической обработки панорамной съемки описаны в работе (Козлова и др., 2014).

Как сказано выше, для работы по оценке прочности грунта было отобрано по тринадцать панорам в каждом маршруте луноходов (табл. 1). На них отчетливо видны следы грунтозацепов, что давало дополнительную информацию об ориентировке изучаемого отрезка колеи. Именно эти изображения мы использовали для измерения глубины колеи, оставленной колесами луноходов на маршрутах следования.

Как уже отмечалось выше, изображение панорамы выполнено в сферической проекции, где проекция линии горизонта в системе координат камеры представлена дугой, кривизна которой зависит от наклона Лунохода к поверхности.

Для определения высоты кромки вала необходимо проводить измерения по направлению нормали к поверхности Луны. Но из-за сферичности проекции изображения требуется учитывать наклон нормали к поверхности в плоскости изображения. Определение отдельных элементов внешнего ориентирования и положения нормали к поверхности выполнено с помощью специально разработанного программного обеспечения Mexlab Mosaic.

В программе на изображении воссоздается сетка дальностей – набор параллельных линий вдоль двух осей, Y – координата вдоль визирной оси камеры (в системе координат снимка направлена вперед (вдаль от точки лунохода) и в проекции снимка выглядит набором концентрических сферических отрезков), X – перпендикулярна Y и направлена влево (в начало точки сканирования

слева – направо). Высота всех линий учитывает кривизну сферы Луны и соответствует ее поверхности (рис. 6 – сетка дальностей и нормаль к поверхности).

Вычисление координат точек снимка по известным координатам точек местности в системе координат камеры выполняется по следующим формулам:

$$\begin{pmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} X - X_P \\ Y - Y_P \\ Z - Z_P \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \varphi \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathrm{arctg}\left(\dfrac{V_Z}{\sqrt{V_X^2 + V_Y^2}} \right) \\ \mathrm{arctg}\left(\dfrac{V_X}{V_Y} \right) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} L \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\varphi \\ \lambda \end{pmatrix} P^{-1} + \begin{pmatrix} Y_C \\ X_C \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где X_P, Y_P, Z_P – координаты точки линии сетки; X, Y, Z – положение лунохода; M – матрица углов вращения (крен, тангаж, курс); V_X, V_Y, V_Z – вектор в системе координат камеры лунохода; φ, λ – панорамические широта и долгота; P – размер пикселя изображения, равный 0.06 градуса/пиксель; X_C, Y_C – координаты центральной точки снимка в системе координат изображения (в пикселях, для лунохода принято значение (2500,500) – середина изображения).

Для определения превышений необходимо восстановить направление нормали в точки измерения. Для этого в заданной точке снимка (L, S) строится луч (V_X, V_Y, V_Z), выходящий из центра фотографирования до пересечения с поверхностью "сетки". Для получения направления луча используется формула (4):

$$\begin{pmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin(\lambda)\cos(\varphi) \\ \cos(\lambda)\cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} V_X' \\ V_Y' \\ V_Z' \end{pmatrix} = M^{-1} \begin{pmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix} = \left| \frac{Z}{V_Z'} \right| \begin{pmatrix} V_X' \\ V_Y' \\ V_Z' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}. \quad (6)$$

По формулам (5)–(6) на основе V_X, V_Y, V_Z вычисляется точка пересечения луча и поверхности Луны (X_P, Y_P, Z_P). Измерение превышений выполняется только вдоль линии нормали. При измерении отрезка нормали используются формулы (4), (5) и (7).

$$\begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{X_{PN}^2 + Y_{PN}^2}}{\sqrt{V_X'^2 + V_Y'^2}} \begin{pmatrix} V_X' \\ V_Y' \\ V_Z' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где X_{PN}, Y_{PN} – точка начала нормали.

На каждом изображении в радиусе до 7.5 м (чаще в пределах 3 м) от аппарата выполнялось измерение глубины колеи по кромке вала в трех точках. Результаты измерений представлены в табл. 2 и 3 (СКО – среднеквадратичное отклонение) и на рис. 7 и 8.

Из приведенных данных следует, что измеренная глубина колеи для Лунохода-1 находится в пределах от 9 до 49 мм (среднее значение 24 мм, стандартное отклонение 2 мм), а для Лунохода-2 глубина колеи находится в пределах от 12 до 32 мм (среднее значение 21 мм, стандартное отклонение 1 мм), т.е. эти параметры близки друг к другу. Два значения глубины, измеренные в пределах материковой местности холмов Встречные в юго-западной части маршрута Лунохода-2 (20 и 21 мм), находятся в пределах значений, характерных для измерений в пределах морской равнины. Два значения, измеренные вблизи (10–20 м) кромки борозды Прямой (21 и 23 мм) тоже находятся в пределах значений, характерных для морской равнины на удалении от борозды Прямой. Глубины колей, измеренные вблизи (10–20 м) от посадочных платформ Луны-17 и -21 заметно меньше глубин в других местах (9 и 12 мм). По-видимому, это результат раздувания самого верхнего (сантиметры?) более рыхлого слоя грунта выхлопными газами обеспечивающих посадку тормозных ракетных двигателей. Такое раздувание впервые видели астронавты Apollo-11 на конечном этапе посадки (Aldrin и др., 1969). Оптический эффект такого раздувания изучался в ряде работ, например, Kreslavsky, Shkuratov (2003); Kaydash и др. (2011); Clegg и др., 2014; Кайдаш, Шкуратов, 2014. Результат такого раздувания в местах посадки Луны-17 и Луны-21 виден на снимках LROC NAC, полученных при сравнительно большой (>40°) высоте Солнца над горизонтом (рис. 9).

Таблица 2. Результаты измерений глубины колеи Лунохода-1

№ места измерений	№ панорамы	Координаты места съемки, градусы		Тип местности	Глубина колеи в точках, м				Расстояние до третьей (дальней) точки от аппарата, м	СКО измерения глубин, мм
		широта	долгота		1	2	3	среднее*		
1	100	38.238	–35.001	Море	10	7	9	9	1.8	1.1
2	132	38.216	–34.987	Море	22	12	25	20	2.9	1.8
3	153	38.199	–34.981	Море	26	19	28	24	3.2	2.0
4	160	38.205	–34.979	Море	34	45	40	40	2.5	1.6
5	171	38.225	–34.996	Море	16	13	21	17	5.4	3.3
6	253	38.278	–35.012	Море	18	23	19	20	2	1.3
7	271	38.28	–35.015	Море	44	50	52	49	3.2	2.1
8	272	38.284	–35.017	Море	26	15	14	18	4.3	2.6
9	274	38.29	–35.016	Море	23	32	27	27	2.2	1.4
10	281	38.303	–35.003	Море	13	18	17	16	2.1	1.3
11	287	38.316	–35.004	Море	28	37	20	28	3.2	2.0
12	307	38.319	–35.008	Море	18	34	20	24	3.4	2.1
13	330	38.316	–35.008	Море	36	28	8	24	2.5	1.6

* – округление до целых значений.

Таблица 3. Результаты измерений глубины колеи Лунохода-2

№ места измерений	№ панорамы	Координаты места съемки, градусы		Тип местности	Глубина колеи в точках, м				Расстояние до третьей (дальней) точки от аппарата, м	СКО измерения глубин, мм
		широта	долгота		1	2	3	среднее*		
1	375	25.999	30.401	Море	9	14	13	12	2.6	1.6
2	383	25.978	30.431	Море	15	12	22	16	1.9	1.2
3	387	25.974	30.437	Море	15	24	26	22	7.5	4.6
4	394	25.877	30.457	Море	22	13	14	16	2.2	1.4
5	408	25.799	30.508	Материк	24	15	24	21	2.2	1.4
6	412	25.801	30.517	Материк	17	20	23	20	4.2	2.6
7	428	25.799	30.62	Море	19	14	20	18	2	1.3
8	429	25.803	30.726	Море	31	31	34	32	3.7	2.3
9	436	25.815	30.834	Море	20	15	22	19	1.6	1.0
10	441	25.82	30.84	Море	23	20	24	22	2.4	1.5
11	446	25.795	30.891	Море	15	21	28	21	2.4	1.5
12	448	25.796	30.907	Море	25	21	23	23	4.9	3.0
13	455	25.832	30.922	Море	31	23	26	27	1.5	1.0

* – округление до целых значений.

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛУННОГО ГРУНТА ПО ГЛУБИНЕ КОЛЕЙ ЛУНОХОДОВ

Анализ методов оценки прочности лунного грунта

Идея оценки несущей способности по глубине колеи – просадке грунта (sinkage) под колесами полноприводного самоходного аппарата – была предложена еще при исследованиях физико-механических свойств грунта в экспедиции Лунохода-1 (Леонович и др., 1971). При этом ориентировочная глубина колеи, оценка которой была сделана с помощью датчика вертикального положения девятого колеса, на различных участках трассы при прямолинейном движении оказалась в пределах 10–50 мм. Нижняя граница этого диапазона определяется максимальной глубиной следа свободно катящегося девятого колеса, которая составляла 5–10 мм. Эта глубина, в свою очередь, оценивалась при анализе фотопанорам в сравнении с известной шириной обода колеса одометра (рис. 10). Таким образом, погрешность оценки указанного диапазона составляла ±5 мм.

Однако, при наличии в составе самоходного шасси Лунохода-1 специального прибора оценки проходимости (ПрОП), представлявшего собой механический пенетрометр (рис. 11), иные способы оценки физико-механических свойств носили исключительно качественный характер. Тем бо-

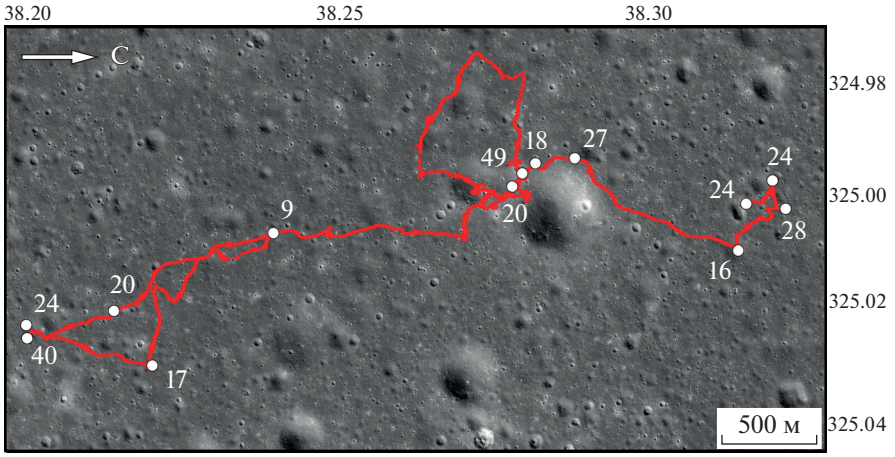


Рис. 7. Результаты измерений глубины колеи Лунохода-1. Значения глубины колеи даны в миллиметрах.

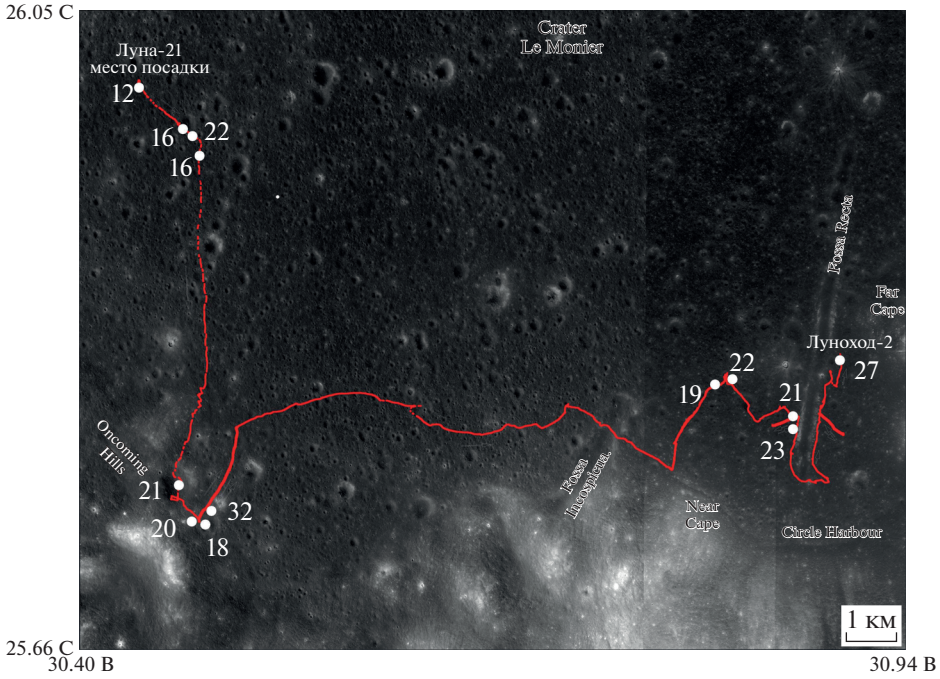


Рис. 8. Результаты измерений глубины колеи Лунохода-2. Значения глубины колеи даны в миллиметрах.

лее что ПрОП был тщательно отработан в наземных испытаниях на различных аналогах лунного грунта. На Луне он работал по автоматическим алгоритмам и цикл измерений составлял считанные минуты.

По трассе движения Лунохода-1 измерения проводились через каждые 15–30 м пути, а общее количество циклов измерений составило 537 (Леонович и др., 1978). По трассе движения Лунохода-2 измерения проводились то достаточно часто, то с большими интервалами движения и их общее количество 497 (Кемурджиан и др., 1976).

Оригинальный конусно-лопастной штамп сначала внедрялся в грунт по нормали к поверхности с помощью одного из двух раздельных приводов подъема-опускания, а затем поворачивался на угол 180° относительно вертикальной оси штампа с помощью привода поворота. Это позволяло на каждом цикле измерений оценить и сопротивление грунта деформации при одноосном нагружении конусом штампа, и сопротивление грунта вращательному срезу лопатками штампа (рис. 12).

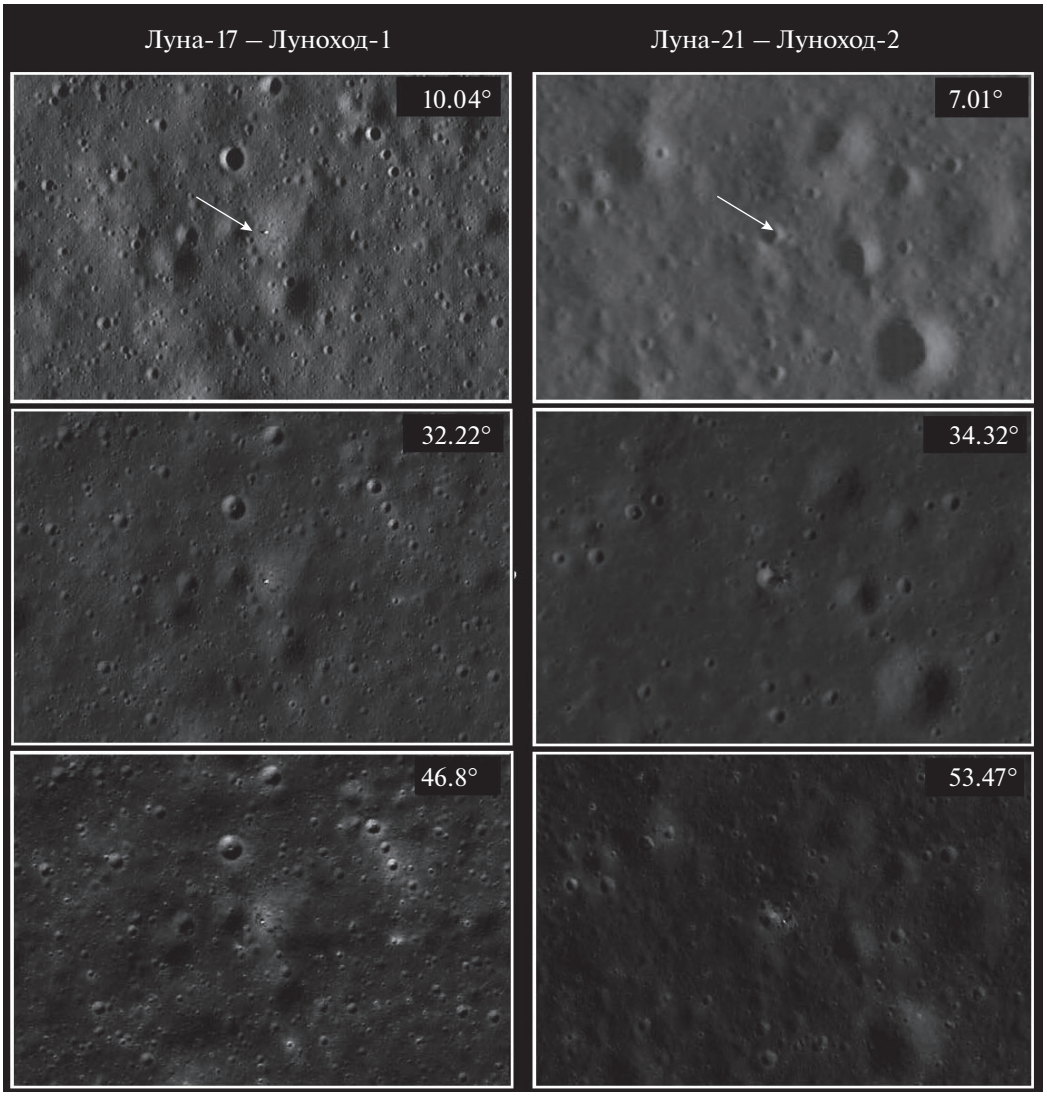


Рис. 9. Посадочная платформа Луны-17 и Луны-21 на снимках LROC NAC. На снимках, полученных при высоте Солнца над горизонтом 46.9° и 53.47°, вокруг платформы видно осветленное гало диаметром порядка 30–40 м. Фрагменты снимков (сверху вниз) для Луны-17 – M162542216RC, M175502049RC, M173144480RC, для Луны-21 – M101971016LC, M1274040806RC, M122007650LC.

Прочность или несущая способность, численно равная среднему значению давления грунта на штамп, определяется при поступательном движении штампа. При повороте штампа определяется сцепление (cohesion), численно равное отношению сил сопротивления повороту грунта к площади цилиндрической поверхности по границе подвижных частиц грунта с неподвижной средой. Наиболее часто встречается грунт с несущей способностью в диапазоне 0.255–0.465 кг/см^2 (25.5–46.5 кПа) (рис. 12а). Близкие диапазоны характерны и для трассы движения Лунохода-2, где наибольшая частота относится к участкам трассы с несущей способностью 27–46 кПа (Кемурджиан и др., 1976).

Теоретически можно предположить возможность оснащения всех будущих луноходов пенетрометрами со штампами одинаковой геометрии (на механизмы и автоматику это ограничение, конечно, не распространяется). Это позволило бы в будущем создать карты прочности лунной поверхности. Несмотря на небольшую глубину внедрения штампов ПрОП советских луноходов (до 100 мм), которая определяет толщину исследуемого слоя, такие карты были бы очень полезны уже на первых этапах проектирования лунной базы и ее оборудования.

Но в реальности сопоставить прочность грунта на просторах разных районов Луны можно только по глубине и характеру колеи луноходов. Это особенно просто сделать, рассматривая трассы дви-

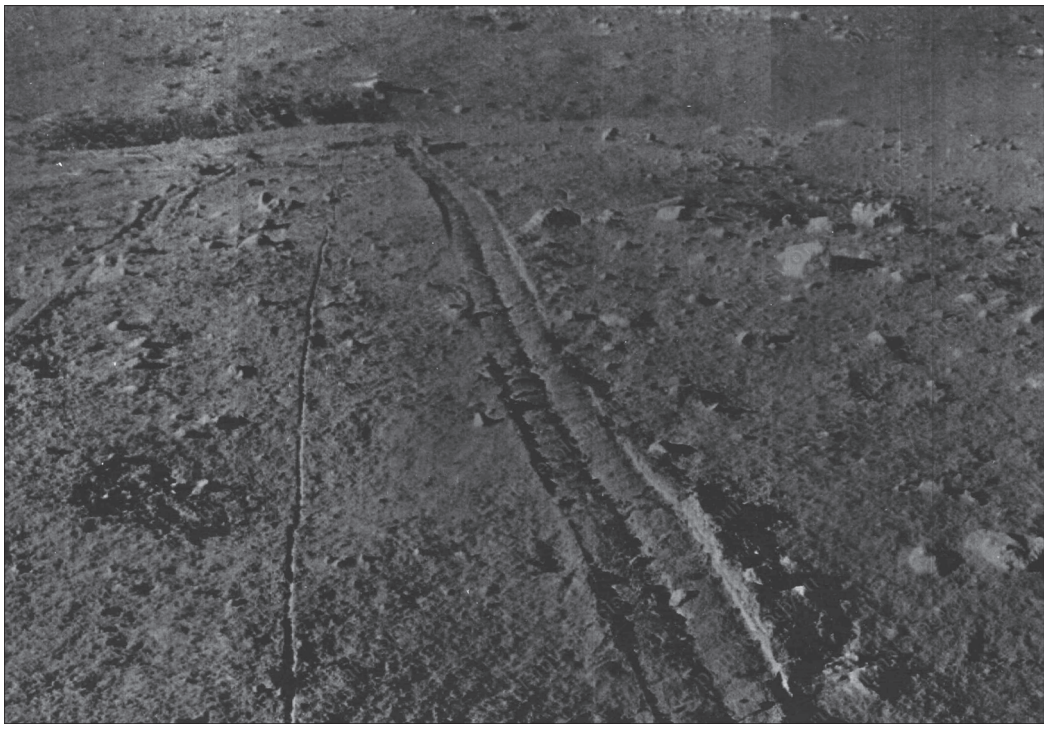


Рис. 10. Участок трассы Лунохода-1 со следом 9-го колеса (между двумя колеями). Фрагмент панорамы L1_D03_S01_P02m.

жения луноходов одного типа, в первую очередь, полных близнецов по конструкции колес, как, например, Yutu и Yutu-2. И это особенно интересно потому, что Yutu работал в какой-то мере исследованном Море Дождей, а Yutu-2, впервые в истории, проложил колею на дне крупного (D = = 186 км) кратера Von Karman, на обратной стороне Луны. Эта сторона существенно отличается от видимой стороны Луны по истории формирования своей поверхности. Но вот сравнение колеи луноходов показывает, что механические свойства поверхностного слоя в морских районах видимой стороны и на обратной стороне могут быть близки друг к другу (рис. 13).

Важно, что съемка колеи обоих луноходов выполнена в местах посадки, на спокойном рельефе с незначительными углами наклона поверхности. Впереди перед каждым луноходом видны небольшие кратеры. Различным является положение Солнца относительно луноходов. Для Yutu оно впереди справа, для Yutu-2 впереди слева. Главным отличием района исследований Yutu являются камни различных размеров и формы – продукты выброса коренных пород. Такая морфология позволяет говорить о сравнительно более молодом возрасте этого образования в Море Дождей в сравнении с кратером на пути Yutu -2

Но в обоих случаях материалом опорной поверхности движения является лунный реголит – переработанный мелкозернистый материал. Ввиду различий во времени переработки зерна реголита на трассе Yutu могут быть более крупными, чем на трассе Yutu-2. Однако эти различия не существенны для описания картины деформации лунного грунта под колесным движителем: основная деформация происходит во время первого цикла нагружения, при этом грунт уплотняется и его прочность увеличивается; восстанавливающая деформация практически отсутствует; буксование ведущих колес на спокойном рельефе практически отсутствует.

Согласно измерениям Tang и др. (2020), просадка грунта на трассе движения Yutu изменялась в пределах 2.5–9.3 мм, а на трассе Yutu-2 – 2.3–7.8 мм, что свидетельствует о близости механических свойств лунного грунта на трассах движения в Море Дождей и в кратере Von Karman. Но проектировщикам новых луноходов, строительных и дорожных машин сооружений лунных баз необходимо знать численные значения несущей способности лунного грунта.

Особенно важно установить корреляцию по отношению к советским луноходам, что позволит в той или иной мере использовать результаты исследований, выполненных ПрОП, отличающиеся высоким уровнем достоверности. В частности, авторы статьи Леонович и др. (1971), в первую очередь В.В. Громов, непосредственно проводивший исследования лунного грунта, доставленного станцией Луна-16, с помощью специально разра-

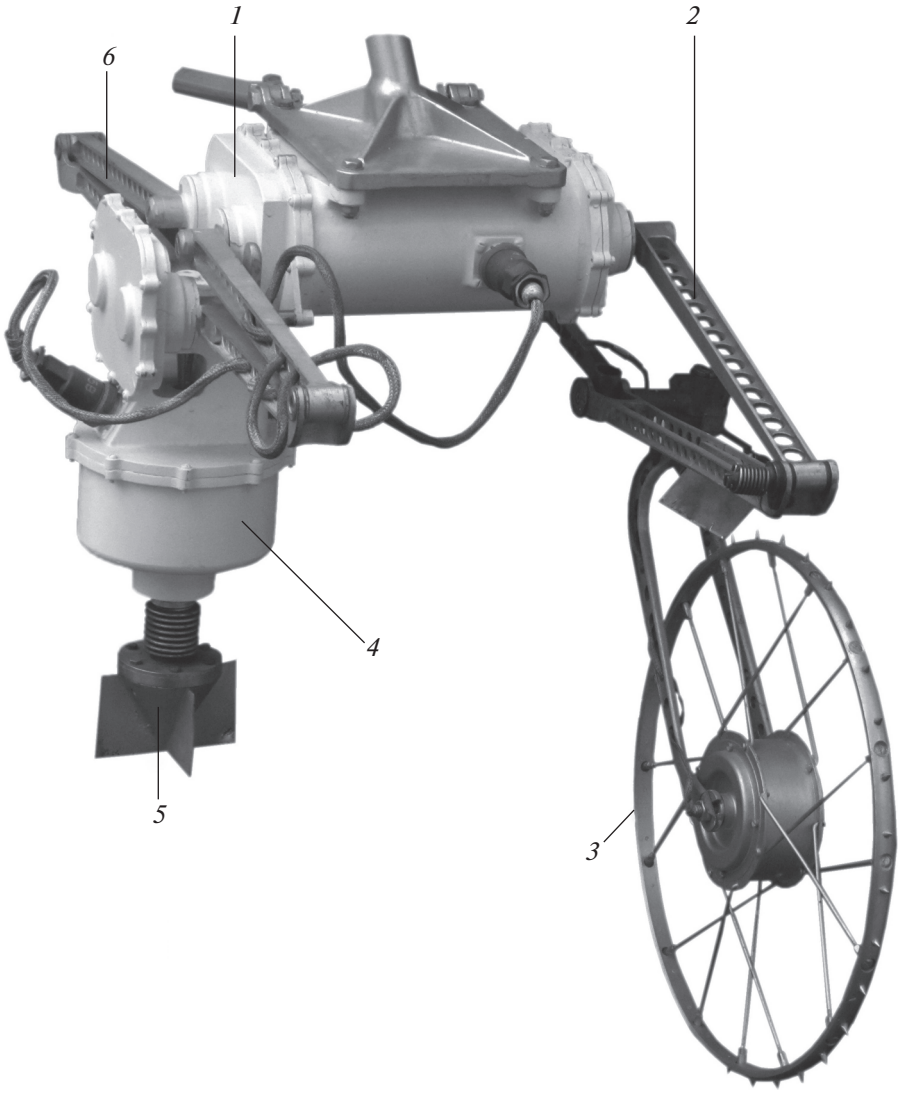


Рис. 11. Прибор оценки проходимости (ПрОП): *1* – блок приводов подъема-опускания штампа и колеса одометра, *2* – механизм подъема-опускания колеса одометра, *3* – колесо одометра с датчиком оборотов, *4* – привод поворота штампа, *5* – конусно-лопастной штамп, *6* – механизм подъема-опускания штампа (Malenkov, 2016).

ботанного оборудования (Кемурджиан и др., 1976) доказали близкое соответствие величины сцепления (когезии) грунта в Море Дождей и в Море Изобилия. В Море Дождей этот параметр лунного грунта измеряли в естественном залегании с помощью ПрОП, установленного на Луноходе-1. Как видно из графика рис. 12б, наибольшей частоте 0.6 соответствовал диапазон измерений 0.0395–0.0595 кГ/см^2 (3.95–5.95 кПа). Сцепление частиц грунта, доставленного из Моря Изобилия, при исследовании в лаборатории находилось в диапазоне 0.04–0.05 кГ/см^2 (4.0–5.0 кПа).

Большой объем научной информации по свойствам лунного реголита был получен во время лунных экспедиций по программе Apollo и в последующих исследованиях доставленного на Землю лунного грунта в американских лабораториях. При этом американские коллеги в своих обобщениях привлекали и результаты исследования образцов лунного грунта, доставленных на Землю советскими автоматическими станциями Луна-16, Луна-20 и Луна-24 (например, Carrier и др., 1991; Carrier, 2005; Colwell и др., 2007).

Много уникальной информации было получено американскими коллегами и по результатам исследований лунного грунта в естественном залегании. Это наблюдения за деформацией и структурой грунта под опорами различных лунных посадочных блоков, вскапывание грунта ковшом манипулятора по программе Surveyor. В экспедициях по программе Apollo астронавты работали с комплектом инструментов, включавшим совок для отбора проб грунта, ручной пенетро-

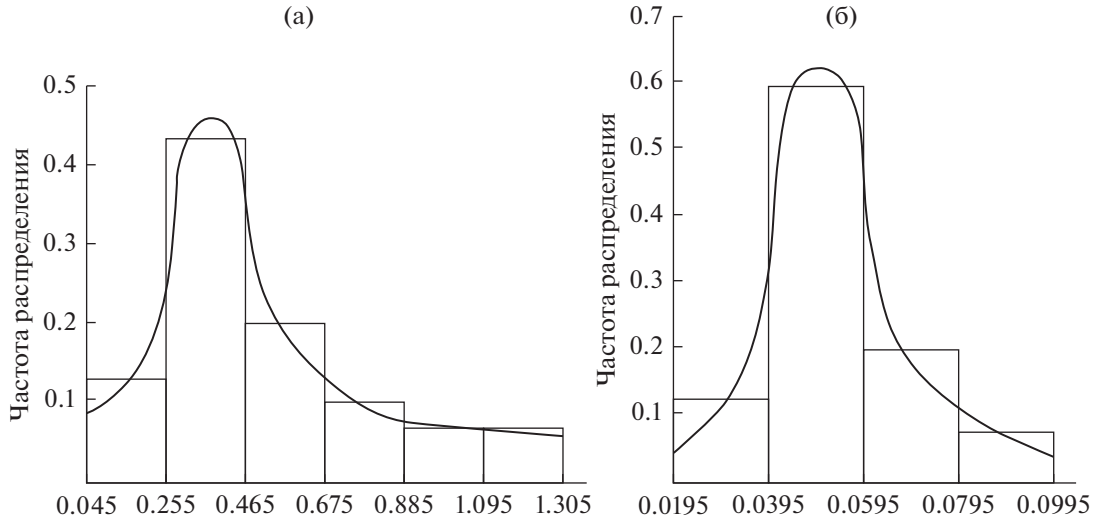


Рис. 12. Типичные гистограммы и кривые распределения величины несущей способности (в кГ/см^2) под нормальной нагрузкой (а) и сцепления (в кг/см^2) частиц грунта при действии касательных нагрузок (б) (Леонович и др., 1971).

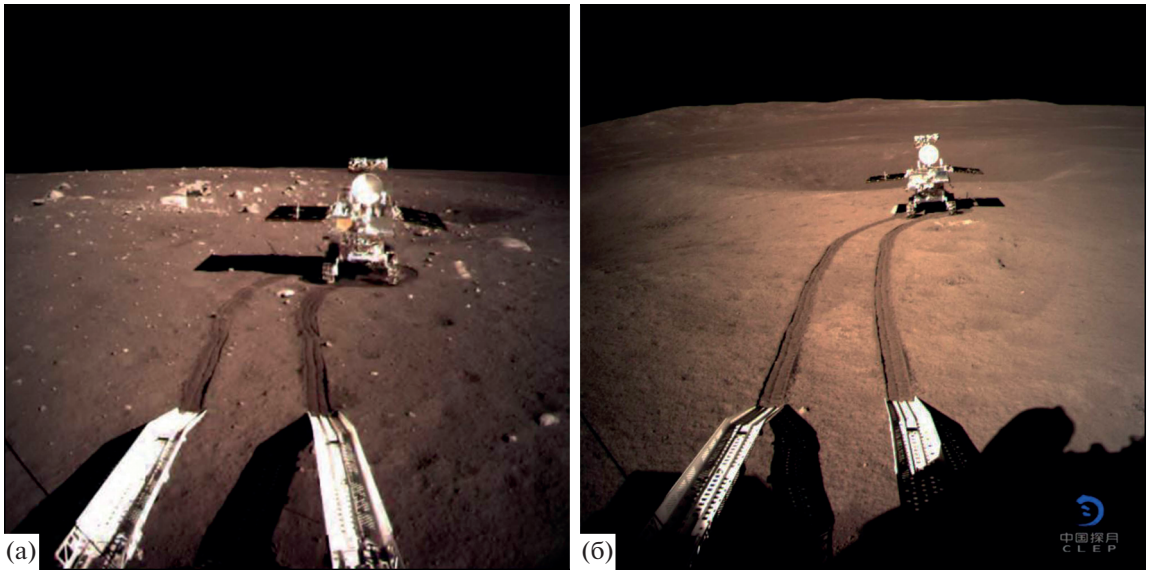


Рис. 13. Колея Yutu в месте посадки Chang'e-3 (а) и Yutu -2 в месте посадки Chang'e -4 (б). Фото China National Space Administration // Xinhua News Agency: https://www.space.com/23971-china-moon-rover-landing-change3-success.html, https://www.space.com/42902-china-moon-far-side-rover-yutu-2-tracks.html.

метр, снабженный записывающей аппаратурой (The Lunar Self-Recording Penetrometer – LSRP), трубки для взятия керна (The Core Tube Sampler), которые можно было забить в грунт специальным молотком, а также ручной бур (например, Costes и др., 1971). Результаты исследований с помощью LSRP расшифровывались по возвращению на Землю.

Общим для этих исследований было физическое участие астронавтов в процессе внедрения в грунт совка, пенетрометра, керна и бура. Астронавт мог впоследствии, в дополнение к кадрам фотофиксации, рассказать ученым об обстоятельствах и особенностях выполнения всех операций. Например, во время экспедиции Apollo-16 при работе с пенетрометром астронавт прикладывал усилие до 215 Н, внедряя штамп на глубину до 760 мм. Глубина бурения в этой экспедиции достигла 2.24 м (Mitchell и др., 1972).

Такие параметры намного превосходили возможности автоматических пенетрометров советских луноходов, которые исследовали только верхний слой реголита толщиной не более 100 мм. Правда этот слой был самым важным для движе-

ния автоматических и пилотируемых луноходов, так как именно с ним взаимодействовал движитель, что определяло тягово-сцепные качества, подвижность и проходимость транспортных средств.

Перечисленные обстоятельства, а также различие оборудования и методик его использования, ограничивает возможность сопоставления результатов советских и американских исследований лунного грунта в естественном залегании по всему спектру его физико-механических характеристик.

Авторы не ставят перед собой подобную задачу даже применительно к опорной поверхности движения потому, что автоматические и пилотируемые луноходы существенно отличаются по конструкции колесных движителей. Тихоходные (до 2 км/ч) роботы, которые должны сохранить подвижность в любых ситуациях, на любом рельефе и грунте, снабжены жесткими колесами с сетчатыми ободами и высокими грунтозацепами. Их простая конструкция позволяет добиться минимальной массы колеса при высоких тягово-сцепных характеристиках. Техническое задание на проектирование самоходного шасси советских луноходов включало преодоление подъемов крутизной 20° по слабосвязному грунту. Фактические углы при выезде Лунохода-1 из кратеров, судя по бортовой телеметрической информации, достигали 25°–27°, а средняя скорость движения, с учетом времени на осмысление ситуации, составила всего 0.14 км/час. Водители подчас меняли курс, применяя движение галсами, но оба лунохода ни разу не теряли подвижность.

Металлосетчатые упругие двухконтурные шины колес пилотируемых лунных вездеходов Lunar Roving Vehicle (LRV) повышали плавность хода и обеспечивали хорошую маневренность на ровных площадках и на склонах. Благодаря правильной оценке пилотом дорожной ситуации на трассе движения и хорошей управляемости машины, максимальные углы подъема, например, LRV-1, которым управлял командир экипажа Apollo-15 David R. Scott, не превысили 12° при средней скорости движения 9.2 км/час (Malenkov и др., 2019). При этом упругие шины оставляли после себя не колею, а только легкие следы.

Краткое описание конструкции колес автоматических луноходов

Конструкция жестких колес советских луноходов это результат работы коллектива конструкторов, исследователей и технологов (рис. 14) (Анисов и др., 1971; Malenkov, 2016). Выбор жесткого колеса (примерно 2500 Н/см), радиальная деформация которого ничтожна в сравнении с деформацией грунта, был обусловлен несколькими причинами. Среди них – ставка на восьмиколесный движитель, который, помимо прочего, до последнего сохранял возможность перехода на гусеничный движитель.

Колесная формула 8 × 8 ограничивала диаметр колес, а колеса малого диаметра, в свою очередь, ограничивали величину упругого прогиба шины и, соответственно, максимальную площадь пятна контакта шины с грунтом. Проектирование ходовой части с оглядкой на гусеничный движитель привело к выбору танкового (другой термин – бортового) способа поворота самоходного шасси Лунохода-1. Но такой способ поворота требует высокой осевой жесткости движителя, недостижимой для колес с упругой шиной. Усложнять конструкцию с одновременным снижением надежности и увеличением массы упругого колеса в сравнении с жестким не было никаких оснований. Необходимый уровень плавности хода обеспечивался упругим элементом рычажной подвески – пучковым титановым торсионом.

Ключевым компонентом колеса является его жесткий обод. Он имеет три профилированных титановых сварных обруча, покрытых сверху плетеной из проволоки металлической сеткой. Сетка пришивается проволокой к крайним обручам и прижимается с помощью заклепок к среднему и крайним обручам двумя рядами косых (не параллельных оси колеса) титановых грунтозацепов, установленных со смещением по углу установки, в шахматном порядке. Поэтому на среднем ободе шаг в два раза меньше, чем на крайних обручах.

Если обручи, связанные между собой титановыми грунтозацепами, образуют силовой каркас, определяющий жесткость обода в радиальном и осевом направлениях, то сетка и высокие грунтозацепы определяют тягово-сцепные свойства колеса. Испытания сплошных и сетчатых дуговых штампов на аналогах лунного грунта показали, что при равной нормальной силе прижатия штампа к грунту, усилие, необходимое для его сдвига, в случае сетчатого штампа на 20–30% больше, чем усилие сдвига штампа с контактной поверхностью в виде металлического листа. Если взаимодействие листа с грунтом определяется исключительно фрикционными свойствами контактной пары, то сетка позволяет подключить к усилию сдвига, численно равному развиваемой тяге, силы сцепления грунта в каждой ячейке сетки, интегрированные по всей площади контакта. Косые (не параллельные оси колеса) грунтозацепы не позволяют сохранить рисунок сетки при движении на мелкозернистом грунте. Но такой рисунок можно увидеть на фото колеи варианта колеса с сетчатым ободом и прямыми грунтозацепами, проложенной на выровненном участке поверхности вулканического песка (рис. 15).

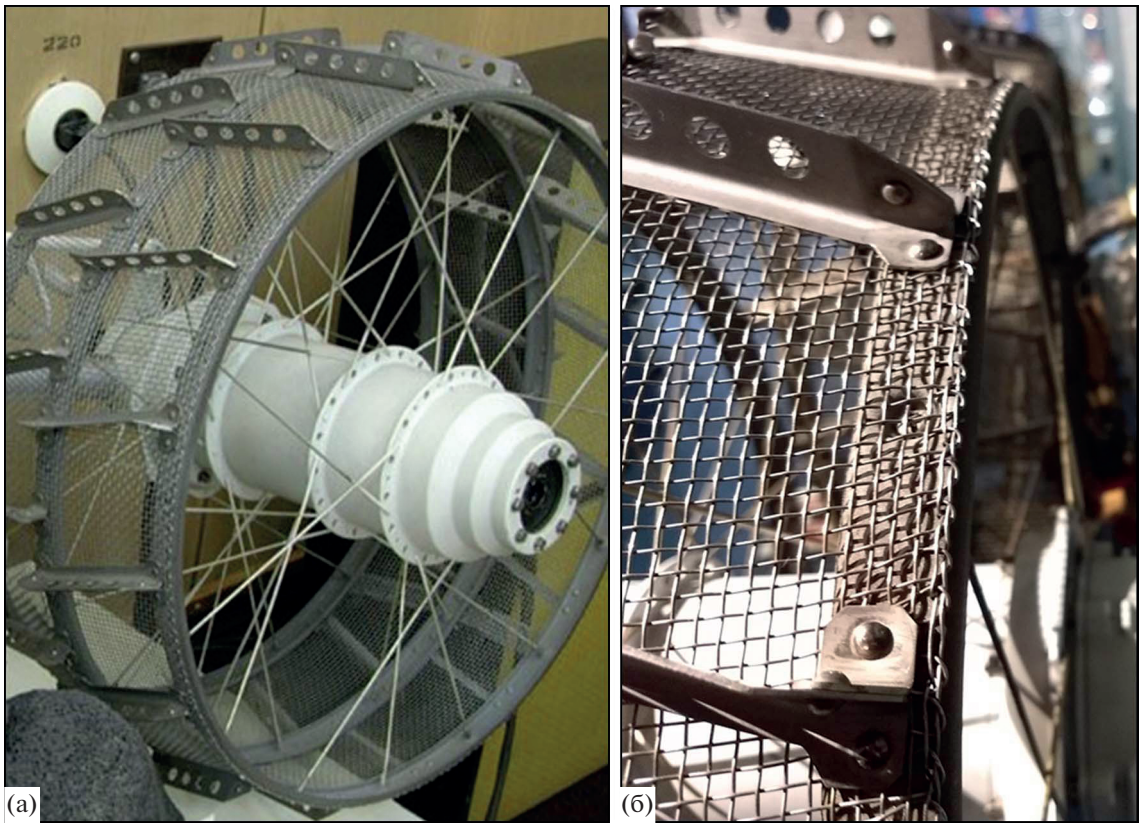


Рис. 14. Общий вид жесткого колеса самоходного шасси советских луноходов (а) и фрагмент заделки проволочной сетки жесткого обода колеса на крайнем обруче (б).

Весьма эффективно увеличивают тягу на слабо связных грунтах высокие грунтозацепы, высота которых ограничивается условием: прирост тяги от деформации грунта должен быть больше, чем одновременное увеличение коэффициента сопротивления движению. Испытания колес с различной высотой грунтозацепов в грунтовых каналах позволили определить, что это условие выполняется при высоте грунтозацепов, составляющей примерно 3% от диаметра. Испытания позволили также выявить оптимальный шаг и количество грунтозацепов по лучшему соотношению “тяговое усилие–масса грунтозацепов”: длина дуги между грунтозацепами по среднему ободу должна составлять примерно 4 см. В грунтозацепах сделаны отверстия – испытания показали, что уменьшение площади контакта с грунтом, при соблюдении некоторых пропорций, не снижает тяговое усилие.

Колесо, фрагмент которого показан на рис. 16, участвовало в различных ходовых испытаниях в течение несколько лет в составе макетов, масса которых порой существенно превышала 1/6 массы Лунохода-1. Испытания проводились не только на аналогах лунного реголита, но и на каменных грядах. Хорошо видны пластические деформации отдельных грунтозацепов, местные искажения рисунка сетки, но он не теряет форму даже при имитации удара одного из колес лунохода массой более 700 кг на максимальной скорости 2 км/ч в жесткое непреодолимое препятствие. Потеря формы колеса произошла только на стенде при статическом радиальном нагружении среднего обруча колеса, закрепленного на стенде силой 5000 Н.

Диаметр среднего обруча больше диаметра крайних обручей, так что в радиальном сечении профиль обода представляет собой линию, близкую к дуге большого диаметра. Дугообразный профиль и косые грунтозацепы снижают величину сопротивления грунта при боковом (перпендикулярном по отношению продольной оси) скольжении колес, неизбежном при бортовом способе поворота.

При движении по твердой поверхности, типа выходов скальных пород, колесо имеет точечный дискретный контакт с опорной поверхностью. Благодаря перекрытию грунтозацепов на среднем ободе улучшается плавность качения на таком основании. На мягких грунтах дискретность грунтозацепов не имеет динамических последствий из-за деформации грунта.

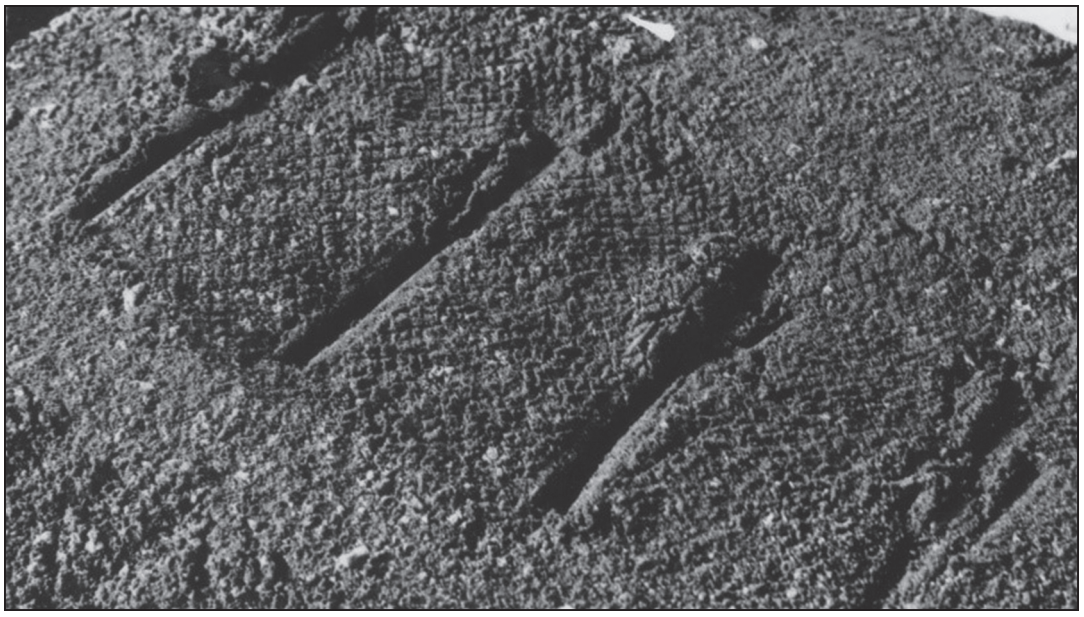


Рис. 15. Отпечаток сетчатого обода колеса на вулканическом песке.



Рис. 16. Обод колеса Лунохода-1 после испытаний в составе ходового макета.

Каждый из обручей связан со ступицей колеса обычными велосипедными спицами, замыкающими чрезвычайно жесткую и прочную пространственную связь ступицы с ободом при минимальной массе и максимальной дешевизне. Ведь на каждое колесо требуется всего 16 покупных спиц.

Однако если между ступицей и ободом необходимо разместить рулевые приводы с механизмами поворота колес относительно оси шкворня, то спицы не годятся. Они перекрывают весь объем между ступицей и ободом в габаритах колеса. В конструкции колес Yutu для организации связи ступицы поворотного колеса с жестким ободом, полностью соответствующим ободу колес советских луноходов, использованы специальные диски сложной конфигурации (рис. 17) (Li и др., 2015). В этом случае, когда мотор – колеса оснащены

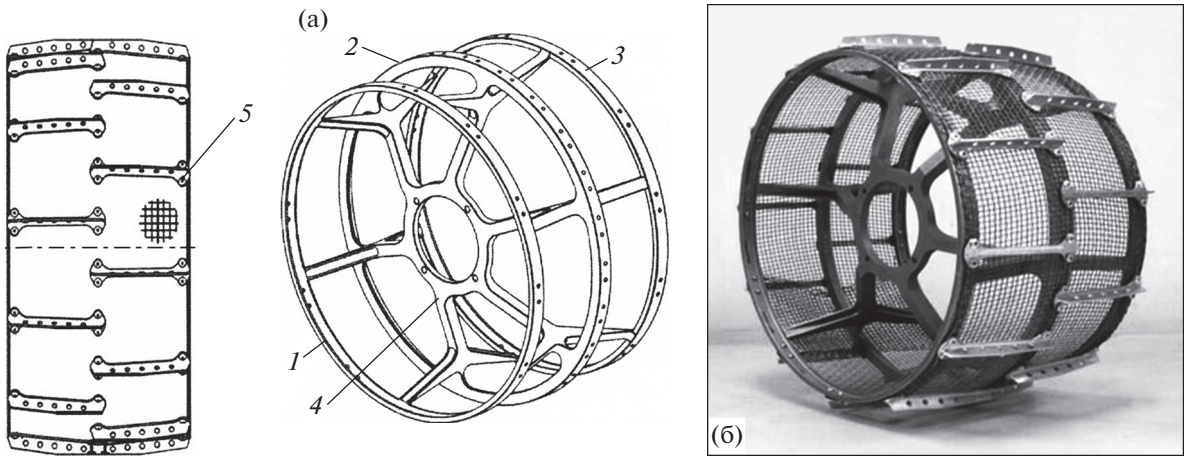


Рис. 17. Конструктивная схема жесткого обода (а) и фото колеса (б) луноходов серии Yutu: *1*, *3* – крайние обручи, *2* – средний обруч, *4* – специальный диск, *5* – грунтозацепы.

рулевыми приводами, дугообразный профиль колеса позволяет минимизировать крутящий момент сопротивления на валу этих приводов.

Основные параметры колес советских и китайских луноходов, необходимые для расчета несущей способности грунта приведены в табл. 4.

В заключение этого подраздела нужно отметить, что различие в ориентации грунтозацепов на ободах колес советских и китайских луноходов, обусловленное применением различных способов маневрирования, не влияет на результаты расчетов при движении на реголите. В обоих случаях грун-

Таблица 4. Параметры колес луноходов

Параметр	Луноход-1 и Луноход-2	Yutu и Yutu-2
Диаметр колеса по грунтозацепам, мм	510	300
Ширина колеса, мм	200	150
Высота грунтозацепов, мм	15	10
Количество грунтозацепов	32 (по 16 грунтозацепов на каждой половине обода)	24 (по 12 грунтозацепов на каждой половине обода)
Длина дуги между грунтозацепами по среднему обручу, мм	≈42	≈39
Расположение грунтозацепов на ободе	В шахматном порядке	В шахматном порядке
Ориентация грунтозацепов	Под углом относительно оси колеса (косые)	Параллельно оси колеса (прямые)
Тип конструкции обода колеса	Сетчатый с двумя крайними и средним обручами, связанными грунтозацепами	Сетчатый с двумя крайними и средним обручами, связанными грунтозацепами
Материал и диаметр проволоки сетки, мм	Сталь, 0.5	Титан, 0.6
Внутренний (на просвет) размер ячейки сетки (примерно), мм	3.0 × 3.0	4.0 × 4.0
Профиль обода	Имитация дуги: диаметр среднего обруча больше диаметра крайних	Имитация дуги: диаметр среднего обруча больше диаметра крайних
Статическая нагрузка на каждое колесо на ровной горизонтальной поверхности на Луне, Н	156 (Луноход-1) 73 (Луноход-2)	36
Масса колеса, кг	2.7 (со ступицей)	Нет данных

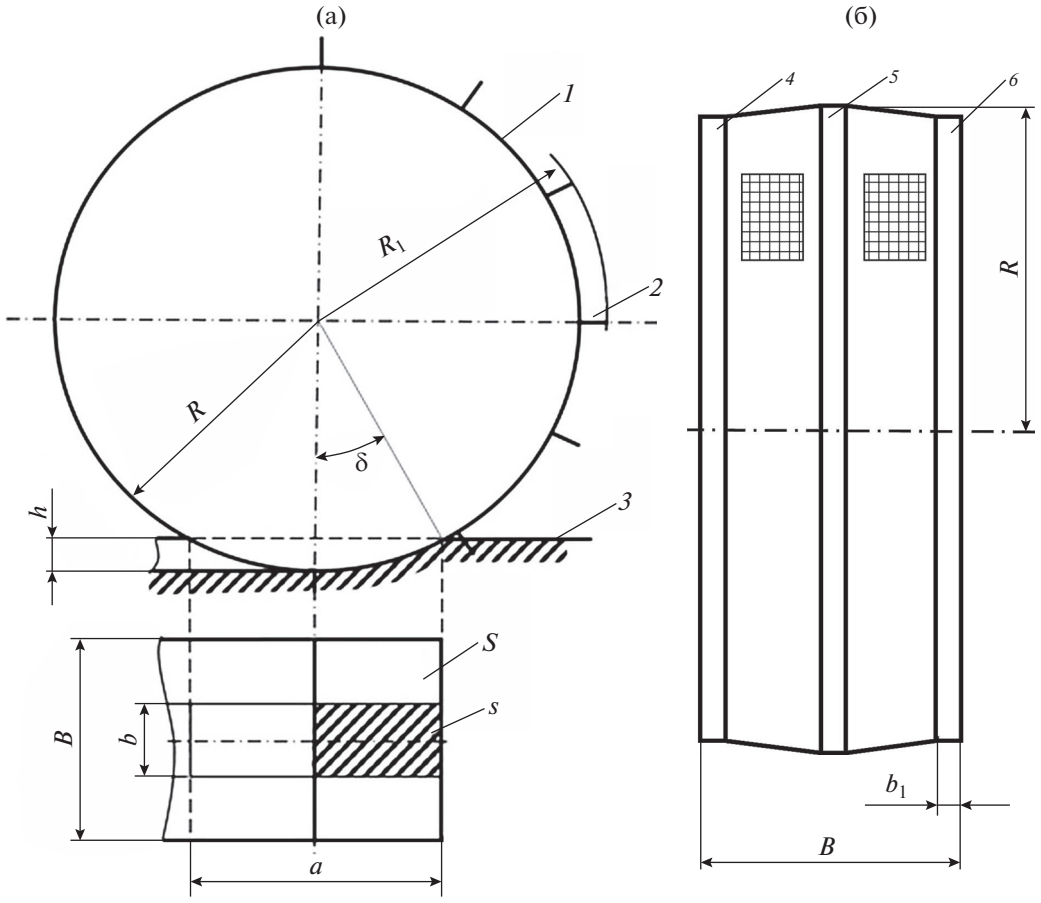


Рис. 18. Расчетная схема статического взаимодействия жесткого сетчатого обода колеса шасси Лунохода-1 с лунным реголитом (а) и схема обода (б): *1* – обод, *2* – грунтозацеп, *3* – грунт, *4*, *6* – крайние обручи, *5* – средний обруч, *S* – площадь пятна контакта, *s* – расчетная площадь контакта.

тозацепы врезаются в грунт на всю высоту, а качение происходит на ободах, геометрия которых и определяет площадь пятна контакта.

Методика расчета давления колес луноходов с жестким металлосетчатым ободом и грунтозацепами

Полная аналогия конструкции жестких ободов колес советских и китайских луноходов позволяют производить расчеты несущей способности грунта под многоколесным движителем по единой методике. Едиными должны быть и допущения, которые, конечно, упрощают реальную картину взаимодействия движителя с грунтом, но гарантируют достаточную точность сравнительных оценок. Ключевое значение в таких расчетах имеет точность определения просадки, все другие данные являются известными параметрами луноходов. Допущения могут быть сформулированы следующим образом:

– колея проложена на ровной поверхности лунного реголита, движение происходит в установившемся режиме со скоростью не более 2 км/ч, взаимодействие колес с грунтом носит статический характер, качение колес осуществляется по ободу, в расчетах используется диаметр среднего обруча;

– перераспределение нормальных реакций, вызванных реактивными крутящими моментами тяговых приводов, в расчетах не учитывается;

– просадка грунта считается результатом первой деформации, т.е. деформацией под передними колесами, скольжение колес на грунте – юго-западное или буксование, отсутствует.

Перечисленные допущения приводят к расчетной схеме, приведенной на рис. 18.

Длина хорды a (рис. 18) равна

$$a = 2R\sin\delta, \tag{8}$$

где $\sin\delta = \sqrt{1-\cos^2\delta}$, $\cos\delta = \dfrac{R-h}{R}$.

После преобразований получим

$$a = 2\sqrt{2hR - h^2}, \tag{9}$$

где $R = R_1 - h_1$, R_1 – радиус колеса по грунтозацепам, h_1 – высота грунтозацепов.

Профиль обода колеса имеет дугообразную форму, при этом разница в диаметре среднего и крайних ободов настолько мала, так что влиянием кривизны профиля на расчетную площадь контакта колеса с грунтом можно пренебречь. Для расчета принимаем диаметр обода равным диаметру среднего обруча.

Длина дуги l, образованная хордой a, равна

$$l = 2R\delta, \quad (10)$$

где $\delta = \arcsin(a/2R)$.

Тогда получим:

$$l = 2R\arcsin\left(a/2R\right). \quad (11)$$

Продольные проволочки сетки создают опорную площадь контакта по хорде дуги, образованной погруженной в грунт частью обода колеса, на отрезке хорды длиной $a/2$.

Поперечные проволочки, с учетом того, что сетка имеет квадратные ячейки, создают опорную площадь контакта, соответствующую длине проволоки, равной длине дуги $l/2$.

С учетом сетки расчетная ширина площади контакта s равна

$$b = 3b_1 + n_1 d_1\left(1 + l/a\right), \quad (12)$$

где b_1 – ширина обруча, d_1 – диаметр проволоки плетеной сетки обода, n_1 – количество ячеек сетки между средним и крайними обручами.

С учетом продольных и поперечных проволочек сетки расчетная площадь контакта s определяется величиной

$$s = b0.5a. \quad (13)$$

Подставляя в это выражение (12) получим

$$s = 0.5a(3b_1 + n_1 d_1\left(1 + l/a\right)). \quad (14)$$

Несущая способность лунного грунта при изложенных допущениях равна средней величине давления q контактных площадок всех ходовых колес на грунт:

$$q = \frac{mg}{is}, \quad (15)$$

где m – полная масса лунохода, g – ускорение свободного падения на Луне, i – количество мотор – колес.

Результаты расчета несущей способности по колее советских и китайских луноходов

Исходные данные для советских луноходов: радиус колеса $R_1 = 255$ мм, высота грунтозацепов $h_1 = 20$ мм, масса $m = 756$ кг (Луноход-1) и $m = 840$ кг (Луноход-2), $g = 1.62$ м/с^2, диапазон глубины колеи: 9–49 мм (Луноход-1), 12–32 мм (Луноход-2).

Исходные данные для китайских луноходов: $R_1 = 150$ мм, $h_1 = 10$ мм, $m = 135$ кг, $g = 1.62$ м/с^2, диапазон глубины колеи: 2.5–9.3 мм (Yutu), 2.3–7.8 мм (Yutu-2) (Tang и др., 2020).

Результаты расчетов удельного давления колеса Лунохода-1 и -2 и китайских луноходов в зависимости от глубины колеи показаны на рис. 19. Пунктирной линией показаны расчетные характеристики. Сплошной линией показаны участки расчетных характеристик, соответствующие диапазону между минимальным и максимальным значениями глубины колеи на исследуемом участке трассы. Точки на кривых для Лунохода-1 и -2 соответствуют данным глубины колеи на исследованных участках. Для луноходов Yutu и Yutu-2 точки соответствуют границам диапазона глубины колеи согласно приведенным выше исходным данным.

Таким образом, приведенные на рис. 19 расчетные кривые гиперболического типа представляют собой зависимость удельного давления колеса на грунт от величины площади пятна контакта колеса с грунтом при его погружении на величину h. Площадь пятна контакта представляет собой проекцию на горизонтальную плоскость контактирующей с грунтом поверхности колеса. При этом колесо, погружаясь в грунт, оставляет за собой колею той же глубины. Эта зависимость имеет физический смысл в диапазоне погружения колеса в грунт на величину h от нуля до значения, равного радиусу колеса.

При $h = 0$ площадь пятна контакта равна нулю и удельное давление стремится теоретически к бесконечности. Условно можно представить, что колесо при этом стоит на абсолютно твердом грунте. При $h = R$, т.е. условно колесо погрузилось в рыхлый грунт по ступицу, удельное давление определяется площадью пятна контакта $s = bR$.

Используя расчетные кривые как своего рода номограммы, по глубине колеи на оси ординат находим соответствующее определенной кривой удельное давление, которое можно интерпретировать как прочность грунта, по которому движется колесо. Таким образом, данные кривые позволяют сравнивать условия движения колеса, характеризуемые прочностью грунта.

На рис. 19 видно, что Луноход-1 имеет широкий разброс по условиям движения (кривая *1*), которые характеризуются диапазоном глубины колеи 9–49 мм, что соответствует диапазону прочности грунта, определенному по удельному давлению колес, 23.4–9.8 кПа.

Расчетная кривая *2* Лунохода-2 расположена над кривой *1*, поскольку масса Лунохода-2 больше. На исследуемом участке глубина колеи изменяет-

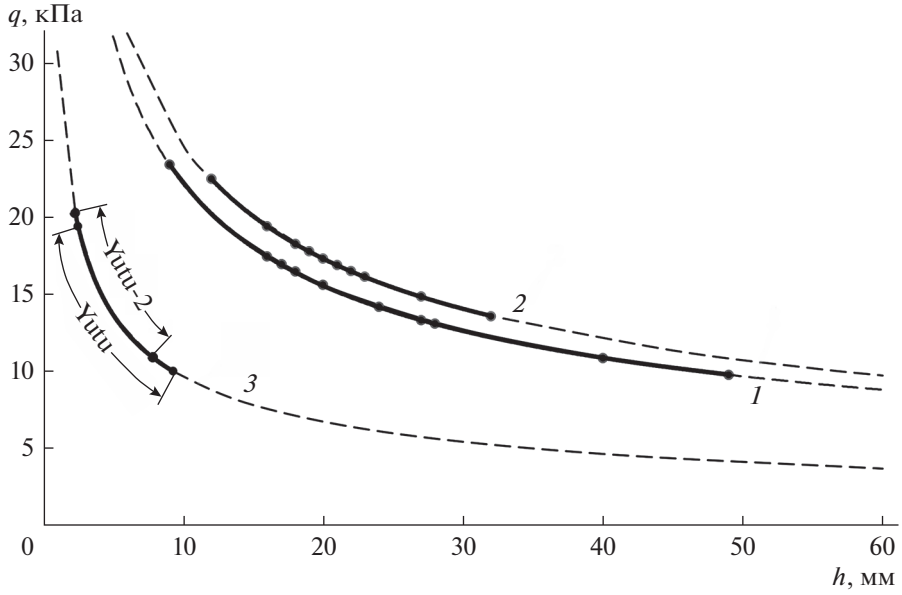


Рис. 19. Удельное давление колес q в зависимости от глубины колеи: *1* – Луноход-1; *2* – Луноход-2; *3* – Yutu и Yutu-2.

ся в диапазоне 12–32 мм, что соответствует диапазону прочности грунта, определенному по удельному давлению колес, 22.4–13.5 кПа. Видим, что диапазон условий движения, характеризуемых прочностью грунта, для Лунохода-2 находится внутри интервала, полученного для Лунохода-1. Причем этот диапазон смещен в сторону более высоких удельных давлений, это означает, что для исследуемого участка трассы Лунохода-2 движение происходило по относительно прочному грунту. Для сравнения, если бы Луноход-2 шел по участку трассы Лунохода-1, он оставил бы след колеи глубиной примерно до 60 мм.

Для указанного выше диапазона глубины колеи Yutu 2.5–9.3 мм, в соответствии с расчетной зависимостью (кривая *3*) рис. 19 диапазон прочности лунного грунта составил соответственно 19.4–10.0 кПа. Для Yutu-2 глубина колеи изменялась в диапазоне 2.3–7.8 мм, что определяет соответственно диапазон прочности грунта 20.2–10.9 кПа.

При сравнении результатов расчета видно, что условия работы обоих китайских луноходов фактически находятся внутри диапазона, полученного для Лунохода-1, при этом величина этого диапазона у каждого из китайских луноходов меньше, что говорит о не таком большом разнообразии условий работы Yutu и Yutu-2 по сравнению с Луноходом-1. Это объясняется тем, что Луноход-1 прошел существенно большее расстояние и, кроме того, он имеет более высокую проходимость. Так, Луноход-1 прошел около 10 км. Луноход Yutu прошел 114 м. Участок пути Yutu-2, для которого выполнен данный анализ колеи, тоже незначителен. По данным на 21 декабря 2020 г., за 25 лунных дней путь, пройденный луноходом Yutu-2, составил 600.6 м.

Конструкция жестких ободов колес советских и китайских луноходов является идентичной, поэтому вполне ожидаемо получилось, что и характеристики 1 и 3, приведенные на рис. 19, являются подобными. Степень подобия определяется нагрузкой на колесо и его размерами. Нагрузка на колесо на ровной горизонтальной поверхности у Лунохода-1 составляет 156 Н, а у Yutu – 36 Н, т.е. в четыре раза меньше.

Расчетно-теоретический анализ взаимозависимости измерений прочности грунта конусным штампом ПрОП и колесом Лунохода-1 по глубине колеи

Прибор оценки проходимости, который был установлен на советских луноходах (рис. 11), имел следующие параметры конусно-лопастного штампа (в размерности, указанной в первоисточнике, например, Кемурджиан и др., 1976):

диаметр основания конуса 50 мм;

высота конуса 44 мм;

диаметр по лопастям 70 мм;

усилие внедрения штампа до 20 кГ;

глубина внедрения 50–100 мм;

угол поворота штампа до 90°;

вращающий момент на штампе до 0.5 кГм.

Нагружение штампа в приборе осуществлялось статической нагрузкой с помощью рычажного механизма с электроприводом. Реакция от

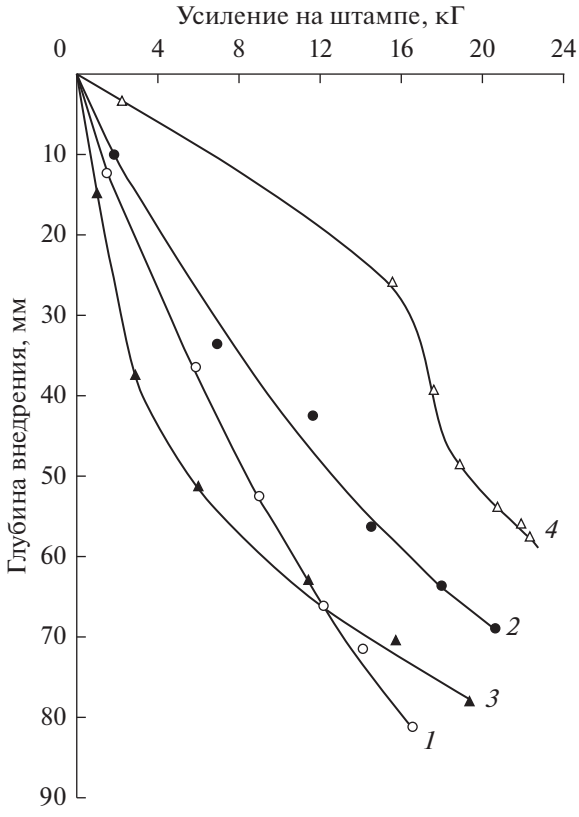


Рис. 20. Кривые внедрения конусно-лопастного штампа в лунный грунт: *1* – горизонтальный участок лунной поверхности; *2* – склон кратера; *3* – вал кратера; *4* – участок, покрытый мелкими камнями.

усилия внедрения воспринималась корпусом лунохода.

Внедрение штампа в грунт производилось до заглубления на полную его высоту, при этом измерялось усилие внедрения. Если внедрение штампа при достижении максимального усилия внедрения 20 кГ полностью в грунт не происходило, измерялась глубина внедрения конусной части.

Несущая способность определялась как среднее удельное давление, приходящееся на основание штампа, при погружении последнего на глубину, равную его высоте. Если штамп внедрялся на глубину, меньшую его высоты, несущая способность определялась как величина удельного давления, приведенного к площади сечения конуса поверхностью грунта.

На рис. 20 приведены для примера кривые внедрения конусно-лопастного штампа в лунный грунт. По графику видно, что минимальная чувствительность прибора при измерении параметров внедрения достаточно высокая. Так начальным измерениям на кривых соответствует минимальное усилие около 1 кГ, а минимальный ход штампа при начальных измерениях составляет порядка несколько миллиметров.

В случае пренебрежения влиянием лопастей, которые имеют толщину всего 1 мм, давление конусного штампа на грунт в зависимости от глубины внедрения определяется по формуле:

$$q_p = P/S_\text{р}, \tag{16}$$

где P – усилие внедрения; $S_\text{р}$ – площадь сечения штампа поверхностью грунта.

$$S_\text{р} = h_\text{р}^2 \text{tg}^2(\beta/2), \tag{17}$$

где β – угол при вершине конуса; $h_\text{р}$ – глубина внедрения штампа.

Тогда:

$$q_\text{р} = \frac{P}{h_\text{р}^2 \text{tg}^2(\beta/2)}. \tag{18}$$

Так как нагрузка на штамп может изменяться от нуля до 20 кГ, можно построить семейство кривых, характеризующих область удельных давлений штампа на грунт для разных усилий нагружения и величины внедрения в грунт. Расчетные зависимости удельного давления штампа, в зависимости от глубины погружения в грунт в пределах конусной части для разных нагрузок, показаны на рис. 21.

Семейство кривых ПрОП наглядно демонстрирует, что диапазон измерений несущей способности грунта с помощью этого прибора является несоизмеримо более широким в сравнении с оценками по глубине колеи. Это обычное преимущество специального прибора перед подручными средствами измерений. Измерения могут производиться как на слабонесущих грунтах с несущей способностью 5–10 кПа, так и на достаточно прочных, с несущей способностью более 100 кПа.

Как видно, кривые имеют гиперболическую форму, как и расчетная зависимость удельного давления колеса Лунохода-1 в зависимости от глубины колеи для исследованного участка трассы, которая также показана на рис. 21.

Однако кривые отличаются кривизной, что обусловлено разной физической картиной деформации грунта конусным штампом и условным колесным штампом. Форма конусного штампа позволяет определять прочностные характеристики грунта при постоянном давлении при внедрении штампа в пределах высоты конусной части. Для процесса осадки условного колесного штампа удельное давление зависит от деформации уплотнения грунта.

С целью получения зависимости между двумя методами определения механических свойств лунного грунта был выполнен расчетно-теоретический анализ и сопоставлены методики и результаты оценки несущей способности конусным и колесным штампами.

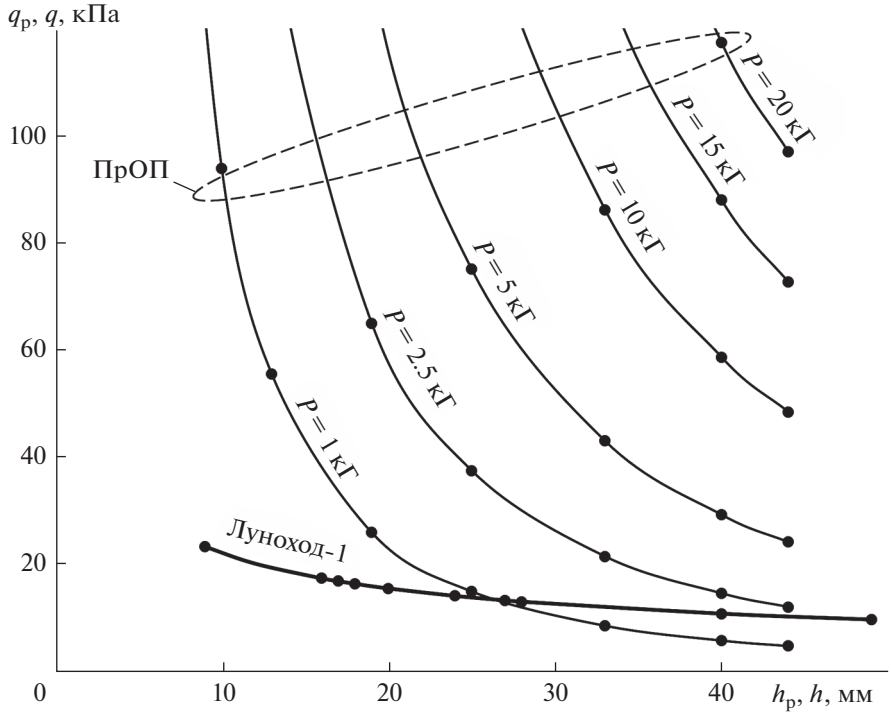


Рис. 21. Расчетные зависимости удельного давления конусного штампа $q_р$ ПрОП для разных нагрузок (семейство кривых ПрОП обозначено замкнутой пунктирной линией) и колеса Лунохода-1 q в зависимости, соответственно, от глубины внедрения в грунт и от глубины колеи.

При внедрении конусного штампа (рис. 22) происходит уплотнение грунта и трение скольжения конусной поверхности штампа в грунте. Сила трения $R_{\tau 1}$ пропорциональна нормальной реакции R_{n1}, представляющей результирующую силу давления грунта на соответствующую площадь боковой поверхности конуса. Давление грунта возникает в результате его сопротивления деформации уплотнения. В расчете принимается допущение, что давление грунта распределено равномерно по боковой поверхности конуса.

С учетом принятых выше допущений, силы, действующие на конусный штамп при внедрении в грунт (рис. 22), определяются следующими выражениями:

$$P = q_р \frac{\pi D^2}{4}, \tag{19}$$

где $q_р$ – вертикальное удельное давление силы P, действующей на верхнюю часть конуса.

$$R_{n1} = \frac{\sigma_1}{2} \frac{\pi D^2}{4\sin(\beta/2)}, \tag{20}$$

где σ_1 – равномерно распределенное давление грунта по боковой поверхности конуса в результате деформации уплотнения.

$$R_{\tau 1} = fR_{n1}, \tag{21}$$

где f – коэффициент трения конусной поверхности штампа о грунт.

Из условия равновесия сил в проекции на вертикальную ось следует:

$$P = 2R_{n1}\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) + 2R_{\tau 1}\cos\left(\frac{\beta}{2}\right). \tag{22}$$

Из этого уравнения, с учетом формул (19)–(21) получается следующая зависимость давления ко-

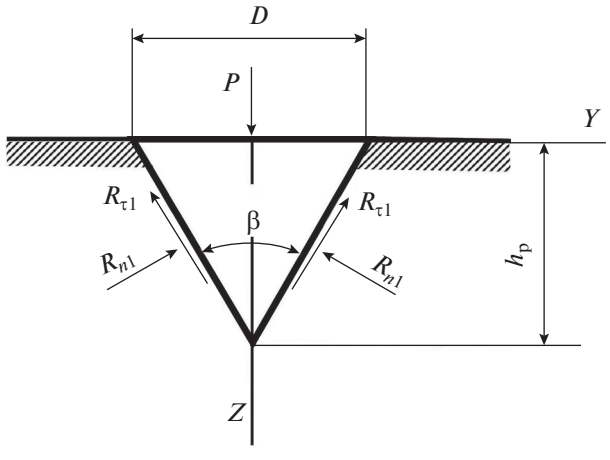


Рис. 22. Схема сил при внедрении в грунт конусного штампа.

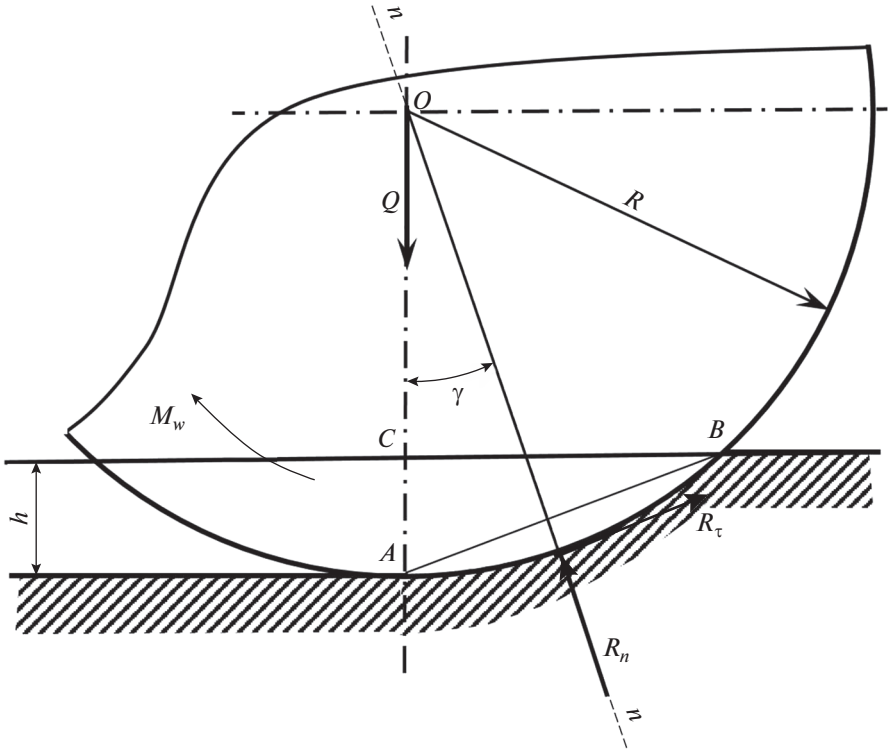


Рис. 23. Схема сил и моментов, действующих на ведущее жесткое колесо при его качении по деформируемому грунту.

нусного штампа от параметров его взаимодействия с грунтом:

$$q_\text{р} = \sigma_1\left(1 + \frac{f}{\text{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)}\right). \quad (23)$$

В случае взаимодействия прямолинейно движущегося жесткого колеса с деформируемым грунтом (рис. 23), согласно принятым выше допущениям, грунт не имеет остаточных упругих деформаций, а колесо катится без проскальзывания и, погружаясь в грунт на глубину h, оставляет за собой колею той же глубины. При этом реакция грунта действует по нормали к поверхности обода колеса и, согласно принятому допущению, определяется равномерно распределенным давлением грунта по ободу в пределах его сектора, находящегося в контакте с грунтом.

К колесу приложен момент вращения M_w, часть силы веса лунохода Q, и реакции грунта: касательная реакция R_τ, обусловленная сцеплением обода колеса с грунтом, и нормальная реакция R_n, отражающая давление грунта на обод. Точка приложения сил R_τ и R_n определяется углом γ, равным половине угла сектора колеса, находящегося в контакте с грунтом.

Уравнение равновесия сил, в проекции на линию n–n:

$$Q\cos\gamma - R_n = 0, \quad (24)$$

$$Q = qs, \quad (25)$$

где q – вертикальное удельное давление колеса на грунт; s – площадь обода колеса, находящегося в контакте с грунтом, в проекции на горизонтальную плоскость.

$$R_n = \sigma s_1, \quad (26)$$

где σ – величина давления грунта, определяющая нормальную реакцию R_n, s_1 – площадь обода колеса, находящегося в контакте с грунтом, в проекции на плоскость, перпендикулярную линии n–n.

Учитывая, что ширина обода в проекциях не меняется:

$$\frac{s}{s_1} = \frac{CB}{AB} = \cos\gamma. \quad (27)$$

Тогда из (17) с учетом (18)–(20) получим

$$q = \frac{\sigma}{\cos^2\gamma}. \quad (28)$$

Из геометрических соотношений:

$$\frac{AB}{2} = R\sin\gamma, \quad h = AB\sin\gamma, \quad (29)$$

следует:

$$\sin^2\gamma = \frac{h}{2R}. \quad (30)$$

Тогда из (28) с учетом (30) получается следующая зависимость давления колеса q от его геометрических параметров и глубины погружения в грунт:

$$q = \frac{\sigma}{1-\sin^2\gamma} = \frac{\sigma 2R}{2R-h}. \quad (31)$$

Из сопоставления выражений для расчета q_p (23) и q (31) видно, что различие механизма действия сил при внедрении конусного штампа и погружении в грунт катящегося колеса заключается в том, что при внедрении конусного штампа совершается работа сил уплотнения грунта и одновременно работа сил трения конусной поверхности штампа по грунту, а под колесом происходит, главным образом, только уплотнение грунта. Силы сцепления деформируемых колесом объемов грунта относительно его неподвижных участков, видимо, незначительны в сравнении с силами трения конуса о грунт, возникающими при внедрении штампа. Различие физических механизмов деформации грунта конусным штампом и колесом, вместе с различиями глубины деформируемого грунта и определяет разницу результатов измерений этими двумя методами. Но на одном и том же грунте между этими измерениями обязательно должна быть зависимость.

Для конусного штампа ПрОП, выполненного из титанового сплава, можно принять коэффициент трения о грунт $f = 0.35$ (см., например, Флоренский и др., 1975). Угол при вершине конусного штампа $\beta = 60°$. Тогда связь между удельным давлением и напряжениями деформации грунта получит вид пропорции:

$$q_\text{р} = 1.61\sigma_1. \quad (32)$$

Согласно формуле (31) удельное давление колеса на грунт q определяется давлением реакции грунта на обод σ и глубиной осадки колеса в грунт.

При глубине внедрения конусного штампа, равной глубине погружения колеса, можем считать и равным давление грунта, т.е. $\sigma_1 = \sigma$. Тогда взаимозависимость между удельными давлениями конусного штампа и колеса можно записать в виде

$$q_\text{р} = kq, \quad (33)$$

где $k = 1.61\dfrac{2R-h}{2R}$ – коэффициент пропорциональности.

Таким образом, выражение (33) устанавливает линейную связь между измерениями удельного давления на грунт конусным и колесным штампами с учетом различия геометрических форм и размеров этих штампов. Физической основой расчета является представление о неизменности механических свойств однородного лунного реголита при любом способе его деформации – штампом, колесом, обувью астронавта, опорой посадочного аппарата или любым выносным прибором. Это представление фактически было принято на самых ранних этапах оценки физико-механических свойств лунного грунта – измерениях, выполненных пенетрометром станции Луна-13. Индентор этого пенетрометра имел диаметр 35 мм (Кемурджиан и др., 1976). Важны только глубина грунта, на которой проводятся измерения, и статический характер нагружения. Причем достаточно однородным для применения формулы (33) можно считать реголит с россыпью мелких камней, габариты которых не превышают радиуса основания конусного штампа.

В соответствии с (33) для расчетного диапазона удельных давлений колеса 23.4–9.8 кПа на исследованных участках трассы Лунохода-1 соответствует диапазон расчетных удельных давлений ПрОП: 37.0–14.1 кПа. Фактический диапазон измерений ПрОП по трассе на глубине погружения штампа не более 50 мм составил 98.1–19.6 кПа. Существенная разница расчета по зависимости (33) в верхней части диапазона вполне понятна – измерения с помощью ПрОП производили и в таких точках, где глубина колеи была соизмерима с погрешностью ее измерения. В нижней части диапазона различие расчетных (14.1 кПа) и фактических (19.6 кПа) результатов измерений ПрОП отражает действительные погрешности расчетной методики, обусловленные принятыми допущениями.

Учитывая изложенное, расчетные результаты измерений ПрОП по формуле (33) на трассах китайских луноходов Yutu и Yutu-2 укладываются в диапазоны 31–15.5 кПа (Yutu) и 32.3–17.1 кПа (Yutu-2). Сравнение этих результатов с расчетными результатами измерений ПрОП на трассах движения Луноходов-1 и -2 позволяет сделать качественный вывод об однородности механических свойств поверхностного слоя грунта, характеризующих его несущую способность, в различных районах Моря Дождей, в кратере Лемонье на восточном побережье Моря Ясности и в районе работы Yutu-2 на обратной стороне Луны.

Дальнейшее уточнение данной зависимости может быть сделано, если в этом возникнет практическая необходимость.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предыдущих разделах описаны результаты измерения глубины колеи, оставленной колесами Луноходов-1 и -2, и по ним оценивается проч-

ность верхнего слоя лунного грунта в местах измерений. Измерения глубин колеи проведены в 13 местах по маршруту Лунохода-1 и в 13 местах по маршруту Лунохода-2. Они оказались равными 9–49 мм (среднее 24 мм) для Лунохода-1 и 12–32 мм (среднее 21 мм) для Лунохода-2, т. е. близки друг к другу. Затем с учетом особенностей конструкции колес Луноходов-1 и -2 и их масс был выполнен расчет зависимости прочности грунта на сжатие от глубины колеи. Разброс значений прочности для Лунохода-1 оказался равным от 23.4 до 9.8 кПа (среднее 16.9 кПа), а для Лунохода-2 – от 22.4 до 13.5 кПа (среднее 14.3 кПа). Также была рассмотрена конструкция колес китайских луноходов Yutu и Yutu-2. Показано, что по основным параметрам она подобна конструкции колес наших луноходов. Привлекая литературные данные о глубине колеи колес Yutu (2.5–9.3 мм) и Yutu-2 (2.3–7.8 мм) и с учетом их меньшей, чем у луноходов, массы оценена прочность грунта по маршруту этих аппаратов: 19.4–10.0 и 20.2–10.9 кПа соответственно.

Таким образом, измеренная прочность грунта в изученных морских районах (Луноход-1, большая часть маршрута Лунохода-2, Yutu) варьирует примерно в тех же пределах, как и на изученных материковых участках (Холмы Встречи на маршруте Лунохода-2 и весь пока короткий путь Yutu-2). Эти вариации существенно меньше, чем в измерениях, выполненных с прибором ПрОП Лунохода-1 и -2. Это явно связано с ограниченным числом измерений: 13 + 13 для Луноходов по глубине колеи и несколько сотен по данным ПрОП. А ограниченное количество измерений в существенной мере определило и меньшее разнообразие локальных геологических ситуаций, изученных по глубинам колеи, по сравнению с ситуациями, изученными с прибором ПрОП. Кроме того, “штамп” колеса Луноходов шире штампа ПрОП, что способствует уменьшению разнообразия результатов измерений. Поэтому описанное в настоящей работе исследование носит скорее методический характер, демонстрируя, что так можно определять прочность грунта.

Измеренная глубина колеи минимальна и, соответственно прочность грунта на сжатие максимальна в непосредственной близости (10–20 м) от посадочных платформ Луны-17 и Луны-21. Очевидно, это связано с раздуванием выхлопными газами садящихся аппаратов верхнего, наиболее рыхлого слоя грунта.

В работе также исследованы особенности оценки прочности грунта конусно-лопастным и условно колесным штампами. Установлена линейная зависимость между результатами измерений, проводимых этими двумя методами. В будущих сравнениях следует учитывать, что оценки ПрОП характеризуют свойства грунта на глубину 50–100 мм, а наши оценки – на глубину в несколько раз меньше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анисов К.С., Мастаков В.И., Иванов О.Г. и др. (всего 18 авторов). Устройство и работа станции Луна-17 и Лунохода-1 // Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1 / Ред. Виноградов А.П. М.: Наука, 1971. С. 7–20.

Базилевский А.Т. Гребенник Н.Н., Громов В.В., Дмитриев А.Д., Кемурджиан А.Л., Полосухин В.П., Семенов П.С., Флоренский К.П. Зависимость физико-механических свойств лунного грунта от особенностей рельефа и процессов в районе работ “Лунохода-2” // Космич. исслед. 1984. Т. XXII. Вып. 2. С. 243–251.

Громов В.В., Забавников Н.А., Кемурджиан А.Л. и др. Передвижение по грунтам Луны и планет / Ред. Кемурджиан А.Л. М.: Машиностроение, 1986. 272 с.

Кайдаш В.Г., Шкуратов Ю.Г. Структурные нарушения лунной поверхности вблизи места посадки “Лунохода-1” // Астрон. вестн. 2014. Т. 48. № 3. С. 183–194. (*Kaydash V.G., Shkuratov Yu.G.* Structural disturbances of the lunar surface near the Lunokhod-1 spacecraft landing site // Sol. Syst. Res. 2014. V. 48. № 3. P. 187–175.)

Карачевцева И.П., Конопихин А.А., Шингарева К.Б., Черепанова. Е.В., Гусакова Е.Н., Баскакова М.А. Атлас Лунохода-1: геоинформационное картографирование и анализ региона посадки автоматической межпланетной станции “Луна-17” по данным дистанционного зондирования спутника Lunar Reconnaissance Obiter // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 292–303.

Кемурджиан А.Л., Громов В.В., Черкасов И.И., Шварёв В.В. Автоматические станции для изучения поверхностного покрова Луны. М.: Машиностроение, 1976. 205 с.

Козлова Н.А., Карачевцева И.П., Зубарев А.Э., Надеждина И.Е., Конопихин А.А., Коханов А.А., Патратий В.Д., Гаров А.С., Абдрахимов А.М., Оберст Ю. Новая цифровая обработка архивных лунных панорам для целей крупномасштабного картографирования и геоморфологического анализа поверхности Луны // Изв. высших учебн. заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2014. № 2. С. 11–19.

Леонович А.К., Громов В.В., Рыбаков А.В., Петров В.К., Павлов П.С., Черкасов И.И., Шварев В.В. Исследования механических свойств лунного грунта на самоходном аппарате “Луноход-1” // Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1 / Ред. Виноградов А.П. М.: Наука, 1971. С. 78–88.

Леонович А.К., Иванов О.Г., Павлов П.С. (еще 13 соавтров). 1. Самоходное шасси “Лунохода-1” как инструмент для исследования лунной поверхности // Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1. Т. 2 / Ред. Барсуков В.Л. М.: Наука, 1978. С. 25–43.

Литвак М.Л., Головин Д.В., Дьячкова М.В., Калашников Д.В., Козырев А.С., Митрофанов И.Г., Мокроусов М.И., Санин А.Б., Третьяков В.И. Гамма- и нейтронные спектрометры, предназначенные для установки на борт лунохода // Астрон. вестн. 2020. Т. 54. № 4.

С. 302–316. (*Litvak M.L., Golovin D.V., Dyachckova M.V., Kalashnikov D.V., Kozyrev A.S., Mitrofanov I.G., Mokrkusov M.I., Sanin A.B., Tretyakov V.I.* Gamma and Neutron Spectrometers Designed for Installation Onboard the Lunar Rover // Sol. Syst. Res. V. 54. № 4. P. 275–287.)

Селиванов А.С., Говоров В.М., Засецкий В.В., Тимохин В.А. Особенности построения и основные параметры телевизионных систем “Лунохода-1” // Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1 / Ред. Виноградов А.П. М.: Наука, 1971. С. 55–65.

Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Николаева А.В. (составители). Лунный грунт: свойства и аналоги. Модель 1974. АН СССР. М.: ГЕОХИ им. В.И. Вернадского, 1975. 20 с.

Aldrin E.E., Armstrong N.A., Collins M. 2. Crew Observations // Apollo 11 Preliminary Science Report. NASA SP-214. 1969. P. 35–40.

Artemis plan. NASA's Lunar Exploration Program Overview. National Aeronautics and Space Administration. NP-2020-05-2853-HQ. September 2020. 74 p.

Carrier W.D., Olhoeft G.R., Mendell W. Physical properties of the lunar surface, Lunar Sourcebook / Eds Heiken G., Vaniman D., French B.M. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1991. P. 475–594.

Carrier W.D. The four things you need to know about the geotechnical properties of lunar soil. Lunar Geotechnical Institute, september 2005. 23 p.

Clegg R.N., Jolliff B.L., Robinson M.S., Hapke B.W., Plescia J.B. Effects of rocket exhaust on lunar soil reflectance properties // Icarus. 2014. V. 227. P. 176–194. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.09.013

Colwell J.E., Batiste S., Horanyi M., Robertson S., Sture S. Lunar surface: Dust dynamics and regolith mechanics // Rev. Geophys. 2007. V. 45. Iss. 2. RG2006. 23 p. https://doi.org/10.1029/2005RG000184

Costes N.C., Cohron G.T., Moss D.C. Penetration resistance test – An approach to evaluating in-place strength and packing characteristics of lunar soils // Proc. Second Lunar Sci. Conf. 3, 1973–1987, M.I.T. Press, 1971. P. 1973–1987.

Karachevtseva I.P., Kozlova N.A., Kokhanov A.A. and 11 coauthors. Cartography of the Luna-21 landing site and Lunokhod-2 traverse area based on Lunar Reconnaissance Orbiter Camera images and surface archive TV-panoramas // Icarus. 2017. V. 283. P. 104–121.

Kaydash V., Shkuratov Y., Korokhin V., Videen G. Photometric anomalies in the Apollo landing sites as seen from the Lunar Reconnaissance Orbiter // Icarus. 2011. V. 211(1). P. 89–96. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2010.08.024

Kreslavsky M.A., Shkuratov Yu.G. Photometric anomalies of the lunar surface: Results from Clementine data // J. Geophys. Res. 2003. V. 108(E3). https://doi.org/10.1029/2002je001937

Li Jian-qiao, Huang Han, Dang Zhao-long, Zou Meng, Wang Yang. Sinkage of wire mech wheel under blight load // J. Jilin Univ. (Engineering and Technology Edition). 2015. V. 45. № 1. P. 167–173.

Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Tretyakov V.I. The nearest perspectives for Lunokhod 2.0 // 10th Moscow Solar System Symp. Space Research Institute. 2019. Abs. 10MS3-MN-18.

Malenkov M. Self-propelled automatic chassis of Lunokhod-1: History of creation in episodes // Frontiers of Mechanical Engineering. 2016. № 11(1). P. 60–86.

Malenkov M.1., Creel R.A., Dovgan V.G., Scott D.R., Basilevsky A.T., Head J.W. They are ahead of time: The influence of the Soviet and American lunar rovers on modern planetary research // 10th Moscow Solar System Symp. Space Research Institute. 2019. V. 2. P. 90–93.

Mitchell J.K., Bromwell L.G., Carrier W.D., Costes N.C., Houston W.N., Scott R.F. Soil mechanics experiment // Apollo-15 Prelim. Sci. Rept., SP-289, 7–1 to 7–28, NASA-GSFC, Washington, DC, 1972.

Tang Zh., Liu J., Wang X. and 13 coauthors. Physical and mechanical characteristics of lunar soil at the Chang'E-4 landing site // Geophys. Res. Lett. 2020. V. 47. Iss. 22. e2020GL089499. 8 p. https://doi.org/10.1029/2020GL089499

Wan W.X., Wang C., Li C.L., Wei Y. China's first mission to Mars // China' Nature Astron. 2020. V. 4. P. 721–722.

Witze A. NASA has launched the most ambitious Mars rover ever built: Here's what happens next // Nature. 2020. V. 584. P. 15–16.

Zelenyi L.M. Russian Space Science Program update. 57th European Space Sciences Committee Plenary Meeting. Amsterdam. 9–10 May 2019.