

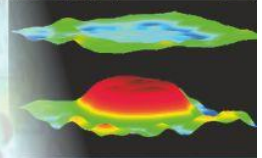


Освоение Луны 2025+

Луна - единственный естественный спутник Земли. Римляне называли его Луной, греки Селеной. Расстояние от Земли до Луны изменяется от 356400 км до 406700 км. Луна обращается вокруг Земли почти по круговой орбите с периодом в 27,3 дня, а также вращается вокруг своей оси с тем же периодом, поэтому она всегда обращена к Земле одной и той же стороной. Диаметр Луны в 3476 км составляет четверть диаметра Земли. Она такая же большая, как планета Меркурий. Поэтому Землю и Луну рассматривают как двойную планетную систему. Однако они сильно отличаются. Луна не имеет воды и воздуха, её видимая поверхность залита тёмными лавовыми морями, пересечена серыми холмами, испещрена многочисленными кратерами. **Лунный день** длится **14 земных суток**, и за этот период поверхность нагревается до **+120⁰С**, а за лунную ночь поверхность остывает до **-180⁰С**.

Лунная поверхность: На Луне нет воздушной атмосферы и она не обладает магнитным полем. Её незащищенная поверхность постоянно бомбардируется микрометеоритами, космическими лучами, заряженными частицами солнечного ветра. За время существования Луны эти крошечные удары раздробили её поверхность и образовали слой мелко гранулированного материала, названного **реголитом**. На более древней континентальной части толщина реголита достигает 15 метров, в морских бассейнах - 2-8 метров. Луна всегда смотрит на нас одной стороной в силу синхронности вращения и обращения вокруг Земли. Впервые обратную сторону Луны сфотографировала советская станция "**Луна-3**" в **1959 г.**

На карте **видимой стороны Луны** видны тёмные области, которые с древности получили название морей, и светлые, возвышенные континентальные области. **Моря** представляют собой безводную застывшую лаву, образующую положительную гравитационную аномалию - маскон. **Лавы** заполняют огромные бассейны, образованные при массивной бомбардировке метеоритами в её ранней истории. Вся поверхность усеяна многообразными кратерами ударного и вулканического происхождения. Размеры этих круговых образований варьируются от 300 км до



Южный полюс

Северный полюс

нескольких миллиметров. Большинство массивных кратеров образовалось более 3-х миллиардов лет в эпоху великой бомбардировки Луны. Большие кратеры окружены валами, образованными из выброшенного материала во время удара. Некоторые кратеры, образованные недавно, сопровождаются яркими лучами: кратер Коперник, кратер Тихо. Если на обращенном к нам лунном полушарии моря составляют примерно 40% его территории, то на обратной стороне Луны на долю морей приходится менее 10%. На невидимом полушарии кратеры крупнее и многочисленнее, чем на видимой стороне Луны, что свидетельствует, об «асимметрии» вулканических процессов на Луне. **Северная полярная область**, покрытая кратерами и небольшими морями - Холода и Гумбольта - является типичной для всей Луны. На южном полюсе обратной стороны Луны обнаружен самый большой кратер Солнечной системы **Южный полюс - Эйткен** ударного происхождения (4 млрд. лет назад) диаметром **более 2500 км** и глубиной **до 12 км**.

Изучение этой области показало необычный геохимический состав, богатый железом и титаном, и наличие запасов водяного льда. Полюса Луны являются наилучшими местами для размещения долговременных научных баз: здесь есть постоянно освещаемые Солнцем площадки, которые позволяют эффективно использовать солнечные батареи для обеспечения их энергией.

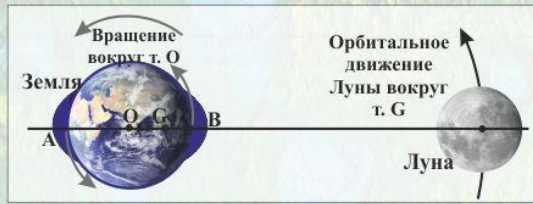
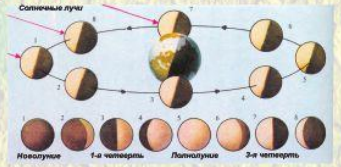
Среднее расстояние до Земли	384400 км
Миним. расстояние – перигей	363296 км
Максим. расстояние – апогей	405503 км
Эксцентриситет орбиты	0.0549
Орбитальный период	27.32 дней
Сутки (резонанс 1:1)	27.32 дней
Средняя скорость по орбите	1.03 км/с
Наклон орбиты к эклиптике	5°13'
Наклон оси вращения к эклиптике	1°32'
Экваториальный радиус R	1738 км
Масса M	7.349 x 10 ²² кг
Средняя плотность ρ	3.344 г/см ³
Сжатие фигуры	0.002
Ускорение на экваторе g	1.624 м/с ²
2-я космическая скорость v ₂	2.376 км/с
Излучение от Солнца	1380 Вт/м ²
Поверхностная температура	-180 до +120 ⁰ С
Альбедо	0.12
Максимальная видимая звездная величина	-12.74

А. Гусев¹, Н. Петрова¹, Zh. Meng², J-S. Ping³,
Институт геологии и нефтегазовых технологий

¹ Казанский Федеральный Университет; ² Jilin University &
³ National Astronomical Observatories of CAS, Beijing, China

Динамика системы Земля - Луна

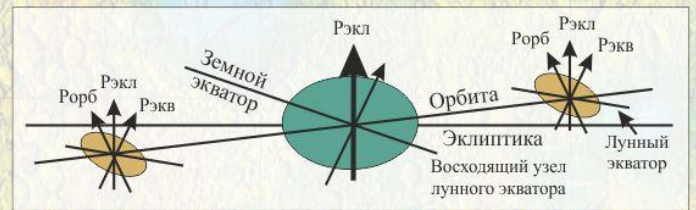
Фазы Луны: Дневная сторона Луны отражает солнечный свет, ночная «земной свет». Луна обращается по орбите вокруг Земли с периодом 27,3 дня. Геометрия расположения Земли, Луны и Солнца изменяется с периодом 29,5 дней, мы наблюдаем это явление как цикл Лунных фаз: новолуние, полнолуние, уходящая Луна.



Приливы: Луна и Земля движутся вокруг общего центра масс, смещённого на 4600 км от центра масс Земли. Гравитационные силы между Землей и Луной вызывают морские приливы и отливы на Земле. Два раза в течение суток подъем суши на Земле достигает 78 см, а в узких заливах мирового океана до 20

метров. Земля и Солнце также вызывают на Луне слабые твёрдотельные приливы: наибольший прилив высотой 0,1 метра происходит с периодом в 27 дней, менее 1 см - раз в полмесяца, приливы менее 1 мм происходят с периодами 1/3 месяца, 1 год и 6 лет. Это приводит к увеличению лунной орбиты на 4 см в год. Приливы замедляют вращение Земли примерно на 1,5 мсек за столетие. Через несколько сотен миллионов лет Луна уйдет от Земли настолько далеко, что не будет полных солнечных затмений.

Вращение Луны: Вращение Луна согласовано с движением ее вокруг Земли (резонанс 1:1). Вращение Луны описывается тремя законами Кассини (1693 г.): 1. Луна вращается с постоянной угловой скоростью вокруг своей оси; 2. Полос лунного экватора, эклиптики и лунной орбиты лежат в одной плоскости Кассини. Восходящий узел лунной орбиты совпадает с нисходящим узлом лунного экватора; 3. Плоскость лунного экватора наклонена под постоянным углом $I = 1,570^\circ$ к плоскости эклиптики. В конце XX века было получено теоретическое обоснование законов Кассини для Луны, включающей вязко-упругую мантию и жидкое ядро (Белецкий, 1971; Баркин, 1978, 2003). **Оптическая либрация** (покачивание) Луны по широте обусловлена наклоном лунной оси к плоскости её орбиты. Оптическая либрация в долготу вызвана различием в скорости орбитального движения Луны - она быстрее движется в перигее и медленнее в апогее.



Период	Амплитуда либраций по долготе (")	Период	Амплитуда либраций (")	
			в наклоне	в узле ($\times I$)
1 г	90,7	∞	5553,6	0,3
∞	63,9	27,555 д	99,0	101,3
3 г	16,8	27,212 д	78,9	78,9
27,555 д	16,8	26,878 д	24,6	24,6
273 г	14,2	18,6 г	11,8	11,8
206 д	9,9	13,606 д	10,5	10,1

Благодаря оптической либрации мы можем видеть с Земли 59% лунной поверхности. **Физическая либрация Луны** описывает неравномерность собственного вращения тела Луны, вызванное её несферичностью, неоднородностью и деформируемостью. Существует вынужденная и свободная физическая либрация. Периоды и амплитуды вынужденной либрации по долготу, в наклоне и узле определяются гравитационным взаимодействием Луны с Землей, Солнцем и планетами. **Свободная либрация**

возникает из-за несовпадения оси вращения Луны с осью фигуры Луны С. В силу этого появляются движение полюса Луны относительно оси фигуры, аналогичное Чандлеровым колебаниям Земного полюса, а также появляется два типа нутационных движений по широте и по долготу. Амплитуды и периоды этих колебаний определены из лазерной локации Луны (ЛЛЛ) с Земли (1970 - 2021). Если же тело Луны содержит жидкое ядро, в движении лунного полюса появляется дополнительное колебание - свободная нутация ядра. А если ядро двухслойное - внешнее жидкое и внутреннее твёрдое, как у Земли: то появляются еще два типа колебаний: либрация по широте и свободная нутация внутреннего ядра.

По данным ЛЛЛ обнаружено постоянное смещение оси вращения Луны из плоскости Кассини (0,26 сек), вызванное приливной диссипацией в мантии и турбулентностью в жидком ядре. В силу диссипации свободные либрации должны затухать со временем. Однако их обнаружение из ЛЛЛ порождает проблему поиска механизмов, поддерживающих

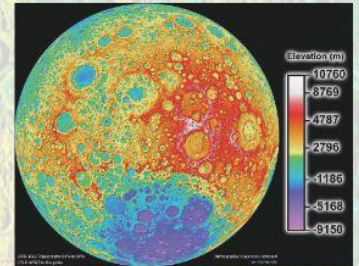
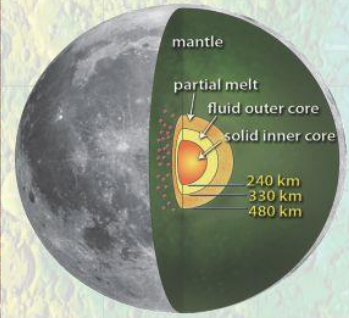
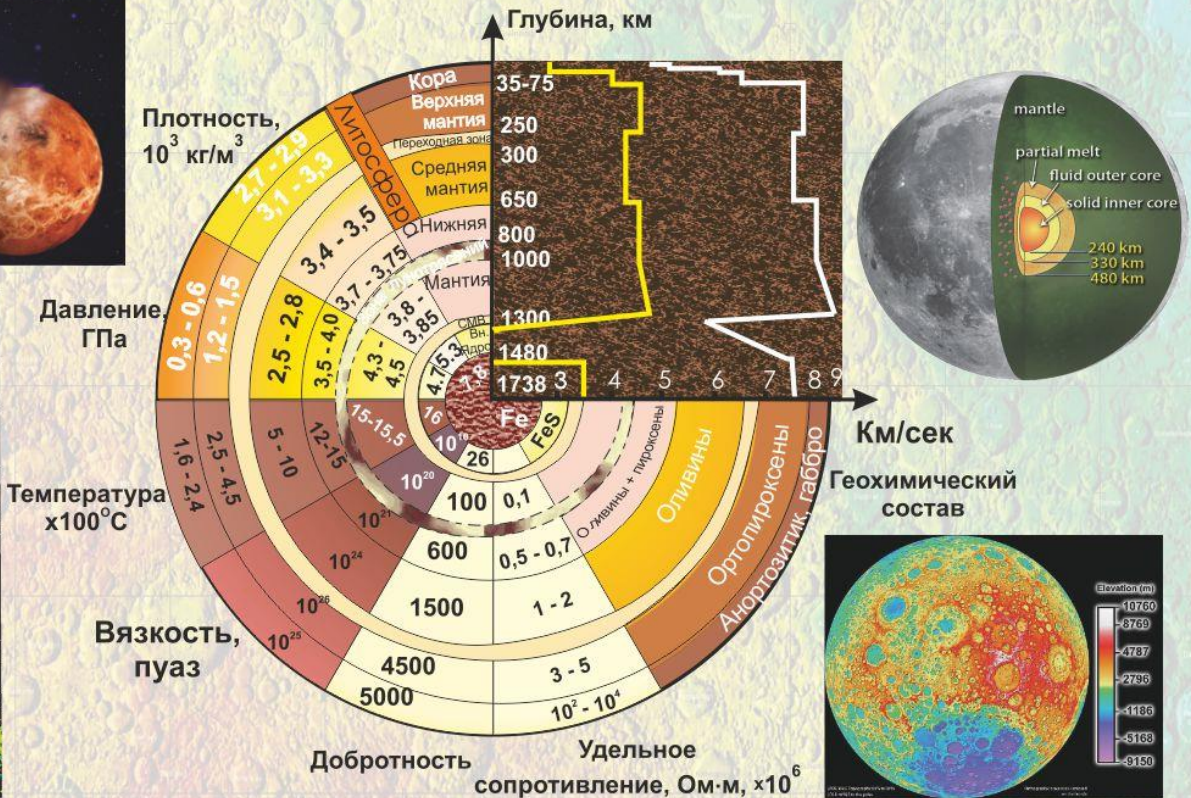
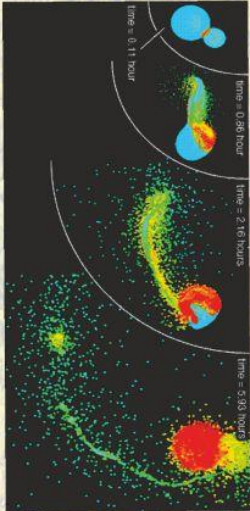
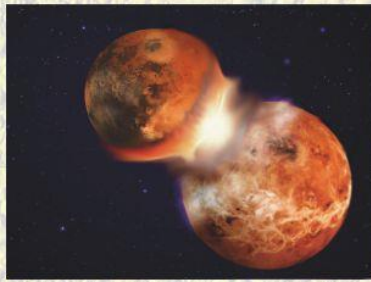
Чандлеровы колебания амплитуда	эллипс $8.183'' \times 3.306''$ (69x28 м)
период	74.626 г
Прецессия: амплитуда	0.032"
период	24.16 год
Долготная мода: амплитуда	1.296"
период	1056.12 дней
Свободная нутация ядра P_{FICN}	0.016"
	159 - 277 лет
Свободная нутация внутреннего ядра P_{FICW}	$\sim 0.001''$
	516-635 лет
Чандлеров период внутреннего ядра P_{ICW}	$\sim 0.003''$
	101-108 лет



эти свободные колебания. К таковым механизмам можно отнести лунотрясения, падения крупных метеоритов и комет, перекачка турбулентных движений на границе ядро-мантия (СМВ) в энергию свободных колебаний.



Внутреннее строение Луны



Толщина коры Луны в среднем составляет 38 км, изменяясь от 0 км под лунным морем Кризисов до 75 км в кратере Королева. Под корой находится **мантия** и **ядро** радиусом приблизительно 340 км с массой 1-2% от массы Луны. Нижняя мантия Луны частично расплавлена на границе с ядром. **Центр масс Луны** смещен на 1,68 км от ее геометрического центра в направлении к Земле. В интервале от 3-4 млрд. лет назад гигантская бомбардировка породила огромные бассейны на поверхности Луны. Поверхность Луны можно разделить на два типа: континентальная горная часть и относительно молодые лунные моря. **Лунные моря**, которые составляют 16% всей поверхности Луны, - это огромные заполненные лавой кратеры, возникшие в результате столкновений с небесными телами. Большая часть поверхности покрыта **реголитом** - смесью тонкой пыли и скалистых обломков, полученных из столкновений с метеорами. Тёмные морские породы являются **базальтами** с относительно высоким содержанием железа и титана. Яркие светлые горные породы отличаются от морских. Они называются **анортозитами** и богаты алюминием и кальцием.

Образование Луны: Существуют 4 гипотезы образования Луны.

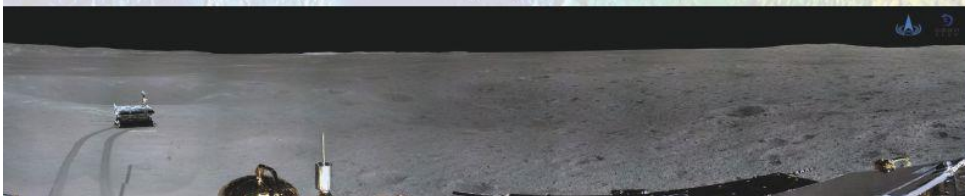
Захват: Луна, как самостоятельное небесное тело, сформировалась вне Солнечной системы, а затем при тесном сближении с Землей, была захвачена в её поле тяготения, превратившись в спутник.

Распад протоЗемли: Жорж Дарвин (1845-1912) предположил, что на раннем этапе своего формирования Земля вращалась настолько быстро, что это привело к сильной деформации ее тела и отрыву образовавшегося горба, из которого и сформировалась Луна.

Двойная планета: Земля и Луна сформировались из одного и того же газо-пылевого облака (совместная аккреция).

Гигантский удар: предполагается, что 4,6 млрд. лет назад, когда Земля была еще расплавлена, небесное тело размером с Марс нанесло Земле мощный удар на скорости 4 км/с. В результате большое количество вещества мантии и коры было расплыено вокруг Земли. Вещество ударника также было расплыено и перемешано с земным. Из этого вещества сформировалась Луна, состав которой подобен составу верхней мантии Земли.

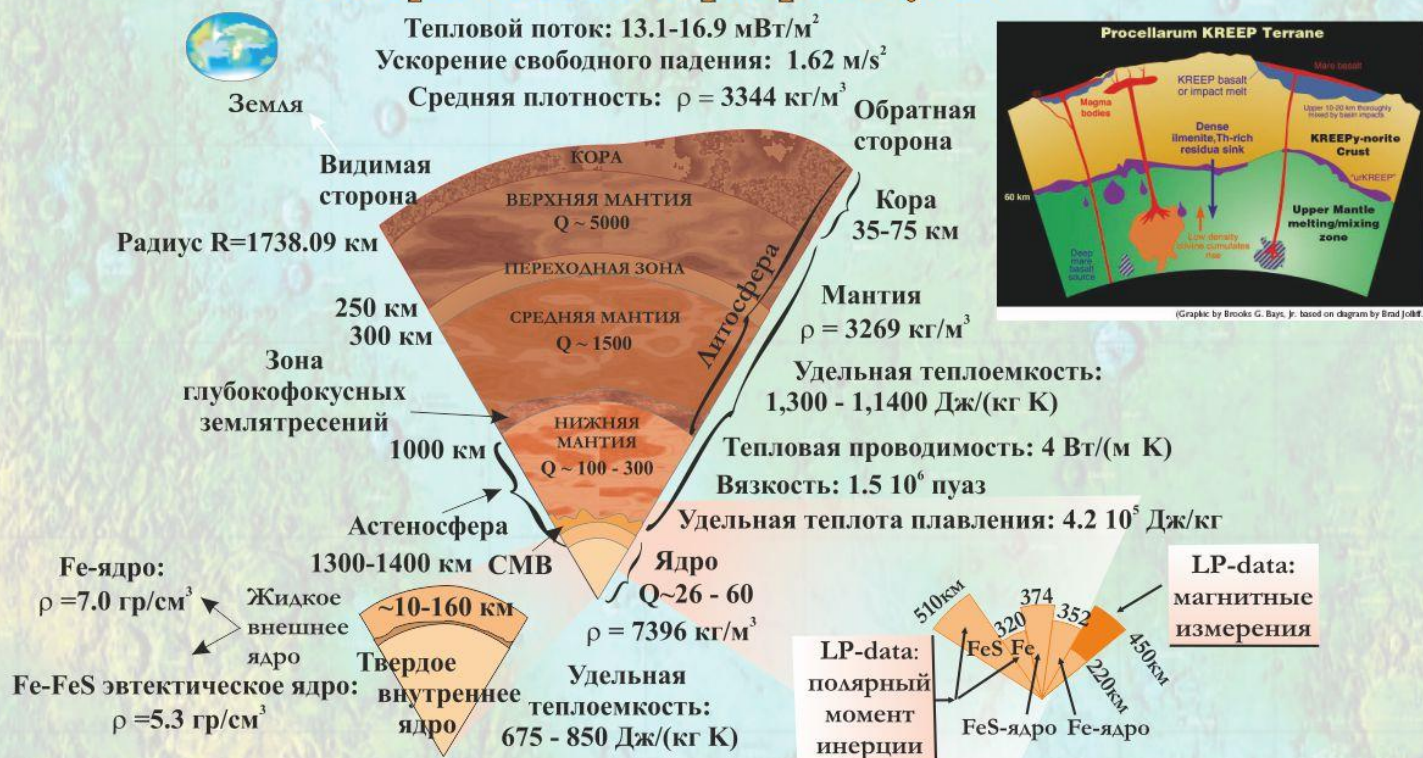
Геофизические данные Луны	
Средняя плотность	3344 кг м^{-3}
Плотность мантии	3269 кг м^{-3}
Плотность ядра	7396 кг м^{-3}
Толщина мантии	1.288×10^6 м
Радиус ядра	350-400 км
Давление в ядре	45 - 50 кбар
Поверхностный тепловой поток	$13.1 + 16.9 \text{ мВт м}^{-2}$
Температурный градиент для верхней мантии	2° К/км
Температура нижней мантии (855 км)	1700° К
Удельная теплоемкость мантии	$1300 \text{ Дж кг}^{-1} \text{ К}^{-1}$
Тепловая проводимость мантии	$4 \text{ Вт м}^{-1} \text{ К}^{-1}$
Коэффициент теплового расширения	$4 \times 10^{-4} \text{ К}^{-1}$
Коэффициент вязкости нижней мантии	1.5×10^6 пуаз
Число Релея для ранней тепловой конвекции	$(2.4-3.6) \times 10^5$
Концентрация урана верхней мантии	25.7 парциальная доля на миллион
Удельное сопротивление мантии	2×10^6 ом м
Дипольный магнитный момент	10^{13} Гс м^3





К настоящему времени более 60 миссий (США, СССР, Японии, Китая, Индии, Израиль) посетили Луну с 1959 года. Проект «Аполлон» отправил на Луну 27 астронавтов в период с 1968 по 1972 годы, 12 из которых высадились на поверхность Луны. На Землю было доставлено 382 кг лунных пород. «Луноходы-1,2» (СССР) прошли более 47 км в Море Дождей и Море Ясности, исследуя химический состав грунта и делая панорамные снимки. Богатейшая информация о Луне получена в результате 52-летней лазерной локации Луны (NASA, JPL), пяти американских лунных спутников NASA: Clementine (1994), Lunar Prospector (1998–1999), LRO (2009–2016+), GRAIL (2011–2012), LADEE (2013–2014); европейского зонда “SMART” (2005–2006); японского аппарата-лаборатории “Kaguya” (2007–2009); пяти китайских спутников серии “Chang'E-1/2, 3/4, 5/6” (2007–2021+); индийского спутника “Chandrayaan” (2008–2009).

Геофизический разрез Луны



Геофизические характеристики ядра	
Плотность ядра (сред.)	7396 кг м ⁻³
Плотность внешнего жидкого ядра (Fe-FeS)	5300 кг м ⁻³
Плотность внутреннего твёрдого ядра (Fe)	7800 кг м ⁻³
Давление в центре ядра	50 кбар
Давление на СМВ, 1300 км	45 – 47 кбар
Температура СМВ	1700° К
Температура ядра	1400 – 1700 К
Начальная температура ядра (4,5 млрд.лет)	1800° К
Удел. теплоёмкость ядра	675 Дж кг ⁻¹ К ⁻¹
Коэффициент вязкости	$1.5 \cdot 10^6$ пуаз
Число Релея для ранней тепловой конвекции	$(2.4-3.6) \cdot 10^5$
Добротность Q	26 – 37
Удел. сопротивление ядра	10^5 Ом·см

Освоение Луны: 1) геологическое обоснование для детального изучения полезных ископаемых поверхностного слоя Луны (реголит). 2) Поиск и изучение форм нахождения **летучих элементов, редких и редкоземельных металлов** в реголите в полярных и экваториальных областях Луны. 3) В условиях Луны получение **водорода, кислорода и других летучих элементов** из лунных пород а) для **создания ракетного топлива** и б) средства продолжительного безопасного жизнеобеспечения космонавтов, включая **энергообеспечение и продукты питания**. 4) Поиск и создание технологий использования местного сырья и естественных укрытий для защиты космонавтов на Луне: **лунные лавовые пещеры**. 5) Изучение возможностей организации на Луне изготовления строительных материалов для **защиты от космической радиации**. 6) Применение **аддитивных технологий 3D печати** строительных и прочих полезных материалов **из лунного сырья в лунных условиях**. 7) Поиск и создание современных технологий по изготовлению **земных аналогов лунного реголита** для проведения научно-технических экспериментов на Земле с целью научного исследования и коммерческого освоения полезных ресурсов Луны.

geo.kpfu.ru – Институт геологии и нефтегазовых технологий (420111, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 4/5)
 cdogeo.kpfu.ru – Центр дополнительного образования, менеджмента качества и маркетинга

