

## КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ МАССЫ ВОДЫ ЛУННОЙ КОРЫ. ОЦЕНКА РЕНТАБЕЛЬНОСТИ ДОБЫЧИ ВОДЫ НА ЛУНЕ ЧЕЛОВЕКОМ

Елохин И.В.

г. Самара, МБОУ Лицей «Технический» им. С.П. Королева, 6 «Б» класс

Руководитель: Филиппов Ю.П., г. Самара, Самарский университет, к.ф.-м.н.,  
доцент кафедры ОТФ

Планета Земля – это уникальное тело не только в Солнечной системе, но и во всей видимой части Вселенной с особыми физико-химическими свойствами, жидкой водой на поверхности и кислородная атмосфера. Прежде всего это единственное место во Вселенной, где достоверно существует разумная жизнь!

К сожалению, для земной жизни существует множество угроз [1][20], это невольно подталкивает человечество к освоению космоса. Кроме того, к этому нас подталкивает ограниченность земных ресурсов и необходимость их добычи в космосе [5]. Ближайшим таким телом, очевидно, является Луна. Одной из главных проблем, существующих на пути её колонизации, является проблема воды на Луне. Ведь без воды невозможна жизнь, а её доставка с Земли будет, очевидно очень дорогим удовольствием. Открытия XXI века [6,7], связанные с наличием источников воды на Луне в корне изменили отношение ведущих космических держав к колонизации Луны. Можно утверждать, что началась «вторая гонка» в освоении Луны.

В связи со сказанным, главной целью настоящей работы является:

1. Выполнение расчёта полной массы воды в твёрдой фазе на лунных полюсах. Оценка массы воды, содержащиеся в минеральных соединениях. Оценка рентабельности использования водных ресурсов Луны человеком.

2. Основными задачами настоящей работы является следующие положения:

3. Определение модели ударного лунного кратера. Расчёт объёма полости кратера.

4. Оценка массы льда расположенного внутри полярного кратера, как функции селеноцентрической широты.

5. Расчёт полной массы запасов воды в полярных областях Луны.

6. Оценка массы воды, содержащейся в минеральных гранулах по всей поверхности Луны.

7. Оценка рентабельности добычи воды на Луне человеком.

### 1. Природа луны и её водные ресурсы

#### 1.1. Современные представления о Луне

Общие сведения. Луна – это естественный спутник Земли (см. рис. 1), самый

близкий к Солнцу спутник планеты, второй по яркости объект на земном небосводе после Солнца и пятый по размерам естественный спутник классической планеты Солнечной системы [8].

Внутреннее строение Луны. В теле Луны можно выделить следующие основные зоны [9]: кора, верхняя мантия (астеносфера), средняя мантия, нижняя мантия и ядро (см. рис. 2). Поверхность Луны покрыта реголитом – смесью тонкого слоя пыли и скалистых обломков, образующихся в результате столкновений метеоритов с лунной поверхностью. Толщина слоя реголита составляет от доли метров до десятков метров.

#### 1.2. Современная карта распределения водных ресурсов Луны

Гипотеза Юри и новые факты. Еще в шестидесятые годы XX столетия американский планетолог, профессор Гарольд Юри после тщательного анализа снимков спутника, сделанных американскими автоматическими межпланетными станциями (АМС) (см. рис. 4) сформулировал гипотезу, согласно которой на поверхности Луны, в прошлом текли самые настоящие водные реки.

Исследование лунной коры с помощью АМС. Новым важным этапом в изучении Луны и поиске на ней водяного льда стал запуск двух американских автоматических межпланетных станций (АМС). 9 октября 2009 года, в рамках программы исследования Луны, был проведён уникальный эксперимент [13]. АМС LCROSS был направлен в кратер Кабео диаметром 98 км и глубиной 4 км расположенный в 100 км от южного полюса и никогда не освещаемый Солнцем. Спектрометры АМС LCROSS уверенно показали наличие частиц водяного льда.

Позже, в марте 2010 года американские ученые с использованием данных индийского космического аппарата «Чандраян-1» обнаружили залежи водяного льда в более чем сорока кратерах северного полюса Луны. По оценкам ученых, общая масса залежей водяного льда здесь составляет более чем 600 миллионов тонн.

В 2012 году с помощью АМС LRO обнаружили [14] в кратере Шакleton присутствие водяного льда. По оценкам специалистов, на Луне могут существовать запасы

воды с общей массой, равной  $102 \div 103$  миллионов тонн.

Обнаружение воды внутри минералов. В июле 2017 года вышла в свет статья [7], в которой говорится об открытии на Луне больших запасов воды, заключённой внутри минерального соединения. По данным этого космического аппарата была построена первая карта распределения водных ресурсов по поверхности Луны, представленная на рис. 4.

Исследователи сосредоточили свое внимание на пирокластической породе, которая имеет вулканическое происхождение. Исследования лунных пород, доставленных на Землю с помощью космических аппаратов «Аполлон-15» и «Аполлон-17» показали, что большое количество воды заперто в стеклянных «бусинах» внутри пирокластической породы. Породы подобного рода на Луне достаточно много, а значит, и воды там тоже много.

### 1.3. Перспективные методы добычи воды на Луне

Прямая добыча водяного льда – под прямым методом добычи водяного льда подразумевается метод, который связан с непосредственным извлечением залежей водяного льда из поверхностного слоя лунной коры в околополярных областях.

Метод естественной дистилляции – метод, основан на естественной дистилляции водяного льда с использованием парникового эффекта и энергии Солнца. В июне 2015 года планетологи из США и Российской Федерации предложили новый метод добычи воды на спутнике Земли при помощи дистилляции (см. рис.6). Суть метода в том, что с восходом Солнца начинается интенсивный нагрев поверхностных слоёв лунной коры и водяного льда, находящегося там же. Он начинает интенсивно превращаться в водяной пар. Пар, скапливающийся в них, будет оседать на стенках теплицы.

Метод интенсивной возгонки водяных паров из пирокластических пород с использованием искусственного микроволнового излучения. Данный метод подразумевает, что с помощью спецтехники, будет производиться добыча пирокластической породы. С помощью специальных установок, напоминающих гигантские микроволновые печи, пирокластическая порода в больших количествах содержащей воду в минерализованном виде будет подвергаться облучению электромагнитными волнами микроволнового диапазона. Вода начнёт интенсивно испаряться. Собирая водяной пар из этих установок и охлаждая его, можно получить жидкую воду. Преимуществом

данного метода является гораздо более высокий уровень производительности. Кроме того, запасы пирокластической породы в лунной коре огромны, следовательно, и запасы воды также велики. Главным недостатком этого метода является высокое энергопотребление такой микроволновой установки.

## 2. Количественный анализ массы воды, оценка рентабельности её добычи

### 2.1. Формулировка модели ударного лунного кратера

Ударный кратер будем моделировать вертикальным круглым цилиндром радиуса  $R$  и высоты  $H$  (см. рис. 8). Объём цилиндра определяется выражением вида:

$$V_c = S_r H = \pi R^2 H, \quad (1)$$

здесь  $S_r$  – площадь основания цилиндра (круга). Будем полагать, что геометрический центр данного цилиндра находится на селеноцентрической широте  $\varphi$  (см. рис. 9). Солнечный свет будем представлять пучком параллельных лучей распространяющихся параллельно плоскости эклиптики, от Солнца.

### 2.2. Оценка массы льда расположенного внутри кратера

Вычислим максимально допустимую массу водяного льда, которая может содержаться в ударном кратере, на селеноцентрической широте  $\varphi$ .

Для этого рассмотрим процесс падения солнечных лучей на кратер. Солнечный свет несёт с собой энергию, которая при поглощении её веществом тратится на нагрев тела, плавление и сублимацию его вещества. Как известно возраст Луны и Солнца составляет не мене 4.5 млрд. лет. В течение такого большого промежутка времени вода должна испариться полностью со всех поверхностей Луны, открытых для солнечных лучей. Следовательно, лёд может сохраниться лишь в неосвещённой части лунного кратера. Определим минимальное значение угла падения ( $\alpha$ ) световых лучей на кратер, находящийся на освещённой Солнцем стороне Луны, на селеноцентрической широте  $\varphi$  (см. рис. 10). Положим, что плоскости эклиптики и лунного экватора совпадают, а солнечные лучи распространяются параллельно данным плоскостям.

Согласно рис. 10 угол падения  $\alpha$  образован падающим лучом ОК и продолжением радиуса планеты СК. Заметим также, что прямая QQ' параллельна ОК. Следовательно, к данным прямым прямая СК является

секущей. Как известно из курса геометрии углы при параллельных прямых и секущей должны быть одинаковыми. Следовательно, угол  $\varphi = \alpha$ , то есть селеноцентрическая широта местности равна углу падения световых лучей от Солнца в полдень.

Далее мы определим долю от полного объёма ударного кратера, которая будет находиться в тени от солнечных лучей. Что бы решить поставленную задачу мы перейдём к рассмотрению кратера в форме параллелепипеда со сторонами  $a \times a \times H$ , объём которого равен объёму кратера-цилиндра, при этом их высоты  $H$  одинаковые, а основанием параллелепипеда является квадрат со стороной  $a$ .

Определим сторону основания  $a$ . Как известно, объём параллелепипеда с квадратным основанием  $a$  и высотой  $H$  представляется выражением вида:

$$V_i = a^2 H. \quad (2)$$

Поскольку, объёмы цилиндра и параллелепипеда одинаковые, то приравняем правые части выражений (1) и (2). В результате получим

$$\pi R^2 H = a^2 H, \Rightarrow a = \sqrt{\pi} R. \quad (3)$$

Рассмотрим данный параллелепипед, находящийся на селеноцентрической широте  $\varphi$ . Световые лучи от Солнца будут падать на верхнюю границу кратера под углом  $\varphi$  (см. рис. 11). Часть объёма кратера будет находиться в тени, следовательно, в этой области может находиться лёд. Определим эту долю от полного объёма кратера. Если дно кратера частично освещается (см. рис. 11. а), то в этом случае область тени, заключённая внутри кратера – параллелепипеда, является треугольной призмой, а боковые грани – прямоугольники, плоскости которых перпендикулярны основаниям (см. рис. 11. а). Объём данной фигуры представляется в виде:

$$V_{\text{тн}} = S_{\text{т}} a, \quad (4)$$

где  $S_{\text{т}}$  – площадь прямоугольного треугольника, находящегося в основании призмы. Согласно рис. 11. а, данную площадь можно представить в виде:

$$S_{\text{т}} = \frac{1}{2} EC \cdot CB = \frac{1}{2} (H \cdot \operatorname{tg} \varphi) H, \quad (5)$$

здесь мы учли, что  $EC = H \cdot \operatorname{tg} \varphi$ ,  $CB = H$ . В итоге объём  $V_{\text{тн}}$  представляется выражением:

$$V_{\text{тн}} = \frac{1}{2} H^2 a \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (6)$$

Найдём искомую долю  $x_1$

$$x_1 = V_{\text{тн}} / V_{\text{н}} = \frac{1}{2} \left( \frac{H}{a} \right) \operatorname{tg} \varphi. \quad (7)$$

Рассмотрим вторую ситуацию. Когда частично освещаются лишь боковые стенки кратера, дно остаётся в тени (см. рис. 11. б). В данном случае область, заполняемая солнечным светом, представляет собой треугольную призму, площадь основания которой есть

$$S_i = \frac{1}{2} f a. \quad (8)$$

Здесь мы учли, что  $AE = f$ . Кроме того, из треугольника  $ABE$  следует, что

$$f = \frac{AB}{\operatorname{tg} \varphi} = \frac{a}{\operatorname{tg} \varphi}. \quad (9)$$

Определим объём части кратера, заполненной светом:

$$V_i = S_i a = \frac{1}{2} \frac{a^3}{\operatorname{tg} \varphi}. \quad (10)$$

Следовательно, часть кратера, приходящаяся на тень, есть призма, в основании которой находится трапеция, объём которой

$$V_{\text{тн}} = V_{\text{н}} - V_i = a^2 \left( H - \frac{1}{2} \frac{a}{\operatorname{tg} \varphi} \right). \quad (11)$$

Найдём искомую долю  $x_2$

$$x_2 = V_{\text{тн}} / V_{\text{н}} = \left( 1 - \frac{1}{2} \frac{a}{H \cdot \operatorname{tg} \varphi} \right). \quad (12)$$

Пограничное состояние между указанными ситуациями достигается при условии  $\varphi = \varphi_0$ . Последний параметр должен удовлетворять условию:

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{a}{H}, \Rightarrow \varphi_0 = \operatorname{arctg} \left( \frac{a}{H} \right). \quad (13)$$

В итоге искомую долю  $x$  можно представить в виде:

$$x = \begin{cases} \frac{1}{2} \left( \frac{H}{a} \right) \operatorname{tg} \varphi, & \text{при } \varphi \leq \varphi_0, \\ \left( 1 - \frac{1}{2} \frac{a}{H \cdot \operatorname{tg} \varphi} \right), & \text{при } \varphi > \varphi_0. \end{cases} \quad (14)$$

Далее мы будем полагать, с учётом равенства объёмов круглого и квадратного кратеров, что искомая доля  $x$  является одинаковой для кратеров указанных формул. Следовательно объём тени цилиндрического кратера можно записать в виде:

$$V_{sh} = xV_c, \quad (15)$$

где  $V_c$  – объём цилиндрического кратера, определяемый выражением (1). Далее нетрудно определить максимальную возможную массу водяного льда в кратере:

$$M_i = \rho_i V_{sh} = \rho_i \pi R^2 H x, \quad (16)$$

где  $x$  определяется выражением (14). На рисунке А.1 приложения А представлен график зависимости полной максимальной массы водяного льда кратера от селеноцентрической широты  $\phi$ , при  $R=0.5$  км,  $H=0.3$  км и  $\rho=920$  кг/м<sup>3</sup>. Из рисунка видно, что предельное значение искомого параметра составляет  $2.2 \cdot 10^{11}$  кг. При этом темпы изменения искомой массы больше при значениях  $\phi > \phi_0$ .

### 2.3. Расчёт полной массы воды полярных областей Луны

В настоящем параграфе будет выполнен расчёт максимально возможной массы водяного льда, запасённого в полярных областях Луны. Поверхность Луны будем представлять, как поверхность, покрытую кратерами с диаметром один километр, один из которых приходится на каждый 100 км<sup>2</sup>. Будем полагать, что лёд остаётся лишь в тех кратерах, объём тени в полдень которых составляет не менее 50% от объёма кратера. Эта ситуация соответствует значению угла падения световых лучей в полдень  $\Phi = \Phi_0$ .

Как показывают исследования [15] для кратеров с диаметром один км отношение его диаметра к глубине составляет  $a/H=10:3$ , что соответствует значению угла

$$\Phi_0 = \arctg(10:3) = 73^\circ. \quad (17)$$

Следовательно, лишь кратеры, находящиеся на широтах  $[-90^\circ, -73^\circ] \cup [73^\circ, 90^\circ]$  могут содержать лёд. Определим суммарную площадь полярных областей поверхности Луны. Для этого заметим, что данные области имеют форму шарового сектора с углом раствора, равным  $\alpha = 90^\circ - \Phi_0$ . Тогда с использованием формулы для площади шарового сектора [16]

$$S_{шс} = 2\pi R^2 (1 - \cos\alpha), \quad (18)$$

можем записать полную площадь северной и южной полярных областей:

$$S_{по} = 4\pi R_{л}^2 (1 - \cos\alpha) = 1,659 \cdot 10^6 \text{ км}^2. \quad (19)$$

Следовательно, общее количество кратеров с указанным диаметром равно

$$N_k = \frac{S_{по}}{100} = 1.659 \cdot 10^4. \quad (20)$$

В указанных кратерах объём тени будет составлять от 50 до 100%, следовательно, среднее значение данного интервала – 75%. Т.о., полная масса водяного льда, запасённая в кратерах данных полярных областей, есть

$$M_{пол} = 0.75 \rho_i \pi R^2 H N_k = 2.7 \cdot 10^{15} \text{ кг}. \quad (21)$$

Последнее значение следует рассматривать как верхнее ограничение на полную массу водяного льда, находящегося в околополярных кратерах Луны. Согласно оценкам специалистов, полная масса водяного льда в полярных кратерах может достигать значений  $10^{12}$  кг [12]. Таким образом, наш новый результат не противоречит прогнозам предшественников  $2,7 \cdot 10^{15}$  кг.

### 2.4. Оценка массы воды, содержащейся в минеральных гранулах поверхности Луны

Как показывают исследования [7], часть воды на Луне содержится в связанном состоянии, в форме гранул пирокластической породы. Согласно данным наблюдений, полученным с помощью космических аппаратов, пирокластические породы чаще всего встречаются внутри кратеров средних размеров – с диаметром порядка одного километра.

Результаты [7] химических экспериментов с пирокластическими породами указывают на то, что массовая доля воды в этих породах не превосходит значения

$$\eta = \frac{m(\text{H}_2\text{O})}{m(\text{ПП})} = 0.0005. \quad (22)$$

Вычислим общее количество кратеров поверхности Луны с диаметром 1 км, с учётом того, что один такой кратер в среднем приходится на 100 км<sup>2</sup> поверхности Луны. Будем полагать, что Луна является шаром, следовательно, площадь всей её поверхности определится выражением:

$$S_{л} = 4\pi R_{л}^2 = 3.80 \cdot 10^7 \text{ км}^2. \quad (23)$$

Следовательно, общее количество таких кратеров на поверхности Луны есть

$$N_{пол} = \frac{S_{л}}{100} = 3.80 \cdot 10^5. \quad (24)$$

Данные наблюдений [17] показывают, что толщина слоя пирокластических пород, слагающих поверхность данных кратеров заключена в интервале 4–7 метров. В качестве среднего значения толщины слоя будем принимать величину

$$\bar{h} = 5 \text{ м}. \quad (25)$$

Следовательно, теперь нетрудно определить полную массу воды, заключённую внутри пирокластических пород:

$$M_B = N_{\text{пол}} \pi R_K^2 \bar{h} \rho_{\text{л}} \eta = 1.34 \cdot 10^{12} \text{ кг.} \quad (26)$$

Полученный результат уверенно согласуется с оценками предшественников –  $10^9$  кг согласно работе [17].

### 2.5. Оценка себестоимости добычи воды на Луне в рамках её основных методов

Прежде всего отметим, что в литературе существенно разнятся оценки стоимости доставки 1 кг груза на поверхность Луны. От 20 тысяч долларов [18], до 75–100 долларов на 2050 год [19]. В качестве опорной оценки, которая будет использована в последующем анализе, возьмём значение 10 тысяч долларов. Выполним оценку себестоимости добычи жидкой воды с использованием метода плавления. Лёд на Луне в полярных областях находится при температуре  $t_0 = -100^\circ\text{C}$ . Для того, чтобы один килограмм льда превратить в жидкую воду необходимо количество теплоты, равное

$$Q = \lambda_{\text{л}} m_0 + c_{\text{л}} m_0 (t_{\text{пл}} - t_0), \quad (27)$$

где  $\lambda_{\text{л}}$  – удельная теплота плавления льда (её значение равно 340 кДж/кг),  $m_0 = 1$  кг,  $c_{\text{л}} = 2.1$  кДж/(кг·°C) – удельная массовая теплоёмкость водяного льда. Численный расчёт теплоты  $Q$  даёт значение 550 кДж. Очевидно, что плавление будет происходить в колориметр – ёмкости, стенки которой обладают низкой теплопроводностью (порядка 20%), значит, в колориметр необходимо поставить 660 кДж. Данную теплоту легче всего доставить с помощью электрической цепи. Основным источником электрической энергии на Луне является солнечный свет который перерабатывается солнечными батареями с КПД равным 10%, следовательно солнечным батареям необходимо переработать 6,6 МДж солнечной энергии средняя сегодняшняя стоимость 1 кВт·ч = 3,6 МДж составляет 0.1 доллара. Учитывая, что стоимость солнечной энергии на Луне должна быть существенно дороже предположим в 100 раз, следовательно, стоимость лунного 1 кВт·ч будет составлять 10 долларов. Следовательно, стоимость плавления льда составит

$$C_1 = \frac{660}{3600} 10\$ = 1,8\$ \approx 2\$. \quad (28)$$

Не менее дорогой составляющей добычи воды данным методом будет механизированная добыча и доставка льда из кратера к колориметру. Предположим, что лёд добывается и доставляется электрокаром с мощностью двигателя 100 кВт. Будем полагать, что время затрачиваемое на доставку 10 тонн водяного льда составляет 2 часа, тогда при условии, что всё указанное время

двигатель электрокара работает на предельной мощности, полная затраченная электроэнергия составит 200 кВт·ч, следовательно, один рейс электрокара в автономном режиме будет стоить 2 тысячи долларов. Необходимо также учесть техобслуживание и периодический контроль за транспортом, которые оценим таким же значением. Следовательно, стоимость 10 тонн льда будет составлять 6 тысяч долларов, а 1 кг – 0,6 доллара. В итоге стоимость добычи одного килограмма жидкой воды данным методом составит приблизительно 2,5 доллара за 1 кг. Это существенно меньше значения стоимости доставки 1 кг воды с Земли на Луну ракетным способом, что указывает на рентабельность данного метода и необходимости его детальной проработки.

Рассмотрим второй метод добычи жидкой воды путём её возгонки из пирокластических пород. Прежде всего, необходимо доставлять данное вещество из кратеров в колориметр, в котором необходимо осуществлять возгонку воды. Следовательно, в стоимость воды должна войти стоимость добычи и доставки данной породы, которая равна 0.6 доллара за килограмм, как и в предыдущем случае. Возгонка водяных паров будет активно протекать при температуре  $t_1 = 500^\circ\text{C}$ . Для этого необходимо нагреть данную породу до указанной температуры от первоначальной  $t_0 = -50^\circ\text{C}$ . При этом необходимо количество теплоты

$$Q = c_{\text{пн}} M_{\text{пн}} (t_1 - t_0), \quad (29)$$

где  $c_{\text{пн}}$  – удельная массовая теплоёмкость пирокластических пород в различных источниках теплоёмкость данных пород существенно различается (от 800 до 1200 Дж/(кг·°C)), поэтому в качестве опорного значения примем величину – 1000 Дж/(кг·°C).  $M_{\text{пн}}$  – масса нагреваемой пирокластической породы. При этом тепловые потери колориметра будем считать по-прежнему равные 20%. Следовательно, количество теплоты необходимое для подачи в колориметр будет равно

$$Q_1 = 1.2 c_{\text{пн}} \frac{m_{\text{в}}}{\eta} (t_1 - t_0) = 1.32 \cdot 10^9 \text{ Дж} = 366,7 \text{ кВт·ч.} \quad (30)$$

Следовательно, полная стоимость возгонки и последующей конденсации воды составит

$$C_2 = 0,6\$ + Q_1 \cdot 10\$ \approx 3668 \text{ \$/кг.} \quad (31)$$

Таким образом, себестоимость добычи 1 килограмма жидкой воды методом возгонки составляет 3668 \\$/кг, что, конечно, является очень высокой себестоимостью.

Однако последний результат почти в три раза меньше себестоимости доставки земной воды. Возможно, при развитии инфраструктуры солнечной энергетики Луны себестоимость электроэнергии уменьшится в  $10 \div 100$  раз и тогда себестоимость  $C_2$  существенно уменьшится.

Таким образом, в работе строго показано, что себестоимость добычи жидкой воды любым из возможных методов гораздо ниже себестоимости её доставки с Земли, следовательно, разработка методов добычи жидкой воды и их реализация является рентабельной процедурой, которая требует неотложного решения уже сегодня, для того чтобы завтра колонизировать Луну.

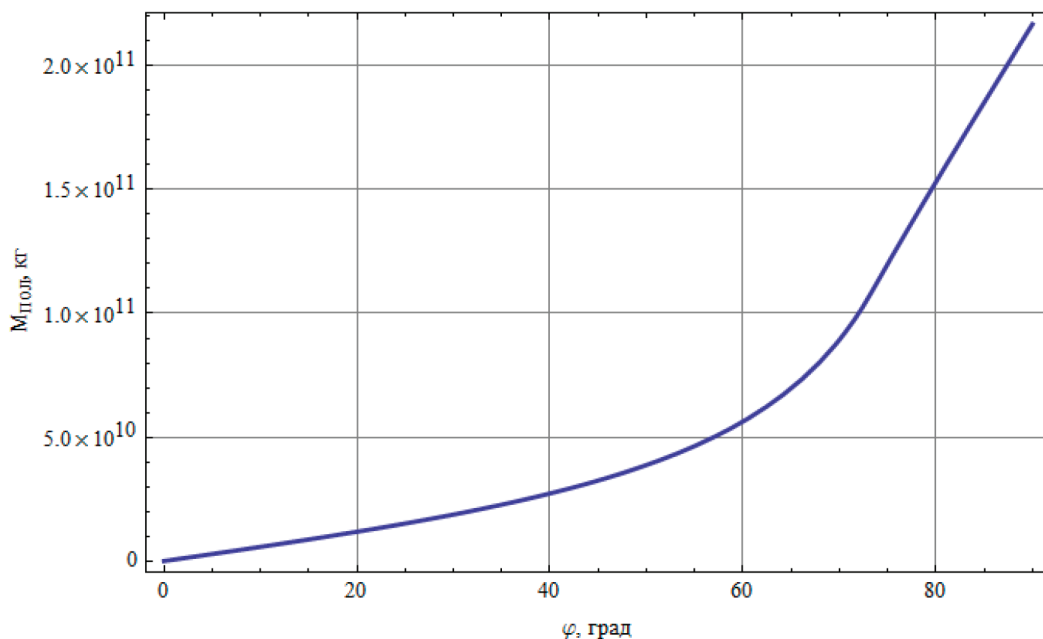
**Список литературы**

1. Ученые назвали пять угроз из космоса для жизни на Земле. URL: <https://vistanews.ru/science/107203>.
2. Сурдин В.Г. Пятая сила. – М.: МЦМО. – 2002. – 40 с.
3. Денисов А. Астрономы отрицают возможность «бегства» Луны. – URL: <https://ria.ru/science/20110622/391844110.html>
4. Schröder K.-P.; Cannon S.R. Distant future of the Sun and Earth revisited. – Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2008 – 386(1). – P. 155–163.
5. Коняев А. Небо в алмазах. – URL: <http://lenta.ru/articles/2013/01/30/asteroid/>.
6. Эймос Д. На Луне нашли «значительное количество» воды. – URL: [http://www.bbc.com/russian/science/2009/11/091113\\_water\\_moon.shtml](http://www.bbc.com/russian/science/2009/11/091113_water_moon.shtml).

7. Milliken R. E. and Li S. Remote detection of widespread indigenous water in lunar pyroclastic deposits. – Nature Geoscience. – 2017. – 10. – P. 561–565.
8. Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии. – М.: Едиториал УРСС. – 2004. – 544с.
9. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. Элементарное введение в планетную и спутниковую геофизику – М.: Наука и образование, 2013. – 414 с.
10. Астрономия: век XXI / Ред.-сост. В.Г. Сурдин, 2-е изд., испр. и доп. Фрязино: Век 2. – 2008. – 626 с.
11. Бутиков Е.И. Физика океанских приливов в компьютерных моделях. – 2007. – С. – П.: 2007. – 16 с.
12. Лунные воды: Влажный спутник. – URL: <https://www.popmech.ru/science/7846-lunnye-vody-vlazhnyy-sputnik>.
13. Окончательное доказательство: ...И снова о воде. – URL: <https://www.popmech.ru/science/9683-okonchatelnoe-dokazatelstvo-i-snova-o-vode>.
14. Малянов Д. Ледяная Луна. -- URL: [https://www.gazeta.ru/science/2012/09/03\\_a\\_4749829.shtml](https://www.gazeta.ru/science/2012/09/03_a_4749829.shtml).
15. Фельдман В. И. Петрология импактитов. М.: изд-во МГУ. – 1990. – 299 с.
16. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. – М.: АСТ: Астрель. – 2006. – 991с.
17. Li S., Lucey P., and Milliken R. Water in pyroclastic deposits and cold traps on the Moon: Possible resources for future exploration. URL: <https://www.hou.usra.edu/meetings/leag2017/presentations/wednesday/li.pdf>
18. Кириллов В. Полеты в копеечку. – Журнал Коммерсант. – 1998. -- 07. – с.65.
19. Уитон Э.П. Коммерция в космосе. – URL: <http://epizodsspace.airbase.ru/bibl/spaceage/18.htm>.
20. Елохин И.В. Жизненный путь звезды Солнце // Старт в науке. – 2016. – № 3. – С. 118–120 – URL: <http://science-start.ru/ru/article/view?id=340>.

**Приложения  
Приложение А**

**Основные численные результаты работы**



*Зависимость максимальной массы водяного льда от селеноцентрической широты φ*

## Рисунки и диаграммы



Рис. 1. Вид Луны в полнолуние (при лунном затмении)

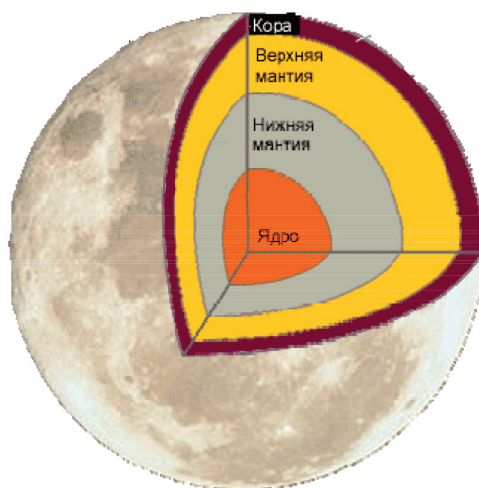


Рис. 2. Внутреннее строение Луны

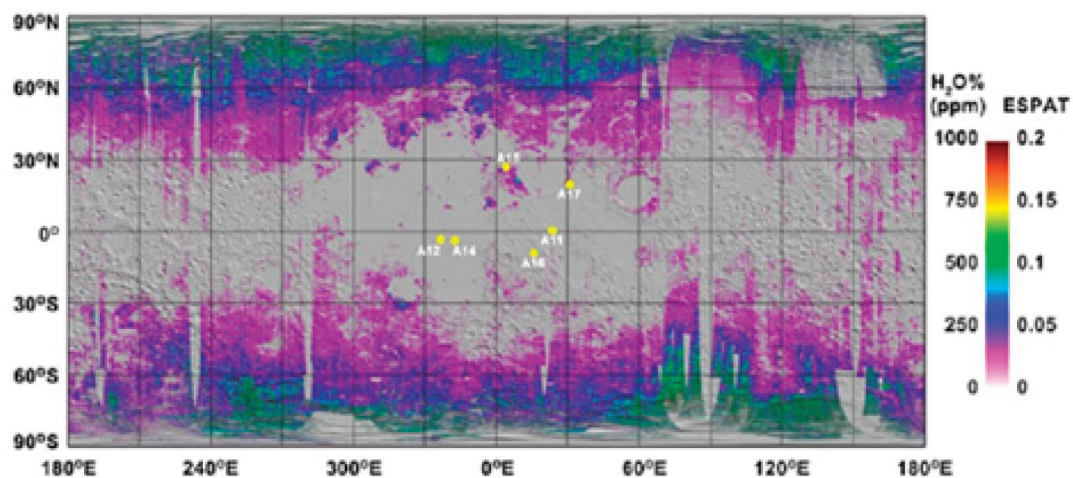
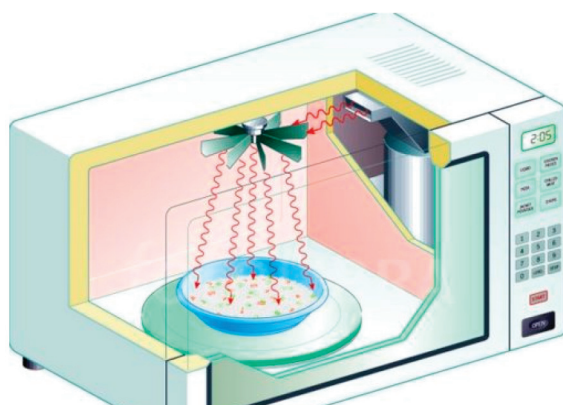


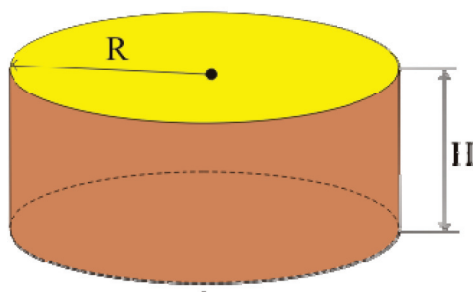
Рис. 4. Современная карта распределения водных ресурсов по поверхности Луны, построенная и представленная в работе [13]



*Рис. 6. Возможный вид будущей пластиковой «теплицы» в представлении художника*



*Рис. 7. Домашняя микроволновая печь, прообраз которой будет использован для добычи воды на Луне*



*Рис. 8. К определению геометрической формы лунного кратера*



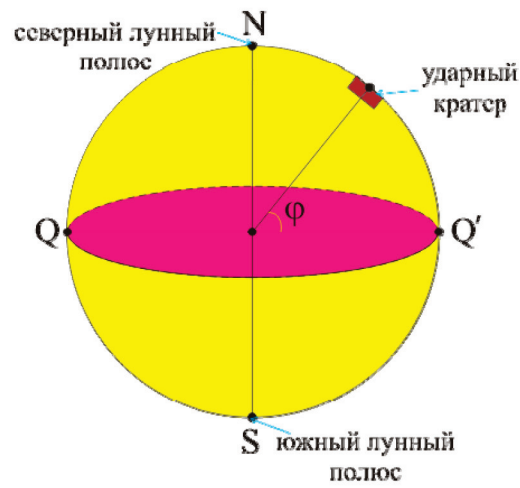


Рис. 9. К определению положения кратера на поверхности Луны

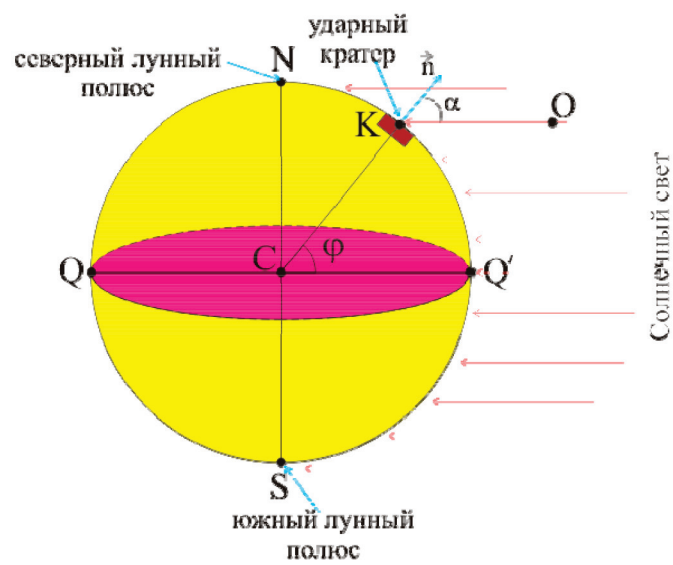


Рис. 10. К определению угла падения солнечных лучей на кратер

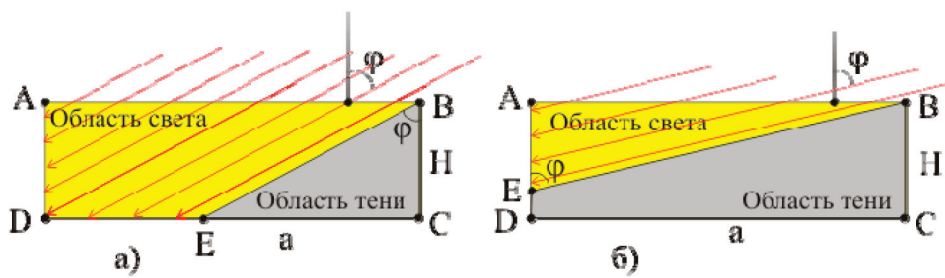


Рис. 11. К определению областей света и тени лунного кратера