

# ПРОБЛЕМЫ ПОИСКА ВНУТРЕННЕЙ ВОДЫ НА ЛУНЕ

Ю.И. Матвеев<sup>1</sup>, В.И. Костенко<sup>1</sup>, В.Н. Хмелёв<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт космических исследований» РАН, г. Москва

<sup>2</sup> Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск.

Рассмотрено влияние трещин, образующихся при взрыве метеорита, на проникновение воды, образующейся в недрах Луны, - внутренней воды в области стенок и вала кратера. Предложены приборы и оборудование для определения содержания внутренней воды в кратерах, доступных для посадки лунных зондов.

*Ключевые слова:* кратеры Луны, внутренняя вода, трещины в стенках кратеров, зоны расположения внутренней воды.

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема поиска воды на Луне приобрела в последнее время актуальное значение в связи с уточнением мест для размещения лунной базы (ЛБ) и ее функционированием там. Как показывают последние исследования (Crotts, 2009, 2012; Иванов, 2014), существует несколько главных источников поступления летучих компонентов в лунный реголит:

–солнечный ветер, основным компонентом которого являются протоны, взаимодействующие с окислами лунного реголита;

–малые тела Солнечной системы (кометы, метеориты);

–лунные недра.

Данные по содержанию летучих компонентов в областях реголита эндогенного происхождения свидетельствуют о широком присутствии воды в лунных недрах, причем содержание их может быть сопоставимо с таковым в земных недрах (Иванов, 2014). В дальнейшем для краткости эту воду будем называть внутренней.

Из трех перечисленных выше источников наиболее исследована вода, образующаяся под действием солнечного ветра. Данные, полученные с помощью телескопа LEND (Lunar Exploration Neutron Detector), созданного в ИКИ РАН для космического аппарата (КА) NASA LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter), подтвердили факт повышенного содержания воды в полярных областях Луны, позволили построить карты распространенности воды в реголите в окрестностях северного и южного полюсов (Митрофанов, 2016).

Оказалось, что повышенная концентрация воды (в среднем до 0.5% воды по массе) наблюдается как в некоторых постоянно затененных кратерах (например, в Кабео и Шумейкер), так и в районах, регулярно освещаемых Солнцем, где вода предохраняется от сублимации относительно тонким слоем безводного реголита. Поэтому для изучения воды, образующейся под действием солнечного ветра, на Луне космиче-

ский аппарат (КА) не обязательно должен находиться на дне постоянно затененного кратера.

В работе (Дьячкова и др., 2017) на основании полученной карты распределения воды, образующейся под действием солнечного ветра, и с учетом характеристик местности были определены основная и резервная точки прилунения КА Луна-25. При этом учитывалось, что КА должен сохранять работоспособность после пребывания в условиях лунной ночи, обеспечивать энергетические и коммуникационные потребности бортовой научной аппаратуры в течение лунного дня.

Совокупность баллистических и инженерных ограничений определяют допустимый южный полярный сектор расположения районов посадки КА Луна-25, ограниченный параллелью 65° ю.ш. и меридианами 0 и 60° в.д.

В рамках выполненных оценок наиболее благоприятных мест посадки КА Луна-25 можно оценить вероятность обнаружения в реголите дна кратеров Богуславского и Манцини воды, занесенной малыми телами Солнечной системы. Для этого воспользуемся результатами работы (Козлова, 2004), в которой были определены кратеры, где может находиться вода. В случае Южного полюса Луны таких кратеров 296 и они располагаются южнее 60° ю.ш. Если допустить, что они располагаются равномерно в указанной области, тогда в уточненной области посадки (Дьячкова и др., 2017) будет находиться ~ 16 кратеров. Здесь были учтены ограничение мест посадки по долготе от 0 до 60° и по широте от 65 до 75° ю.ш.

Относительно работы (Дьячкова и др., 2017) следует заметить, что сформулированные в ней ограничения следуют из предположения, что управление посадкой и связь с Луной-25 будут осуществляться с земли. При использовании Лунных орбитальных станций многие из этих ограничений снимаются. Соответственно области поиска источников внутренней воды могут быть расширены.

Статистика метеоритов, бомбардирующих землю, показывает (Hughes, 1981), что основная масса метеоритов, падающих на землю, являются каменными или железоканненными – 96%. Остальные 4% - это метеориты неизвестного происхождения. Если допустить, что это количество является максимальной оценкой числа метеоритов водяного происхождения и подобная статистика распространяется на Луну, то число кратеров, содержащих метеоритную воду в области приземления КА Луна-25, будет меньше 1. Это означает, что кратеры Богуславского или Манцини могут содержать только внутреннюю воду или воду, образующуюся под действием солнечного ветра.

Учитывая, что среднее содержание воды, образующейся под действием солнечного ветра, в этих кратерах ~ 0.5% (Митрофанов, 2016), речь идет об определении количества внутренней воды, содержание которой, как показывает бомбардировка кратера Кабео в эксперименте LCROSS, может достигать в среднем до 5.6% (Colaprete A., et al., 2010). Ниже будут рассмотрены: возможная природа образования внутренней воды в кратерах Луны, ее местоположение и эксперименты по обнаружению ее в кратерах Богуславского или Манцини.

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ БОМБАРДИРОВКИ ЛУНЫ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ LCROSS С ПОЗИЦИЙ ОЦЕНКИ СОДЕРЖАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ВОДЫ

При образовании кратера независимо от типа метеорита (каменного или ледяного) по его периферии образуется зона трещин, в которые может проникнуть внутренняя вода вследствие разогрева дна кратера при образовании горячего импактного расплава от удара метеорита (рис.1) и процессов фильтрации. Ниже будут выполнены оценки местоположения воды и мощности её запасов.

Особого внимания при выполнении этих оценок заслуживают результаты, полученные в эксперименте LCROSS при столкновении последней ступени ракеты Centaur со стенкой кратера Кабео. Содержание воды в облаке выброса оценивается как  $5.6 \pm 2.9\%$  мас.% (Colaprete A., et al., 2010). Возникает вопрос о природе этой воды.

В работе (Futera et al., 2017) было показано, что вода на Земле могла возникнуть в её недрах на глубинах от 40 до 400 км в результате химических реакций. Были смоделированы условия, которые характерны для недр Земли при температуре 1400°C и давлении 20 кбар. При таких параметрах содержащийся в мантии диоксид кремния вступает в химическую реакцию с водородом, что приводит к образованию воды и гидрида кремния.

Накопление воды внутри минеральных пород может привести к росту давления до 200 кбар, а выход жидкости из объема породы вызвать глубинные землетрясения (Coghlan, 2017), образование трещин в мантии и движение воды в направлении к поверхно-

сти Земли. Поводом для такого рода подхода к объяснению появления воды на Земле послужила экспериментальная работа японских физиков (Shinozaki A. et al., 2012), в которой было изучено взаимодействие водорода с силикатом магния (форстеритом) при высоком давлении, создаваемом лазерным лучом (Shinozaki A. et al., 2014).

Учитывая, что мантии Земли и Луны имеют одинаковое строение, аналогичный процесс может иметь место и на Луне (Иванов, 2014).

#### ГРАНИЦЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ВОДЫ ЗА СТЕНКАМИ ЛУННЫХ КРАТЕРОВ

При ударе и взрыве метеоритов, наряду с возбуждением упругих волн и формированием кратера, образуется зона трещин за пределами кратера (Родионов и др., 1986), которые заполняются внутренней водой Луны. Так как дно кратера покрыто ударным расплавом (рис. 1), который непроницаем для внутренней воды, она будет отсутствовать в реголите дна кратера. Поэтому внутренняя вода Луны может находиться только за пределами кратера или в его стенках. В дальнейшем при охлаждении кратера эта вода замерзает в трещинах и на поверхности его стенки в области холодных ловушек. Оценки ее содержания показывают, что поиск внутренней воды может представлять практический интерес для обеспечения лунной базы (ЛБ) водой.

Возникает вопрос, как далеко может простираться зона трещин у различных кратеров, как она влияет на пористость  $\eta$ , обусловленную трещинами естественного происхождения, и какая часть зоны трещинообразования доступна для внутренней воды (водопоглощения).

Глубину нахождения внутренней воды на Луне можно оценить из следующих соображений. На Земле нижняя граница биосферы (среды, для существования которой необходима вода) в литосфере составляет 3.5 – 7 км (Войткевич, 1989) от поверхности земли или ~ 10% от толщины коры Земли. Допустим, что на Луне глубина нахождения внутренней воды составляет тоже ~10% от толщины коры Луны. Если взять среднюю толщину лунной коры 50 км, то максимальная глубина нахождения внутренней воды будет ~ 5 км, т.е. это те самые глубины, которые имеют место в кратерах диаметром  $D \leq 100$  км (глубина кратера Кабео – 4 км, максимальная глубина кратера Манцини – 5 км, кратера Богуславского – 3.4 км).

Воспользуемся данными работы (Родионов и др., 1986, гл.8, §8.6) для оценки пористости зоны радиальных трещин  $\eta$ :

$$\eta = \frac{\sigma_s}{E} \left( \frac{b_s}{b_o} \right)^2 \left[ \left( \frac{b_o}{r} \right)^2 - (1 - \nu) \frac{b_o}{r} \right], \quad (1)$$

где  $\sigma_s$  – начальная прочность горной породы,  $E$  – модуль Юнга горной породы,  $b_s$  – расстояние от центра

взрыва (в нашем случае от центра кратера) до зоны радиальных трещин,  $b_o$  - расстояние от центра взрыва до упругой зоны (фактически условная граница завершения процесса образования трещин),  $r$  - радиальная переменная.

Радиус зоны радиальных трещин определим, согласно (Родионов и др., 1986, гл.8, §8.3), из выражения

$$b_s/b_o = [(3p_n + 2\sigma_o)/\sigma_s]^{0.5}, \quad (2)$$

где  $p_n$  - горное давление на глубине взрыва, в нашем случае, так как взрыв происходит на поверхности Луны,  $p_n = 0$ ,  $\sigma_o$  - прочность на отрыв.

В дальнейшем при оценках параметров уравнений (1) и (2) будем исходить из того, что взрыв происходит в горной породе типа гранита со следующими начальными свойствами:  $\sigma_s = 10^2$  МПа,  $\sigma_o = 10$  МПа. Такой подход широко используется в работах (Базилевский и др., 1983; Родионов и др., 1986).

Тогда из (2) найдем  $b_o = 2.24b_s = 1.12D_r$ , где  $D_r$  - диаметр кратера, и область образования трещин ( $b_o - b_s$ ) =  $0.62D_r$ . В случае кратера Кабео ( $b_o - b_s$ ) = 61 км, а в случае кратера Богуславского ( $b_o - b_s$ ) = 58.6 км.

Определим с помощью выражения (1) пористость на границе с упругой зоной при  $b_o/r = 1$ . Тогда

$$\eta(b_o) = \frac{\sigma_s \nu}{E \cdot 5} \quad (3)$$

В случае гранита  $E = (3.5...5)10^4$  МПа,  $\nu = 0.1...0.15$  и  $\eta(b_o) = 0.57 \cdot 10^{-4}$ , т.е. пористость практически будет равна нулю. В земных условиях реальная (фоновая) пористость гранита равна  $\eta_{ph} = 1.8\%$  (взята как средняя по данным (Каталог камня, Гранит плюс // <http://www.granitplys.ru/catalogue/>)).

Чтобы учесть влияние фоновой пористости на  $\sigma_s$  и  $E$ , воспользуемся эмпирической формулой Рышкевича (Стрелов, 1972, гл.3), которая учитывает влияние пористости на прочность породы, т.е.

$$\sigma_s = \sigma_{so} \exp(-\beta_\sigma \eta), \quad (4)$$

где  $\sigma_{so}$  - прочность породы при отсутствии пористости,  $\beta_\sigma$  - коэффициент, который меняется от 4 до 7 при измерении пористости в %.

Аналогичным образом можно записать зависимость модуля Юнга от пористости, только беря другой коэффициент -  $\beta_E$ .

Подставляя указанные зависимости в выражение (3), получим уравнение для определения поправочно-множителя к нему:

$$\eta_{ph} = \frac{\sigma_{so} \nu}{E_o \cdot 5} \exp(\Delta\beta \cdot \eta_{ph}),$$

где  $\Delta\beta = \beta_E - \beta_\sigma$ . При  $\eta_{ph} = 1.8\%$  значение  $\Delta\beta = 3.2$ .

Определим с помощью выражения (1) пористость при  $r = b_s$  (на краю кратера). В этом случае  $\eta(b_s) = 0.29 \cdot 10^{-3}$ , а  $\eta(b_s)/\eta(b_o) = 5.1$ . С учетом фонового значения  $\eta(b_s) = 9.2\%$ . Так как пространство между выбранными кратерами подвергалось ударам метеоритов разного размера, то соответствующее значение  $\eta_{ph}$

на Луне будет больше, чем на земле. Поэтому найденное значение  $\eta(b_s)$  на стенках кратера будет минимальным.

При ударе и взрыве метеорита происходит увеличение размеров трещин. Однако найденные значения пористости не означают, что они полностью заполнены водой и таким образом, можно оценить содержание внутренней воды в стенках кратера. По мере удаления от края кратера встречаются трещины, в которые не может проникнуть вода. Для оценки этого явления вводится параметр *водопоглощение*  $V$ , который характеризует способность материала впитывать и удерживать воду. Количественно он определяется как отношение разности весов насыщенного водой и сухого образца к весу сухого образца. Если взять среднее значение отношения водопоглощения к пористости гранита  $\langle V/\eta \rangle$  по данным (Каталог камня, Гранит плюс // <http://www.granitplys.ru/catalogue/>), то  $\langle V/\eta \rangle = 0.2$  и содержание воды на стенках кратера будет  $\sim 1\%$ .

Верхнюю границу содержания воды можно определить из следующих физических соображений: чем больше пористость (раскрытие трещин), тем больше вероятность заполнения таких трещин и  $\langle V/\eta \rangle \rightarrow 1$ . Кроме того, на такой характер поведения  $\langle V/\eta \rangle$  будет влиять более высокое значение  $\eta_{ph}$ . Поэтому в качестве верхней оценки содержания воды в стенках кратера можно взять 9%.

С помощью выражения (1) можно оценить область зоны трещин, содержащую основное количество воды. Оценка тангенсов углов наклона касательных в точках  $b_o$  и  $b_s$  показывает, что в точке  $b_s$  тангенс угла наклона в 3.6 раза больше, чем в точке  $b_o$ . Точка пересечения касательных, проведенных из  $b_o$  и  $b_s$ ,  $r^* = 1.17 + 0.45b_s$  условно делит зону образования трещин на две части:  $r^* - b_s$ , где водопоглощение высокое, и  $b_o - r^*$ , где водопоглощение слабое и вкладом его в общее содержание воды можно пренебречь. Оценка ширины вала кратера  $L$  с помощью выражения:  $L = 0.65D^{0.8}$ , согласно (Базилевский и др., 1983), показывает, что  $r^* \sim L$ . Так в случае кратера Кабео  $r^* = 23$  км, а  $L = 25$  км, аналогичные результаты получаются для кратера Богуславский  $r^* = 22$  км,  $L = 25$  км и Манцини.

Косвенным подтверждением присутствия внутренней воды в стенках кратеров может служить бомбардировка кратера Кабео последней ступенью ракеты Centaur в рамках эксперимента LCROSS (Colaprete et al, 2010; Gladstone et al, 2010).

Оценку содержания внутренней воды в стенках кратеров Луны можно выполнить по данным картографирования нейтронным телескопом LEND (Митрофанов, 2016) и данным бомбардировки кратера Кабео в эксперименте LCROSS (Colaprete A., 2010). Если воспользоваться приближенной формулой для коэффициента ослабления эпитепловых нейтронов  $\xi(p)$  работы (Митрофанов, 2016), где  $p$  - массовая доля воды, тогда при  $\langle p \rangle = 5.6\%$ , измеренной в работе

(Colaprete A., 2010),  $\xi(p) \sim 0.314$ . Так как LEND имеет пространст-венное разрешение 10 км, усредняя на этом расстоянии  $\xi(p)$ , можно учесть вклад горизонтальных и наклонных участков кратера в среднее значение  $\langle \xi(p) \rangle$ . В случае кратера Кабео, у которого  $\langle \xi(p) \rangle = 0.797$ , глубина  $\sim 5$  км,  $\xi(p)$  наклонного участка  $\xi_{п.в.}(p) \sim 0.314$ , величина  $\xi(p)$  прямого участка  $\xi_{п.в.}(p)$  будет  $\xi_{п.в.}(p) \sim 0.86$ , т.е. почти как в окрестностях Южного полюса. Таким образом, присутствие внутренней воды, которая наиболее близка к наклонной стенке у дна глубоких кратеров, приводит к флуктуации  $\xi(p)$  на 8 %, в то время как флуктуации  $\xi(p)$  на горизонтальных участках будут порядка 1 - 2 %.

### ПРИБОРЫ И СРЕДСТВА ПОИСКА ВНУТРЕННЕЙ ВОДЫ В КРАТЕРАХ БОГУСЛАВСКОГО ИЛИ МАНЦИНИ

Рассмотрим возможности поиска внутренней воды. Как уже было отмечено выше, внутренняя вода может находиться в стенках выбранного кратера (Богуславского или Манцини). Для ее поиска можно, как и в случае эксперимента LCROSS, использовать бомбардировку стенок кратера. Отличие заключается только в том, что бомбардировку предлагается проводить не с орбиты спутника Луны, а с места посадки зонда. Такой подход имеет ряд преимуществ. Во-первых, он позволяет выполнить измерения содержания воды по высоте и по азимуту кратера. Во-вторых, подбирая характеристики взрывчатых веществ (ВВ) бомбардировочного устройства, можно регулировать температуру продуктов выброса и тем самым обеспечить высокую точность регистрации содержания воды в стенке кратера. В-третьих, применение такого бомбардировочного устройства позволяет более эффективно использовать энергию взрыва для образования облака продуктов выброса, чем при использовании последней ступени ракеты Centaur.

Так как современные средства посадки могут обеспечить прилунение КА достаточно близко к стенке кратера (с точностью  $\sim 3$  км в случае миссии Луна-27), последнее позволяет оптимизировать бомбардировочное устройство по весу и габаритам, вписать его в контуры посадочного аппарата. Еще более гибко и с большей точностью можно реализовать бомбардировочное устройство при использовании луноходов, например, китайского Юйту.

Габариты лунохода «Юйту»: длина - 1,5 м, ширина - 1 м, высота - 1,1 м. Масса «Юйту» - 140 кг, из которых 20 кг полезной нагрузки. Луноход может передавать видео в реальном времени, имеет автоматические сенсоры для предотвращения столкновения с другими объектами. Луноход рассчитан на работу в течение 3-х месяцев, прохождение дистанции в 10 км, развивать скорость 3.2 м/мин и преодолевать препятствия, имеющих  $30^\circ$  уклон.

Для бомбардировки стенок кратера на луноходе можно установить 2 модифицированных неуправляемых реактивных снаряда (НУРС) типа С-8ДФ, которые широко применяются в военной авиации. При этом, одна из задач С-8ДФ - поражение фортификационных сооружений открытого типа. Взрыв его по фугасному действию соответствует тротиловому эквиваленту 6 кг. Дальность пуска до 4.0 км, масса ракеты - 13.4 кг, вес боевой части - 5.5 кг, длина - 1.68 м.

Выполним некоторые оценки облака взрыва, которое может быть получено с помощью такого бомбардировочного устройства. Обычно в качестве стандартной оценки сравнительной мощности взрыва принимают глубину воронки, образующейся в грунте после взрыва.

При ориентировочном определении эффективности боеприпаса (Куров, 1961) характеристическую глубину воронки  $H$  (в м) можно оценить по эмпирической формуле

$$H \approx \sqrt[3]{\frac{P}{C'}}$$

где  $P$  - вес боевого заряда ВВ в кг, коэффициент  $C'$  учитывает особенность преграды и эффект срабатывания заряда на разной глубине  $h$  (в случае скалы при  $h$  до 1.5 м,  $C' = 4.0$ ; щебенки или насыпи  $C' = 1.0$ ; обычный грунт  $C' = 0.7$ ).

Практика показывает, что максимальный эффект взрыва (размер воронки, образующейся в грунте), наблюдается, если он происходит на глубине, которая для боеприпаса с весом заряда ВВ  $P$  в кг составляет примерно

$$h_{opt} = (0.85 \div 0.95) (P)^{1/3}, \text{ м.}$$

В нашем случае при  $P \sim 6$  кг,  $h_{opt} = 1.63$  м, а  $H \sim 1.14$  м в скале,  $H \sim 1.8$  м в щебенке и  $H \sim 2$  м в обычном грунте, а среднее значение  $\langle H \rangle = 1.65$  м.

При взрыве снаряда на любой глубине непосредственные разрушения от действия взрыва наблюдаются в некоторой области с центром в точке взрыва и предельным радиусом  $R_p$ , определяемым соотношением

$$R_p = k_p (P)^{1/3}, \text{ м.}$$

где  $k_p$  - коэффициент, числовые значения которого зависят от типа преграды ( $k_p = 1.07$  для обыкновенного грунта,  $k_p = 0.92$  для известняка и песчаника). Эта область называется областью или сферой разрушения. В случае обычного грунта  $R_p = 1.94$  м и  $R_p = 1.67$  м в случае известняка.

Оценка объема выброшенного грунта с помощью НУРС в случае твердых пород на основании полученных выше параметров показывает, что он будет  $\sim 5 \text{ м}^3$ .

Если полученный результат сравнить с данными LCROSS (Colaprete et al, 2010) по количеству выброшенной при взрыве воды ( $\sim 155$  кг) и ее содержания в

продуктах выброса (5.6%), то количество выброшенного грунта будет составлять  $\sim 2.8$  т, т.е. 0.008 от расчетного значения – 350 т (LCROSS – Wikipedia), а энергия взрыва, выраженная в тротиловом эквиваленте тринитротолуола (ТНТ), не 2 тонны ТНТ, а всего 14 кг ТНТ. Максимальную глубину воронки можно определить, воспользовавшись данными (Gladstone et al., 2010; Hermalyn et al., 2012), взяв ее минимальный диаметра – 25 м. При минимальной плотности грунта  $1110 \text{ кг/м}^3$  (Naune et al., 2017), объем выброшенного грунта с поверхности кратера Кабео составит  $2.52 \text{ м}^3$ . Аппроксимируя воронку шаровым сегментом, можно определить ее глубину, которая будет равна 0.01 м. Последнее означает, что удар ступени Centaur в стенку кратера Кабео произошел не под углом  $90^\circ$  к траектории падения, а меньшем  $\sim 5^\circ$ . В работе (Marshall W. et al, 2012) этот угол составляет  $3.67 \pm 2.3^\circ$ . В результате объем выброса продуктов взрыва оказался на два порядка меньше расчетного и его не увидели с земли с помощью телескопов.

То, что угол соударения последней ступени со стенкой кратера оказался мал, связано с тем, что последняя ступень после торможения совершала, согласно (Hermalyn et al, 2012), неуправляемый полет. При этом присутствовало ее вращение относительно траектории падения (грубо говоря, ступень стала «кувыркаться» относительно центра масс с малой скоростью), которое было вызвано поперечной составляющей тормозного импульса и импульсом, полученным при разделении ступени с сопровождающим аппаратом (SS), на котором были установлены спектрометры. В результате получился скользящий удар.

Кроме того, вращение ступени при старте аппарата SS могло повлиять на его траекторию, т.е. траектория ступени и аппарата SS могли не совпадать, что повлияло на точность определения содержания воды в облаке взрыва. Оценка угловой скорости вращения ступени  $\omega$  за 9.67 часов дает  $\omega = 4.3 \cdot 10^{-5}$  рад/с, т.е., несмотря на малую скорость вращения ступени относительно центра масс, за столь длительное время падения ступени произошел разворот ее оси относительно центра масс. А так как ступень была достаточно длинная (12.68 м), при соприкосновении ее со стенкой кратера, которая тоже имела угол наклона по отношению к «идеальной» лунной сфере (perfect lunar sphere), возник момент относительно центра масс, который привел к скользящему удару основной массы.

При торможении ступени в момент ее скольжения по поверхности кратера (путь торможения составил порядка двух длин ступени) произошел сильный разогрев его поверхности до 1000 К (Gladstone et al, 2010), что вызвало плавление льда в трещинах и последующее испарение воды в облако выброса.

В качестве прибора, регистрирующего содержание воды в облаке взрыва на посадочном устройстве или луноходе, можно использовать, как и в случае экспе-

римента LCROSS), ИК-спектрометры, работающие в среднем диапазоне ИК-излучения (one mid-infrared spectrometer) от 2,5—50 мкм (рис.2).

Таким образом, осуществив посадку в районе №2 внутри кратера Манцини (Дьячкова, 2017), с помощью предлагаемых выше способов можно определить содержание внутренней воды в его стенке. При уточнении места посадки появляется еще один критерий – угол наклона стенки к основанию кратера. Желательно, чтобы он был близок к  $90^\circ$ .

Полученные данные по содержанию внутренней воды в кратере Манцини совместно с данными бомбардировки LCROSS позволят выявить некоторые тенденции в распределении внутренней воды в зависимости от широты Луны, уточнить широты, начиная с которых запасы внутренней воды достаточны для надежного обеспечения экипажа ЛБ.

Конечно, одноразовая бомбардировка кратера Манцини не позволяет накопить статистический материал по внутренней воде. Но используя данные бомбардировки LCROSS, можно выявить некоторые тенденции в распределении внутренней воды в зависимости от широты Луны.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные выше оценки мест нахождения внутренней воды в кратерах Луны и предлагаемые экспериментальные подходы ее обнаружения позволяют количественно оценить запасы внутренней воды, находящейся в стенках кратеров. В работе показано, что бомбардировка стенок кратеров с мест посадки КА намного эффективнее, чем бомбардировка с орбиты Луны как в случае LCROSS. Рассмотренное в работе (Дьячкова и др., 2017) место посадки №2 в кратере Манцини может послужить в качестве отправной точки для поиска внутренней воды.

При выборе глубины поиска внутренней воды в качестве отправной точки была использована глубина, при которой произошла бомбардировка в эксперименте LCROSS. Реально внутренняя вода может находиться на меньших глубинах. С этой точки зрения предлагаемое бомбардировочное устройство позволяет провести поиски воды на меньших глубинах в том же кратере Манцини, что является несомненным его преимуществом.

Предлагаемые взрывные технологии настолько хорошо отработаны в условиях земли, в том числе и проблемы безопасности, связанные с их использованием и транспортировкой, что надежность их применения ничуть не уступает надежности манипуляторов или буровых установок, которые широко используются при космических исследованиях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН Китая в рамках научного проекта № 19-52-53018.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Ударные кратеры на Луне и планетах [Текст] / А.Т. Базилевский [и др.]; – М.: Наука, 1983. – 200 с.
2. *Войткевич Г.В.* Основы учения о биосфере: [Текст] / Г.В. Войткевич, В.А. Вронский. – М.: Просвещение, 1989. – 160 с.
3. Выбор мест посадки космического аппарата Луна-25 в окрестности южного полюса Луны / М.В. Дьячкова [и др.] // *Астрономический вестник*. – 2017. – № 3. – С. 204-215.
4. Иванов, А.В. Летучие компоненты в образцах лунного реголита. Обзор [Текст] / А.В. Иванов // *Астрономический вестник*. – 2014. – № 2. – С. 120-138
5. Каталог камня, Гранит плюс [Электронный ресурс] // – Режим доступа: <http://www.granitplys.ru/catalogue/>
6. Козлова, Е.А. О природе аномальных образований в полярных областях Меркурия и Луны [Текст] / Е.А. Козлова // *Астрономический вестник*. – 2004. – № 5. – С. 1–13.
7. Куров, В.Д. Основы проектирования пороховых ракетных снарядов: [Текст] / В.Д. Куров, Ю.М. Должанский. – М.: Оборонгиз, 1961. – 247 с.
8. Митрофанов, И.Г., Вода в полярных областях Луны: результаты картографирования нейтронным телескопом ЛЕНД / И.Г. Митрофанов, А.Б. Санин, М.Л. Литвак // *Докл. РАН*. 2016. – № 6. – С. 660–663.
9. Родионов, В.Н. Основы геомеханики: [Текст] / В.Н. Родионов, И.А. Сизов, В.М. Цветков. – М.: Недра, 1986. – 301 с.
10. Стрелов, К.К. Структура и свойства огнеупоров: [Текст] / К.К. Стрелов. – М.: Металлургия, 1972. – 216 с.
11. Clark P.E., Malphrus B., Reuter D., et al. Broadband InfraRedCompact High-resolution Exploration Spectrometer: Lunar Volatile Dynamics for the Lunar Ice Cube Mission // *Smallsat Conference 2016 Clarketal Lunar Ice Cube August 2016*.
12. Coghlan A. Planet Earth makes its own water from scratch deep in the mantle // *DAILY NEWS*. 27 January 2017.
13. Colaprete A., Schultz P., Heldmann J., et al. Detection of Water in the LCROSS Ejecta Plume // *Science*. 2010. V.330. № 6003. P.463–468. - the concentration of water to be "5.6 ± 2.9% by mass."
14. Crotts A. Water on the Moon // *The Space Review*. 2009. Monday, October 12.
15. Crotts A.P.S. Water on The Moon, III. Volatiles & Activity // *Astronomical Review*. 2012. V.7. P. 53-94.
16. Futera Z., Yong X., Pan Y., Tse J.S., English N.J. Formation and properties of water from quartz and hydrogen at high pressure and

temperature // *Earth and Planetary Science Letters*. 2017. V.461. 1 March. P. 54–60.

17. Gladstone G.R., Herley D.M., Retherford K.D., et al. LRO-LAMP observations of the LCROSS Impact Plume // *Science*. 2010. V. 330. P.472-476.
18. Hayne P.O., Bandfield J.L., Siegler M.A., Vasavada A.R., Ghenet R.R., Williams J.-P., Greenhagen B.T., Aharonson O., Elder C.M., Lucey P.G., and Paige D.A. Global regolith thermophysical properties of the Moon from the Diviner Lunar Radiometer Experiment // *J. Geophys. Res.: Planets* 2017. V.122. Iss.12. P. 2371–2400.
19. Hermalyn B., Schultz P.H., Shirley M., Ennico K., Colaprete A. Scouring the surface: Ejecta dynamics and the LCROSS impact event // *Icarus*. 2012. V.218, pp.654-665.
20. Hughes D.W. Meteorite falls and finds: some statistics // *Meteoritics*. 1981. V.16. No.3. P.269-281.
21. LCROSS – Wikipedia.
22. Marshall W., Shirley M., Moratto Z., et al. Locating the LCROSS Impact Craters // *Space Sci. Rev*. 2012. V.167. P.71–92
23. Neish C. D., Bussey D. B. J., Spudis P., et al. The nature of lunar volatiles as revealed by Mini-RF observations of the LCROSS impact site // *J. Geophys. Res*. 2011. V. 116. E01005.
24. Shinozaki A., Hirai H., Kagi H., et al. Reaction of forsterite with hydrogen molecules at high pressure and temperature // *Physics and Chemistry of Minerals*. 2012. V.39, Iss.2, pp.123-129.
25. Shinozaki A., Kagi H., Noguchi N., Hirai H., et al. Formation SiH4 and H2O by dissolution of quartz in H2 fluid under high pressure and temperature // *Am. Mineral*. 2014. V.99, pp.1265-1269.

*Матвеев Юрий Игнатьевич* – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института биохимической физики Российской академии наук (ИБХФ РАН) email: [yu.matveev@mail.ru](mailto:yu.matveev@mail.ru).

*Костенко Валерий Иванович* – Доктор технических наук, академик Российской академии естественных наук, Заведующий лабораторией технологического обеспечения эксперимента, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт космических исследований» РАН, тел. (095)3331577 e-mail: [kostenko@iki.rss.ru](mailto:kostenko@iki.rss.ru).

*Хмелев Владимир Николаевич* – доктор технических наук, профессор, Заместитель директора по научной работе, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, (3854)432581, e-mail: [vnh@bti.secna.ru](mailto:vnh@bti.secna.ru)



**Рис. 1. Схема кратера с уплощенным дном:**

**1** - реголит на дне кратера; **2** - ударный расплав на дне кратера, образующий непроницаемую для воды подложку; **3** - зона трещин.

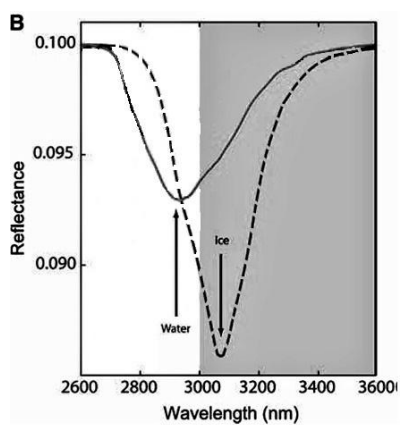


Рис. 2. Область длин волн (выделена серым цветом), в которой наблюдается максимальное поглощение ИК-волн водяным льдом по данным (Clark P.E., 2016).

# PROBLEMS OF SEARCHING FOR INTERNAL WATER ON THE MOON

Yu. I. Matveev<sup>1</sup>, V.I. Kostenko<sup>1</sup>, V.N. Khmelev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Federal State Budgetary Institution of Science "Space Research Institute" of the Russian Academy of Sciences, Moscow

<sup>2</sup> Biysk Institute of Technology (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Altai State Technical University named after I.I. Polzunova", Biysk.

Abstract – This article discusses the effect of cracks formed during the explosion of a meteorite on the penetration of water formed in the depths of the moon - the internal water in the region of the walls and shaft of the crater. Instruments and equipment are proposed for determining the content of inland water in the craters available for landing lunar probes.

Key words: craters of the Moon, internal water, cracks in the walls of craters, zones of internal water

## REFERENCES

1. Impact Craters on the Moon and Planets [Text] / Bazilevsky A.T. [and other]; – M.: The science, 1983. – 200 p.
2. Voytkovich G.V. Fundamentals of Biosphere Studies: [Text] / G.V. Voytkovich, V.A. Vronsky. – M.: Education, 1989. – 160 p.
3. Selection of landing sites for the Luna-25 spacecraft near the south pole of the Moon / M.V. Dyachkova [and other] // Astronomical Gazette. – 2017. – № 3. – P. 204-215.
4. Ivanov, A.V. Volatile components in samples of the lunar regolith. Overview [Text] / A.V. Ivanov // Astronomical Gazette. – 2014. – № 2. – P. 120-138
5. Stone catalog, Granite plus [Electronic resource] // – Access mode: <http://www.granitplys.ru/catalogue/>
6. Kozlova, E.A. On the nature of anomalous formations in the polar regions of Mercury and the Moon [Text] / E.A. Kozlova // Astronomical Gazette. – 2004. – № 5. – P. 1–13.
7. Kurov, V.D. Basics of powder rocket design: [Text] / V.D. Kurov, Yu.M. Dolzhansky. – M.: Oborongiz, 1961. – 247 p.
8. Mitrofanov, I.G., Water in the polar regions of the moon: mapping results of the LEND neutron telescope / I.G. Mitrofanov, A.B. Sanin, M.L. Litvak // Report. RAS. 2016. – № 6. – P. 660–663.
9. Rodionov, V.N. Basics of Geomechanics: [Text] / V.N. Rodionov, I.A. Sizov, V.M. Cvetkov. – M.: Nedra, 1986. – 301 p.
10. Strelov, K.K. Структура и свойства огнеупоров: [Text] / K.K. Strelov. – M.: Metallurgy, 1972. – 216 p.
11. Clark P.E., Malphrus B., Reuter D., et al. Broadband InfraRedCompact High-resolution Exploration Spectrometer: Lunar Volatile Dynamics for the Lunar Ice Cube Mission // Smallsat Conference 2016 Clarketal Lunar Ice Cube August 2016.
12. Coghlan A. Planet Earth makes its own water from scratch deep in the mantle // DAILY NEWS, 27 January 2017.
13. Colaprete A., Schultz P., Heldmann J., et al. Detection of Water in the LCROSS Ejecta Plume // Science. 2010. V.330. № 6003. P.463–468. - the concentration of water to be "5.6 ± 2.9% by mass."
14. Crotts A. Water on the Moon // The Space Review. 2009. Monday, October 12.
15. Crotts A.P.S. Water on The Moon, III. Volatiles & Activity // Astronomical Review. 2012. V.7. P. 53-94.
16. Futera Z., Yong X., Pan Y., Tse J.S., English N.J. Formation and properties of water from quartz and hydrogen at high pressure and temperature // Earth and Planetary Science Letters. 2017. V.461. 1 March. P. 54–60.
17. Gladstone G.R., Herley D.M., Retherford K.D., et al. LRO-LAMP observations of the LCROSS Impact Plume // Science. 2010. V. 330. P.472-476.
18. Hayne P.O., Bandfield J.L., Siegler M.A., Vasavada A.R., Ghent R.R., Williams J.-P., Greenhagen B.T., Aharonson O., Elder C.M., Lucey P.G., and Paige D.A. Global regolith thermophysical properties of the Moon from the Diviner Lunar Radiometer Experiment // J. Geophys. Res.: Planets 2017. V.122. Iss.12. P. 2371–2400.
19. Hermalyn B., Schultz P.H., Shirley M., Ennico K., Colaprete A. Scouring the surface: Ejecta dynamics and the LCROSS impact event // Icarus. 2012. V.218, pp.654-665.
20. Hughes D.W. Meteorite falls and finds: some statistics // Meteorities. 1981. V.16. No.3. P.269-281.
21. LCROSS – Wikipedia.
22. Marshall W., Shirley M., Moratto Z., et al. Locating the LCROSS Impact Craters // Space Sci. Rev. 2012. V.167. P.71–92
23. Neish C. D., Bussey D. B. J., Spudis P., et al. The nature of lunar volatiles as revealed by Mini-RF observations of the LCROSS impact site // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. E01005.
24. Shinozaki A., Hirai H., Kagi H., et al. Reaction of forsterite with hydrogen molecules at high pressure and temperature // Physics and Chemistry of Minerals. 2012. V.39, Iss.2, pp.123-129.
25. Shinozaki A., Kagi H., Noguchi N., Hirai H., et al. Formation SiH4 and H2O by dissolution of quartz in H2 fluid under high pressure and temperature // Am. Mineral. 2014. V.99, pp.1265-1269.

Matveev Yury Ignatievich - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of the Institute of Biochemical Physics of the Russian Academy of Sciences (IBPh RAS) e-mail: [yu.matveev@mail.ru](mailto:yu.matveev@mail.ru).

Kostenko Valery Ivanovich - Doctor of Technical Sciences Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Head of the Laboratory Technological Support of the Experiment, Federal State Budgetary Institute of Science Space Research Institute of RA, tel. (095) 3331577 e-mail: [kocstenko@iki.rss.ru](mailto:kocstenko@iki.rss.ru)

Khmelev Vladimir Nikolayevich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director for Research, Biysk Technological Institute (branch) Altai State Technical University, (3854) 432581, e-mail: [vnh@bti.secna.ru](mailto:vnh@bti.secna.ru)