

УДК 523.83

О ВЫБОРЕ РАЙОНА ПОСАДКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ЛУНА-27

© 2022 г. М. В. Дьячкова^а*, И. Г. Митрофанов^а, А. Б. Санин^а, М. Л. Литвак^а, В. И. Третьяков^а

^аИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

*e-mail: djachkova@np.cosmos.ru

Поступила в редакцию 13.01.2021 г.

После доработки 14.12.2021 г.

Принята к публикации 08.01.2022 г.

На настоящий момент задача выбора мест посадок для космического аппарата Луна-27 обеспечена большим количеством актуальных данных, часто имеющих более высокое пространственное разрешение по сравнению с данными, использовавшимися для выбора мест посадки аппарата Луна-25. Кроме того, получение данных о поверхности с пространственным разрешением, сравнимым с размерами космического аппарата (КА), в дальнейшем может быть обеспечено орбитальным аппаратом Луна-26. Предварительные оценки условий лунной поверхности в южном полярном регионе южнее 80° ю.ш. для посадки КА Луна-27 показали необходимость серьезно повышать точность посадки по сравнению с эллипсом области посадки аппарата Луна-25. Размер этого эллипса посадки южнее 80° ю.ш. делает безопасную посадку практически невозможной: поверхность в окрестности южного полюса Луны не располагает ни одной ровной и освещенной площадкой такого размера. Повышение точности посадки уже до 5 км приводит к возможности выбора района посадки среди шести кандидатов. Дальнейшее повышение точности посадки до 3 км может обеспечить широкий выбор из 15 районов-кандидатов, в каждом из которых возможно осуществить как безопасную посадку, так и выполнение научной миссии проекта Луна-27. Наконец, при точности посадки около 500 м можно наметить обширные области в окрестности южного полюса, в которых присутствуют многочисленные районы с благоприятными условиями как для безопасной посадки, так и для проведения обширной программы научных исследований.

Ключевые слова: Луна, Луна-25, Луна-27, места посадки

DOI: 10.31857/S0320930X22030021

ВВЕДЕНИЕ

Целью современной российской лунной программы является изучение Луны, в том числе ее полярных областей, так как именно там возможно обнаружить воду в виде льда под слоем реголита либо на поверхности в затененных областях лунных полярных кратеров (Митрофанов и др., 2016). КА Луна-25 станет продолжением одноименной серии советских лунных станций, последней из которых была Луна-24 в 1976 г., и планируется к запуску в 2022 г. Приборы на его борту предназначены для исследований в окрестности южного полюса Луны состава, структуры и физико-механических свойств лунного реголита, пыли и плазменной экзосферы.

В 2024 г. будет запущен орбитальный КА Луна-26, целью которого является проведение дистанционных исследований с орбиты поверхности Луны и окололунного пространства. Для достижения этой цели будут выполнены следующие научные задачи: построение топографической карты лунной поверхности, определение структуры и состава недр, поиск богатых водородом регионов на

Луне, определение химического и элементного состава реголита, определение неоднородности лунного гравитационного поля, а также изучение состава и динамики экзосферы, исследования взаимодействия солнечного ветра и Луны, исследования лунных магнитных аномалий и соответствующей динамики плазмы.

Планируемый к запуску в 2025 г. КА Луна-27 должен стать первым в череде будущих научных исследований Луны в районе, потенциально пригодном для развертывания лунной научной станции. За ним должен последовать проект Луна-28 по доставке из этого района на Землю лунного полярного реголита (Долгополов и др., 2011). Луна-27 представляет собой спускаемый аппарат, предназначенный для посадки на широтах южнее 80° ю.ш. Основной целью научной миссии КА Луна-27 является *in situ* обнаружение и изучение летучих веществ в грунте Луны, в том числе водяного льда, вблизи южного полюса (Tret'yakov и др., 2020). Для достижения этой цели должны быть решены следующие научные задачи: анализ грунта и исследования его физических (механических, теп-

ловых и др.) свойств, исследования минералогического, элементного и изотопного состава лунного реголита в образцах, доставляемых с различных глубин от 1 м до поверхности, взятых в непосредственной окрестности космического аппарата. Также в проекте будут выполнены исследования ионной, нейтральной и пылевой составляющих экзосферы Луны и эффектов взаимодействия поверхности Луны с межпланетной средой и солнечным ветром, сейсмологические исследования внутреннего строения Луны и исследования ее глобального движения.

Научные цели исследования Луны, стоящие перед КА Луна-27, требуют приближения сектора выбора района посадки ближе к южному полюсу относительно выбранных основного и резервного районов посадки КА Луна-25 (Дьячкова и др., 2017), которые расположены на границе южной полярной области. Выбор мест посадки КА Луна-25 обусловлен поиском компромисса между научными целями миссии и инженерными ограничениями, связанными, прежде всего, с размером эллипса посадки, составляющим (15 × 30) км. Площадки такого размера, соответствующие инженерным требованиям, предъявляемым к месту посадки КА Луна-25, удалось обнаружить только вблизи параллели 70° ю.ш.

Работа по выбору мест посадки для КА Луна-27 находится на начальном этапе. Предполагается, что окончательное утверждение кандидатов будет принято в том числе по результатам картографирования поверхности Луны орбитальным аппаратом Луна-26. Опыт и результаты миссии Луна-25 также будут приняты во внимание. В данной статье приводится первоначальный обзор потенциальных районов-кандидатов для места посадки космического аппарата Луна-27.

ЮЖНАЯ ПОЛЯРНАЯ ОБЛАСТЬ ЛУНЫ

Южная полярная область Луны характеризуется пересеченным рельефом вследствие ее расположения в окрестности бассейна Южный полюс—Эйткен, самой крупной ударной структуры Луны, о происхождении которой нет единого мнения (Garrick-Bethell, Zuber, 2009; Schultz, Crawford, 2011; Melosh и др., 2017; Ivanov и др., 2018; James и др., 2019; Moriarty и др., 2019). Решению вопроса о происхождении этой структуры могут способствовать ее изучение *in situ*, а также доставка на Землю образцов грунта.

Пересеченный рельеф и небольшой наклон оси вращения Луны к плоскости эклиптики, равный 1.54°, формируют экстремальные условия освещенности поверхности в окрестности Южного полюса. Большая часть территории получает солнечный свет менее 50% времени. Также для южного полярного региона характерны резкие

контрасты: территории, никогда не получающие солнечного света, соседствуют с территориями, освещенными Солнцем значительно более 50% времени лунных суток. В редких случаях этот показатель может достигать 80% (Bussey и др., 2010). Последние могут представлять собой перспективные площадки для размещения солнечных панелей будущей лунной станции, что обеспечит ее постоянным источником энергии. Такие площадки также могут предоставить возможность длительной прямой связи с Землей, благодаря установке там принимающих и передающих антенн. Кроме того, для успешного функционирования обитаемой лунной станции значительным подспорьем может служить наличие водяного льда в ее непосредственной окрестности. Также необходим относительно пологий рельеф как непосредственно для постройки самой базы, так и для дальнейшего изучения и освоения ее окрестностей, например, с помощью мобильных аппаратов.

Научные цели требуют расположения района посадки станции Луна-27 в окрестности южного полюса. Однако, в связи с упомянутым выше сложным рельефом, такое продвижение требует уменьшения размера эллипса посадки и применения систем высокоточной посадки и уклонения от опасности. Требуемая точность посадки может быть оценена, исходя из наличия в южной полярной области подходящих площадок, отвечающих заданным требованиям.

К южному полярному региону Луны как перспективному району для ее изучения и освоения приковано внимание научного сообщества. Для него имеется большой набор данных орбитального картографирования. На данный момент основной вклад в точное орбитальное картографирование южного полярного региона вносит КА LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter) (Vondrak и др., 2010). Так, например, разрешение цифровых моделей рельефа по данным лазерного альтиметра LOLA, установленного на его борту, для самой южной части региона (южнее параллели 87.5° ю.ш.) достигает 5 м (Smith и др., 2010).

В дальнейшем, в случае успешной работы орбитальной станции Луна-26, станут доступными новые данные о лунной поверхности, которые могут быть использованы для выбора или анализа мест посадки КА Луна-27.

КРИТЕРИИ ДЛЯ ВЫБОРА МЕСТ ПОСАДКИ КА ЛУНА-27

Успешное решение поставленных перед миссией Луна-27 задач станет возможным в случае выбора оптимального места посадки космического аппарата. Для этого выбора будет применен разработанный ранее метод сравнения между со-

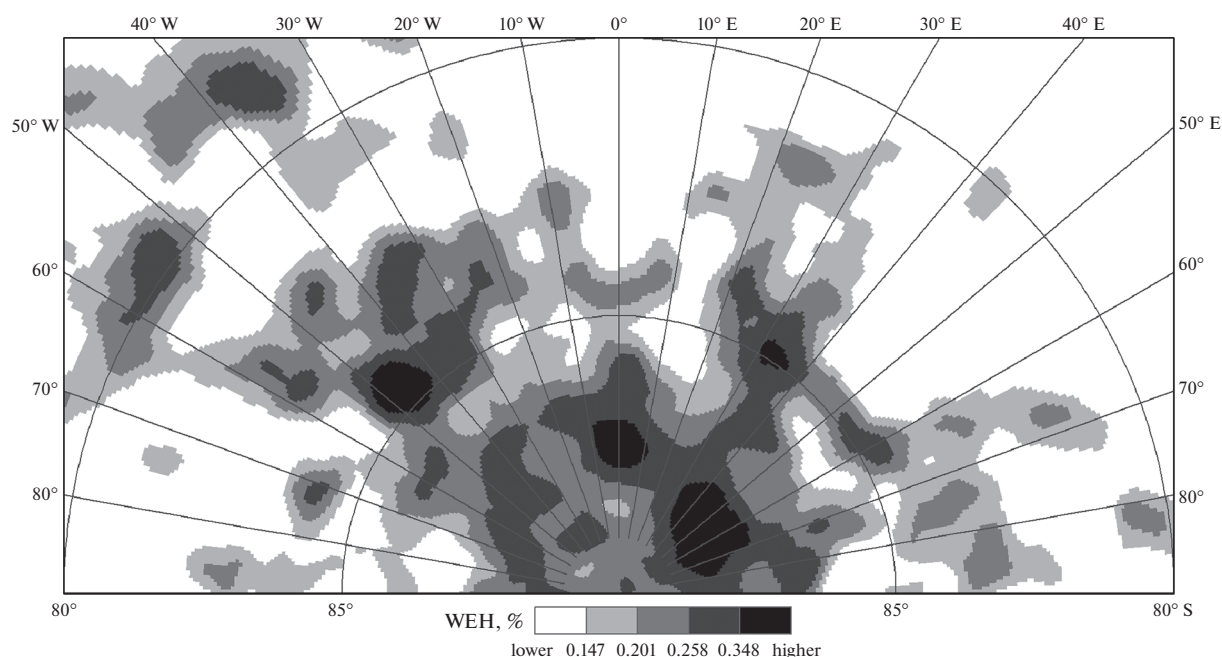


Рис. 1. Карта эквивалентного содержания воды (WEH) в подповерхностном слое лунного грунта для южного полярного региона Луны (видимая сторона).

бой районов-кандидатов для места посадки КА Луна-25 (Дьячкова и др., 2017), который предполагает разделение научных и инженерных критериев и различный подход к их дальнейшему анализу: научные критерии носят рекомендательный характер при выборе благоприятных территорий для посадки, в то время как инженерные критерии соответствуют жестким ограничениям. Ввиду схожести конструктивных особенностей аппаратов Луна-25 и Луна-27, а также решаемых ими научных задач, для проекта Луна-27 нами были выбраны аналогичные критерии благоприятности района-кандидата для посадки.

Поиск подходящей для посадки территории предлагается осуществлять на видимой стороне Луны в секторе южной полярной области, с севера ограниченной параллелью 80° ю.ш., а с востока и запада ограниченной меридианами 90° в.д. и 90° з.д. соответственно. Расширение посадочного сектора в западное полушарие, по сравнению с посадочным сектором аппарата Луна-25, приведет в том числе к улучшению научного потенциала посадочной территории в связи с большей распространенностью именно в западном полушарии подповерхностного водяного льда по данным российского прибора LEND на борту КА LRO (Sanin и др., 2017).

Среди всех приполярных участков поверхности, которые удовлетворяют инженерным требованиям безопасной посадки и обеспечения работы аппарата на поверхности, следует выбрать именно те, для которых наблюдается высокое ожидае-

мое количество водяного льда в реголите. Таким образом, в качестве научного критерия для выбора благоприятных районов посадки были предложены значения водородного эквивалента воды (WEH), построенные на основе анализа данных нейтронных измерений с прибором LEND (Sanin и др., 2017). Пространственное разрешение использованных данных прибора LEND вблизи полюсов составляет 0.5°. Пример такой карты представлен на рис. 1. Из сравнения с картой освещенности, представленной на рис. 3, очевидно, что области с максимально высокой оценкой содержания воды в реголите расположены вблизи или даже внутри постоянно затененных районов. Следует отметить, что они, как правило, имеют очень сложный рельеф и неблагоприятные условия освещенности.

Кроме набора данных, характеризующих содержание водяного льда в реголите, в качестве научных критериев выбора мест посадки могут стать карты температур поверхности, доступные благодаря измерениям с инструментом Diviner на борту КА LRO (Paige и др., 2010). Этот инструмент предназначен для измерения температуры на поверхности и под поверхностью Луны с целью идентификации холодных зон, где может сохраняться лед. В задачи эксперимента входит также выявление возможных опасностей для посадки космического аппарата (крупные камни и неровности), а также исследование тепловых свойств грунта. Для целей выбора мест посадки могут быть использованы как данные, усредненные за дневной

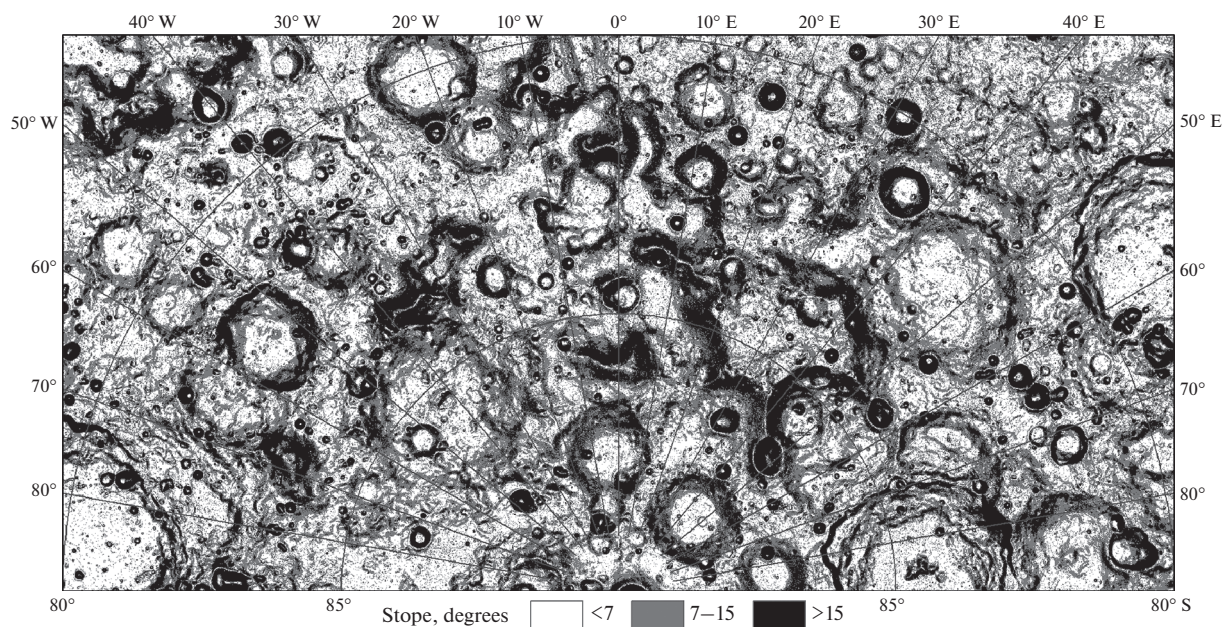


Рис. 2. Карта уклонов поверхности для южного полярного региона Луны (видимая сторона).

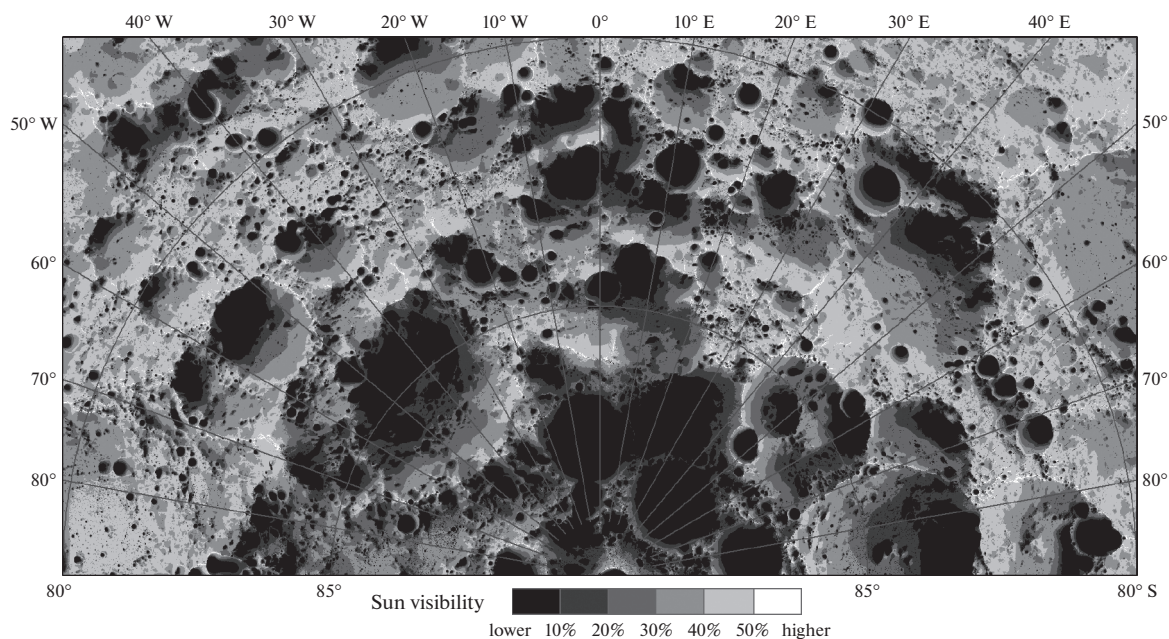


Рис. 3. Карта средней освещенности Солнцем поверхности для южного полярного региона Луны (видимая сторона).

и ночной периоды лунаций, так и данные измерений с разрешением 10 мин. На данном этапе исследований оценки температуры поверхности как возможного признака наличия льда под слоем реголита не использовались.

Однако была выполнена оценка средних температур для потенциальных мест посадки (см. табл. 1–3).

В качестве предварительных инженерных ограничений, накладываемых на выбор места посадки, были выбраны следующие параметры.

Уклон поверхности, обеспечивающий полностью безопасную посадку, принят равным 7° на базе, сравнимой с размерами космического аппарата. Невозможность опрокидывания аппарата обеспечивает критерий уклона поверхности — он не может превышать 15° . Высокие широты дают

Таблица 1. Характеристики районов-кандидатов в места посадки для КА Луна-27 с радиусом 5 км

	Широта, угл. град	Долгота, угл. град	Высота, м	Средний уклон поверхности, угл. град	Доля площади с уклоном $>7^\circ$, %	Доля площади с уклоном $>15^\circ$, %	Средняя освещенность поверхности, %	Доля площади со средней освещенностью $<35\%$, %	Средняя видимость Земли, %	Доля площади со средней видимостью Земли $<50\%$, %	WEN, %	Средняя температура, К	Максимальная температура, К
1	-82.361	64.682	-70	5.61	24.02	1.78	40.2	4.87	57.01	9.94	0.167	145.29	253.93
2	-80.515	36.706	-2056	3.62	9.00	0.37	37.44	10.53	79.33	0.33	0.178	135.78	247.9
3	-79.406	-36.908	-1830	4.79	20.50	1.18	40.56	7.49	85.43	1.15	0.195	148.67	260.68
4	-79.628	-49.910	-1872	4.75	18.68	1.41	41.13	8.47	70.45	4.02	0.200	145.94	251.62
5	-79.319	-55.838	-2813	3.69	9.81	0.66	37.06	5.75	62.96	2.27	0.239	140.52	255.23
6	-80.061	-62.690	-1346	3.79	10.25	0.90	42.73	3.54	65.67	3.52	0.237	143.63	247.97

Таблица 2. Характеристики районов-кандидатов в места посадки для КА Луна-27 с радиусом 3 км

	Широта, угл. град	Долгота, угл. град	Высота, м	Средний уклон поверхности, угл. град	Доля площади с уклоном $>7^\circ$, %	Доля площади с уклоном $>15^\circ$, %	Средняя освещенность поверхности, %	Доля площади со средней освещенностью $<35\%$, %	Средняя видимость Земли, %	Доля площади со средней видимостью Земли $<50\%$, %	WEN, %	Средняя температура, К	Максимальная температура, К
1	-82.361	64.682	-70	5.69	21.43	2.55	39.69	6.71	57.72	5.05	0.168	144.38	252.77
2	-84.354	24.807	4650	5.44	27.82	0.92	39.98	12.84	84.57	0.36	0.273	134.19	236.18
3	-83.097	-16.227	-1446	5.04	18.98	0.33	37.00	19.79	85.59	0.01	0.163	136.44	248.90
4	-82.539	-33.094	-953	3.55	8.30	0.14	39.50	9.56	75.34	0.61	0.26	131.21	231.10
5	-81.101	-36.284	-1230	4.40	15.92	0.71	44.90	2.52	80.90	0.75	0.176	145.20	247.94
6	-80.556	-37.046	-2050	2.86	3.84	0.01	38.21	1.56	82.88	0.01	0.177	137.45	247.38
7	-79.432	-36.722	-1831	4.06	12.64	0.57	41.23	4.37	88.72	0.65	0.196	148.89	259.54
8	-79.686	-34.772	-1431	5.27	23.62	2.82	42.70	7.52	94.02	1.35	0.183	145.29	249.65
9	-79.317	-33.105	-1351	4.51	17.29	2.27	40.27	7.57	73.70	1.76	0.216	142.98	250.87
10	-77.599	-38.628	2802	4.77	18.27	1.13	42.54	2.09	96.03	0.89	0.182	155.08	265.13
11	-79.688	-49.104	-1972	4.04	9.84	0.82	41.48	2.76	72.66	0.60	0.182	140.77	246.30
12	-80.112	-50.732	-1755	4.67	18.46	1.25	42.26	5.38	74.52	3.32	0.197	145.85	252.47
13	-79.188	-56.129	-2784	3.13	4.45	0.01	36.33	3.40	62.67	0.55	0.209	139.55	255.78
14	-80.053	-62.524	-1340	3.3	3.88	0.01	43.87	0.40	67.38	0.45	0.238	144.89	249.15
15	-80.755	-62.456	-522	4.91	20.21	1.13	42.76	1.96	75.88	1.41	0.170	148.81	255.23

дополнительное преимущество при выборе мест посадки: пространственное разрешение цифровых моделей рельефа, созданных на основе данных, полученных с инструментом LOLA, улучшается.

Карта уклонов поверхности для указанного выше посадочного сектора могут быть построены

на основе данных, полученных с инструментом LOLA на базе от 40 м для всего посадочного сектора (рис. 2) до 10 м на параллели 87.5° . Длина базы для расчета уклонов поверхности значительно превышает размер аппарата, однако на данном первичном этапе исследований такой размер базы представляется достаточным для оценки об-

Таблица 3. Характеристики районов-кандидатов в места посадки для КА Луна-27 с радиусом 0.5 км

	Широта, угл. град	Долгота, угл. град	Высота, м	Средний уклон поверхности, угл. град	Доля площади с уклоном $>7^\circ$, %	Средняя освещенность поверхности, %	Средняя видимость Земли, %	WEN, %	Средняя температура, К	Максимальная температура, К
1	-80.003	81.094	-17	3.41	1.91	41.81	62.65	0.203	151.71	262.21
2	-81.085	69.885	1684	2.53	0.00	46.12	66.09	0.188	140.01	247.95
3	-82.379	64.426	-63	3.52	0.71	41.02	57.28	0.167	141.81	248.60
4	-84.790	28.963	5307	2.81	0.00	45.63	90.13	0.276	130.58	236.97
5	-83.349	19.709	835	3.16	1.01	44.63	64.01	0.192	143.10	248.18
6	-81.322	22.901	2247	3.05	1.76	45.74	92.09	0.190	140.18	248.50
7	-85.292	-5.232	-160	2.65	1.68	38.56	75.21	0.177	129.45	238.39
8	-84.269	-5.439	-1052	2.88	0.20	38.70	80.95	0.207	141.31	255.18
9	-84.462	-15.206	-1307	2.40	1.52	38.18	69.00	0.167	127.99	241.12
10	-82.460	-11.984	-1591	2.58	1.77	39.15	69.70	0.172	129.00	237.43
11	-83.046	-17.532	-1587	1.71	0.15	35.73	85.76	0.167	133.99	246.18
12	-82.672	-20.476	-1488	2.95	1.97	42.13	81.84	0.176	143.33	253.76
13	-82.676	-33.070	-942	2.07	0.10	37.63	82.89	0.249	138.33	250.07
14	-82.429	-44.947	-486	2.12	0.20	41.86	76.76	0.224	129.36	237.58
15	-82.496	-61.378	-2156	3.39	0.10	43.06	63.73	0.189	140.11	250.26
16	-80.556	-37.071	-2056	2.12	0.00	38.51	83.37	0.174	137.39	253.00
17	-79.001	-35.162	-1144	3.67	2.00	40.48	87.84	0.228	139.47	251.68
18	-77.638	-38.446	2770	2.58	0.00	43.31	99.05	0.180	154.60	269.73
19	-76.586	-47.174	2687	2.52	0.00	40.35	100.00	0.196	161.96	276.85
20	-78.934	-46.333	-1304	3.61	6.05	39.92	63.88	0.189	130.44	249.70
21	-79.506	-54.279	-2364	2.31	0.90	44.20	65.24	0.242	145.73	257.99
22	-79.967	-63.114	-1360	1.98	0.00	43.82	66.76	0.203	145.46	256.52
23	-86.392	-62.336	-1451	3.49	1.98	37.32	62.65	0.232	122.15	234.04

щих условий на поверхности. Для более детального анализа могут быть использованы снимки с камерами LROC NAC, полученные специальной стереосъемкой предварительно отобранной территории, либо на основе уже осуществленной съемки с возможностью создания стереопары из имеющихся снимков.

Продвижение посадочного сектора в сторону южного полюса Луны накладывает значительные ограничения на максимальный период освещенности поверхности Солнцем. Продолжительность средней освещенности поверхности Солнцем снижается до 35%, что соответствует продолжительности светлого периода лунации в 10 земных суток. Вместе с тем допустимость такого значения в качестве критерия $>35\%$ для выбора района посадки представляется целесообразной ввиду значительного увеличения площади к югу

от параллели 80° ю.ш., пригодной для посадки по этому критерию, по сравнению с критерием $>40\%$, который использовался для выбора районов посадки для КА Луна-25 в пределах посадочного сектора, ограниченного параллелями 65° ю.ш. и 85° ю.ш.

Также в связи с приближением посадочного сектора КА Луна-27 к полюсу снижается средняя продолжительность видимости Земли по сравнению с аналогичным показателем для посадочного сектора аппарата Луна-25. Критерий пригодности района для посадки был выбран равным значению средней продолжительности видимости Земли $>50\%$.

Использованные в данной статье карты для средней освещенности Солнцем (рис. 3) и для средней видимости Земли (рис. 4) были построены на основе данных, полученных с инструмен-

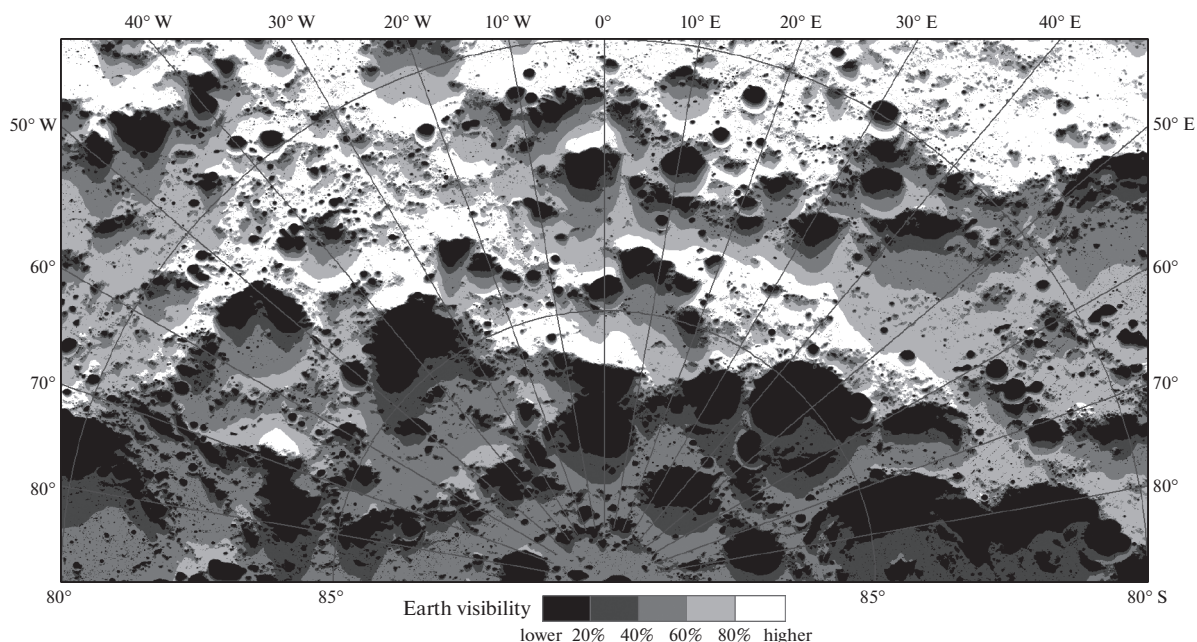


Рис. 4. Карта средней видимости Земли для южного полярного региона Луны (видимая сторона).

том LOLA, для цифровой модели рельефа и имеют пространственное разрешение 120 м (Mazarico и др., 2011).

МЕТОД ВЫБОРА МЕСТ ПОСАДКИ

Построенные карты (рис. 1–4), отражающие результаты научных исследований и свойства поверхности с точки зрения инженерных требований, были использованы для поиска районов-кандидатов, в которых в пределах размеров эллипса посадки в максимальной степени выполняются все критерии успешной реализации проекта. Для количественной оценки пригодности всех тестируемых районов было проведено специальное ранжирование используемых карт.

Карты инженерных параметров (рис. 2–4) для уклонов поверхности, освещенности Солнцем и видимости Земли были преобразованы бинарным образом по схеме “0–1”: всем пикселям, не удовлетворяющим требованиям безопасной посадки (уклоны $>7^\circ$, освещенность Солнцем $<35\%$, видимость Земли $<50\%$), были присвоены значения “0”, а пикселям, пригодным для посадки, присвоены значения “1”. Полученные таким образом бинарные карты уклонов, освещенности Солнцем и видимости Земли были умножены друг на друга. Результирующая карта пригодности представляла собой растровый слой со значениями в пикселях “1” (пригодность для посадки) и “0” (непригодность для посадки).

Эта так называемая карта “инженерной пригодности” была умножена на ранжированную

карту значений WEN. Ранжирование соответствовало уровням от 1 до 10. Самый низкий уровень 1 соответствует содержанию WEN в реголите до 0.033 вес. %. Минимальное значение WEN для уровня 1 соответствует концентрации WEN в грунте сухих экваториальных районов Луны. Самый высокий уровень 10 соответствует содержанию WEN от 0.24 до 0.54 вес. %. Максимальное значение WEN для уровня 10 соответствует абсолютному максимуму оценки WEN в пределах южного полярного сегмента. Промежуточные уровни от 2 до 9 равномерно заполняют интервал оценок содержания WEN от нижнего граничного значения уровня 1 до верхнего граничного значения уровня 10. Таким образом, в разработанном методе выбора мест посадки запрещающим свойством обладают только инженерные критерии, в то время как научные требования носят рекомендательный характер.

В результате логического “перемножения” указанных карт была получена ранжированная по содержанию WEN карта пригодности территорий южного полярного сектора для посадки космического аппарата, которая содержит множество пикселей с индексами пригодности “0”. Очевидно, что районы-кандидаты должны быть отобраны на основе условия, что площадки с ненулевым индексом пригодности в пределах посадочного эллипса доминируют. Доля пригодных пикселей в пределах площади выбираемого эллипса посадки определяет его уровень пригодности для посадки.

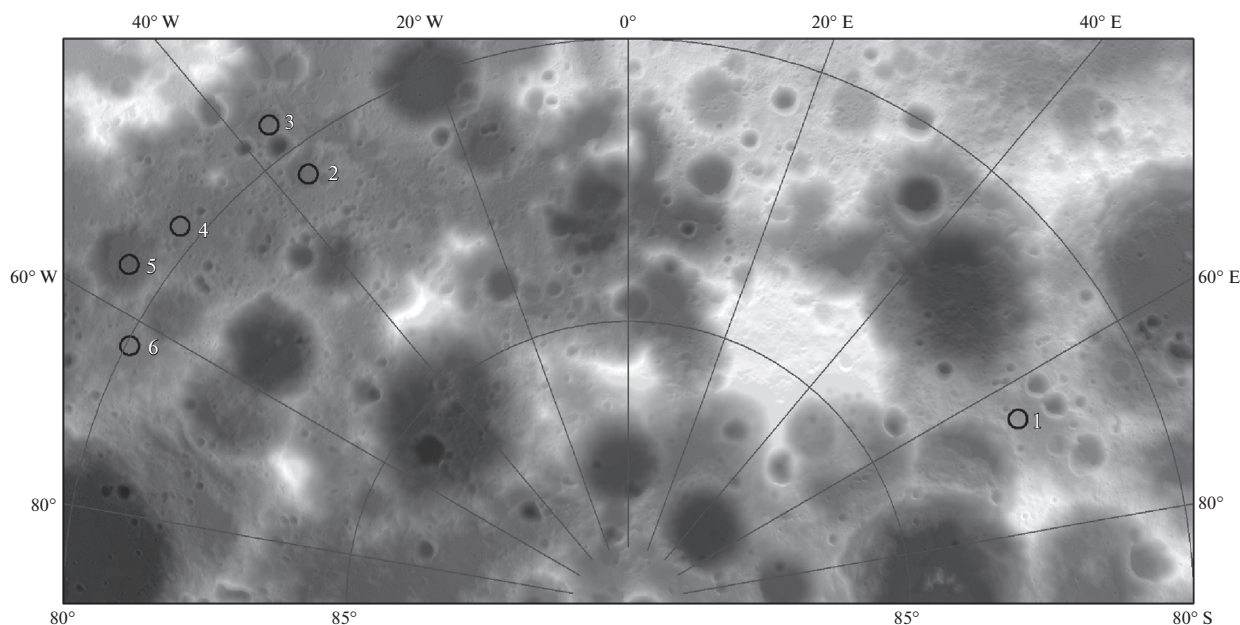


Рис. 5. Районы-кандидаты в места посадки КА Луна-27, имеющие радиус 5 км. Нумерация районов проведена в произвольном порядке.

ВОЗМОЖНЫЕ ОБЛАСТИ ДЛЯ ВЫБОРА РАЙОНОВ ПОСАДКИ КА ЛУНА-27 В ЮЖНОМ ПОЛЯРНОМ РЕГИОНЕ ЛУНЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТОЧНОСТИ ПОСАДКИ

Основным параметром, определяющим возможность посадки в выбранном районе, станет точность посадки космического аппарата или определяемый ею размер эллипса посадки. Так, размер эллипса посадки (15×30) км, принятый для КА Луна-25, наложил значительные ограничения на выбор районов, пригодных для посадки в выбранном для нее секторе. Анализ полученной карты пригодности для КА Луна-27 показал, что аналогичный размер эллипса сделает практически невозможной посадку этого аппарата в область южнее 80° , где особенности рельефа не позволяют найти ровную площадку с необходимым уклоном на участке поверхности такого размера.

В связи с тем, что в настоящий момент еще не определены окончательно параметры системы посадки КА Луна-27, нами были рассмотрены три случая, когда возможные отклонения относительно намеченной точки посадки соответствуют разбросу в 5, 3 и 0.5 км.

Анализ поверхности для сектора посадки по описанным выше критериям и с учетом точности посадки в пределах 5 км дает шесть районов-кандидатов с уровнем пригодности эллипса выше 50% (см. рис. 5). Характеристики площадок приведены в табл. 1. Важно отметить, что этими шестью кандидатами ограничиваются все возможные места посадки заданного размера в заданном

секторе с таким уровнем пригодности. Средний уклон поверхности для этих кандидатов составляет 4.4° , что меньше, чем аналогичный показатель для выбранных районов посадки аппарата Луна-25, составляющий 5.1° (Дьячкова и др., 2017). Оценка среднего содержания воды в реголите для шести кандидатов составляет около 0.2%, что почти в два раза выше аналогичного показателя для выбранных районов посадки для КА Луна-25. Риск опрокидывания (вероятность совершения посадки на поверхность с уклоном более 15°) составляет всего около 1%.

Для оценки степени пригодности шести районов-кандидатов для посадки на основе совокупности выбранных критериев была проведена их приоритизация. Она проводилась на основании формального сопоставления индексов ранжирования по каждому параметру, приведенному в табл. 1. Самому высокому индексу ранжирования соответствовали минимальное среднее значение угла наклона поверхности, максимальное значение средней освещенности, максимальное значение средней видимости Земли, максимальная доля поверхности, допустимой для посадки с точки зрения уклонов, максимальная продолжительность освещенности Солнцем и видимости Земли, максимальный средний индекс содержания воды, минимальные средние значения средней и максимальной температур. Для каждого района значения всех индексов ранжирования складывались. Приоритетность районов определялась на основе сопоставления суммарных значений ин-

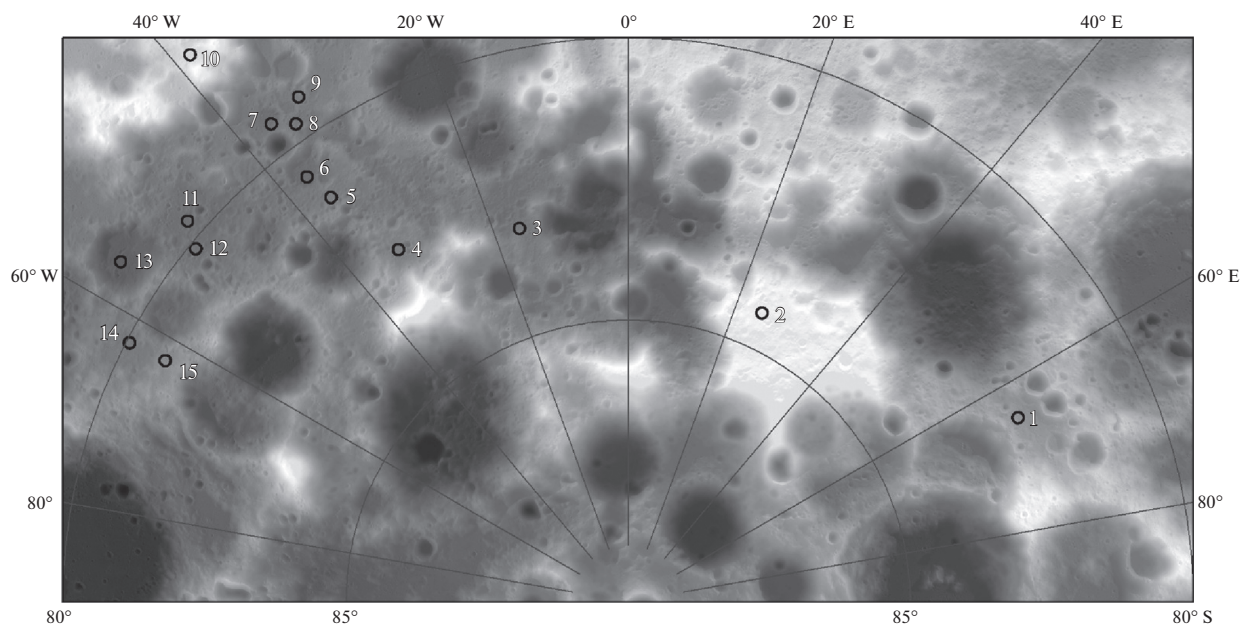


Рис. 6. Районы-кандидаты в места посадки КА Луна-27, имеющие радиус 3 км. Нумерация районов проведена в произвольном порядке.

дексов ранжирования. Максимальная сумма соответствовала самому высокому приоритету.

На основе такой приоритизации наиболее благоприятным для посадки оказался район 2. Он превосходит других кандидатов по параметрам уклонов поверхности, средний уклон для него составляет 3.6° . Вероятность обнаружения в нем высокого содержания воды оказалась на среднем уровне по сравнению с другими районами-кандидатами, что в целом позволяет сделать вывод о том, что при точности посадки в пределах 5 км наибольшей значимостью обладают инженерные критерии.

При повышении точности посадки до 3 км и при аналогичном уровне пригодности 50% можно найти пятнадцать районов-кандидатов (рис. 6 и табл. 2). На основе приоритизации, описанной выше, оптимальным для посадки является район 6, аналогичный по расположению району 2 при точности посадки 5 км. Благодаря уменьшению размера этого района величина среднего уклона понижается и составляет всего 2.9° , однако оценка содержания воды для него 0.18% остается такой же, как и средняя величина для всех пятнадцати районов-кандидатов. Таким образом, и для точности посадки 3 км преобладающими факторами при выборе наиболее благоприятного района-кандидата остаются инженерные требования.

Отклонение от намеченной точки посадки в 0.5 км, требующее достаточно высокой точности посадки, выводит выбор районов-кандидатов на уровень отбора обширных областей, в пределах которых посадка может осуществляться на раз-

личные площадки, и при этом уровень их пригодности составляет более 85%. Таким образом, полукилометровый масштаб области разбросов относительно выбранной точки посадки обеспечивает возможность выбора конкретного места посадки из гораздо большего числа районов-кандидатов, чем число районов-кандидатов, допустимых при посадке с меньшей точностью.

Области, внутри которых может осуществляться поиск конкретных районов для посадки показаны на рис. 7. В табл. 3 приведены инженерные характеристики (средний уклон поверхности, доля поверхности площадки с уклоном более 7° , средняя освещенность Солнцем, средняя видимость Земли) для наилучших районов в пределах выделенных областей, а научные параметры (среднее содержание воды в реголите, средние и максимальные температуры) приведены для областей целиком. Стоит отметить, что в пределах наилучших районов с радиусом 0.5 км отсутствуют поверхности с уклоном более 15° , с освещенностью Солнцем менее 35% и с видимостью Земли менее 50%.

Выбор окончательного места посадки будет зависеть от итоговой точности посадки. В случае наиболее высокоточной посадки представится широкий выбор из множества районов, допустимых с инженерной точки зрения, и решающим фактором при выборе станут научные критерии, такие как геологические особенности поверхности в месте посадки, температуры поверхности, предполагаемое максимальное значение WEN.

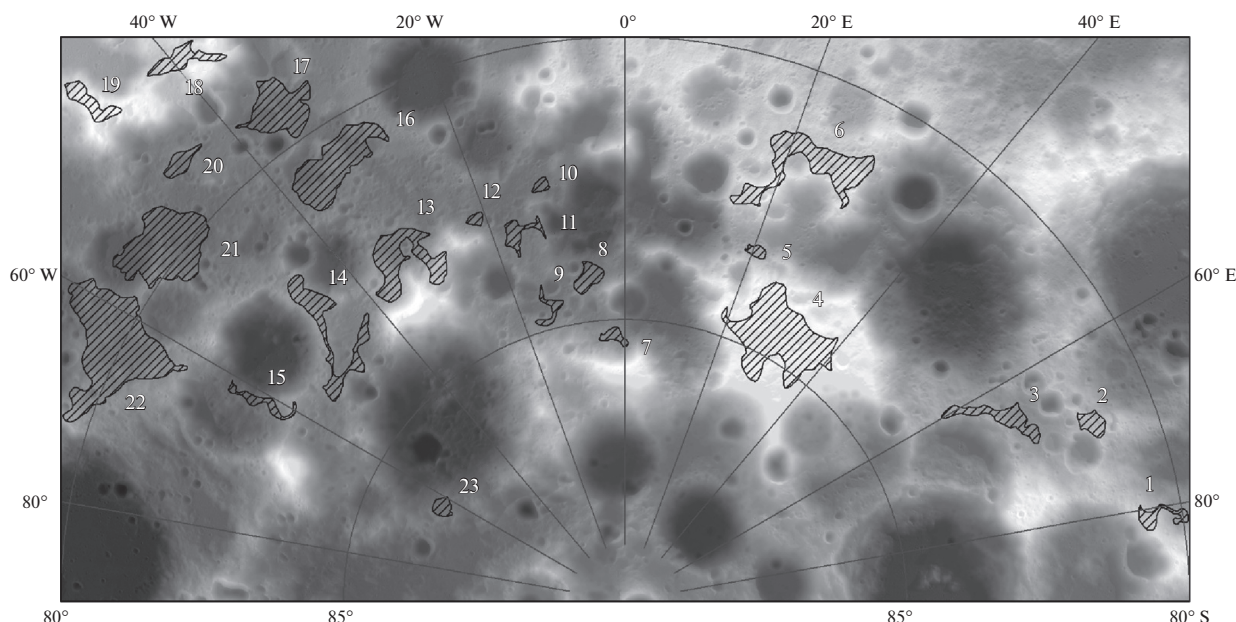


Рис. 7. Области, внутри которых могут быть выбраны места посадки КА Луна-27, имеющие радиус 0.5 км. Нумерация областей проведена в произвольном порядке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На настоящий момент задача выбора мест посадок для КА Луна-27 обеспечена большим количеством актуальных данных, часто имеющих более высокое пространственное разрешение по сравнению с данными, использовавшимися для выбора мест посадки КА Луна-25. Тем не менее данные о поверхности с пространственным разрешением, сравнимым с размерами КА, практически отсутствуют. Получение таких данных в дальнейшем может быть обеспечено орбитальным КА Луна-26.

Предварительные оценки потенциала лунной поверхности в южном полярном регионе (южнее 80° ю.ш.) для посадки КА Луна-27 показали необходимость серьезно повышать точность посадки по сравнению с КА Луна-25. Размер эллипса посадки (15 × 30) км, аналогичный эллипсу посадки КА Луна-25, сделает безопасную посадку невозможной: поверхность в окрестности южного полюса Луны не располагает ни одной ровной и освещенной площадкой такого размера. Уменьшение эллипса посадки уже до размеров 5 км приводит к возможности выбора площадки посадки из шести кандидатов. Дальнейшее уменьшение размеров площадки посадки КА Луна-27 может обеспечить широкий выбор из пятнадцати районов-кандидатов, в каждом из которых возможно осуществить как безопасную посадку, так и выполнение научной миссии КА Луна-27. Уменьшение площадки посадки до размеров 0.5 км позволит выбрать место посадки для КА Луна-27, обеспечить его безопасность и решение научных задач, а

также рассматривать область, в которую будет совершена посадка, как полигон для работы последующих КА.

Работа была поддержана Министерством науки и высшего образования РФ, грант АААА-А18-118012290370-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Долгополов В.П., Ефанов В.В., Зайцева О.Н., Зеленый Л.М., Мартынов М.Б., Пичхадзе К.М. Перспективные космические аппараты для фундаментальных и прикладных исследований Луны // Космонавтика и ракетостроение. 2011. № 3(64). С. 52–65.
- Дьячкова М.В., Литвак М.Л., Митрофанов И.Г., Санин А.Б. Выбор мест посадки космического аппарата Луна-25 в окрестности южного полюса Луны // Астрон. вестн. 2017. Т. 51. № 3. С. 204–215. (Djachkova M.V., Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Sanin A.B. Selection of Luna-25 landing sites in the South Polar Region of the Moon // Sol. Syst. Res. 2017. V. 51. № 3. P. 185–195.)
- Митрофанов И.Г., Санин А.Б., Литвак М.Л. Вода в полярных областях Луны: результаты картографирования нейтронным телескопом ЛЕНД // Докл. РАН. 2016. Т. 466. № 6. С. 660–663.
- Bussey D.B.J., McGovern J.A., Spudis P.D., Neish C.D., Noda H., Ishihara Y., Sørensen S.-A. Illumination conditions of the south pole of the Moon derived using Kaguya topography // Icarus. V. 208. № 2. P. 558–564.
- Garrick-Bethell I., Zuber M.T. Elliptical structure of the lunar South Pole-Aitken basin // Icarus. 2009. V. 204. № 3. P. 399–408.
- Ivanov M.A., Hiesinger H., van der Bogert C.H., Orgel C., Pasckert J.H., Head J.W. Geologic history of the northern portion of the South Pole-Aitken Basin on the

- Moon // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2018. V. 123. № 10. P. 2585–2612.
- James P.B., Smith D.E., Byrne P.K., Kendall J.D., Melosh H.J., Zuber M.T. Deep structure of the lunar South Pole-Aitken Basin // *Geophys. Res. Lett.* 2019. V. 46. № 10. P. 5100–5106.
- Mazarico E., Neumann G.A., Smith D.E., Zuber M.T., Torrence M.H. Illumination conditions of the lunar polar regions using LOLA topography // *Icarus*. 2011. V. 211. P. 1066–1081.
- Melosh H.J., Kendall J., Horgan B., Johnson B.C., Bowling T., Lucey P.G., Taylor G.J. South Pole-Aitken basin ejecta reveal the Moon's upper mantle // *Geology*. 2017. V. 45. P. 1063–1066.
- Moriarty D.P., Watkins R.N., Valencia S.N., Kendall J.D., Petro N.E. Mineralogy of Thorium-Enhanced Materials within the South Pole-Aitken Basin: Possible Traces of the Lunar Upper Mantle // 50th Lunar and Planet. Sci. Conf., held 18–22 March, 2019 at the Woodlands, Texas. LPI Contribution No 2132. id. 2874
- Paige D.A., Foote M.C., Greenhagen B.T., Schofield J.T., Calcutt S., Vasavada A.R., Preston D.J., Taylor F.W., Allen C.C., Snook K.J., Jakosky B.M., Murray B.C., Soderblom L.A., Jau B., Loring S., Bulharowski J., Bowles N.E., Thomas I.R., Sullivan M.T., Avis C., De Jong E.M., Hartford W., McCleese D.J. The Lunar Reconnaissance Orbiter Diviner Lunar Radiometer Experiment // *Space Sci. Rev.* 2010. V. 150. № 1–4. P. 125–160.
- Sanin A.B., Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Bakhtin B.N., Bodnarik J. G., Boynton W.V., Chin G., Evans L.G., Harshman K., Fedosov F., Golovin D.V., Kozhev A.S., Livengood T.A., Malakhov A.V., McClanahan T.P., Mokrousov M.I., Starr R.D., Sagdeev R.Z., Tretyakov V.I., Vostrukhin A.A. Hydrogen distribution in the lunar polar regions // *Icarus*. 2017. V. 283. P. 20–30.
- Schultz P.H., Crawford D. Origin of nearside structural and geochemical anomalies on the Moon // *Recent Advances and Current Research Issues in Lunar Stratigraphy* / Ed. Ambrose D.A. Williams Geological Soc. Am. Special Paper. 2011. V. 477. P. 141–159.
- Smith D.E., Zuber M.T., Jackson G.B., Cavanaugh J.F., Neumann G.A., Riris H., Sun X., Zellars R.S., Coltharp C., Connelly J., Katz R.B., Kleyner I., Liiva P., Matuszeski A., Mazarico E.M., McGarry J.F., Novo-Gradac A.-M., Melanie N.O., Peters C., Ramos-Izquierdo L.A., Ramsey L., Rowlands D.D., Schmidt S., Scott V.S., Shaw G.B., Smith J.C., Swinski J.-P., Torrence M.H., Unger G., Yu A.W., Zagwodzki T.W. The Lunar Orbiter Laser Altimeter investigation on the Lunar Reconnaissance Orbiter mission // *Space Sci. Rev.* 2010. V. 150. P. 209–241.
- Tretyakov V.I., Zelenyi L.M., Mitrofanov I.G. Overview of Luna-27 science instruments // *The Eleventh Moscow Int. Solar Syst. Symp.*, held October 5–9, 2020, Moscow, Russia, 11MS3-MN-10.
- Vondrak R., Keller J., Chin G., Garvin J. Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO): Observations for lunar exploration and science // *Space Sci. Rev.* 2010. V. 150. P. 7–22.