

УДК 520.6; 523.3

СОДЕРЖАНИЕ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ВОДЯНОГО ЛЬДА В КРАТЕРЕ КАБЕО ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИБОРА LEND НА БОРТУ ОРБИТАЛЬНОЙ МИССИИ NASA LRO

© 2024 г. М. Л. Литвак^{a,*}, И. Г. Митрофанов^a, А. Б. Санин^a, М. В. Дьячкова^a

^a Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

*e-mail: litvak@mx.iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 16.02.2024 г.

После доработки 25.03.2024 г.

Принята к публикации 03.04.2024 г.

В статье представлены результаты анализа данных российского нейтронного спектрометра LEND (Lunar Exploration Neutron Detector), установленного на борту лунного орбитального аппарата NASA LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter). Получена оценка содержания подповерхностного водяного льда в вечно затененной области Кабео-1, расположенной внутри большого кратера Кабео в окрестности южного полюса Луны. В анализе были использованы наблюдения, выполненные с прибором LEND за период с 2009 по 2023 г. Показано, что нейтронное альbedo поверхности в окрестности и внутри Кабео-1 коррелирует с высотой рельефа и распределением среднегодовых температур. Среднее содержание подповерхностного водяного льда по всей области Кабео-1 было оценено как $0.49 \pm 0.05\%$ по массовой доле. Максимальное значение около 0.7% наблюдается на самом дне кратера на участке поверхности, где зафиксирована минимальная среднегодовая температура. Этот участок совпадает с местом проведения ударного эксперимента LCROSS (Lunar Crater Observation and Sensing Satellite), в рамках которого было подтверждено значительное количество водяного льда в приповерхностном веществе Луны.

Ключевые слова: Луна, кратер Кабео, LEND, нейтроны, водяной лед

DOI: 10.31857/S0320930X24060013, EDN: NGQFNC

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время к исследованию лунных полярных областей привлечено достаточно большое внимание. С помощью орбитальных наблюдений там были обнаружены локальные участки, где может залежать подповерхностный водяной лед, а сам район вокруг южного полюса сейчас рассматривается как потенциальное место для создания постоянно действующих лунных баз.

Еще в работах Watson и др. (1961) и Arnold (1979) была предложена и рассмотрена гипотеза, в соответствии с которой водяной лед и другие летучие вещества могут захватываться и сохраняться длительное время в холодных ловушках,

расположенных на дне полярных вечно затененных кратеров, где температура вещества поверхности всего на несколько десятков градусов выше абсолютного нуля.

Первое экспериментальное указание, что в полярных областях может находиться водяной лед, было получено по данным бистатического радара на борту миссии NASA Clementine (Nozette и др., 1996). Впоследствии полученный результат был признан неоднозначным и не подтвердился по данным наземных радарных наблюдений обсерватории Аперсibo (Stacy и др., 1997).

В 1998 г. к Луне был запущен орбитальный КА Lunar Prospector (Binder, 1998), на борту которого был установлен нейтронный спектрометр LPNS

(Lunar Prospector Neutron Spectrometer). Он обнаружил значимое уменьшение потока эпитепловых нейтронов с поверхности Луны вблизи обоих лунных полюсов, что было интерпретировано как свидетельство присутствия в веществе поверхности водяного льда (Feldman и др., 1998). Предложенный метод наблюдений был основан на том, что входящий в состав воды водород является хорошим замедлителем вторичных нейтронов, образующихся при бомбардировке поверхности Луны заряженными частицами галактических космических лучей (ГКЛ) (см., например, Drake и др., 1988; Masarik, Reedy, 1996). Было высказано предположение, что обнаруженный водород в составе молекул воды может концентрироваться внутри постоянно затененных кратеров (Feldman и др., 2001). Полностью подтвердить это предположение, основываясь только на данных LPNS, было невозможно, так как пространственное разрешение этого прибора составляло порядка 45 км (Maurice и др., 2004), что больше, чем размер большинства постоянно затененных кратеров.

Существенное продвижение в вопросе локализации водяного льда в полярных областях Луны произошло после запуска в 2009 г. еще одного орбитального аппарата NASA LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter), на котором было установлено сразу несколько научных приборов, предназначенных для поиска водяного льда. Одним из таких приборов был коллимированный нейтронный спектрометр LEND, разработанный в ИКИ РАН (Mitrofanov и др., 2010a; 2010b). За счет массивного коллиматора LEND обладает узким полем зрения и способен регистрировать нейтронное излучение от объектов на поверхности Луны с пространственным разрешением до 10 км с орбиты с высотой около 50 км (Mitrofanov и др., 2010a). Это позволило провести глобальное картографирование потока нейтронов, и подтвердить, что только в некоторых вечно затененных кратерах зафиксировано высокое содержание водорода, которое может быть интерпретировано как присутствие водяного льда (Mitrofanov и др., 2010b; Sanin и др., 2012). Неожиданностью оказалось, что не все, даже крупные, вечно затененные области содержат водяной лед, и что подповерхностный лед присутствует и под регулярно освещаемой поверхностью, будучи погребенным под верхним сухим слоем реголита (Mitrofanov и др., 2012; Boynton и др., 2012). Полученные данные были использованы для создания карты распределения подповерхностного водяного льда в полярных районах Луны (Sanin и др.,

2017). Самое большое понижение нейтронного потока и, соответственно, наиболее количество водяного льда было обнаружено при пролетах LRO над вечно затененной областью Кабео-1, расположенной внутри одноименного большого кратера. Поэтому, на основании данных прибора LEND, область Кабео-1 была выбрана в качестве цели для эксперимента LCROSS (Lunar Crater Observation and Sensing Satellite), который проводился параллельно с LRO (Mitrofanov и др., 2010b; Colaprete и др., 2010). В ходе этого эксперимента разгонный блок Centaur был специально перенаправлен с лунной орбиты для удара по поверхности вечно затененной области Кабео-1 (Colaprete и др., 2010). В поднятом в результате взрыва облаке пыли орбитальными спектрометрами были обнаружены пары различных летучих веществ, в том числе и воды. Проведенные оценки показали, что содержание водяного льда в лунном веществе может составлять $5.6 \pm 2.9\%$ в слое вещества с глубиной более метра (Colaprete и др., 2010). Это соответствует измерениям прибора LEND, если предположить, что водяной лед распределен неоднородно с глубиной, а его большая часть залегает на глубине нескольких десятков сантиметров (Mitrofanov и др., 2010b; Sanin и др., 2017).

Картографирование лунной поверхности с использованием данных других приборов, установленных на борту космического аппарата LRO, также позволило получить новую информацию о постоянно затененных областях. Был составлен их полный каталог по данным лазерной альтиметрии (эксперимент Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA), Mazarico и др., 2011); оценена температура поверхности и смоделировано, на какой глубине мог сохраниться водяной лед (эксперимент Diviner (Paige и др., 2010)); измерено отражение поверхности в УФ-диапазоне (эксперимент Lyman Alpha Mapping Project (LAMP), Gladstone и др., 2012; Hayne и др., 2015; Magaña и др., 2022) и обнаружен поверхностный слой замерзшей воды на поверхности некоторых вечно затененных областей (эксперимент LAMP, Hayne и др., 2015; Magaña и др., 2022).

В этой работе мы продолжили анализ данных прибора LEND, полученных за период с сентября 2009 г. по май 2023 г. Основное внимание было уделено наблюдениям области Кабео-1, так как именно здесь было исходно зарегистрировано самое большое ослабление нейтронного потока, указывающее на существенное содержание подповерхностного льда (Mitrofanov и др., 2010b; Sanin и др., 2017).

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА LEND

Эксперимент LEND был предложен российскими учеными совместно с американскими коллегами и успешно прошел жесткий конкурсный отбор в NASA при выборе научной аппаратуры для миссии LRO. Прибор LEND был разработан в ИКИ РАН по заказу Российского космического агентства (Роскосмос) в соответствии с межагентским соглашением между NASA и Роскосмос.

LEND представляет собой нейтронный спектрометр, состоящий из девяти различных нейтронных детекторов, позволяющих регистрировать нейтронный поток от лунной поверхности в диапазоне энергий от тепловых нейтронов (доли эВ) до быстрых нейтронов (энергия до 10 МэВ) (см. Mitrofanov и др., 2010a).

Четыре детектора (CSETN1-4) установлены внутри массивного композитного коллиматора, который изготовлен из слоев полиэтилена и порошка ^{10}B . Полиэтилен замедляет быстрые и эпитепловые нейтроны до тепловых энергий, а ^{10}B имеет очень большое сечение поглощения тепловых нейтронов. Применение коллиматора позволяет обеспечить регистрацию потока эпитепловых нейтронов (0.4–500 эВ) в узком поле зрения, которое формируется как за счет нейтронов, прошедших непосредственно в раствор коллиматора (угол в 4° от направления в надир), так и нейтронов, частично затененных коллиматором (диапазон углов 4° – 14° от направления в надир). В этом случае часть нейтронов попадает в раствор коллиматора, а часть затеняется коллиматором (Litvak и др., 2016). На поверхности Луны, при наблюдении с высоты 50 км (средняя высота пролета орбитального аппарата над южным полярным районом) это соответствует пятну с характерным размером 10 км, что позволяет отождествить крупные, постоянно затененные кратеры на полюсах Луны. Поэтому эти детекторы используются для построения карт нейтронного альbedo полярных областей с высоким пространственным разрешением (Litvak и др., 2012a).

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Космическая станция LRO работает на орбите Луны, начиная с 2009 г., при этом условия наблюдения ею полярных областей постепенно ухудшаются. Поле двух лет работы

на околополярной круговой орбите с высотой 50 км в целях экономии топлива и максимального продления времени наблюдений, КА был переведен на эллиптическую орбиту с перигентром в окрестности южного полюса. Со временем орбита перестала быть полярной, в результате чего для наблюдений были потеряны такие крупные полярные кратеры как Шумейкер (в 2015 г.), Хаурт (в 2015 г.) и Фаустини (в 2018 г.).

Данные прибора LEND, как и все данные, полученные научной аппаратурой на борту КА LRO, хранятся в общедоступной базе NASA Planetary Data System (PDS) (см. <https://pds-geosciences.wustl.edu/missions/lro/lend.htm>). На сайте PDS представлено краткое описание форматов данных и методов их первичной обработки. Более детально процедуры обработки данных прибора LEND описаны в (Litvak и др., 2012b; 2016; Boynton и др., 2012) и включают: 1) селективный отбор “благоприятных” временных интервалов, когда не было солнечных событий, а коллиматор прибора LEND был ориентирован в надир; 2) учет “прогрева” детекторов после включения питания (постепенный выход эффективности регистрации нейтронных отсчетов в детекторе на плато); 3) учет короткопериодических и долгопериодических (11-летний солнечный цикл) вариаций потока ГКЛ; 4) оценку погрешностей и 5) оценку фона космического аппарата, который ГКЛ производит в веществе КА.

Для настоящего анализа использовался преобразованный временной профиль (с разрешением 1 с) суммарного скорректированного темпа счета (с применением вышеуказанных процедур) в коллимированных детекторах CSETN1-4 за период с 16 сентября 2009 г. (официальное начало научной миссии LRO) по 1 мая 2023 г. Это в два раза больше, чем временной интервал, использованный в работе (Sanin и др., 2017) при анализе вариаций нейтронного потока и распределения подповерхностного водяного льда в полярных областях Луны. Существенное увеличение объема наблюдательных данных позволяет получить оценки нейтронного потока на более высоком уровне достоверности и обновить оценки содержания подповерхностного водяного льда в вечно затененных полярных областях.

Временной профиль темпа счета в коллимированных детекторах был распределен по поверхности южной полярной области в соответствии с процедурой, описанной в (Litvak и др., 2012b).

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Кратер Кабео находится на видимой стороне Луны недалеко от южного полюса. Его центр лежит в окрестности 85° ю.ш., диаметр кратера составляет примерно 100 км, а максимальная глубина достигает почти 6 км. По данным лазерного альтиметра LOLA, входящего в состав научной аппаратуры миссии LRO, было установлено, что на дне кратера находятся несколько вечно затененных областей (Mazarico и др., 2011). Самая большая вечно затененная область Кабео-1 покрывает площадь в 267.5 км^2 и имеет характерный размер $\sim 18 \text{ км}$. Именно в этой области был проведен эксперимент LCROSS, в точке с координатами $84^\circ.675$ ю.ш. и $48^\circ.725$ з.д.

Благодаря тому, что вечно затененная область Кабео-1 находится на удалении 100 км от южного полюса, эволюция орбиты КА LRO не повлияла на условия ее наблюдения. Объединив вместе все доступные данные измерений на сегодняшний момент, можно существенно повысить статистику отсчетов в коллимированных нейтронных детекторах при пролетах над Кабео-1, по сравнению с предыдущим анализом данных LEND (Sanin и др., 2017), в рамках которого были построены полярные карты распределения водорода/водяного льда.

Текущий анализ данных показал, что средний темп счета лунных нейтронов при пролете над Кабео-1 существенно меньше, чем темп счета, зарегистрированный над районами, лежащими в том же широтном поясе, что и область Кабео-1,

но за пределами последней. На рис. 1 показаны две гистограммы. Сплошной линией показана гистограмма скорости счета лунных нейтронов внутри вечно затененной области Кабео-1, а пунктирной — гистограмма скорости счета лунных нейтронов в узком широтном поясе, где лежит область Кабео-1. Вероятность того, что на рис. 1 представлены две выборки, взятые из одного и того же распределения, составляет всего 10^{-10} (в соответствии со статистическим тестом Колмогорова—Смирнова). Это означает, что нейтронный поток измеренный в постоянно затененной области Кабео-1 статистически значимо в меньшую сторону отличается от измерений за пределами этой области. Можно утверждать, что в Кабео-1 наблюдается самое сильное ослабление нейтронного потока, что делает эту область одним из наиболее перспективных мест для дальнейшего изучения распределения подповерхностного водяного льда в ходе будущих лунных миссий.

Было проверено наличие корреляции между распределением нейтронного потока внутри этой области с высотой рельефа и с распределением среднегодовых температур на дне и стенках холодной ловушки.

В качестве топографии была использована цифровая модель рельефа с разрешением 120 м/пиксел, построенная по данным эксперимента LOLA (Smith и др., 2017). Карта распределения среднегодовых температур с разрешением 240 м/пиксел была построена по данным измерений в ИК-диапазоне, выполненных в эксперименте Diviner (Paige и др., 2010).

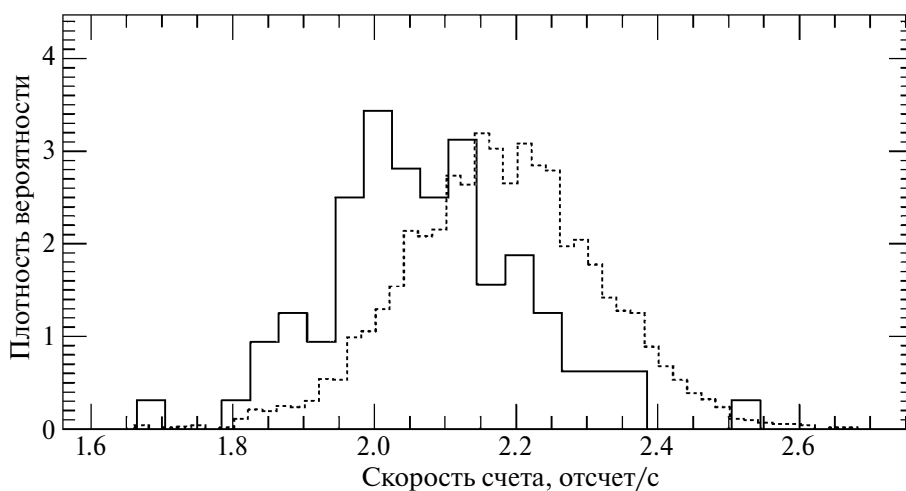


Рис. 1. Распределение скорости счета лунных нейтронов, измеренных прибором LEND в окрестности вечно затененной области Кабео-1 (сплошная линия) и за ее пределами в том же широтном поясе, где лежит область Кабео-1 (пунктирная линия).

На рис. 2–4 представлены карты темпа счета лунных нейтронов (LEND), рельефа поверхности (LOLA) и среднегодовых температур (Diviner), построенные для окрестности Кабео-1.

На всех картах (рис. 2–4) белой пунктирной линией показано сечение вечно затененной области Кабео-1, проходящее через место падения разгонного блока Centaur, осуществленного в эксперименте LCROSS. На представленных картах нейтронного потока, высоты рельефа

и среднегодовых температур (рис. 2–4) место падения отмечено красным кружком. Соответственно, на рис. 5 представлены профили скорости счета лунных нейтронов, высоты рельефа и среднегодовой температуры, построенные вдоль выбранного сечения вечно затененной области Кабео-1. На всех профилях также отмечено место падения разгонного блока Centaur, а пунктирные линии показывают границы вечно затененной области Кабео-1.

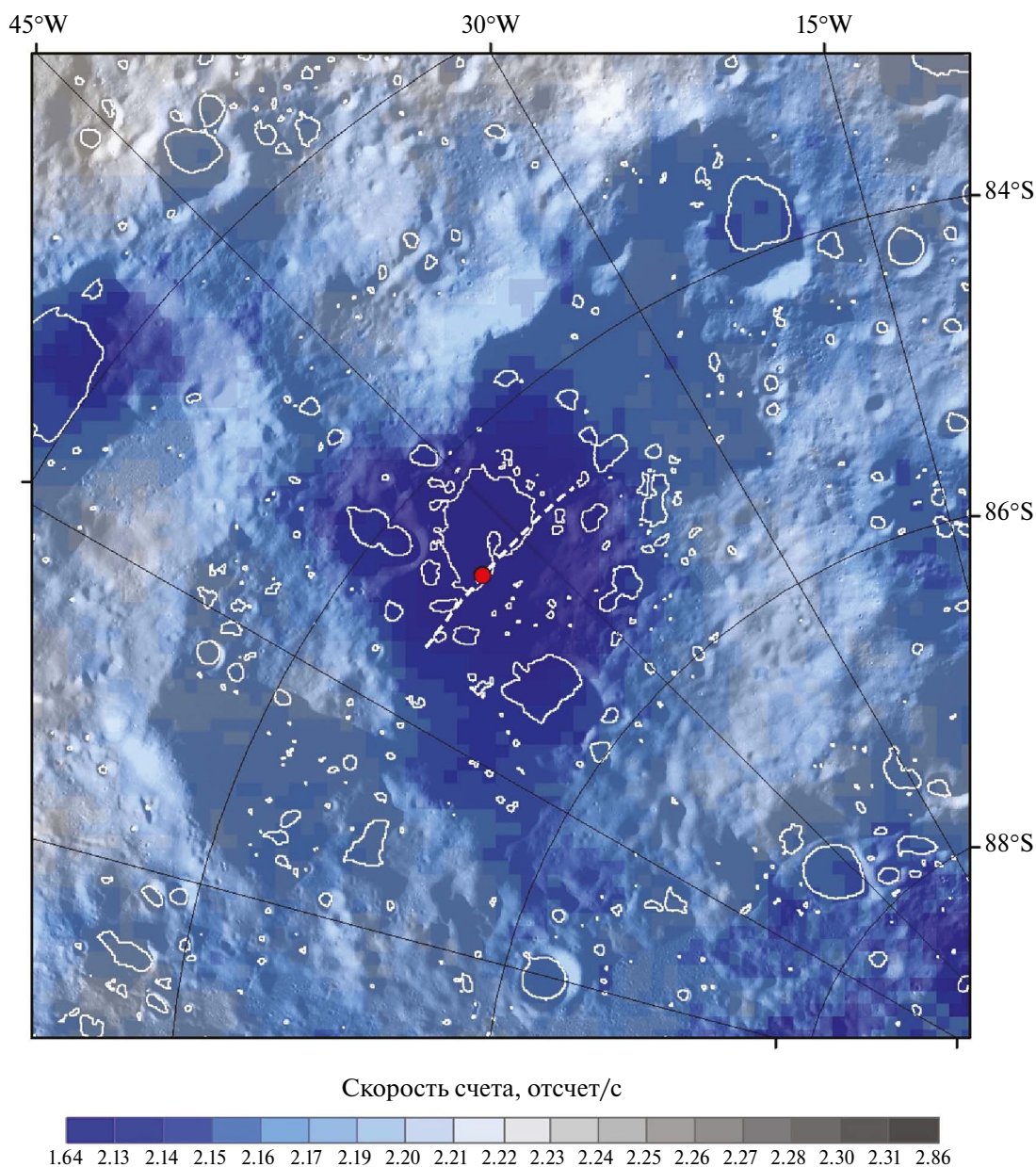


Рис. 2. Карта скорости счета лунных нейтронов, измеренных прибором LEND в окрестности вечно затененной области Кабео-1. Белой пунктирной линией показан профиль сечения вечно затененной области Кабео-1, проходящего через место падения LCROSS, которое показано красным кружком.

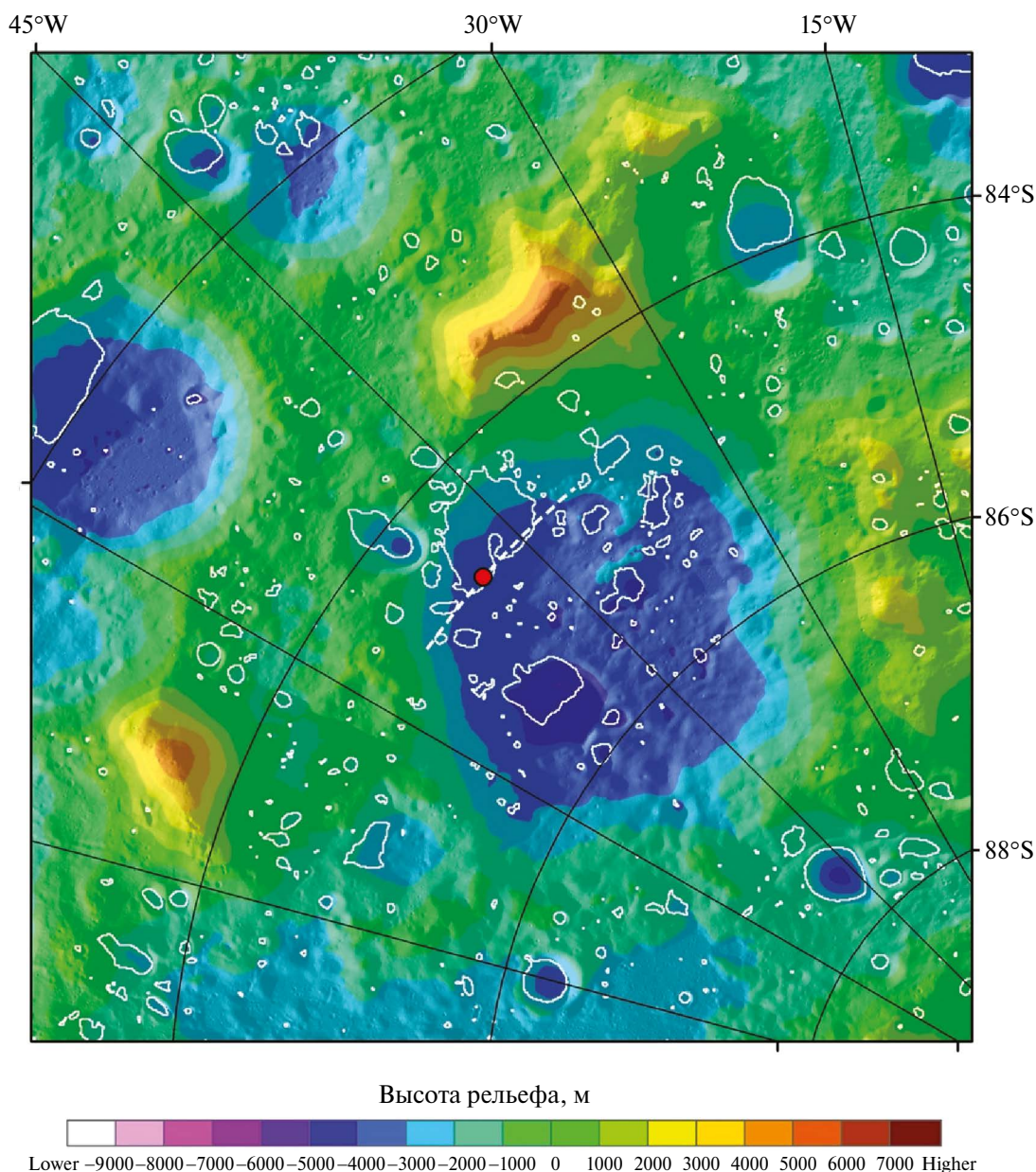


Рис. 3. Карта рельефа поверхности, построенная по данным прибора LOLA в окрестности вечно затененной области Кабео-1, (Smith и др., 2017). Белой пунктирной линией показан профиль сечения вечно затененной области Кабео-1, проходящего через место падения LCROSS, которое показано красным кружком.

Сравнение показывает, что полученные профили довольно хорошо повторяют форму друг друга. Это подтверждается корреляционным анализом, проиллюстрированным на рис. 6 и рис. 7. Рассчитано, что коэффициенты линейной корреляции Пирсона между нейтронным альбедо поверхности и высотой рельефа, а также между нейтронным альбедо поверхности и среднегодовой температурой, почти совпадают и равны ~ 0.8 , что говорит о значимой корреляции. Таким образом,

по мере спуска на дно по склонам области Кабео-1 мы одновременно наблюдаем постепенное понижение нейтронного потока и понижение среднегодовой температуры, которая падает почти на 30° от верхнего края Кабео-1 к его дну. Минимальное значение температуры совпадает с местом падения Centaur и местом, где наблюдается минимальное значение нейтронного потока.

Можно заключить, что прибор LEND, благодаря своей разрешающей способности, позволил

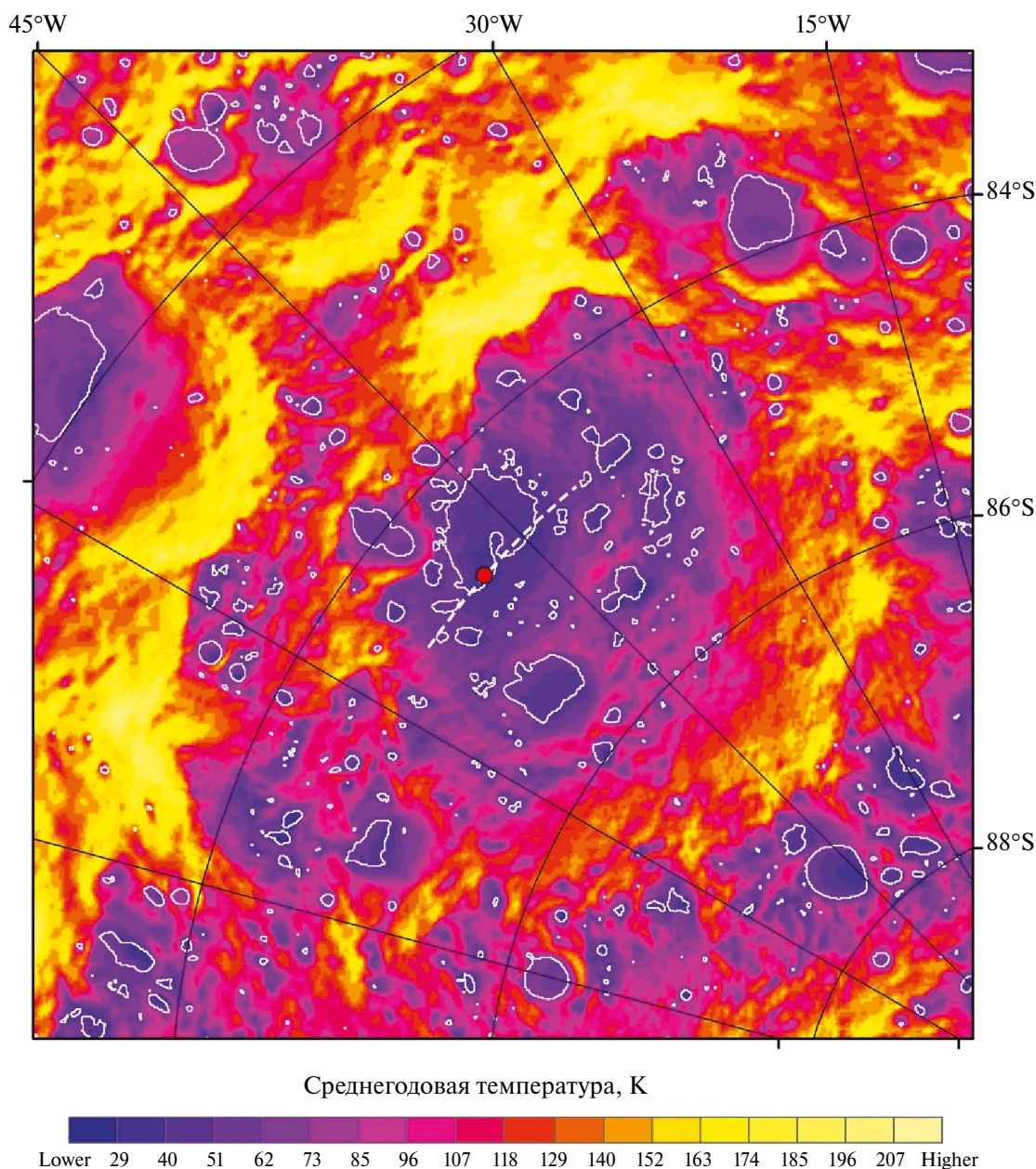


Рис. 4. Карта среднегодовых температур, построенная по данным прибора Diviner в окрестности вечно затененной области Кабео-1 (Paige и др., 2010). Белой пунктирной линией показан профиль сечения вечно затененной области Кабео-1, проходящего через место падения LCROSS, которое показано красным кружком.

не только локализовать на карте южного полюса Луны вечно затененную область Кабео-1 как отдельный район с минимальным нейтронным потоком, но и дает возможность изучить, как нейтронное альbedo меняется внутри этой области.

Используя численное моделирование эксперимента LEND и предполагая, что весь водород в толще вещества химически связан в составе молекул воды, можно оценить содержание

водяного льда в вечно затененной области Кабео-1. Следуя методике, представленной в работе (Sanin и др., 2017) можно оценить, что среднее содержание водяного льда в Кабео-1 составляет $0.49 \pm 0.05\%$, а максимальное значение в точке падения разгонного блока Centaur может достигать 0.7% .

Следует отметить, что полученные выше результаты на основе большой совокупности

статистических данных подтвердили, что выбор района кратера Кабео в качестве места для проведения эксперимента LCROSS, предложенный в 2009 г. по первым данным наблюдений прибора

LEND, является оптимальным (Mitrofanov и др., 2010b; Colaprete и др., 2010). Полученные результаты показали, что точка столкновения разгонного блока с поверхностью Луны соответствует

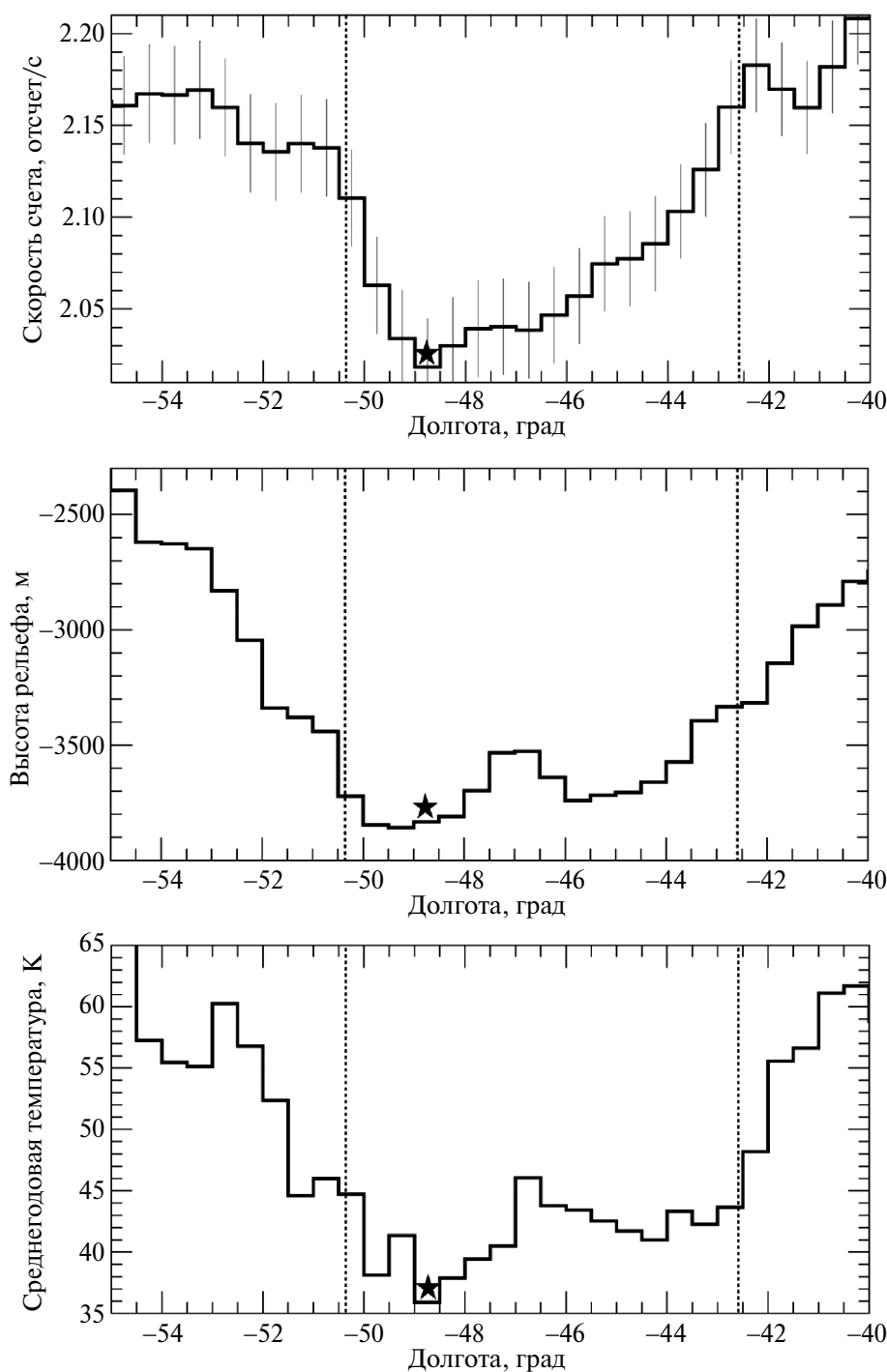


Рис. 5. Профили скорости счета лунных нейтронов (верхний график), высоты рельефа (средний график) и среднегодовой температуры (нижний график) вдоль сечения вечно затененной области Кабео-1 (см. карты, представленные на рис. 2–4), проходящего через место падения разгонного блока Сентауг в эксперименте LCROSS (отмечено черной звездочкой). Границы вечно затененной области Кабео-1 показаны пунктирными линиями.

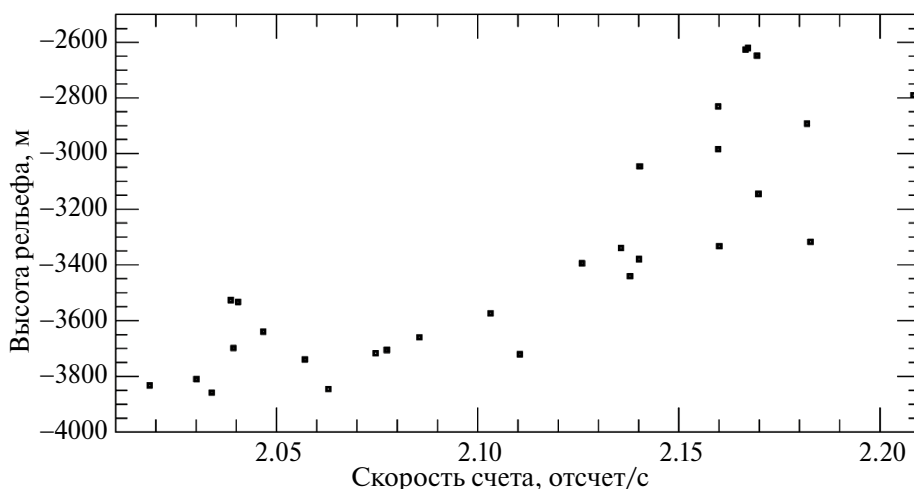


Рис. 6. Корреляция между высотой рельефа и нейтронным альбедо поверхности в окрестности и внутри вечно затененной области Кабео-1.

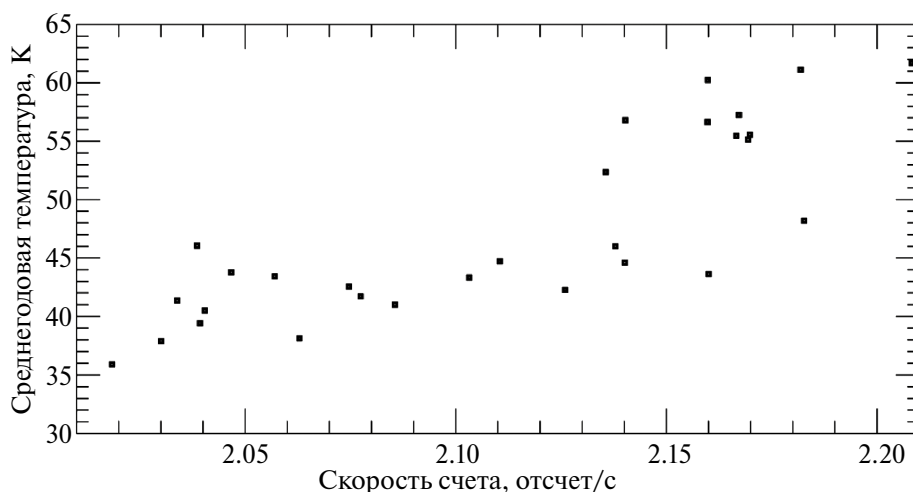


Рис. 7. Корреляция между среднегодовой температурой и нейтронным альбедо поверхности в окрестности и внутри вечно затененной области Кабео-1.

району, в котором содержание водяного льда в верхнем слое вещества, излучающего нейтроны, вероятно, является максимальным для всей южной полярной области.

СРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ ДРУГИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сейчас доступны результаты поисков лунного полярного льда, полученные с применением разных методов обнаружения. Их сравнение позволяет оценить неоднородность залегания льда по глубине, так как спектральные методы (ИК- и УФ- спектрометрия) имеют максимальную

глубину проникновения, измеряемую в микро-нах, а нейтронная спектроскопия дает возможность оценить содержание подповерхностного водяного льда на глубинах до 1 м.

ИК-спектроскопия. В 2009 г. совместный анализ данных приборов M³ (Pieters и др., 2009), VIMS на борту КА Cassini (Sunshine и др., 2009) и NRIIR на борту КА Deep Impact (Clark, 2009) впервые показал, что в полярных областях на поверхности лунного грунта могут присутствовать молекулы воды и гидроксильной группы ОН. Недавний анализ данных M³ позволил идентифицировать уже 169 вечно затененных областей на южном полюсе Луны, где были обнаружены

следы поверхностного водяного льда (Lemelin и др., 2021). Кабео-1 входит в этот список, но по количеству обнаруженных следов поверхностного водяного льда (данные M³) уступает другим крупным, вечно затененным областям (Lemelin и др., 2021).

УФ-спектроскопия. Ультрафиолетовый спектрометр LAMP, установленный на борту КА LRO был специально разработан, чтобы искать поверхностный водяной лед на дне вечно затененных кратеров (Gladstone и др., 2012; Hayne и др., 2015). Современный анализ данных эксперимента LAMP показывает, что некоторые вечно затененные области на южном полюсе могут содержать различные летучие вещества, а содержание поверхностного водяного льда в них оценивается в интервале 0.9%–4.9% (см. Magaña и др., 2022; 2023). В Кабео-1 признаки поверхностного водяного льда также были обнаружены, но их найдено довольно мало.

Нейтронная спектроскопия. Данные всенаправленного нейтронного спектрометра LPNS многократно анализировались с момента первых измерений, когда было обнаружено ослабление нейтронного альbedo Луны в полярных областях (см., например, Feldman и др., 1998; Lawgence и др., 2006; 2022). Для искусственного увеличения пространственного разрешения даже привлекались методы восстановления изображений (Wilson и др., 2018), однако это не позволяет однозначно соотнести ослабление нейтронного потока с особенностями лунного рельефа в виде постоянно затененных областей. Самая

последняя карта распределения полярного водорода, построенная по данным LPNS, представлена в работе (Lawgence и др., 2022). При ее построении авторы попытались учесть все известные коррекции данных LPNS и провести калибровку на измерения содержания водорода в местах посадки КК Apollo. Из проведенного анализа видно, что наиболее водородосодержащая область находится в окрестности большого кратера Кабео. Содержание водорода здесь авторы оценили как 100–110 частей на миллион или примерно 0.1% в водном эквиваленте (Lawgence и др., 2022). Несмотря на все затраченные усилия, следует признать, что всенаправленный нейтронный детектор непригоден для сопоставления распределения нейтронного потока и границ вечно затененной области Кабео-1. Его разрешающая способность составляет десятки километров. Собственно, поэтому и требуется применение методики измерений, основанной на коллимации нейтронного сигнала. Для иллюстрации этого утверждения на рис. 8 представлено сравнение профилей нейтронного темпа счета, зарегистрированных приборами LEND и LPNS и проходящих через вечно затененную область Кабео-1. Оба темпа счета нормированы на свое среднее значение в широтном поясе, где находится Кабео-1. Из этого сравнения хорошо видно, что, в отличие от LEND, профиль LPNS не “чувствует” границ вечно затененной области, а минимум нейтронного потока за счет усреднения по большой площади достигается даже не внутри Кабео-1, как у LEND, а за ее пределами.

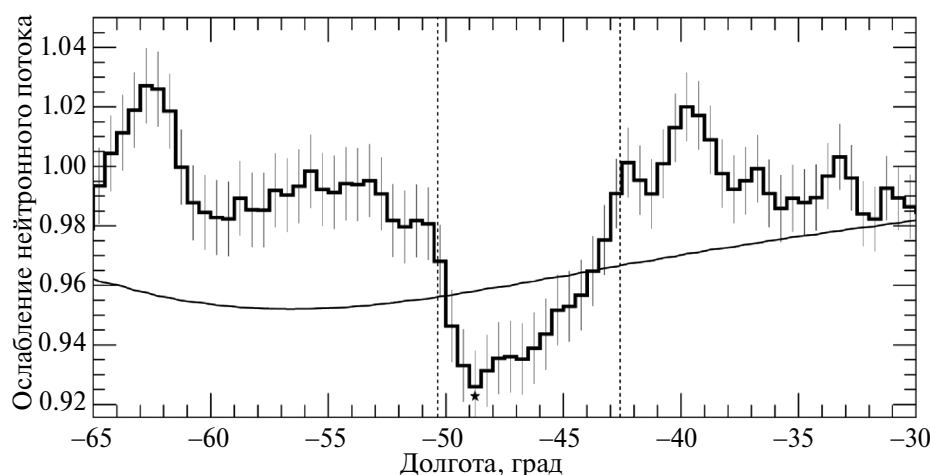


Рис. 8. Нормированные (на среднее) профили скорости счета лунных нейтронов, измеренных приборами LEND (толстая черная кривая) и LPNS (тонкая черная кривая, данные взяты из работы (Lawgence и др., 2022)), вдоль сечения вечно затененной области Кабео-1, проходящего через место падения разгонного блока Centaur в эксперименте LCROSS (отмечено черной звездочкой). Границы области Кабео-1 показаны пунктирными линиями.

Подводя итоги, можно заключить, что данные наблюдений поверхности в видимом, УФ- и ИК-диапазонах показывают, что следы водяного льда присутствуют на дне некоторых вечно затененных областей. При этом область Кабео-1 не находится в первых рядах по количеству обнаружений поверхностного водяного льда, а уступает первенство другим холодным ловушкам. С другой стороны, нейтронная спектроскопия показывает, что подповерхностный водяной лед в наибольшем количестве присутствует именно в Кабео-1. Это согласуется с данными эксперимента LCROSS, показавшими, что в нескольких тоннах лунного реголита, выброшенных при столкновении тяжелой ступени ракеты с поверхностью, значимую часть может составлять водяной лед.

ВЫВОДЫ

14 лет непрерывной работы прибора LEND в составе KA NASA LRO на лунной орбите предоставляют самую большую совокупность данных наблюдений нейтронного альбеда южной полярной области Луны. Несмотря на постепенную эволюцию орбиты LRO, часть вечно затененных кратеров в окрестности южного полюса все еще доступна для наблюдений. В этот список попадает и вечно затененная область Кабео-1, находящаяся внутри крупного кратера Кабео, которая в исходном анализе данных LEND была отмечена как наиболее водосодержащая (0.5–4.0% в зависимости от глубины залегания) (см. Mitrofanov и др., 2010b). Именно в этом районе на основании наблюдений LEND, в рамках эксперимента LCROSS, была проведена искусственная бомбардировка поверхности Луны, которая показала, что на дне вечно затененной области Кабео-1 в толще вещества может присутствовать водяной лед в количестве $5.6 \pm 2.9\%$ (Colaprete и др., 2010).

Большой объем накопленных данных и высокое пространственное разрешение прибора LEND позволили выделить на полярной карте область Кабео-1 и показать, что нейтронный поток уменьшается по мере движения от края кратера к его дну, коррелируя с высотой места и его среднегодовой температурой. Обнаружено, что минимальное значение нейтронного потока наблюдается на самом дне Кабео-1, на участке, где зафиксирована наименьшая среднегодовая температура, совпадая с местом проведения эксперимента LCROSS. По данным LEND, здесь в толще лунного вещества в среднем может содержаться до $\sim 0.7\%$ водяного льда.

Анализ данных ИК- и УФ-спектроскопии, полученных в экспериментах M³/Chandrayaan-1 и LAMP/LRO выявил следы поверхностного слоя замерзшей воды в форме инея на дне некоторых вечно затененных областей. Обнаружено, что значимое количество поверхностного инея наблюдается в крупных кратерах Шумейкер, Хауорт, Фаустини. В Кабео-1 покрытых инеем районов зарегистрировано гораздо меньше, и можно говорить только о превышении пороговых значений.

Можно предположить, что распределение замерзшей воды в области Кабео-1 сильно неоднородно как по поверхности, так и по глубине. Самая высокая массовая доля воды имеет место на глубине нескольких метров искусственного кратера от удара блока Centaur. На глубине нескольких десятков сантиметров до 1 м слоя нейтронного излучения средняя массовая доля воды составляет около 0.7%. Наконец, поверхность на дне кратера может быть покрыта тонким слоем водяного инея, который регистрируется на пределе чувствительности современной аппаратуры.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема ОСВОЕНИЕ, № 122042500014-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arnold J.R. Ice in the lunar polar regions // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. P. 5659–5668.
2. Binder A.B. Lunar Prospector: Overview // Science. 1998. V. 281 (5382). P. 1475–1476.
3. Boynton W.V., Droege G.F., Mitrofanov I.G., McClanahan T.P., Sanin A.B., Litvak M.L., Schaffner M., Chin G., Evans L.G., Garvin J.B., and 5 co-authors. High spatial resolution studies of epithermal neutron emission from the lunar poles: Constraints on hydrogen mobility // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. id. E00H33. <https://doi.org/10.1029/2011JE003979>
4. Clark R.N. Detection of adsorbed water and hydroxyl on the Moon // Science. 2009. V. 326. P. 562–564.
5. Colaprete A., Schultz P., Heldmann J., Wooden D., Shirley M., Ennico K., Hermalyn B., Marshall W., Ricco A., Elphic R.C., and 7 co-authors. Detection of water in the LCROSS ejecta plume // Science. 2010. V. 330. P. 463–468.
6. Crider D.H., Vondrak R.R. The solar wind as a possible source of lunar polar hydrogen deposits // J. Geophys. Res.: Planets. 2000. V. 105. P. 26773–26782.

7. Drake D., Feldman W.C., Jakosky B.M. Martian neutron leakage spectra // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. № B6. P. 6353–6368. <https://doi.org/10.1029/JB093iB06p06353>.
8. Feldman W.C., Maurice S., Binder A.B., Barraclough B.L., Elphic R.C., Lawrence D.J. Fluxes of fast and epithermal neutrons from Lunar Prospector: Evidence for water ice at the lunar poles // *Science*. 1998. V. 281. P. 1496–1500.
9. Feldman W.C., Maurice S., Lawrence D.J., Little R.C., Lawson S.L., Gasnault O., Wiens R.C., Barraclough D.L., Elphic R.C., Prettyman T.H., and 2 co-authors. Evidence for water ice near the lunar poles // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 23231–23251.
10. Gladstone G.R., Retherford K.D., Egan A.F., Kaufmann D.E., Miles P.F., Parker J.W., Horvath D., Rojas P.M., Versteeg M.H., Davis M.V., and 10 co-authors. Far-ultraviolet reflectance properties of the Moon's permanently shadowed regions: Albedo of Moon's permanently shadowed regions // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117(E12). <https://doi.org/10.1029/2011JE003913>
11. Hayne P.O., Hendrix A., Sefton-Nash E., Siegler M.A., Lucey P.G., Retherford K.D., Williams J.P., Greenhagen B.T., Paige D.A. Evidence for exposed water ice in the Moon's south polar regions from Lunar Reconnaissance Orbiter ultraviolet albedo and temperature measurements // *Icarus*. 2015. V. 255. P. 58–69. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.03.032>
12. Head J.W., Wilson L., Deutsch A.N., Rutherford M.J., Saal A.E. Volcanically induced transient atmospheres on the Moon: Assessment of duration, significance, and contributions to polar volatile traps // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47(18). id. e2020GL089509. <https://doi.org/10.1029/2020GL089509>
13. Lawrence D.W., Feldman W.C., Elphic R.C., Hagerthy J.J., Maurice S., McKinney G.W., Prettyman T.H. Improved modeling of Lunar Prospector neutron spectrometer data: Implications for hydrogen deposits at the lunar poles // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. id. E08001.
14. Lawrence D.J., Peplowski P.N., Wilson J.T., Elphic R.C. Global hydrogen abundances on the lunar surface // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2022. V. 127. id. e2022JE007197. <https://doi.org/10.1029/2022JE007197>
15. Lemelin M., Li S., Mazarico E., Siegler M.A., Kring D.A., Paige D.A. Framework for coordinated efforts in the exploration of volatiles in the south polar region of the Moon // *Planet. Sci. J.* 2021. V. 2. id. 103 (17p.). <https://doi.org/10.3847/PSJ/abf3c5>
16. Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Malakhov A., Boynton W.V., Chin G., Droege G., Evans L.G., Garvin J., Golovin D.V., and 10 co-authors. Global maps of lunar neutron fluxes from the LEND instrument // *J. Geophys. Res.* 2012a. V. 117. id. E00H22. <http://dx.doi.org/10.1029/2011JE003949>
17. Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Golovin D.V., Malakhov A.V., Boynton W.V., Droege G., Harshman K., Starr R.D., Milikh G., and Sagdeev R. LEND neutron data processing for the mapping of the Moon // *J. Geophys. Res.* 2012b. V. 117. id. E00H32. <http://dx.doi.org/10.1029/2011JE004035>
18. Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Bakhitin B.N., Bodnarik J.G., Boynton W.V., Chin G., Evans L.G., Harshman K., Livengood T.A., and 5 co-authors. The variations of neutron component of lunar radiation background from LEND/LRO observations // *Planet. and Space Sci.* 2016. V. 122. P. 53–65. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2016.01.006>
19. Magaña L.O., Retherford K.D., Byron B.D., Hendrix A.R., Grava C., Mandt K.E., Raut U., Czajka E., Hayne P.O., Hurley D.V., and 6 co-authors. LRO-LAMP survey of lunar south pole cold traps: Implication for the presence of condensed H₂O // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2022. V. 127 (11). id. e2022JE007301. <https://doi.org/10.1029/2022JE007301>
20. Magaña L.O., Retherford K.D., Byron B.D., Hendrix A.R., Grava C., Mandt K.E., Raut U., Czajka E., Hayne P.O., Hurley D.V., and 6 co-authors. LRO-LAMP lunar south pole cold traps: Assessment of H₂O and potential CO₂ and NH₃ reserves // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2023. V. 128. id. e2023JE007863. <https://doi.org/10.1029/2023JE007863>
21. Maurice S.W., Lawrence D.J., Feldman W.C., Elphic R.C., Gasnault O. Reduction of neutron data from Lunar Prospector // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2004. V. 109. id. E07S04.
22. 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. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2010.10.030>
23. Masarik J., Reedy R.C. Gamma ray production and transport in Mars // *J. Geophys. Res.: Planets*. 1996. V. 101. № E8. P. 18891–18912. <https://doi.org/10.1029/96JE01563>
24. Mitrofanov I.G., Bartels A., Bobrovitsky Y.I., Boynton W., Chin G., Enos H., Evans L., Floyd S., Garvin J., Golovin D.V., and 26 co-authors. Lunar exploration neutron detector for the NASA lunar reconnaissance orbiter // *Space. Sci. Rev.* 2010a. V. 150. P. 183–207.
25. Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Boynton W.V., Chin G., Garvin J.B., Golovin D., Evans L.G., Harshman K.,

- Kozyrev A.S., Litvak M.L., and 26 co-authors.* Hydrogen mapping of the lunar south pole using the LRO neutron detector experiment LEND // *Science*. 2010b. V. 330. P. 483–486.
26. *Mitrofanov I.G., Litvak M., Sanin A., Malakhov A., Golovin D., Boynton W., Droege G., Chin G., Evans L., Harshman K., and 14 co-authors.* Testing polar spots of water-rich permafrost on the Moon: LEND observations onboard LRO // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. id. E00H27. <https://doi.org/10.1029/2011JE003956>
27. *Needham D.H., Kring D.A.* Lunar volcanism produced a transient atmosphere around the ancient Moon // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2017. V. 478. P. 175–178.
28. *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. P. 1495–1498.
29. *Paige D.A., Siegler M.A., Zhang J.A., Hayne P.O., Foote E.J., Bennett K.A., and 19 co-authors.* Diviner Lunar Radiometer observations of cold traps in the Moon's south polar region // *Science*. 2010. V. 330 (6003). P. 479–482. <https://doi.org/10.1126/science.1187726>
30. *Pieters C.M., Goswami J.N., Clark R.N., Annadurai M., Boardman J., Buratti B., Combe J.-P., Dyar M.D., Green R., Head J.W., and 19 co-authors.* Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the Moon seen by M³ on Chandrayaan-1 // *Science*. 2009. V. 326. P. 568–582.
31. *Sanin A.B., Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Malakhov A., Boynton W.V., Chin G., Droege G., Evans L., Garvin J., Golovin D., and 10 co-authors.* Testing lunar permanently shadowed regions for water ice: LEND results from LRO // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. id. E00H26. <https://doi.org/10.1029/2011JE003971>
32. *Sanin A.B., Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Bakhitin B.N., Bodnarik J.G., Boynton W.V., Chin G., Evans L.G., Harshman K., Fedosov F., and 10 co-authors.* Hydrogen distribution in the lunar polar regions // *Icarus*. 2017. V. 283. P. 20–30.
33. *Smith D.E., Zuber M.T., Jackson G.B., Cavanaugh J.F., Neumann G.A., Riris H., Sun H., Zelllar R.S., Coltharp C., Connelly J., and 21 co-authors.* Summary of the results from the lunar orbiter laser altimeter after seven years in lunar orbit // *Icarus*. 2017. V. 283. P. 70–91.
34. *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.
35. *Starukhina L.V., Shkuratov Y.G.* The lunar poles: Water ice or chemically trapped hydrogen? // *Icarus*. 2000. V. 147. P. 585–587.
36. *Sunshine J.M., Farnham T.L., Feaga L.M., Groussin O., Merlin F., Milliken R.E., A'Hearn M.F.* Temporal and spatial variability of lunar hydration as observed by the deep impact spacecraft // *Science*. 2009. V. 326. P. 565–568.
37. *Watson K., Brown H., Murray B.* On possible presence of ice on Moon // *J. Geophys. Res.* 1961. V. 66. P. 1598–1600.
38. *Wilson J.T., Lawrence D.J., Peplowski P.N., Cahill J.T.S., Eke V.R., Massey R.J., Teodoro L.F.A.* Image reconstruction techniques in neutron and gamma ray spectroscopy: Improving Lunar Prospector data // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2018. V. 123 (7). P. 1804–1822.