

УДК 551.0:523.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕСУРСОВ РЕГОЛИТА ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

¹Игнатова А.М., ²Игнатов М.Н.

¹ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, e-mail: ignatovaanna2007@rambler.ru;

²ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, e-mail: ig89028332000@gmail.com

В работе рассматривается возможность организации строительства технических построек на поверхности Луны с использованием реголита. Существующие исследования указывают на то что использование «местного» материала является перспективным с точки зрения колонизации в будущем. Учитывая сходство лунных и земных горных пород реализация может происходить по земным технологиям. Представлены петрографические данные о строение лунного грунта, дана его технологическая минералого-петрографическая характеристика и сравнительный анализ с петрографическими данными синтетических минеральных сплавов. Результаты указывают на пригодность лунного реголита для синтеза литых синтетических материалов. Авторы предлагают использовать дуговой и световой способы плавления реголита для получения расплава и изготовления из него отливок. Представлены данные о том, какие материалы можно получить при такой переработке реголита.

Ключевые слова: космическая петрология, Луна, реголит, петругия, каменное литье, освоение космоса

USE OF RESOURCES FOR REGOLITH EXPLORATION OF THE LUNAR SURFACE

¹Ignatova A.M., ²Ignatov M.N.

¹ FGBOU VPO «Permskij nacional'nyj issledovatel'skij politehnicheskij universitet», Perm,
e-mail: ignatovaanna2007@rambler.ru;

²FGBOU VPO «Permskij nacional'nyj issledovatel'skij politehnicheskij universitet», Perm,
e-mail: ig89028332000@gmail.com

We consider the possibility of organizing a technical construction of buildings on the surface of the moon with the regolith. Existing studies indicate that the use of "local" material is promising in terms of colonization in the future. Given the similarity of lunar and terrestrial rocks implementation may occur on the earth technologies. Presented petrographic data on the structure of the lunar soil, given its technological mineralogical and petrographic characterization and comparative analysis with the petrographic data synthetic mineral alloys. The results indicate the suitability of the lunar regolith for the synthesis of molded synthetic materials. The authors suggest the use of arc-light methods and melting of the regolith to produce melt and fabrication of castings. The data on which materials can be obtained by processing such regolite.

Keywords: Cosmic petrology, Moon, regolith petrurgiya, stone molding, space exploration

Активное освоение космоса и исследование возможностей открывающихся перед человечеством этой сфере началось в конце 60-х годов XX столетия. Однако, основы которые обеспечили возможность космических полетов были сформулированы намного раньше, еще в начале XX в. уникальным ученым Циолковским К.Э., он впервые выдвинул практические идеи в создание «космических поездов» и подкрепил их научными работами [1]. Его теоретические разработки по освоению околоземного пространства определили время, причем многие из предложенных им идей могут быть оценены по достоинству только сейчас или в дальнейшем будущем. Выдвинутое им предложение о создании «космического лифта» стало актуальным для реализации только в последние годы, так как стали появляться материалы с помощью, которых эта конструкция может быть построена [2].

Тем не менее постепенно заветы Циолковского К.Э. воплощаются в жизнь, а значит и его идеям о колонизации космоса так же могут быть осуществлены с высокой вероятностью.

В случае успешной реализации идеи «космического лифта» или любой другой, которая упростит межпланетные перемещения и позволит начать освоение ближайшей к нам планеты Луны, неизбежно возникнет проблема, возведения на ее поверхности сооружений для размещения жилых комплексов, лабораторий и производств. Разумеется возможность доставки грузов в космос существует и сейчас, однако, использовать его для отправки стройматериалов будет недопустимой расточительностью. Актуальной и перспективной задачей станет организация изготовления строительных материалов для Лунного строительства, что называется *in-situ*.

Исследования лунного реголита

Наше исследование посвящено изучению возможности организации на Луне изготовления строительных материалов.

Разумеется, организация какого либо производства в такой ситуации будет целесообразным исключительно в том случае если использовать местное сырье. Из чего же можно строить на Луне? Единственный доступный для этого материал, это лунный грунт – реголит.

О реголите нам известно достаточно много, образцы лунной породы были доставлены на Землю несколькими экспедициями, как пилотируемыми, так и не пилотируемыми. Кроме непосредственно изучения доставленного реголита в лабораториях, проводились исследования состава грунта непосредственно на поверхности Луны с помощью рентгенофлуоресцентного анализа. Организаторами этих исследований выступали два государства США и СССР, по политическим причинам исследования велись по большей части параллельно, хотя некоторый обмен данными на официальном уровне происходил. В СССР исследования проводили в замкнутом режиме и иностранные коллеги не привлекались, США напротив, рассредоточивала образцы между странами ООН, Африкой и Индией и аккумулировала результаты достигнутые учеными в различных частях света [3].

Первая лунная экспедиция, проведенная СССР «Луна-1», состоялась 2 января 1959 г. Она заключалась в том, что исследовательский аппарат прошел на высоте 5-6 тыс. километров над поверхностью Луны. Она позволила получить важнейшие данные, но главное достоверно установила что на Луне отсутствует магнитное поле. Позднее в сентябре того же года, было организована миссия «Луна-2». На этот раз аппарат достиг поверхности и с его помощью был установлен выпел СССР. Можно сказать, что так началась практическая колонизация Луны. В октябре все того 59-ого, в результате мисси «Луна-3» были показаны первые в истории человечества телевизионные снимки обратной стороны Луны. США произвели фотосъемку обратной стороны Луны только в 65-ом в результате мисси «Зонд-3». СССР стремительно набирали обороты, были реализованы мисси Луны 4-8, позволившие отработать мягкую посадку на поверхность Луны. Первая мягкая посадка на поверхность Луны состоялась в 66-м, ее осуществили СССР во время мисси «Луна-9», она позволила опровергнуть предположения, что слой пыли на поверхности луны очень мощный. После этих первых исследований

силами советских и американских ученых начались регулярные полеты на Луну.

Кроме геологии на Луне было нечего исследовать, ведь ни атмосферы, ничего другого обнаружено не было. Поэтому в задачи советской миссии «Луна-13» входило в основном фотографирование и исследование механических свойств грунта.

Несмотря на успешность советских экспедиций прорыв все-таки совершили США. Миссия «Аполлон-11», состоявшаяся 20 июля 1969 г. войдет в историю на всегда, ведь именно тогда Человек ступил на поверхность Луны впервые. Тогда и были отобраны образцы лунного грунта и доставлены на Землю. США продолжали начатые исследования, 19 ноября 69-го астронавты миссии «Аполлон-12» высадились в другой точке и продолжили геофизические исследования первых астронавтов, их снова интересовали образцы пород, сейсмология и электропроводность. Следующая экспедиция американцев прошла неудачно, посадки не было. Неудачи постигли и советскую миссию «Луна -16», состоявшуюся 24 сентября 1970 г., не смотря на то что нашим космонавтам удалось совершить мягкую посадку, им пришлось взять керн с лунным грунтом (350 мм) и вернуться на Землю. СССР взяли некоторый реванш в том же году с миссией «Луна-17», на поверхность Луны был доставлен «Луноход 1», который работал 10,5 месяцев, обследовал площадь 80 тыс. кв. метров, снял 200 панорам, 20 тыс. пейзажей, исследовал химический состав грунта. В 71-72-ых США опередили СССР и запустили к луне целых четыре экспедиции «Аполлоны-14,15,16,17». Американские астронавты занимались отбором лунных пород, устанавливали сейсмоприемники для проведения сейсмологических исследований, занимались сейсморазведкой, определяли электропроводность лунного грунта, измеряли тепловой поток, в отдельных точках измерили силу тяжести и получили гравиметрический профиль длиной 12 км. Советский Союз в эти годы продолжал исследования Луны, опираясь, в основном, на автоматические аппараты. В миссии Луна-20 в 72-ом были отобраны лунные породы из региона между Морем Изобилия и Морем Кризисов и доставлены на Землю. Луна-21 доставила на поверхность Луны Луноход-2, который работал на Луне 5 лунных дней. Был изучен профиль длиной 37 километров. Была определена толщина реголита (1-10 м), исследован тектонический разлом «Борозда Прямая» глубиной 40-80 м. Так же, как и на Луноходе-1 производилось фотографирование, определялось магнитное поле, исследова-

лись механические и химические свойства грунта [4].

В последствие на основе полученных данных о реголите было написано множество научных трудов, исследовательские работы активно ведут и до сих пор. Последние труды, которые мы рассматривали в рамках исследования, датированы 2005 (США) и 2009 (РФ) годами. Эти исследования преследуют разные цели, как то исключительно астрономические, выясняется происхождение Луны, особенности ее геологических процессов, так и практические, а именно направленные на адаптацию земных технологий к обработке реголита в лунных условиях. То есть на то о чем и наше исследование, как и что можно изготовить из самой Луны на Луне.

Практическая ценность освоения Луны и переработки ее реголита

Почему эти исследования ведутся? Зачем что-то строить на Луне? Зачем ломать голову над «космическим лифтом»? Туризм!? Разумеется планы у человечества куда как масштабнее.

Во-первых в лунном реголите обнаружена масса редкоземельных металлов, многие из которых находятся в самородной форме, кроме того по данным российских исследователей [5] в реголите содержатся уникальные металлические соединения не характерные для земных естественных условий, но которые являются крайне интересными как конструкционные, кроме того лунный грунт содержит гелий-3, изотоп редчайший изотоп гелия, принесенный космическим ветром на безатмосферную планету [6]. Результаты лабораторного анализа лунного грунта показывают, что в поверхностном слое реголита накопилось порядка 1 млн. т запасов гелия-3. Такого количества ядерного топлива хватило бы на десятки

тысяч лет не только для лунных поселений, но и для всего человечества [7]. И это только начало, освоение Луны позволит решить территориальную проблему, создание сверхпроводников позволит построить на ней удаленные энергостанции, на ее поверхности можно будет построить производства вредные для нашей планеты и тем самым снизить экологическую нагрузку на родную Землю. Строительство баз на Луне позволит вывести исследование космоса на новый уровень и продолжить его освоение. Человечество стремится на Луну не из праздного интереса и вопрос лунных исследований по-прежнему актуален и носит стратегический характер.

Осуществление лунных планов наверняка начнется со строительства и поскольку определено, что строить будут из лунного реголита, следует знать, что же это за материал.

Прежде всего, следует сказать, что, даже визуально выделяется два типа лунного реголита – материковый (светлый) и морской (темный). Эти разновидности грунта отличаются топологией поверхности участков, моря более гладкие, материка более неровные. Эти и другие данные использовались для объяснения происхождения Луны и истории ее развития, а до получения данных о составе грунтов еще и для предположения об их природе. В настоящее время состав и минералогия реголита изучены обширно и с привлечением последних технических достижений [5].

Общие данные о химическом составе лунного грунта представлены в табл. 1, в этой же таблице приведены данные о химическом составе некоторых близких земных пород [4, 8-10]. Эта таблица наглядно демонстрирует, что земные и лунные породы крайне похожи, а значит и технологии обработки представленных земных пород могут быть применимы к лунным.

Таблица 1
Химический состав образцов лунного грунта, доставленных на Землю

Оксиды	Лунные породы				Земные породы			
	«Морские» районы		«Материковые» районы		Базальт	Габбро-диабаз	Дунит	Гранит
	Луна-16	Апполон-15	Луна-20	Апполон-17				
SiO ₂	42,95	45,00	44,20	48,50	47,00	45,00	40,49	72,20
TiO ₂	5,50	2,54	0,32	0,95	1,80	2,50	0,02	0,20
Al ₂ O ₃	13,88	8,90	19,10	17,20	14,50	11,80	0,86	13,40
FeO	20,17	22,21	6,91	14,40	7,35	1,80	5,54	0,64
MgO	6,05	9,08	13,37	8,94	7,67	0,20	0,16	0,6
CaO	10,80	10,27	13,30	11,60	10,00	4,50	0,70	2,24
Na ₂ O	0,23	0,28	0,48	0,40	1,58	2,00	0,10	3,0
K ₂ O	0,16	0,03	0,47	0,25	1,11	1,30	0,04	4,5

Существует достаточно много технологических решений по изготовлению строительных материалов из земных пород основного и ультраосновного характера (базальтов, диабазов, гранитов и др.). Их дробят на щебень, добавляют в строительные смеси и т.д. Однако, эти способы не приемлемы в лунных условиях исключительно из экономических соображений, ведь это так или иначе потребует поставку других дополнительных материалов, цемента, например. Поэтому следует применять технологические методы, подразумевающие наиболее глубокое освоения сырья, предполагающие получение сразу готовой строительной продукции без привлечения других материалов.

Таким методом является метод переработки горных пород в синтетические минеральные сплавы [11], более известный как каменное литье [12, 13] или в иностранной литературе «cast basalt» [14]. Метод подразумевает расплавление горных пород до получения расплава схожего по основным характеристикам с горячей магмой, дальнейшие манипуляции с этим расплавом мало чем отличаются от манипуляций с расплавами металлов, то есть его так же как и металлический расплав заливают в литейные формы, после чего отливки подвергаются термической обработке, параметры которой разумеется отличаются от аналогичных металлургических. Отливки полученные по этой технологии, представляя собой изделия уже не из тех горных пород которые входили в состав сырья, а изделия из синтетических минеральных сплавов. В результате переплавления из горных пород образуется оксидо-минеральный, материал содержащий в себе минеральные фазы близкие, но не идентичные природным образованиям [15]. С точки зрения строения, все симиналы представляют собой материал сочетающий в себе аморфные и кристаллические составляющие, находящиеся вразнос соотношении и по-разному распределенные относительно друг друга. Структура симиналов обеспечивает набор свойств, который как нельзя лучше соответствует агрессивным Лунным условиям.

Прежде всего симиналы способны поддерживать радиационное излучение [16], они обладают высочайшей износостойкостью, а потому им длительное время не страшны космические ветра и солнечная радиация. Материал обладает плотностью на уровне алюминия, а это значит, что в условиях тяготения на Луне манипулировать строительными блоками из симиналов будет возможно без привлечения сложной грузоподъемной техники. В твердом состоянии симиналы не пропускают электри-

чество, но самое главное обладают низкой теплопроводностью и способны аккумулировать тепло, что позволяет осуществлять строительство без дополнительной теплоизоляции. Основные свойства литых симиналов изложены в табл. 2 [17-19].

Ученые NASA давно заинтересовались возможностью изготовления литых изделий из реголита на поверхности Луны [20-23]. В работах значительное внимание уделяется организации энергоснабжения такого производства. Ведь для расплавления реголита требуются значительные энергетические затраты, приблизительная температура плавления реголита около 1500-1700°C, а для достижения структуры обеспечивающей все необходимые и ценные свойства нужна еще и длительная тепловая обработка. Генерировать электрическую энергию на начальном этапе как зарубежные, так и отечественные ученые предлагают с использованием солнечных батарей. В последствие может использоваться и энергия Гелия-3 и другие генераторы.

Изученные источники не дают исчерпывающей информации о том, каким именно образом ученые NASA планируют получать расплав из реголита, хотя в литературе имеется описание некоторых установок для организации такого процесса на Луне, например, получение изделий из реголита методом спекания порошка при литографии и т.д. [22, 24].

Получение расплава реголита

Опираясь на наши исследования [25-28], мы считаем, что наиболее приемлемым способом получения расплава из лунного реголита является метод плавления электрической дугой или еще более перспективный метод получения расплава с использование энергии светового луча.

Для организации расплавления реголита электрической дугой может использоваться установка, аналогичная лабораторной установке, разработанной нами (рис. 1) [29]. Принцип работы установки следующий, измельченный реголит размещают в безтигельном рабочем пространстве печи. Рабочее пространство печи организовано графитовым дном и водоохлаждаемыми стенками. Это пространство является открытым, сверху устанавливают графитовый электрод с механизмом перемещения по вертикали. Поскольку реголит не электропроводен в твердом состоянии, дуга должна в начале загорится между дном рабочего пространства и электродом, затем когда часть реголита перейдет в расплав, который уже является электропроводным, дурра будет гореть между расплавом и электродом. Водоохлаждение обеспечит образование гарнисажа на стенках рабочего пространства.

Таблица 2

Свойства литых симиналов

Физическое свойство	Величина показателя
Плотность расплава	2600-2700 кг/м ³
Плотность затвердевшего расплава	2900-2960 кг/м ³
Водонасыщение	0,1 %
Предел прочности на разрыв	3.5X10 ⁷ Н/м ²
Предел прочности на сжатие	5.4X10 ⁸ Н/м ²
Предел прочности на изгиб	4.5X10 ⁷ Н/м ²
Модуль упругости (модуль Юнга)	1.1X10 ¹¹ Н/м ²
Предел прочности при сдвиге	~10 ⁸ Н/м ²
Твердость Мооса	8.5
Износостойкость	2.2X10 ⁵ м ² /м ³
Удельная теплоемкость	840 Дж/кг К
Температура плавления	1400-1600 К
Теплота плавления	4.2X10 ⁵ Дж/кг(+/-30%)
Теплопроводность	0.8 Вт/м К
Коэффициент линейного термического расширения ... 273-373 К ... 273-473 К	7.7X10 ⁻⁶ м/м К 8.6X10 ⁻⁶ м/м К
Термостойкость	150 К
Поверхностное сопротивление	1.0X10 ¹⁰ Ом-м
Внутренне сопротивление	1.0X10 ⁹ Ом-м
Вязкость расплава	10 ² -10 ⁵ Н-сек/м ²
Поверхностное натяжение расплава	0.27-0.35 Н/м
Скорость звука в расплаве при 1500 К	2300 м/сек (волна сжатия)
Скорость звука в затвердевшем симинале при 1000 К	5700 м/сек (волна сжатия)
Сопротивление расплава 1500 К	1.0X10 ⁻⁴ Ом-м
Теплопроводность, ... расплав при 1500 К ... твердый симинал	0.4-1.3 Вт/м К 1.7-2.5 Вт/м К
Магнитная восприимчивость	0.1-4.0X10 ⁻⁸ В/кг
Темпы роста кристалла	0.02-6X10 ⁻⁹ м/сек

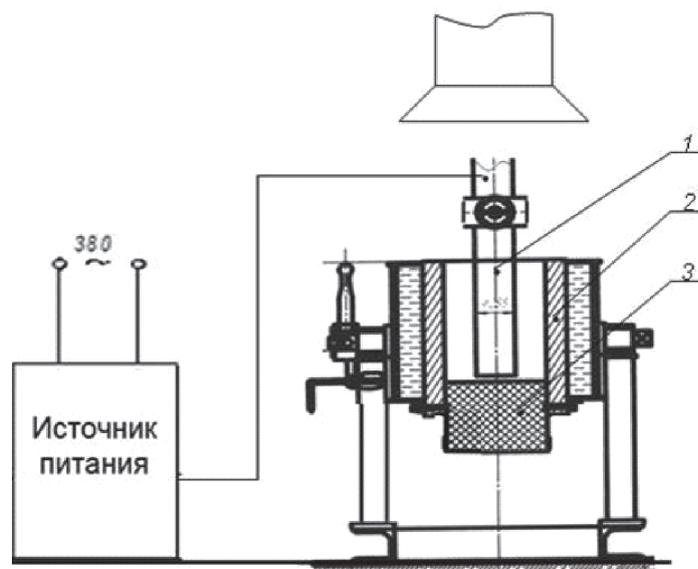


Рис. 1. Схема устройства дуговой плавильной установки:
1 – электрод, 2 – корпус водоохлаждаемый, 3 – графитовое дно

Использование энергии светового луча значительно перспективнее, поскольку позволит без дополнительных преобразований использовать энергию солнечного излучения для производственных целей. Принцип расплавления материала световым лучом заимствован из сварочной технологии. Световой луч с высокой плотностью потока, достаточной для плавления, получают путем фокусирования излучения высокоинтенсивных источников света с помощью специальных оптических систем. Нагрев световым лучом обладает преимуществами по сравнению с другими широко распространенными видами нагрева, а именно: возможностью термообработки материалов независимо от их электрических и магнитных свойств; возможностью получения сравнительно простыми средствами высоких плотностей энергии; бесконтактным способом подвода энергии к изделию непосредственно и через оптически прозрачные оболочки в контролируемой газовой среде и вакууме (как раз в такой среде как и лунная атмосфера), незначительным механическим воздействием на нагреваемый объект; высокой регулируемостью и управляемостью ввода теплоты [30].

По характеристике луча различают сварку монохроматическим остронаправленным лучом (лазер) и сварку световым

лучом, который состоит из электромагнитных волн разной длины.

Монохроматический луч можно сфокусировать на очень малой площади, обеспечив тем самым высокую плотность энергии в пятне нагрева и, как следствие, высокие температуры. Использование светового (полихроматический) луча не может обеспечить столь высокую плотность из-за рассеивания электромагнитной энергии [31]. Использование светового луча для плавления и пайки материалов является экспериментальной технологией, однако, известно, что источник света может находиться на значительном расстоянии от места проведения плавильных работ, следовательно, солнечное световое излучение может использоваться для этих целей. Концентрировать световую энергию можно различными способами (рис. 2). Однако, не разработаны способы для плавления крупных объемов материала. Тем не менее этот способ всегда может рассматриваться как метод соединения отдельных строительных изделий из симиналов.

Предложенные способы организации производства изделий из симиналов находятся на стадии научных идей. Для подробной их разработки и осуществления проектирования необходимы данные о поведении расплавов в лунных условиях.

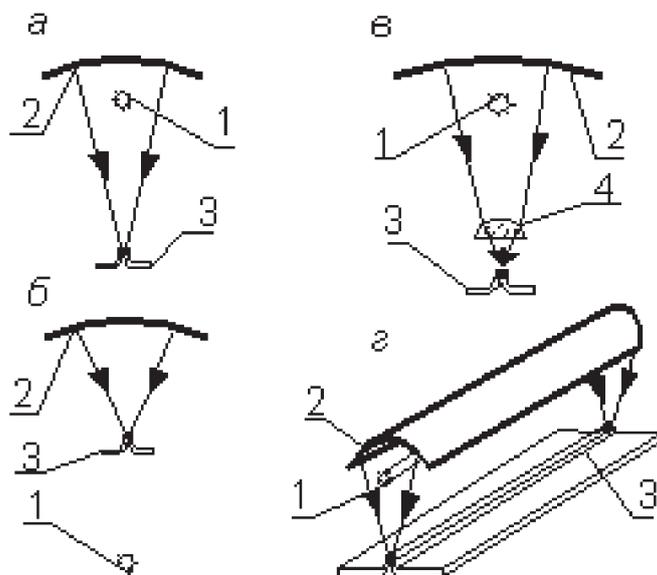


Рис. 2. Система концентрации световой энергии:
 а – длиннофокусная моноэллиптическая (точечный нагрев); б – короткофокусная моноэллиптическая (точечный нагрев); в – длиннофокусная моноэллиптическая с линзовым концентратором (точечный нагрев); г – эллипсоцилиндрическая (полосовой нагрев)

Получение таких данных возможно при проведение моделирующих практических экспериментов. Из земных горных пород или отдельных синтетических компонентов могут быть изготовлены модельные шихтовые составы имитирующие лунный реголит. В лабораторных условиях могут быть воссозданы условия приближенные к лунным и в такой среде могут проводиться эксперименты по плавлению модельных составов. Эти исследования позволят получить данные о процессах растекаемости и смачиваемости расплавов вне земных условий, что в последствие позволит спроектировать

соответствующее оборудование и весь технологический процесс.

Строительные материалы на основе реголита

Данные исследования позволят установить какой структурой будут обладать лунные симиналы.

В настоящее время нам известна какова структура реголита (рис. 3), она действительно схожа со структурой земных базальтов (рис. 4). разумеется нам известно и структура земных симиналов, полученных как на основе базальта, так и на основе других пород и их смесей (рис. 5).

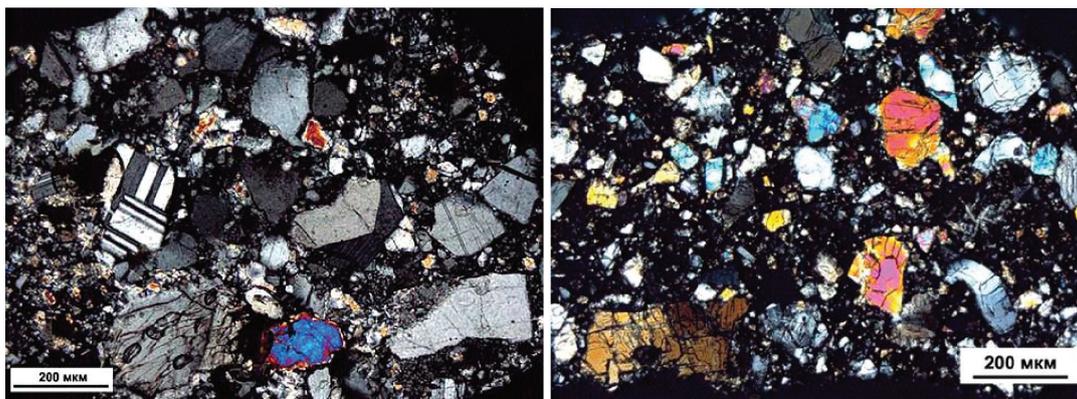


Рис. 3. Структура лунного реголита, представляет собой зерна оливина, авгита, плагиоклаза, распределенные среди обломков других основных пород, присутствует остаточное стекло

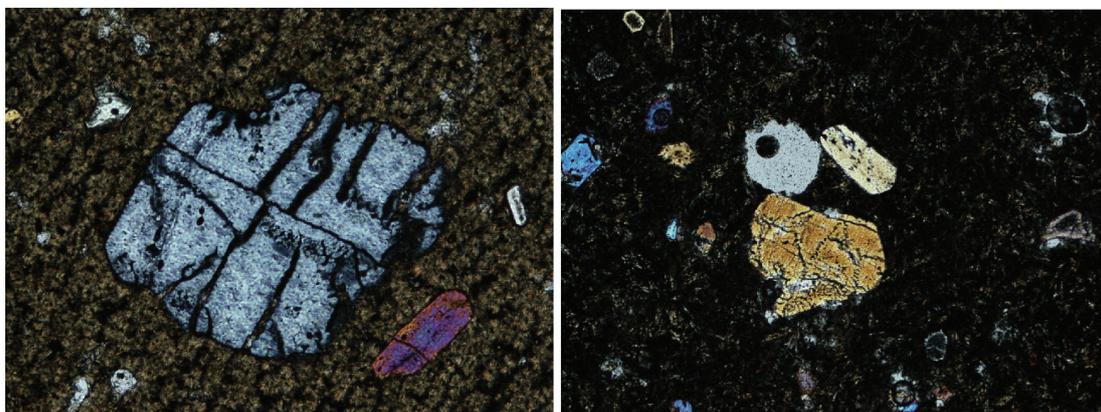
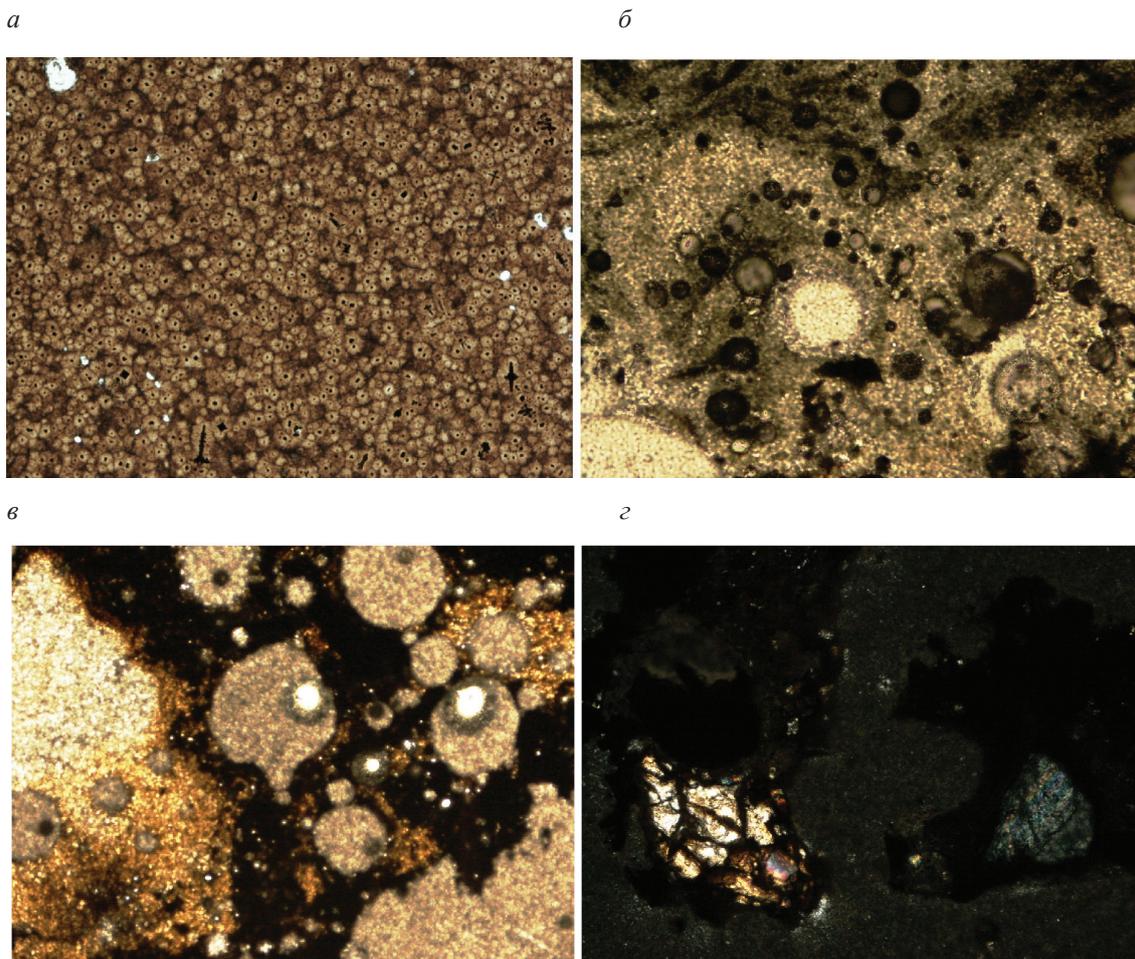


Рис. 4. Земной базальт, также оливин, пироксен, роговая обманка и остаточное стекло (x200)

Ведущие сотрудники Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН А.В. Мохов, П.М. Карташов, О.А. Богатиков доказали, что минералы слагающие реголит в поверхностных слоях сформировались при низких температурах из газовых потоках, это объясняет наличие уникальных соединений

разнородных металлов в его минералогии, важным для науки является возможно ли повторить такой процесс в земных условиях и есть ли возможность получить такие соединения. Это важно как и для точного моделирования, так и для создания принципиально новой технологии синтеза материалов.



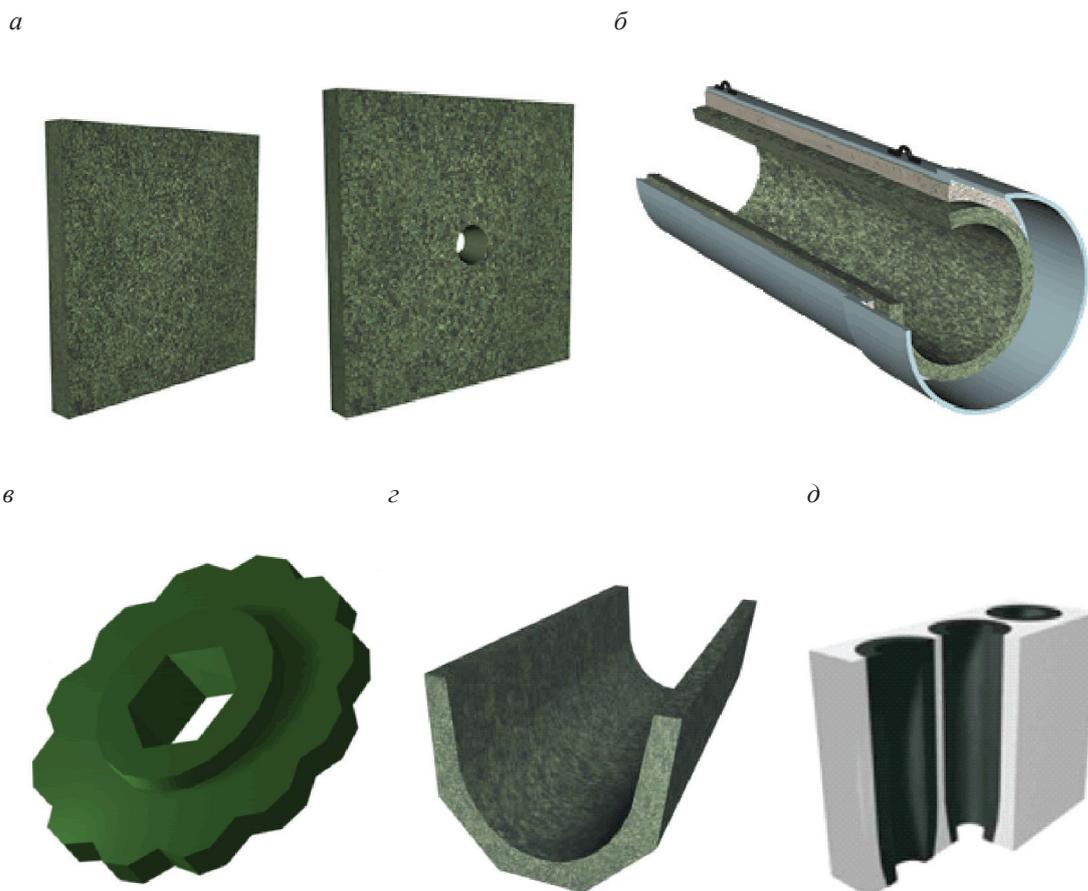
*Рис. 5. Структура литых симиналов:
 а – симинал из ультраосновной породы с добавлением хромитовых руд (x100);
 б – симинал полученный при плазменном плавлении (x200); в – симинал полученный при дуговом
 сплавлении гранул (x200); г – симинал полученные при добавление карбидов (x50)*

Какова будет структура лунных симиналов необходимо знать для того что бы прогнозировать их свойства. Нами проведены обширные разработки в сфере управления свойствами симиналов через влияния на их структурообразование [32-35], при наличие данных о структурообразование лунных симиналов, установленные закономерности могут использоваться и применительно к ним.

Практические модельные эксперименты позволят нам сформировать и номенклатуру будущих строительных изделий на Луне. В настоящее время продукция из симиналов весьма разнообразна (рис. б), она включает в себя и крупногабаритные изделия такие как строительные и фундаментные блоки, и отделочные плиты, элементы циклонов и мультициклонов и т.д. В основном из-

делия из симиналов применяются в агрессивных условиях эксплуатации, например в условиях абразивного износа, в условиях насыщенных кислот, интенсивных излучениях, резких сменах температур и т.д. Причем в этих условиях срок их долговечности исчисляется десятилетиями [36]. Следовательно, и в лунных условиях конструкции из симиналов смогут длительное время противостоять всем невзгодам космического пространства.

Изготовление литых изделий позволит не просто организовать строительную индустрию, но и обеспечит рационализацию других важных задач по колонизации луны, в частности производство симиналов может стать вспомогательным производством при извлечение гелия-3 и других ценных веществ из реголита.



*Рис. 6. Литые изделия из симиналов:
а – износостойкие литы, б – трубы футерованные вкладышем из симинала,
в – колесо грохота, г – желоб, д – мультициклон*

Выводы

Проведенное исследование, как это часто бывает в вопросах космического освоения, оставило больше вопросов, чем ответов. Однако, можно с уверенностью утверждать что организация строительной индустрии на Луне является неотъемлемой и первостепенной задачей на пути ее колонизации. Так же с уверенностью можно утверждать, что сырьем для строительства будет являться реголит. Большинство мировых ученых сходятся во мнении о том, что наиболее рациональным способом переработки реголита в строительную продукцию является технология изготовления литых изделий из симиналов. Открытыми остаются вопросы о конкретном способе получения расплава, поведении расплава в лунных условиях и о структурах лунных симиналов. Авторы предлагают использовать дуговой и световой способы плавления, однако, затрудняются предположить о том, какие структуры могут быть сформированы в лунных условиях и какими свойствами

будут обладать лунные симиналы. Однако, накопленный опыт, позволяет утверждать, что вопрос структуры и свойств может быть регулироваться, для чего разумеется не обойтись без практических модельных экспериментов.

Список литературы

1. Anderson, Alfred T., Jr. Basalt. in Encyclopedia of Science and Technology, vol. 2, McGraw-Hill, New York, 1977, pp.110-110D.
2. Carsley J.N., Blasic J.D., Pletka B.J. Vacuum melting and mechanical testing of simulated lunar glasses. In Engineering, Construction and Operations in Space III: Proc. Space 92, Vol.2.
3. Kenkre V.M., Skala L., Weiser M.W., and Katz J.D. (1991) Theory of microwave interactions in ceramic materials: the phenomenon of thermal runaway. Journal of Materials Science, 26, pp. 2483-2489.
4. Rowley, J.C.; and Neudecker, J.W. Melted In-Place Lunar Soil for Construction of Primary Lunar Surface Structures. In Extraterrestrial Materials Processing and Construction, David R. Criswell, ed. Final Report, NSR 09-051-001 Mod. No. 24, Lunar and Planetary Institute, Houston, Texas, 31 January 1980, pp. 215-219. (Also published as NASA CR-158870.)
5. Taylor L.A. and Carrier W.D. III (1992) The feasibility of processes for the production of oxygen on the

- Moon. Engineering, Construction and Operation in Space III pp. 752-762, American Society of Civil Engineers, New York, NY.
6. Weiblen P.W., Murawa M.J., and Reid K.J. (1990) Preparation of simulants for lunar surface materials. Engineering, Construction and Operation in Space II, pp. 428-435, American Society of Civil Engineers, New York, NY.
7. Ананьев В.П. Основы геологии, минералогии и петрографии/ В.П. Ананьев, А.Д. Потапов – М.: Высшая школа, 1999. – 450 с.
8. Белецкий В.В., Левин Е.М. Динамика космических тросовых систем. – М.: Наука, 1990. – 345 с.
9. Бетехин, А.Г. Курс минералогии / А.Г. Бетехин. – М.: Госгеолтехиздат, 1961. – 539 с.
10. Гинзберг А.С. Влияние изменения химического состава различных окислов на свойства плавящихся горных пород / А.С. Гинзберг, Я.Я. Лисютин // Труды Петрографического института АН СССР, вып. 1. – М.: Изд-во АН СССР, 1938. – 45-67 с.
11. Гончаров Ю.И. Минералогия и петрография сырья для производства строительных материалов и технической керамики: Уч. пособие / Ю.И. Гончаров, В.С. Лесовик, М.Ю. Гончарова, В.В. Строкова. – Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2001. – 181 с.
12. Дёмин В.Н. Циолковский. – М.: Молодая гвардия, 2005. – 336 с. (Вып. 920).
13. Игнатова А.М. Использование автоматических методов оптических исследований в изучение структуры каменного литья // «В мире научных открытий». – №1 (07), 2010. – Часть 4. – С. 166-169.
14. Игнатова А.М. Каменное литье – перспективный материал для строительства на Луне // Материалы конференции «Авиация и космонавтика-2009». М., 2009. С. 45-46.
15. Игнатова А. М. Перспектива использования технологии каменного литья в освоение и исследование лунной поверхности // Материалы II Всероссийской молодежной научной конференции «Минералы: строение, свойства, методы исследования». – Екатеринбург – Миасс: УрО РАН, 2010. – С. 179-180.
16. Игнатова А.М. Петрографические исследования взаимосвязи структуры и свойств базальтового сырья и литья // Материалы 10-х всероссийских научных чтений памяти Ильменского минералога В.О. Полякова. – Миасс, 2009. – С. 45-49.
17. Игнатова А.М. Правила управления структурой и свойствами каменного литья // «Вестник Пермского государственного технического университета «Машиностроение. Материаловедение» // №3, т. 12, 2010.
18. Игнатова А.М., Ханов А.М., Черных М.М. Качественная оценка долговечности облицовочных изделий из синтетических минеральных сплавов // «Вестник Пермского государственного технического университета «Машиностроение. Материаловедение». – № 4, т. 12, 2010. – С. 176-181.
19. Игнатова А.М., Ханов А.М., Игнатов М.Н., Намов В.А., Шехирева А.М. Петрография синтетических минеральных сплавов каменного литья – М.: ВИМС, 2009. – С. 25.
20. Игнатов М.Н., Шундилов Е.Н., Игнатова А.М., Шундилов Н.А., Николаев М.М. Конструкция лабораторной малогабаритной электродуговой установки для плавки фторфлогопита «ДКПП-05». – Тезисы докладов юбилейной НТК «Современные организационные, технологические и конструкторские методы управления качеством». – Пермь: ПГТУ, 2006. – С. 135-137.
21. Игнатова А.М., Чернов В.П., Ханов А.М. Исследование связи между механическими и химическими свойствами и параметрами технологии производства слюдокристаллического каменного фторфлогопитового литья // Тр. VI международной научной школы-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение». – Барнаул, 2009. – С. 170.
22. Игнатова А.М., Черных М.М., Игнатов М.Н. Каменное литье как заменитель природных материалов художественных и архитектурно-декоративных изделий // Стекло и керамика. – №6, 2011. – С. 31-36.
23. Левинсон-Лессинг Ф.Ю. Базальтовое литье / Ф.Ю. Левинсон-Лессинг // Минеральное сырье. – 1927. – № 4. – С. 23-27.
24. Леонтьева А.А. Плавильные базальты, их свойства и применение / А.А. Леонтьева // Труды Института геологических наук АН СССР, вып. 86. – М.: Изд-во АН СССР, 1950. – 143-154 с.
25. Липовский И.Е. Камнелитное производство / И.Е. Липовский, В.А. Дорофеев – М.: Металлургия, 1965. – 176 с.
26. Малыш В.М., Сорока М.М. Электрическая сварка. – Киев: Техніка, 1986.
27. Мороз В.И., Хантресс В.Т., Шевалев И.Л. Планетным экспедиции XX века // Космические исследования, 2002. Т. 40, № 5. С. 451-481.
28. Мохов А.В., Карташов П.М., Богатиков О.А. Луна под микроскопом: Новые данные по минералогии Луны: Атлас. – М.: Наука, 2007. – 127 с.
29. Ниггли П. Магма и ее продукты. Ч. 1. Физико-химические основы / П. Ниггли; пер. с нем. докт. Н.В. Белова; под ред. акад. Д.С. Белянкина. – М.-Л.: Геоиздат, 1946. – 435 с.
30. Пантелеев В.Л. Физика Земли и планет. – Курс лекций Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Физический факультет. – М., 2001. – 145 с.
31. Пчелинцев Л.А., Кузнецов И.И., Ершов А.С. Лунный гелий-3 как источник энергетической стабильности // Стратегическая стабильность. – №1, 2007 г. – С. 34-37.
32. Радиационно-гигиеническая оценка строительных материалов, используемых в гражданском строительстве УССР. – Киев, 1987.
33. Реди Дж. Промышленное применение лазеров. – М.: Мир, 1991.
34. Сверхтекучий ^3He : ранняя история глазами теоретика: нобелевская лекция Э. Дж. Леггетта, УФН, т. 174, № 11, 2003 г.
35. Сибилев А.И. Производство и применение изделий из каменного литья / А.И. Сибилев, И.Е. Липовский. – Донецк: Облиздат, 1960. – 70 с.
36. Чечулин В.А. Свойства камнелитных изделий из отходов обогащения железной руды / В.А. Чечулин, Ю.Г. Ковалев, А.И. Новиков // Стекло и керамика, №3, 1966. – С. 56-66.