

Гипсометрическое картографирование и анализ полярных областей Луны, включая возможные посадочные площадки КА «Луна-25» и «Луна-27»

А.А. Коханов

Московский государственный университет геодезии и картографии

Москва, 105064, Россия

E-mail: a_kokhanov@miigaik.ru

Статья посвящена разработке и созданию карт полярных областей Луны. В статье описаны исходные данные дистанционного зондирования, полученные японским и американским космическими аппаратами в период с 2007 г. по настоящий момент, используемые в данной работе для картографирования и изучения рельефа земного спутника. Представлена концепция настенной обзорной карты полярных областей в масштабе 1:1 600 000, основные принципы её составления и оформления. Приведен макет настенной карты, включающий обзорные карты приполярных областей, гипсометрическую карту и карту уклонов кратера Богуславский – потенциальной посадочной площадки космического аппарата «Луна-25» в масштабе 1:1 000 000, карты уклонов в окрестностях потенциальных посадочных площадок космического аппарата «Луна-27» в масштабе 1:300 000. С помощью гипсографических кривых и гистограмм высот показаны различия в глобальном рельефе северной и южной полярных областей Луны. Перепад высот в южной области почти в два раза больше, чем в северной. При этом средняя высота южной приполярной области составляет -1339 м, а северной – -824 м. Поверхность северной полярной области более пологая по сравнению с южной, большая часть которой занята бассейном «Южный полюс – Эйткен».

Ключевые слова: карта рельефа Луны, полярные территории, Луна-25, Луна-27, характеристика посадочных площадок

Одобрена к печати: 10.05.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-231-238

Введение

Полярные области Луны – территории спутника Земли, которые до сих пор не исследованы контактными методами, представляют в настоящее время особый научный интерес. В 2019 году планируется запуск космического аппарата (КА) «Луна-25» с целью отработки мягкой посадки на поверхности спутника (Хартов, 2015). В качестве посадочной площадки выбрано дно кратера Богуславский (Zelenyi, Popovkin, 2013) в южной полярной области. Затем планируется запуск и посадка КА «Луна-27» для контактных исследований поверхности с целью изучения наличия водяного льда. Место посадки будет определено по результатам работы орбитального аппарата «Луна-26»; на данный момент выбраны несколько предварительных участков (Tretyakov, 2015).

Задачами исследования является изучение поверхности северной и южной полярных областей Луны на основе картографических методов и ГИС с использованием современных данных дистанционного зондирования, включая детальную характеристику области посадки КА «Луна-25», а также потенциальных мест посадок КА «Луна-27», в том числе выявление возможных новых территорий, перспективных с точки зрения обнаружения залегания подповерхностного водяного льда (Litvak et al., 2016). Цель работы – создание обзорной гипсометрической карты полярных областей Луны для картографического обеспечения будущих российских исследовательских миссий.

Источники данных

На момент составления карты наиболее полное и детальное покрытие данными о рельефе картографируемой территории (приполярных территорий Луны) обеспечивают два архива данных дистанционного зондирования:

Архив НАСА: Lunar Orbiter Data Explorer (<http://ode.rsl.wustl.edu/moon>). Архив предоставляет доступ к данным, полученным со спутника Lunar Reconnaissance Orbiter, в том числе результаты их обработки (данные уровня GDR: пространственно привязанные калиброванные продукты – цифровые модели рельефа (ЦМР) и ортомозаики). Для целей картографирования использовалась ЦМР, созданная по данным лазерной альтиметрии инструмента Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) с пространственным разрешением 30 м/пиксель. Каждый пиксель содержит значение среднего превышения участка поверхности относительно среднего радиуса Луны – 1737,4 км (Smith et al., 2010). ЦМР покрывает приполярные участки поверхности Луны, ограниченные по широте $\pm 75^\circ$ и $\pm 90^\circ$. Данная модель рельефа использовалась для составления карт приполярных областей Луны.

Кроме растровых продуктов, архив предоставляет доступ непосредственно к результатам измерений LOLA. Данные представлены в виде пространственно привязанных точек со значением превышения поверхности относительно среднего радиуса. Результаты лазерной альтиметрии использовались для составления карт кратера Богуславский для характеристики посадочной площадки космического аппарата (КА) «Луна-25».

Архив японского космического агентства JAXA: SELENE data archive (<http://l2db.selene.darts.isas.jaxa.jp/>). Ресурс содержит данные, полученные в ходе японской космической миссии SELENE (Кагуя) с 2007 г. по 2009 г. В данной работе использовалась ЦМР SLDEM2013 (Haruyama et al., 2014), созданная по результатам фотограмметрической обработки космических изображений, полученных стереокамерой Terrain Camera. Эта модель рельефа дополнена данными лазерной альтиметрии LOLA и имеет пространственное разрешение 10 м/пиксель. ЦМР доступна пользователям в виде отдельных файлов, покрывающих участки поверхности размером $1^\circ \times 1^\circ$. Эти данные использовались для детального картографирования предполагаемых посадочных площадок КА «Луна-27».

Выбор каждого продукта определён задачами и масштабом картографирования. ЦМР LOLA позволяет отобразить полярные области в заданном масштабе без разрывов и с более высокой детальностью по сравнению с ранее изданными картами (Лазарев, Родионова, 2010; Rodionova et al., 2015). Необработанные данные лазерной альтиметрии использованы для создания ЦМР с разрешением аналогичным разрешению ЦМР полярных областей на территорию, не обеспеченную данными уровня GDR подобного качества. ЦМР SLDEM2013 обладает наилучшим на данный момент пространственным разрешением и использована для вычисления уклонов рельефа на базисах, наиболее близких к размерам посадочного модуля КА.

Картографирование приполярных территорий Луны

Гипсометрические карты северной и южной приполярных областей Луны, ограниченных 75-ми параллелями, составлены в масштабе 1:1 600 000 в нормальной стереографической проекции (рис. 1). Выбранная проекция позволяет сохранить на картографическом изображении форму кратеров – основной структуры рельефа Луны. Меридианы нанесены с шагом в 30°, параллели – 5°.

Для отображения высот разработана гипсометрическая шкала, позволяющая подчеркнуть структуру дна больших кратеров, включая центральные поднятия, и выделить возвышенности. Серо-зелёные ступени шкалы отображают рельеф с высотами ниже среднего радиуса Луны, жёлто-коричневые – выше, что позволяет хорошо различать понижения и возвышенности в приполярных областях. Гипсометрическая шкала дополнена горизонталями, проведёнными через 500 м, и отметками высот с использованием отдельных отсчетов лазерного альтиметра LOLA. Для более пластичного изображения с помощью ЦМР автоматическим способом в ПО ArcGIS 10.1 создана аналитическая отмывка рельефа. Это также позволило дополнительно показать формы рельефа, не выражающиеся цветовой шкалой и рисунком горизонталей.

С использованием результатов моделирования условий освещённости по данным LOLA (Mazarico et al., 2011) на карту нанесены выражающиеся в масштабе постоянно затенённые территории. Эти области, с одной стороны, являются наиболее вероятным местом скопления водяного льда (McClanahan et al., 2015), а с другой – представляют опасность для работы исследовательского космического аппарата с точки зрения недостаточного обеспечения освещённости и, соответственно, длительности функционирования оборудования в экстремальных условиях (Carpenter et al., 2012).

Дополнительно на карте показано место падения разгонного блока «Центавр» – эксперимента, в результате которого было доказано наличие воды на Луне (Day, 2009); также указаны предположительные места посадки российского КА «Луна-27», планируемой в южной приполярной области.

На карте, согласно номенклатуре Международного астрономического союза (Anderson, Whitaker, 1982; <http://planetarynames.wr.usgs.gov>), подписаны оригинальные названия кратеров размером более 30 км в диаметре. Названия даны латиницей и в русской транскрипции (Пугачёва и др., 2010).

Для характеристики посадочных площадок КА «Луна-25» и «Луна-27» составлены карты отдельных участков поверхности Луны в масштабах 1:1 000 000 и 1:300 000 соответственно.

Гипсометрическая карта кратера Богуславский отображает кратер и близлежащие территории и даёт общее представление о рельефе и местоположении области предполагаемой посадки КА «Луна-25». Карта составлена в масштабе 1:1 000 000 в косоугольной равнопромежуточной проекции с центром в точке 42,5° в.д. и 73° ю.ш. Координатная сетка нанесена с шагом в 2° по долготе и 1° по широте. На карту нанесены предполагае-

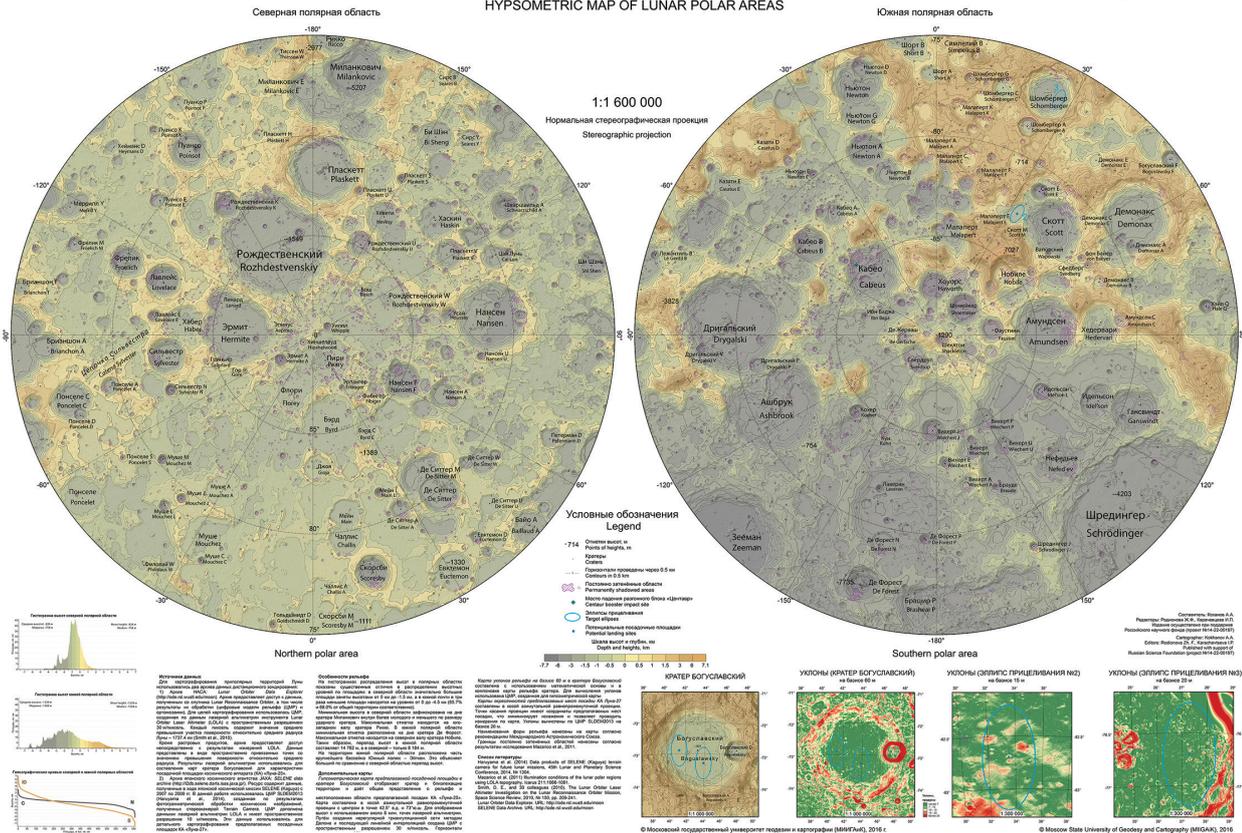


Рис. 1. Макет гипсометрической карты полярных областей Луны

мые точки посадки КА и границы эллипсов прицеливания. Для отображения высот нами создана ЦМР с пространственным разрешением 30 м/пиксель путём создания нерегулярной триангуляционной сети методом Делоне и последующей линейной интерполяцией с использованием около 8 млн. точек лазерной альтиметрии. На карте использована гипсометрическая шкала, разработанная для основной карты. Горизонтالي проведены через 250 м. Карта дополнена аналитической отмывкой рельефа.

Карта уклонов рельефа на базе 60 м в кратере Богуславский составлена с использованием математической основы и в компоновке карты рельефа кратера. Для вычисления уклонов использована ЦМР, созданная для гипсометрической карты.

Карты окрестностей предполагаемых мест посадки КА Луна-27 составлены в масштабе 1:300 000 в косо́й азимутальной равнопромежуточной проекции. Точки касания проекции имеют координаты предполагаемых мест посадки, что минимизирует искажения и позволяет проводить измерения по карте. Уклоны вычислены по ЦМР SLDEM2013 на базе 20 м. Значения уклонов классифицированы на 5 групп, среди которых выделены отвечающие условиям безопасности посадки КА – менее 7° (Basilevsky et al., 2015). На картах выделены постоянно затенённые области в пределах изображаемых территорий.

Картометрические исследования поверхности Луны

На основе составленных карт проведён анализ особенностей рельефа полярных областей Луны с применением инструментов ГИС. Распространённость различных высот относительно среднего радиуса тела в пределах изучаемых территорий показана с помощью гипсографических кривых (рис. 2).

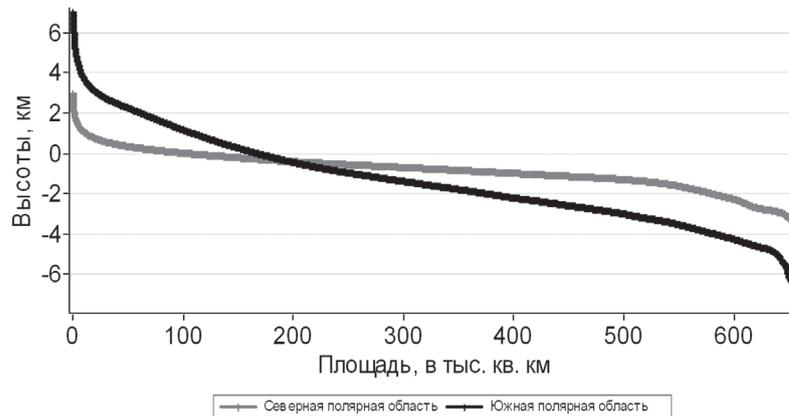


Рис. 2. Гипсографические кривые северной и южной полярных областей

Минимальная высота в северной области (-5207 м) зафиксирована в точке на дне кратера Миланкович внутри более молодого и меньшего по размеру ударного кратера. Точка с максимальной высотой (2977 м) расположена на юго-западном валу кратера Рикко. В южной полярной области минимальная высота отмечена в кратере Де Форест – -7735 м, максимальная – на северном валу кратера Нобиле – поднимается на 7027 м. На гипсографических кривых хорошо видно, что перепад высот в южной полярной области составляет 14 762 м, а в северной – только 8 184 м.

Графики частоты встречаемости высот в южной и северной полярных областях построены для выявления глобальных различий между полярными областями Луны на основе количественных методов. Гистограммы, построенные по ЦМР с размером элемента 30×30 м на местности, наглядно демонстрируют существенные различия в рельефе (см. рис. 3). Так, основные максимумы на гистограмме высот северной области (рис. 3а) приходятся на -1,5 – -0,5 км, что характеризует область как в целом гладкую, средняя высота: -824 м. Локальный максимум на гистограмме (-3 км) обусловлен глубинами нескольких крупных старых плоскодонных кратеров (Рождественский, Нансен, Эрмит, Пласскетт, Миланкович) и их сателлитных кратеров. Медиана высот -758 м.

На территории южной полярной области расположена часть крупнейшего бассейна Южный полюс – Эйткен. Это объясняет больший по сравнению с северной областью перепад высот: южную область пересекает кольцевой вал этого кратера с максимальной высотой более 7 км, а большая часть территории занята склоном бассейна. Также общий уклон территории по направлению к центру бассейна «Южный Полюс-Эйткен» обуславливает

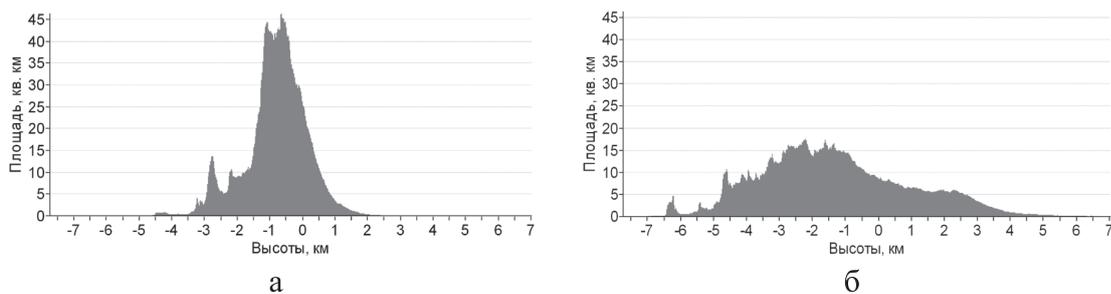


Рис. 3. Гистограммы высот северной (а) и южной (б) полярных областей

более низкий средний уровень высот южной полярной области: средняя высота территории составляет -1339 м, медиана высот – -1568 м.

Таким образом, картографируемые области представляют собой два разных типа мега-рельефа Луны. Рельеф поверхности северной полярной области более пологий по сравнению с южной, большая часть которой занята бассейном «Южный полюс – Эйткен».

Заключение

Новая карта Луны, созданная по новейшим данным дистанционного зондирования, полученным с помощью космического аппарата LRO (включая ЦМР с разрешением 30м/пиксель), отображает рельеф полярных областей в масштабе 1:1 600 000 и является в настоящий момент наиболее детальной гипсометрической картой спутника Земли. Картометрические методы исследования позволили выявить и сравнить количественные параметры распределения высот, особенности поверхности и распределения форм рельефа в полярных областях. Помимо обзорной карты полярных областей, составлены детальная гипсометрическая карта кратера Богуславский и карты уклонов потенциальных посадочных площадок российских космических аппаратов «Луна-25» и «Луна-27». Карты составлены по ЦМР SLDEM 2013 (10 м/пиксель) и могут использоваться в качестве вспомогательного материала для оценки возможных мест посадки космических аппаратов при планировании будущих лунных миссий.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 14-22-00197.

Литература

1. Лазарев Е.Н., Родионова Ж.Ф. Карта рельефа полярных областей Луны // Земля и Вселенная. 2010. № 4. С. 18–30.
2. Пугачёва С.Г., Родионова Ж.Ф., Шевченко В.В., Скобелева Т.П., Дехтярева К.И., Попов А.П. Каталог «Номенклатурный ряд названий лунного рельефа». 2010. URL: <http://selena.sai.msu.ru/Pug/Publications/Nomenclature%20of%20lunar%20names/Nomenclature%20of%20lunar%20names.pdf> (Дата обращения 11.03.2016).
3. Хартов В.В. От исследования к освоению ресурсов Луны. Вчера и завтра (к 50-летию космической деятельности НПО имени С.А. Лавочкина) // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. 2015. № 3. С. 8–14.

4. *Anderson L.E., Whitaker E.A.* NASA Reference Publication 1097: NASA Catalogue of Lunar Nomenclature. Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration. 1982. 183 p.
5. *Basilevsky A.T., Kreslavsky M.A., Karachevtseva I.P., Abdrakhimov A.M.* Size Frequency Distribution of Areas of Various Slopes at “Flat” Sites On The Surface Of Mars And The Moon // 46th Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands, March 16–20, 2015. Abstract No. 1117.
6. *Carpenter J.D., Fisackerly R., De Rosa D., Houdou B.* Scientific Preparations for Lunar Exploration with the European Lunar lander // Planetary and Space Science. 2012. Vol. 74. P. 208–223.
7. *Day B.H.* LCROSS: Finding water at the lunar south Pole // Ad Astra. 2009. Vol. 10. P. 26–29.
8. *Haruyama J., Ohtake M., Matsunaga T., Otake H., Ishihara Y., Masuda K., Yokota Y., Yamamoto S.* Data products of SELENE (Kaguya) terrain camera for future lunar missions // 45th Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands, March 17–21, 2014. Abstract No. 1304.
9. *Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Bakhtin B.N., Bodnarik J.G., Boynton W.V., Chin G., Evans L.G., Harshman K., Livengood T.A., Malakhov A., Mokrousov M.I., McClanahan T. P., Sagdeev R., Starr R.* The variations of neutron component of lunar radiation background from LEND/LRO observations // Planetary and Space Science. 2016. V. 122. P. 53–65.
10. *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. Vol. 211. P. 1066–1081.
11. *McClanahan T.P., Mitrofanov I.G., Boynton W.V., Chin G., Bodnarik J., Droege G., Evans L.G., Golovin D., Hamara D., Harshman K., Litvak M., Livengood T.A., Malakhov A., Mazarico E., Milikh G., Nandikotkur G., Parsons A., Sagdeev R., Sanin A., Starr R.D., Su J.J., Murray J.* Evidence for the sequestration of hydrogen-bearing volatiles towards the Moon’s southern pole-facing slopes // Icarus. 2015. Vol. 255. P. 88–99
12. *Rodionova Zh., Karachevtseva I., Lazarev E., Kokhanov A.* Mapping of the terrestrial planets satellites: the Moon and Phobos // 27th International Cartographic Conference, 16th General Assembly, Rio de Janeiro, August 23–28, 2015. URL: http://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2015/papers/28/302.html (Дата обращения 25.03.2016).
13. *Smith D.E. and 30 colleagues.* The Lunar Orbiter Laser Altimeter Investigation on the Lunar Reconnaissance Orbiter Mission // Space Science. Review. 2010. No. 150. P. 209–241.
14. *Tretyakov V.L.* Lunar robotic missions, as precursors for manned lunar flight // The 6th Moscow Solar System Symposium. Moscow, 5–9 October 2015. Abstract 6MS3-MN-15.
15. *Zelenyi L.M., Popovkin V.I.* Russian Solar system exploration program. Updated version // The 4th Moscow Solar System Symposium. Moscow, October 14–18, 2013. Abstract No. 4MS3-OS-02.

Hypsometric mapping and analysis of lunar polar regions, including potential landing sites for Luna-25 and Luna-27 spacecrafts

A.A. Kokhanov

*Moscow State University of Geodesy and Cartography
105064, Russia
E-mail: a_kokhanov@miigaik.ru*

The paper describes the development and creation of maps of the lunar polar regions. The original modern remote sensing data obtained from spacecrafts in the period from 2007 to present time, which were used for mapping and study of the Earth’s satellite topography, are listed. The concept of general wall map of lunar polar regions at a scale of 1:1 600 000 is presented; basic principles of its compilation and design are described. Layout of wall map is shown, that includes general map of polar regions, hypsometric map and map of slopes of crater Boguslavsky – the potential landing site for Luna-25 spacecraft – at a scale of 1:1 000 000, maps of slopes near potential landing sites for Luna-27 spacecraft. With hypsographic curves and histograms of heights the differences in the global relief between the lunar northern and southern polar regions are shown. The height range in the southern region is almost twice that on the north. The average height of the southern polar region is -1339 m, and that on the north is -824 m. Northern polar region is situated on a lunar terrain with old flat-bottomed craters and has a more gently sloping than the southern region that is mostly occupied by the South Pole-Aitken Basin.

Keywords: map of lunar relief, polar regions, Luna-25, Luna-27, characterization of landing sites

*Accepted: 10.05.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-231-238*

References

1. *Lazarev E.N., Rodionova Zh. F.* Karta rel’efa polyarnykh oblastei Luny (Map of the lunar polar regions), *Zemlya I Vselennaya*, 2010, No. 4, pp. 18–30.

2. Pugacheva S.G., Rodionova Zh.F., Shevchenko V.V., Skobeleva T.P., Dekhtyareva K.I., Popov A.P., available at: <http://selena.sai.msu.ru/Pug/Publications/Nomenclature%20of%20lunar%20names/Nomenclature%20of%20lunar%20names.pdf> (March 11, 2016).
3. Khartov V.V., Ot issledovaniya k osvoeniyu resursov Lunny. Vchera i zavtra (k 50-letiyu kosmicheskoi deyatel'nosti NPO imeni S.A. Lavochkina) (From research to the development of the resources of The Moon. Yesterday and tomorrow (to the 50th anniversary of Space activity of NPO Lavochkin)), *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2015, No. 3, pp. 8–14.
4. Anderson L.E., Whitaker E.A., *NASA Reference Publication 1097: NASA Catalogue of Lunar Nomenclature*, Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration. 1982, 183 p.
5. Basilevsky A.T., Kreslavsky M.A., Karachevtseva I.P., Abdrakhimov A.M., Size Frequency Distribution of Areas of Various Slopes at “Flat” Sites On The Surface Of Mars And The Moon, *46th Lunar and Planetary Science Conference*, The Woodlands, 16–20 March 2015, Abstract No. 1117.
6. Carpenter J.D., Fisackerly R., De Rosa D., Houdou B., Scientific Preparations for Lunar Exploration with the European Lunar lander, *Planetary and Space Science*, 2012, Vol. 74, pp. 208–223.
7. Day B.H., LCROSS: Finding water at the lunar South Pole, *Ad Astra*, 2009, Vol. 10, pp. 26–29.
8. Haruyama J., Ohtake M., Matsunaga T., Otake H., Ishihara Y., Masuda K., Yokota Y., Yamamoto S., Data products of SELENE (Kaguya) terrain camera for future lunar missions, *45th Lunar and Planetary Science Conference*, The Woodlands, 17–21 March 2014, Abstract No. 1304.
9. Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Bakhtin B.N., Bodnarik J.G., Boynton W.V., Chin G., Evans L.G., Harshman K., Livengood T.A., Malakhov A., Mokrousov M.I., McClanahan T.P., Sagdeev R., Starr R., The variations of neutron component of lunar radiation background from LEND/LRO observations, *Planetary and Space Science*, 2016, Vol. 122, pp. 53–65.
10. 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, Vol. 211, pp. 1066–1081.
11. McClanahan T.P., Mitrofanov I.G., Boynton W.V., Chin G., Bodnarik J., Droege G., Evans L.G., Golovin D., Hamara D., Harshman K., Litvak M., Livengood T.A., Malakhov A., Mazarico E., Milikh G., Nandikotkur G., Parsons A., Sagdeev R., Sanin A., Starr R.D., Su J.J., Murray J., Evidence for the sequestration of hydrogen-bearing volatiles towards the Moon’s southern pole-facing slopes, *Icarus*, 2015, Vol. 255, pp. 88–99.
12. Rodionova Zh., Karachevtseva I., Lazarev E., Kokhanov A., Mapping of the terrestrial planets satellites: the Moon and Phobos, *27th International Cartographic Conference, 16th General Assembly*, Rio de Janeiro, August 23–28, 2015. URL: http://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2015/papers/28/302.html (March 25, 2016).
13. Smith D.E., and 30 colleagues, The Lunar Orbiter Laser Altimeter Investigation on the Lunar Reconnaissance Orbiter Mission, *Space Science Review*, 2010, No. 150, pp. 209–241.
14. Tretyakov V.L., Lunar robotic missions, as precursors for manned lunar flight, *The 6th Moscow Solar System Symposium*, Moscow, 5–9 October 2015, Abstract No. 6MS3-MN-15.
15. Zelenyi L.M., Popovkin V.I., Russian Solar system exploration program. Updated version, *The 4th Moscow Solar System Symposium*, Moscow, 14–18 October, 2013, Abstract No. 4MS3-OS-02.