

УДК 523.34; 520.874.3; 520.27; 528.8.044.2

## РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОСТОЯННО ЗАТЕНЕННЫХ ОБЛАСТЕЙ НА ЮЖНОМ ПОЛЮСЕ ЛУНЫ

© 2024 г. Ю. С. Бондаренко<sup>a,\*</sup>, Д. А. Маршалов<sup>a</sup>, Б. М. Зиньковский<sup>b</sup>, А. Г. Михайлов<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>b</sup>Акционерное общество “Особое конструкторское бюро  
Московского энергетического института”, Москва, Россия

\*e-mail: bondarenko@iaaras.ru

Поступила в редакцию 23.11.2023 г.

После доработки 12.01.2024 г.

Принята к публикации 25.01.2024 г.

В работе представлены новые подробные радиолокационные карты и поляриметрические данные, охватывающие южный полярный район видимой стороны Луны размером 400×800 км с пространственным разрешением около 75 м. Данные были получены с использованием 64-метровой антенны ТНА-1500 Центра космической связи ОКБ МЭИ Медвежьего озера и 13.2-метрового радиотелескопа РТ-13 Обсерватории Светлое ИПА РАН на длине волны 4.2 см. На этой длине волны радиолокационные сигналы проникают в лунный реголит на глубину до 1 м и чувствительны к поверхностным и взвешенным породам размерами более 1 см. На картах видны 39% площади постоянно затененных областей, недоступных для наблюдений оптическими наземными средствами, в которых могут скрываться залежи водяного льда. Анализ радиолокационных карт не выявил связи между поляризационными свойствами поверхности в этих областях и наличием солнечного освещения. Полученные в результате этой работы данные могут быть использованы для изучения особенностей поверхности и приповерхностного слоя реголита южного полярного района Луны, включая поиск ледяных отложений в постоянно затененных областях, а также для планирования будущих лунных миссий.

**Ключевые слова:** Луна, южный полярный район, постоянно затененные области, радиолокационные изображения, радиолокационное рассеяние, отношение круговых поляризаций

DOI: 10.31857/S0320930X24040045, EDN: LUHTVN

### ВВЕДЕНИЕ

В августе 2023 г. индийский космический аппарат (КА) Chandrayaan-3 впервые в мире совершил мягкую посадку в районе южного полюса Луны. За время работы миссии была измерена температура на поверхности реголита и под ним, а также исследован его спектральный состав. В это же время к южному полюсу направлялась и российская автоматическая межпланетная станция Луна-25 с целью исследования реголита, экзосферы и отработки технологии безопасной посадки (Митрофанов и др., 2021).

К сожалению, во время одного из орбитальных маневров, произошла нештатная ситуация и КА столкнулся с Луной, не выполнив поставленные перед ним задачи. И все же, интерес к исследованию южного полюса Луны не заканчивается этими миссиями. В текущем десятилетии разными странами выполняется целый ряд космических программ, таких как Artemis, Луна, Chandrayaan, Chang'e и другие основной целью которых является создание базы на Луне, а также поиск водяного льда, в постоянно затененных областях южного полюса Луны. Поэтому в ближайшей перспективе дополнительные знания

об этих областях будут в значительной мере актуальны и востребованы.

Одним из наиболее эффективных методов дистанционного исследования физических свойств поверхности и недр Луны является радиолокация. Этот метод заключается в освещении Луны радиолокационным сигналом, приеме отраженного сигнала (эхо-сигнала) и анализе его характеристик. При этом и излучатель, и приемник радиолокационного сигнала могут располагаться как на Земле, так и на КА в различных “би-статических” конфигурациях. Наиболее простой конфигурацией с точки зрения ее реализации является наземное расположение передающей и приемной антенных систем, однако размещение одной или обеих таких систем на борту КА, находящегося на окололунной орбите, позволяет исследовать обратную сторону Луны, а также выбирать углы, под которыми будет освещаться ее поверхность. Основными преимуществами радиолокации по сравнению с наблюдениями, например, в оптическом или инфракрасном диапазонах длин волн являются чрезвычайно высокое разрешение получаемых изображений, независимость от атмосферы Земли, способность радиосигналов проникать вглубь реголита, наличие в эхо-сигнале информации о поляризационных свойствах рассеивающей поверхности, а также возможность исследовать приполярные области Луны, никогда не освещаемые Солнцем, в том числе и для поиска водяного льда.

Первые радиолокационные наблюдения полярных районов Луны с целью поиска ледяных отложений в постоянно затененных областях, были проведены в 1994 г. с помощью КА Clementine на длине волны 13.2 см. В качестве излучателя радиолокационного сигнала выступала 1.1-метровая антенна, размещенная на борту КА, а прием эхо-сигнала осуществлялся на 70-метровую антенну обсерватории Голдстоун. Основным результатом этого эксперимента стало обнаружение сильного обратного рассеяния в постоянно затененных областях южного полюса Луны, которое объяснялось возможным наличием там водяного льда (Nozette и др., 1996). Годом позже были представлены радиолокационные изображения южного полярного района Луны с разрешением 125 м и поляриметрические данные с разрешением 1 км, полученные в обсерватории Аресибо с помощью 300-метрового локатора и расположенной неподалеку небольшой вспомогательной антенны на длине волны 12.6 см (Stacy и др., 1997). Обнаруженные на изображениях участки с высоким отношением круговых

поляризаций на этот раз не стали убедительным доказательством присутствия водяного льда, поскольку было показано, что часть из них освещается Солнцем или совпадает с обращенными к радару склонами кратеров. Позднее был проведен повторный анализ данных, полученных во время эксперимента на КА Clementine, который также показал, что высокие значения обратного рассеяния не являются чем-то уникальным для исследуемых районов (Simpson и др., 1999).

Первые топографические карты южного полюса Луны с разрешением 150 м в плане и 50 м по высоте были получены в 1997 г. в обсерватории Голдстоун с использованием метода радиолокационной интерферометрии (Margot и др., 1999). Для излучения сигнала на длине волны 3.5 см была задействована 70-метровая антенна, а две 34-метровые антенны, разнесенные друг от друга на 20 км, образовывали приемный радиointерферометр. По полученным значениям высот, используя метод трассировки лучей, впервые были определены границы областей на поверхности Луны, никогда не освещаемых Солнцем.

Следующая попытка обнаружить наличие водяного льда на южном полюсе Луны при помощи радиолокации была предпринята в 2005 г. на длине волны 12.6 см. На этот раз пару 300-метровому локатору обсерватории Аресибо составил 100-метровый радиотелескоп обсерватории Грин-Бэнк. В результате эксперимента было получено изображение с пространственным разрешением порядка 20 м (Campbell и др., 2006), однако проблемы с абсолютной калибровкой приемных каналов радиотелескопа Грин-Бэнк не позволили надежно оценить отношение круговых поляризаций, в результате чего поляриметрические данные были представлены с относительно низким разрешением порядка 500 м. Как и в работе (Stacy и др., 1997) авторы не обнаружили разницы между поляризационными свойствами поверхностей, освещаемых Солнцем и находящихся в постоянной тени.

В 2009 г. был проведен эксперимент LCROSS (Lunar Crater Observation and Sensing Satellite) во время которого отработанный разгонный блок Centaur столкнулся с постоянно затененной поверхностью кратера Кабео, расположенного вблизи южного полюса Луны. При этом сам удар и последовавший за ним выброс наблюдались с окололунной орбиты с инструментами КА LCROSS, включая оптические камеры, спектрометры и радиометр. В результате удара образовался кратер диаметром около 30 м, а в выброшенном облаке газа и пыли была обнаружена

не только вода, но и ряд других летучих соединений (Schultz и др., 2010; Colaprete и др., 2010). Вместе с тем, радиолокационные изображения и поляриметрические данные кратера Кабео на длине волны 12.6 см, полученные до и после удара при помощи радиолокатора с синтезированной апертурой Mini-RF, размещенного на борту КА LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter) не выявили аномального обратного рассеяния в районе падения LCROSS (Neish и др., 2011). Такой результат объяснялся недостаточным пространственным разрешением полученных радиолокационных изображений, сравнимым с размерами образовавшегося кратера, а вода, обнаруженная КА LCROSS, скорее всего, представляла собой небольшие невидимые радаром частички льда, смешанные с реголитом.

Поиски водяного льда с использованием инструмента Mini-RF продолжились в 2010 г. в постоянно затененной области самого южного кратера Луны – Шеклтон. В результате этих наблюдений было обнаружено неоднородное распределение отношения круговых поляризаций на стенках кратера, величина которого уменьшалась в направлении дна. Полученные с Mini-RF данные были хорошо согласованы с повышенной шероховатостью стенок кратера в дециметровом масштабе за счет движения камней вниз по крутым склонам, однако не исключали наличия небольшого количества водяного льда, примешанного к самым верхним метрам реголита (Thomson и др., 2012).

В 2011 г. передающая часть инструмента Mini-RF на борту КА LRO вышла из строя, однако приемник продолжил функционировать, что позволило с 2012 по 2015 гг. провести серию бистатистических радиолокационных наблюдений совместно с 300-метровым радиолокатором обсерватории Аресибо на длине волны 12.6 см. Целью этой кампании было изучение поляризационных свойств различных типов лунной поверхности в зависимости от бистатистического угла и обнаружение эффекта когерентного обратного рассеяния, указывающего на наличие водяного льда (Patterson и др., 2017). Несмотря на то, что такой эффект наблюдался в выбросах нескольких молодых ударных кратеров, а также на дне кратера Кабео, однозначно идентифицировать водяной лед с помощью радиолокации так и не удалось. Поэтому дополнительные бистатистические радиолокационные наблюдения постоянно затененных областей на южном полюсе Луны могут быть полезны для лучшего понимания потенциальной возможности обнаружения водяного льда этим методом.

Современные возможности цифровой обработки сигналов позволяют получать радиолокационные изображения Луны с высоким пространственным разрешением без использования специальных “планетарных локаторов”, таких как 300-метровый телескоп обсерватории Аресибо или 70-метровая антенна обсерватории Голдстоун. Было показано, что для реализации подобных экспериментов вполне достаточно маломощного излучателя и высокочувствительной приемной антенны небольшого размера (Bondarenko и др., 2022). В данной работе проведены радиолокационные наблюдения южного полярного района Луны на длине волны 4.2 см на базе действующих в России антенных систем, описаны метод получения радиолокационных изображений и технические подробности эксперимента, представлены новые радиолокационные карты и поляриметрические данные с пространственным разрешением порядка 75 м, а также проведен анализ отношений круговых поляризаций в постоянно затененных областях на южном полюсе Луны.

#### МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Наземные бистатистические радиолокационные наблюдения Луны осуществляются путем сопровождения передающей и приемной антенными системам и выбранной цели на поверхности Луны по заранее вычисленным эфемеридам, в течение заданного интервала времени (Маршалов и др., 2018). При этом передающая антенная система освещает радиосигналом область, соответствующую пересечению главного лепестка своей диаграммы направленности с поверхностью, а приемная антенная система собирает мощность, отраженную от области, соответствующей ее диаграмме. Ближайшая к приемнику точка на поверхности Луны называется подрадарной (SRP – Sub-Radar Point). Во время наблюдений эта точка движется по поверхности Луны в плоскости, определяющей видимый “доплеровский” экватор  $Eg$ , а вектор, перпендикулярный этой плоскости, проходящий через центр масс Луны, представляет собой видимую ось вращения.

В связи с тем, что каждая из точек освещенной поверхности имеет разные лучевые скорости относительно приемной антенны, сигналы, отраженные от них, будут иметь разное доплеровское смещение частоты. Для точек поверхности, приближающихся к приемнику, частота

эхо-сигнала будет увеличиваться  $+f$ , а для удаляющихся — уменьшаться  $-f$  (см. рис. 1). В результате возникает, так называемое уширение полосы частот эхо-сигнала, которое можно оценить как:

$$B = \frac{2D\omega}{\lambda},$$

где  $\lambda$  — длина волны излучаемого сигнала,  $\omega$  — видимая угловая скорость вращения Луны, а  $D$  — размер наименьшей из проекций диаграмм направленности на поверхности Луны.

Кроме того, эхо-сигнал от каждой точки на освещенной поверхности регистрируется приемной системой со своей задержкой по времени. Эти задержки могут быть измерены в случае, если излучаемый сигнал будет известным образом изменяться со временем (модулироваться). Например, можно изменять фазу сигнала через промежутки времени равные  $\tau$ , в соответствии с повторяющейся последовательностью, состоящей из  $N$  элементов. Период повторения такой последовательности (или импульса) (PRP — Pulse Repetition Period) будет равен  $N\tau$ , с частотой повторения (PRF — Pulse Repetition Frequency) равной  $1/PRP$ . Для получения задержек принятый эхо-сигнал коррелируется с синтезированным модельным эхо-сигналом, в результате чего формируются  $N$  временных рядов, каждый из которых соответствует своей

временной задержке. Применяя к этим рядам преобразование Фурье, вычисляем частоту и мощность соответствующих компонентов эхо-сигнала. Таким образом, в системе координат “частота — временная задержка эхо-сигнала” формируется так называемое радиолокационное изображение, интенсивность которого соответствует мощности принятого эхо-сигнала. Вдоль оси временной задержки полученное радиолокационное изображение будет охватывать область пространства размером  $\Delta R = cPRP/2$  с разрешением  $\Delta r_\tau = c\tau/(2\sin \varphi)$ , где  $c$  — скорость света, а  $\varphi$  — угол между направлением сигнала на освещаемую цель и нормалью к поверхности в этой точке (угол падения). Протяженность такого изображения по оси частот будет ограничена PRF, с частотным разрешением  $\Delta f$ , обратно пропорциональным времени интегрального накопления эхо-сигнала, которое преобразуется в расстояние следующим образом:

$$\Delta r_f = \frac{D}{B} \Delta f.$$

Время интегрирования выбирается таким образом, чтобы  $\Delta r_f \approx \Delta r_\tau$ . При этом, чтобы избежать размытия радиолокационного изображения на длительных временах интегрирования, применяется метод фокусировки, позволяющий компенсировать изменение задержки и доплеровского смещения частоты эхо-сигнала

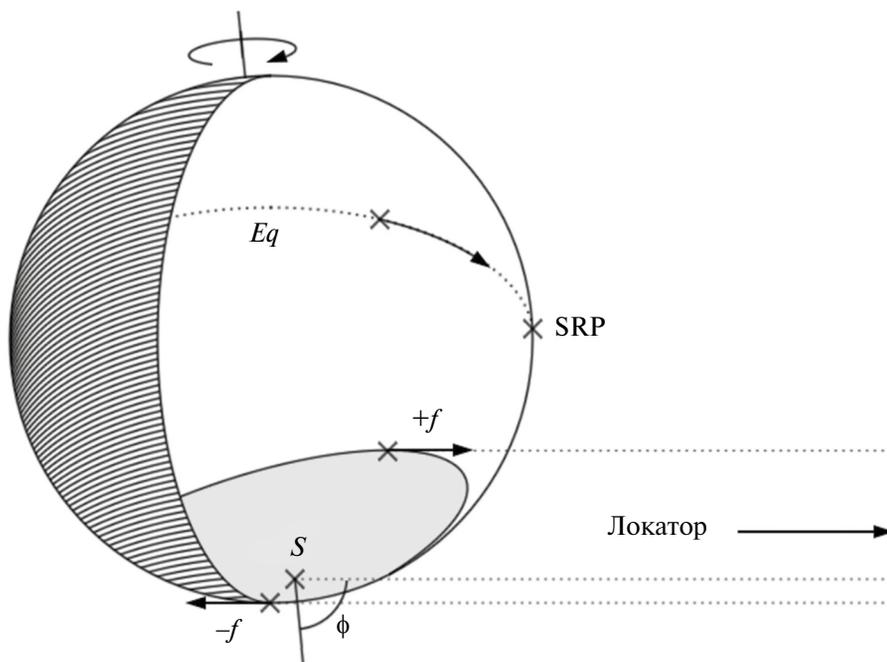


Рис. 1. Схема радиолокационных наблюдений южного полюса Луны.

в выбранной точке поверхности Луны в соответствии с эфемеридными данными (Campbell и др., 2007). Таким образом, пространственное разрешение доплеровского радиолокационного изображения ограничивается в основном фазовой стабильностью передающей и приемной систем и возможностями цифровой обработки данных.

Описанный выше метод получения радиолокационных изображений имеет ряд ограничений, накладываемых на выбор освещаемой области на поверхности Луны и параметры модуляции излучаемого сигнала. У вращающегося сферического тела имеются пары точек к северу и к югу от доплеровского экватора с одинаковыми расстояниями и лучевыми скоростями относительно приемника. В случае, если такие точки одновременно попадают в главный лепесток диаграммы направленности, то возникнет так называемая неоднозначность “север–юг”, приводящая к суммированию на радиолокационном изображении мощностей компонентов эхо-сигнала с одинаковыми значениями задержки и доплеровской частоты. Проблемы неоднозначности “север–юг” можно избежать путем выбора координат цели севернее или южнее доплеровского экватора Луны с учетом размеров наименьшего главного лепестка. К тому же параметры модуляции должны выбираться так, чтобы радиолокационное изображение охватывало всю освещенную область на поверхности Луны, как по задержке, так и по частоте. Т.е. необходимо выполнить два условия:  $\Delta R > D$  и  $PRF > B$ . Это позволит избежать наложений компонентов эхо-сигнала по задержке и частоте на радиоизображении.

Как правило, передающая антенная система облучает цель на поверхности Луны сигналом с одним заданным направлением круговой поляризации. При этом отраженный от поверхности Луны сигнал будет поляризован в обоих направлениях. Большая часть мощности эхо-сигнала будет иметь поляризацию, противоположную излученной, поскольку после отражения от гладких, обращенных к радару участков поверхности с размерами, сопоставимыми с длиной волны излучения, направление круговой поляризации сигнала меняется на противоположное. Однако часть мощности эхо-сигнала принимается в поляризации, совпадающей с излученной, вследствие многократных отражений и диффузного рассеяния на шероховатых поверхностях. Эти составляющие эхо-сигнала принято называть зеркальным и диффузным поляризационными компонентами, соответственно, а отношение

мощностей диффузного компонента к зеркальному (CPR – Circular Polarization Ratio) является мерой шероховатости, количества камней и состава материалов. Малые значения CPR свидетельствуют о гладких на масштабах длины волны поверхностях, в то время как значения, большие единицы, относятся к поверхностям с сильным диффузным рассеянием, таким как, например, каменные выбросы молодых ударных кратеров или покрытые трещинами застывшие лавовые потоки (Campbell, 2012). Кроме того, аномально высокие значения CPR наблюдаются в Солнечной системе у низкотемпературных льдов, например, обнаруженных в постоянно затененных приполярных областях Меркурия (Slade и др., 1992; Harmon и др., 1994). Эти свойства связаны с малым поглощением радиолокационного сигнала водяным льдом и его когерентным обратным рассеянием (Harpe, 1990). Таким образом, для получения информации о физических характеристиках исследуемой области необходимо, чтобы приемная антенная система регистрировала отраженный от поверхности Луны сигнал в обеих круговых поляризациях.

Также, важно понимать, что рассеяние радиолокационного сигнала происходит не только на поверхности реголита, но и в его толще на границах материалов с разными диэлектрическими свойствами, таких как камни, пустоты или коренные породы с размерами, сопоставимыми с длиной волны излучения. Глубина проникновения радиолокационных сигналов зависит от тангенса угла потерь и диэлектрической проницаемости реголита, а также от длины волны излучения радара (Carrig и др., 1991). Радиолокационные сигналы сантиметрового диапазона длин волн позволяют зондировать реголит на глубину от 40 см до 4 м, рассеиваясь на структурах сантиметрового масштаба, в то время как более длинноволновые сигналы проникают на десятки метров, достигая коренных пород (Campbell и др., 1997)

## РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ, ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Наземные радиолокационные наблюдения южного полюса Луны проводились 26 мая 2023 г. с 11:20 до 11:30 UT с использованием 64-метровой антенны ТНА-1500 Центра космической связи ОКБ МЭИ Медвежьих озера (Жуков и др., 2023) и 13.2-метрового радиотелескопа РТ-13 Обсерватории Светлое ИПА РАН (Shuygina и др., 2019). Антенна ТНА-1500 облучала поверхность

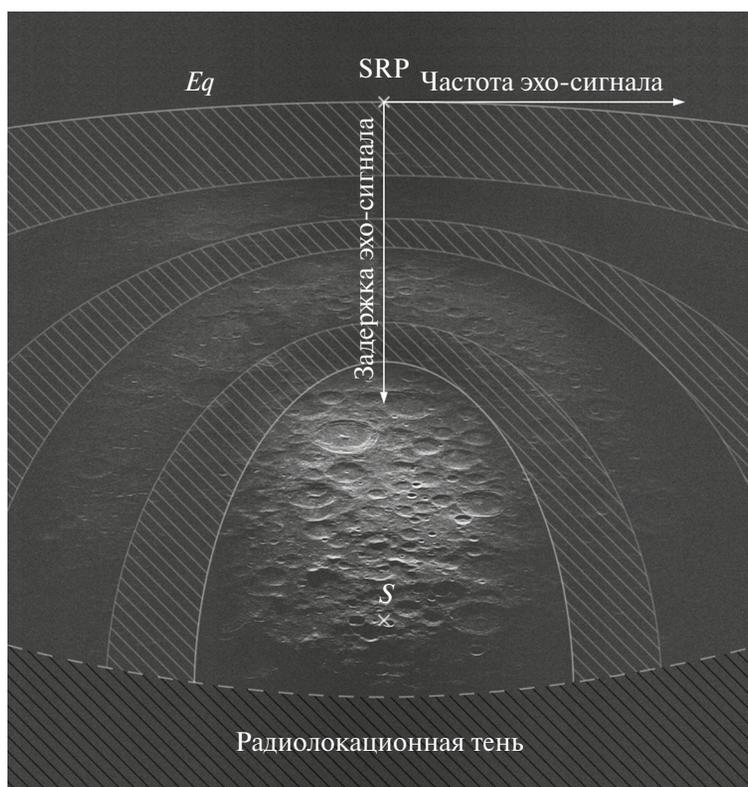
Луны модулированным сигналом на длине волны 4.2 см (7190 МГц) мощностью 1.5 кВт в левой круговой поляризации, а находящийся от нее на расстоянии 700 км радиотелескоп РТ-13 принимал отраженные эхо-сигналы. При этом угол падения сигнала излучателя  $\varphi$  в южном полюсе был равен  $84.1^\circ$ , а размер облучаемой области на поверхности Луны составил порядка  $500 \times 1000$  км. Для данной бистатической конфигурации эта область определялась проекцией главного лепестка диаграммы направленности 64-метровой антенны на южный полюс Луны. На выбранном интервале наблюдений южный полюс Луны был максимально повернут к Земле, что позволило осветить большую часть постоянно затененных областей.

Излучаемый сигнал модулировался двоичной фазовой манипуляцией в соответствии с повторяющейся псевдослучайной последовательностью длиной 32767 элементов с периодом повторения 16.3835 мс и занимал полосу частот, равную 4 МГц. Для выбранных параметров модуляции радиолокационное изображение охватывало область пространства размером 2500 км с разрешением около 75 м по задержке. Соответствующее разрешение по оси доплеровских

частот было достигнуто когерентным интегрированием эхо-сигнала в течение 250 с. Передающие и приемные системы были синхронизированы с водородными стандартами времени и частоты для обеспечения когерентности при столь длительном интервале интегрирования.

Для гарантированной регистрации всей полосы модуляции отраженный от Луны сигнал принимался радиотелескопом РТ-13 в диапазоне частот от 7186 до 7194 МГц (Evstigneev и др., 2020). При этом использовались два канала приемника с левой и правой круговыми поляризациями, в которых проводились измерения шумовой температуры в течение всего интервала наблюдений для надежной оценки значений СРР эхо-сигнала. Сигналы обоих каналов оцифровывались системой преобразования (Nosov и др., 2021) в полосе 8 МГц с 2-битным квантованием по амплитуде и сохранялись на сервере.

В соответствии с описанной в предыдущем разделе методикой было получено радиолокационное изображение южного полярного района Луны, которое представлено на рис. 2 в системе координат “частота – временная



**Рис. 2.** Радиолокационное изображение зеркального компонента южного полярного района Луны на длине волны 4.2 см.

задержка эхо-сигнала”. Размеры изображения составляют порядка 12 мс по задержке и около 20 Гц по частоте. На этом рисунке белыми линиями отмечены контуры проекций главного лепестка диаграммы направленности антенны ТНА-1500 с центром в южном полюсе  $S$ , а также боковых лепестков на поверхности Луны. Нули диаграммы направленности и область радиолокационной тени отмечены штриховкой, а радиолокационный терминатор – пунктирной линией. Подрадарная точка SRP, расположенная на доплеровском экваторе  $Eq$ , имеет наименьшую величину задержки эхо-сигнала, которая увеличивается вдоль оси ординат, а частота эхо-сигнала изменяется вдоль оси абсцисс.

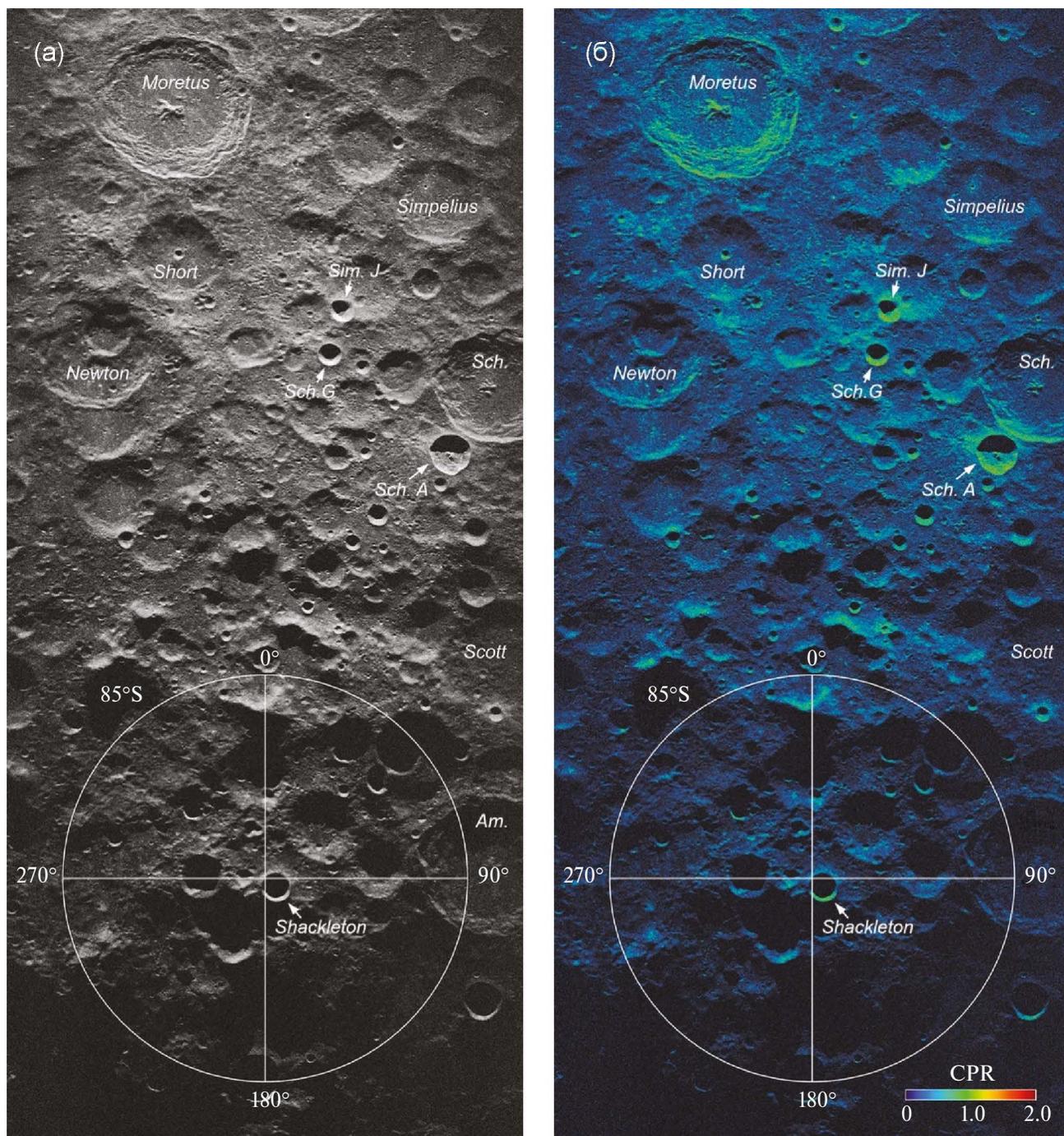
Данное радиолокационное изображение, однако, не привязано к селенографической системе координат, что затрудняет его практическое использование. Временную задержку и частоту эхо-сигнала можно преобразовать к селенографической широте и долготе, используя, например, линейную интерполяцию по известным узловым значениям, вычисленным по эфемеридным данным на средний момент наблюдений (Павлов и др., 2023). Полученная таким образом радиолокационная карта зеркального компонента эхо-сигнала представлена на рис. 3а. Значения CPR для соответствующих селенографических координат были вычислены как отношение мощностей диффузного компонента к зеркальному и наложены на радиолокационную карту цветом в диапазоне от 0 до 2, причем нулевым значениям соответствуют области, находящиеся в радиолокационной тени, а для областей с экстремально сильным диффузным рассеянием значения доходят до 1.8. Эти значения были наложены на радиолокационную карту зеркального компонента эхо-сигнала (рис. 3б). Карты представлены в ортографической проекции с центром в южном полюсе Луны и охватывают южный полярный район видимой стороны Луны размером  $400 \times 800$  км вдоль нулевого меридиана до 68-й параллели южной широты с пространственным разрешением около 75 м на пиксель.

Анализируя полученные изображения, можно отметить, что в районе южного полюса преобладает высокогорный рельеф, сформированный крупными ударными кратерами. Гладкие и ровные поверхности встречаются в основном на дне старых кратеров, таких как Морет, Симпелий, Ньютон и Амундсен. Отбрасываемые рельефом радиолокационные

тени становятся длиннее к югу, по мере увеличения угла падения сигнала от  $62.5^\circ$  до  $84.1^\circ$ . Большинство областей, имеющих высокие значения CPR, можно отнести к повернутым в сторону приемника поверхностям гор, а также внутренним и внешним стенам некоторых кратеров, таких как Симпелий J, Шомбергер A и G. Кроме того, высокие относительно окружающей местности значения CPR обнаруживаются в окрестностях небольших молодых ударных кратеров, что связано с обилием камней с размерами более 1 см, разбросанных по поверхности и находящихся в реголите на глубине до 1 м.

На рис. 4 и 5 представлены более детальные радиолокационные карты зеркального компонента и наложенных на него значений CPR эхо-сигнала для центральной части южного полярного района Луны, соответственно. На картах отмечены основные полярные кратеры, и белыми линиями обозначены границы наиболее крупных постоянно затененных областей, полученные (Mazarico и др., 2011) по данным лазерного альтиметра LOLA (Lunar Orbiter Laser Altimeter), установленного на борту КА LRO. Из рисунков видно, что постоянно затененные области расположены в основном на дне приполярных кратеров и котловин, стены которых блокируют солнечный свет. Несмотря на то, что часть этих областей находится в радиолокационной тени, около 39% площади остается доступной для наземных радиолокационных наблюдений, позволяя провести их детальное изучение. Например, можно обнаружить относительно ровные поверхности на дне кратеров Хаурт, Шумейкер, Фаустини и Слейтер, а также крутые склоны внутренних стен кратеров Шеклтон, Де Герлах и Свердруп, не позволяющие радиолокационному сигналу достигнуть их дна.

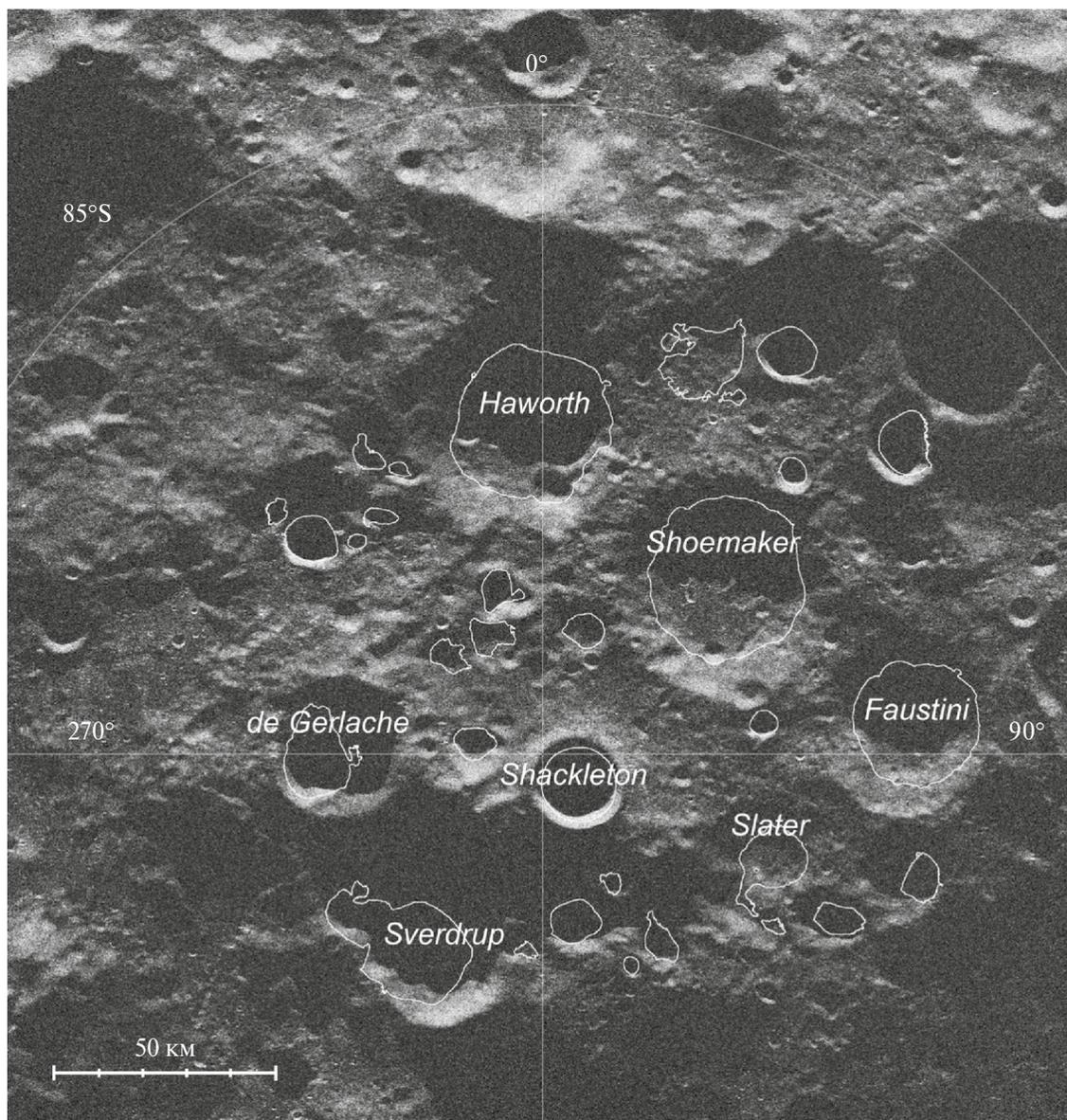
На рис. 5 в обозначенных белыми линиями границах не наблюдается больших, протяженных участков с высокими значениями CPR, характерными для льда. Небольшие участки с наибольшими значениями CPR расположены на обращенных к приемнику поверхностях внутренних стен крупных полярных кратеров – Шеклтон, Де Герлах и Свердруп (см. 1–3 на рис. 5), а также на краях и в окрестностях мелких ударных кратеров (см. 4–6). Средние значения CPR от 0.1 до 0.5 соответствуют гладким поверхностям (см. 7–9). Однако следует отметить, что похожее распределение значений CPR наблюдается и за пределами постоянно затененных областей (см. 10–12).



**Рис. 3.** Радиолокационная карта зеркального компонента эхо-сигнала (а) и карта значений CPR наложенных на зеркальный компонент (б) южного полярного района видимой стороны Луны размером  $400 \times 800$  км вдоль нулевого меридиана до 68-й параллели южной широты. Обозначения кратеров: Moretus (Морет), Sipelius, Sim. J (Симпелий, -J), Short (Шорт), Newton (Ньютон), Schomberger, Sch. A, Sch. G (Шомбергер, -A, -G), Scott (Скотт), Amundsen, Am. (Амундсен) и Shackleton (Шеклтон).

Стоит отдельно рассмотреть кратер Шеклтон, почти целиком находящийся в постоянной тени. Небольшая часть его внутренней стенки,

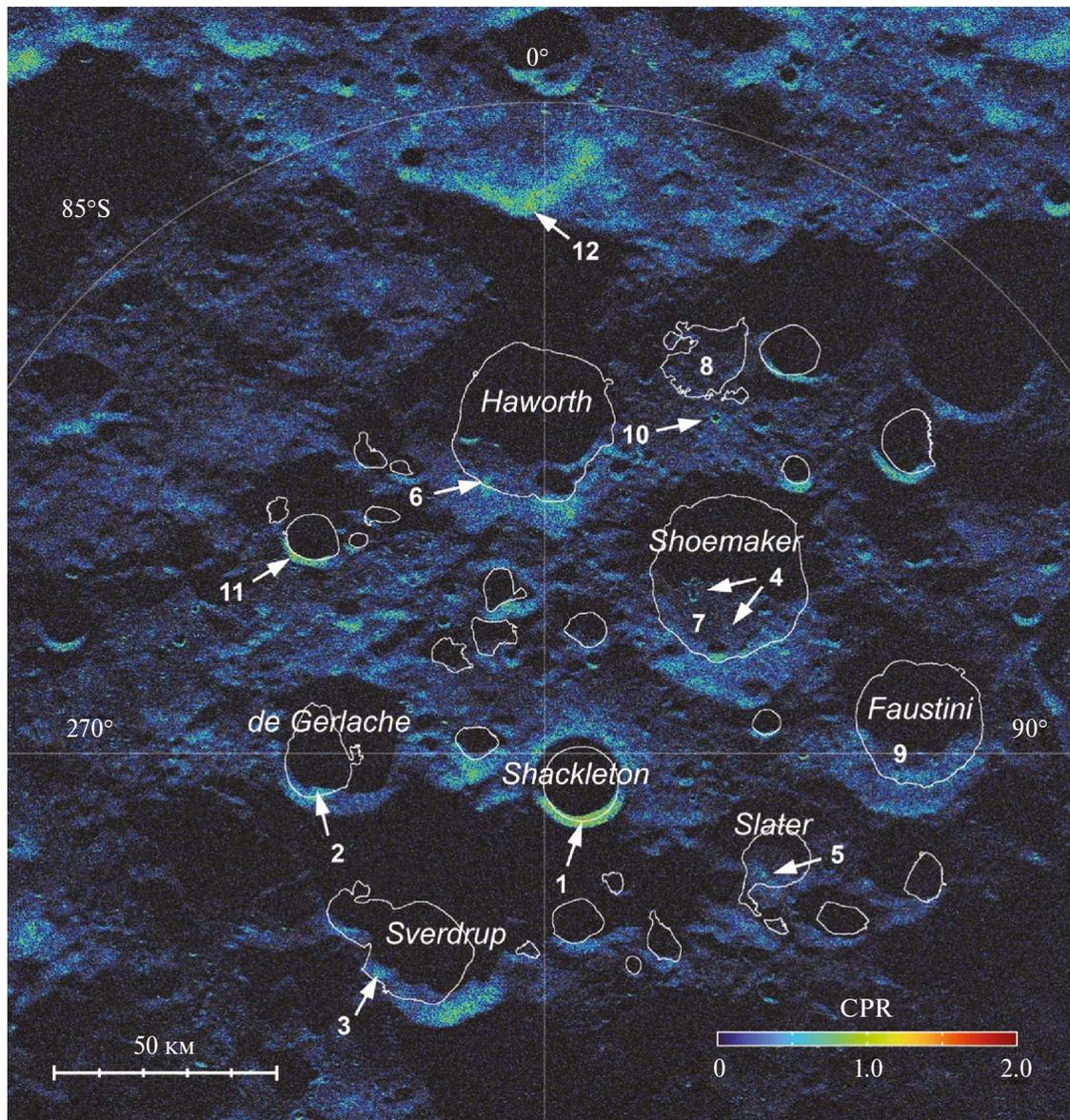
доступная для наземных радиолокационных наблюдений, местами имеет высокие значения CPR, достигающие до 1.8 (см. 1 на рис. 5). Это



**Рис. 4.** Радиолокационная карта зеркального компонента эхо-сигнала центральной части южного полярного района Луны. Белыми линиями обозначены границы наиболее крупных постоянно затененных областей. Обозначения кратеров: Haworth (Хауорт), Shoemaker (Шумейкер), Faustini (Фаустини), de Gerlache (Де Герлах), Shackleton (Шеклтон), Slater (Слейтер) и Sverdrup (Свердруп).

обстоятельство могло бы свидетельствовать о наличии там водяного льда, однако близкие по величине и распределению значения CPR наблюдаются на склонах и других, находящихся вдали от южного полюса кратеров, таких как Симпелий J, Шомбергер A и G (см. рис. 6). Несмотря на то, что высокие значения CPR на видимой внутренней стенке этого кратера распределены неоднородно, на рис. 5 не наблюдается какого-либо резкого изменения CPR в месте перехода

от периодически освещаемой Солнцем области к постоянно затененной. Поэтому, скорее всего, причиной таких высоких значений CPR является неровная каменная поверхность внутренней стенки кратера Шеклтон. Здесь следует отметить, что предыдущие наземные (Campbell и др., 2006) и орбитальные (Thomson и др., 2012) радиолокационные исследования этого кратера также не подтвердили наличия в нем крупномасштабных отложений водяного льда.



**Рис. 5.** Карта значений CPR, наложенных на зеркальный компонент эхо-сигнала центральной части южного полярного района Луны. Белыми линиями обозначены границы наиболее крупных, постоянно затененных областей. Обозначения кратеров: Haworth (Хауорт), Shoemaker (Шумейкер), Faustini (Фаустини), de Gerlache (Де Герлах), Shackleton (Шеклтон), Slater (Слейтер) и Sverdrup (Свердруп).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены новые детальные радиолокационные карты и поляризметрические данные, охватывающие южный полярный район видимой стороны Луны размером  $400 \times 800$  км вдоль нулевого меридиана до 68-й параллели южной широты с пространственным разрешением около 75 м. На картах видны 39% площади постоянно затененных областей, недоступных

для наблюдений оптическими наземными средствами, в которых могут скрываться залежи водяного льда. Проведенный анализ радиолокационных карт не выявил связи между поляризационными свойствами поверхности в этих областях и наличием солнечного освещения. Наблюдаемые высокие значения CPR в постоянно затененных областях, скорее всего, связаны не с водяным льдом, а обусловлены неровными крутыми внутренними склонами

крупных полярных кратеров и выбросами в окрестностях молодых ударных кратеров. Однако данное утверждение применимо лишь к крупномасштабным поверхностным отложениям чистого водяного льда, и не исключает его присутствия в мелкодисперсном состоянии в приповерхностных слоях реголита, или на глубинах, превышающих проникновение радиолокационного сигнала на длине волны 4.2 см, что будет являться вопросом дальнейших исследований. Полученные в результате работы данные могут быть использованы для изучения особенностей поверхности и приповерхностного слоя реголита южного полярного района Луны, включая поиск ледяных отложений в постоянно затененных областях, а также для планирования будущих лунных миссий.

Авторы выражают благодарность техническому персоналу Центра космической связи ОКБ МЭИ Медвежьи озера и Обсерватории Светлое ИПА РАН за помощь в организации и проведении радиолокационных наблюдений Луны.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-22-00254).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков А.О., Иванов К.А., Бондарева М.К., Горовой Д.С. Наземный комплекс управления космическими аппаратами дальнего космоса // Сибирский аэрокосмич. журн. 2023. Т. 24. № 1. С. 99–108.
2. Маршалов Д.А., Бондаренко Ю.С., Медведев Ю.Д., Вавилов Д.Е., Зотов М.Б., Михайлов А.Г. Комплекс средств для проведения радиолокационных наблюдений объектов, сближающихся с Землей // Приборы и техника эксперимента. 2018. Т. 4. С. 111–116.
3. Митрофанов И.Г., Зеленый Л.М., Третьяков В.И., Калашников Д.В. Луна-25: первая полярная миссия на Луну // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 6. С. 497–508. (Mitrofanov I.G., Zelenyi L.M., Tretyakov V.I., Kalashnikov D.V. Luna-25: The first polar mission to the Moon // Sol. Syst. Res. 2021. V. 55. № 6. P. 485–495.)
4. Павлов С.Р., Бондаренко Ю.С., Маршалов Д.А. Методика радиолокационного картирования Луны // Тр. ИПА РАН. 2023. Вып. 67. С. 3–7.
5. Bondarenko Yu.S., Marshalov D.A., Makarchuk S. Radar images of the Moon at 4.2-cm wavelength // LPI Contrib. 2022. № 2678. id. 2131.
6. Campbell B.A., Hawke B.R., Thompson T.W. Regolith composition and structure in the lunar maria: Results of long-wavelength radar studies // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № E8. P. 19307–19320.
7. Campbell D.B., Campbell B.A., Carter L.M., Margot J.-L., Stacy N.J.S. No evidence for thick deposits of ice at the lunar south pole // Nature. 2006. V. 443. № 7113. P. 835–837.
8. Campbell B.A., Campbell D.B., Margot J.L., Ghent R.R., Nolan M., Chandler J., Carter L.M., Stacy N.J.S. Focused 70-cm wavelength radar mapping of the Moon // IEEE Trans. 2007. V. 45. № 12. P. 4032–4042.
9. Campbell B.A. High circular polarization ratios in radar scattering from geologic targets // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. id. E06008.
10. Carrier W.D., Olhoeft G.R., Mendell W. Physical Properties of the Lunar Surface. Lunar Sourcebook. A User's Guide to the Moon. Cambridge Univ. Press, 1991. P. 475–594.
11. Colaprete A., Schultz P., Heldmann J., Wooden D., Shirley M., Ennico K., Hermalyn B., Marshall W., Ricco A., Elphic R.C., Goldstein D., Summy D., Bart G.D., Asphaug E., Korycansky D., Landis D., Sollitt L. Detection of water in the LCROSS ejecta plume // Science. 2010. V. 330. № 6003. P. 463–468.
12. Evstigneev A.A., Chernov V.K., Evstigneeva O.E., Ipatova I.A., Khvostov E.Yu., Lavrov A.P., Pozdnyakov I.A., Vekshin Yu.V., Zotov M.B. RT-13 VLBI receivers // Trans. IAA RAS. 2020. V. 55. P. 36–40.
13. Hapke B. Coherent backscatter and the radar characteristics of outer planet satellites // Icarus. 1990. V. 88. № 2. P. 407–417.
14. Harmon J.K., Slade M.A., Vélez R.A., Crespo A., Dryer M.J., Johnson J.M. Radar mapping of Mercury's polar anomalies // Nature. 1994. V. 369. № 6477. P. 213–215.
15. Margot J.L., Campbell D.B., Jurgens R.F., Slade M.A. Topography of the lunar poles from radar interferometry: A survey of cold trap locations // Science. 1999. V. 284. № 5420. P. 1658–1660.
16. 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. № 2. P. 1066–1081.
17. Neish C.D., Bussey D.B.J., Spudis P., Marshall W., Thomson B.J., Patterson G.W., Carter L.M. The nature of lunar volatiles as revealed by Mini-RF observations of the LCROSS impact site // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. № E1. E01005.
18. Nosov E., Marshalov D., Fedotov L., Sheynman Y. Multifunctional digital backend for quasar VLBI network // J. Instrumentation. 2021. V. 16. id. P05003.
19. Nozette S., Lichtenberg C.L., Spudis P., Bonner R., Ort W., Malaret E., Robinson M., Shoemaker E.M.

- The Clementine bistatic radar experiment // Science. 1996. V. 274. № 5292. P. 1495–1498.
20. *Patterson G.W., Stickle A.M., Turner F.S., Jensen J.R., Bussey D.B.J., Spudis P., Espiritu R.C., Schulze R.C., Yocky D.A., Wahl D.E., and 12 co-authors.* Bistatic radar observations of the Moon using Mini-RF on LRO and the Arecibo observatory // *Icarus*. 2017. V. 283. P. 2–19.
21. *Simpson R.A., Tyler G.L.* Reanalysis of Clementine bistatic radar data from the lunar South Pole // *J. Geophys. Res.* 1999. V.104. № E2. P. 3845–3862.
22. *Slade M.A., Butler B.J., Muhleman D.O.* Mercury radar imaging: Evidence for polar ice // *Science*. 1992. V. 258. № 5082. P. 635–640.
23. *Schultz P.H., Hermalyn B., Colaprete A., Ennico K., Shirley M., Marshall W.S.* The LCROSS cratering experiment // *Science*. 2010. V. 330. № 6003. P. 468–472.
24. *Shuygina N., Ivanov D., Ipatov A., Gayazov I., Marshalov D., Melnikov A., Kurdubov S., Vasilyev M., Ilin G., Skurikhina E., and 8 co-authors.* Russian VLBI network “Quasar”: Current status and outlook // *Geod. Geodyn.* 2019. V. 10. № 2. P. 150–156.
25. *Stacy N.J.S., Campbell D.B., Ford P.G.* Arecibo radar mapping of the lunar poles: A search for ice deposits // *Science*. 1997. V. 276. № 5318. P. 1527–1530.
26. *Thomson B.J., Bussey D.B.J., Neish C.D., Cahill J.T.S., Heggy E., Kirk R.L., Patterson G.W., Raney R.K., Spudis P.D., Thompson T.W., Ustinov E.A.* An upper limit for ice in Shackleton crater as revealed by LRO Mini-RF orbital radar // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. id. L14201.