

В упражнении «Реголит» надо оценить необходимую толщину насыпи для защиты от гамма-излучения на модели поверхности Луны. Лунный реголит в упражнении имитируется близкой по химическому составу вулканической лавовой крошкой. Измерения проводятся дозиметром на поверхности защиты нейтронного источника.

1. Излучения на поверхности Луны

2. Экспериментальные измерения радиационного фона на поверхности Луны

3. Лабораторная установка

4. План работы

5. Литература

6. Вопросы и задачи

7. Приложения

Приложение 1. Технические характеристики дозиметра SOEKS Quantum

Приложение 2. Спектр нейтральной компоненты излучения на Луне

1. Излучения на поверхности Луны

При оценке радиационной защиты на Луне следует учитывать:

- галактические космические лучи (ГКЛ);
- солнечные космические лучи (СКЛ);
- вторичное излучение от активированных ГКЛ и СКЛ материалов.

Ядра обоих типов космических лучей это в основном протоны, ~ 10% - альфа-частицы и ~ 1% более тяжелые ядра с атомными номерами $Z \geq 3^1$. У частиц ГКЛ выше энергии, но ниже потоки, у СКЛ ниже энергии, но выше потоки (Таблица 1). Энергия и заряд частицы диктуют какой механизм, ядерные реакции и ионизационные потери, будут доминировать при ее взаимодействии с веществом. Частицы СКЛ и очень тяжелые ядра ГКЛ ($Z \geq 20$), как правило, останавливаются в верхних нескольких сантиметрах твердого материала и оставляют там следы высокой плотности. Легкие частицы ГКЛ более проникающие и вызывают ядерные реакции².

Таблица 1. Качественные характеристики космических лучей

вид излучения	энергия (МэВ на нуклон)	средний поток (частиц/(см ² ·с))	эффективный пробег, см
<u>солнечные космические лучи (СКЛ)</u> протоны и ядра гелия ядра группы железа и тяжелее	5÷100 1÷50	на орбите Земли ~100 ~1	в реголите 0÷2 0÷0.1
<u>галактические космические лучи (ГКЛ)</u> протоны и ядра гелия ядра группы железа и тяжелее	100÷3000 ~100	3 0.03	0÷100 0÷10

Интенсивность потока космических лучей зависит от фазы солнечного цикла, солнечных вспышек, коронарных выбросов. Так, на Луноходе-1 для измерения интенсивности космических лучей малых энергий было два блока. В наружном блоке разместили 5 кремниевых детекторов и торцевый счетчик Гейгера, во внутреннем блоке —

1 Точная картина сложнее. К примеру для ГКЛ: 1) ядерная компонента: протоны ~87%; гелий ~12%; более тяжелые ядра ~1%; 2) электроны ~1% от числа ядер 3) позитроны ~10% от числа электронов; 4) антипротоны <0,01%

2 Reedy R. C., Arnold J. R., Lal D. Cosmic-ray record in Solar system matter Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 1983.33:505-538.

кремниевый детектор и цилиндрический счетчик Гейгера³. Приборы фиксировали временные и пространственные вариации космических лучей солнечного и галактического происхождения за 11 месяцев, с ноября 1970 г. по октябрь 1971 г., во время перелета станции «Луна-17» от Земли к Луне и во время 11 лунных дней работы «Лунохода-1» на поверхности Луны. Измерения Лунохода-1 подтвердили сильную изменчивость потоков частиц на поверхности Луны. Число протонов с энергиями 1 - 5 МэВ менялось в 10 тысяч раз от 0,1 до 10^3 протонов/(см²·с·стер). Альфа-частиц с энергией 4,5—8,5 МэВ регистрировалось от фоновых значений до 16/(см²·с·стер), протоны с энергией выше 30 МэВ наблюдались со средней интенсивностью от 12 до 25 протонов/(см²·с·стер)⁴.

На Земле космические лучи (КЛ) встречает атмосфера толщиной⁵ около 1000 г/см². Пробеги высокoenергичных протонов в воздухе 70-80 г/см², а ядер гелия - 20-30 г/см². На Земле вероятность дойти до уровня моря у протонов КЛ крайне мала.

На Луне КЛ падают непосредственно на материал поверхности Луны — реголит⁶. Поток заряженных частиц высокой энергии на поверхность Луны, кроме ионизации атомов, вызывает разнообразные ядерные реакции, в том числе с рождением пионов, каонов, мюонов, пар электрон-позитрон и с образованием радиоактивных изотопов. К примеру, при взаимодействии протонов с веществом реголита радиоактивный изотоп алюминия ^{26}Al с периодом полураспада около 0,7 млн. лет может образовываться в реакциях: $^{28}\text{Si}(\text{p},^3\text{He})^{26}\text{Al}^8$; $^{27}\text{Al}(\text{p},\text{d})^{26}\text{Al}$; $^{25}\text{Mg}(\text{p},\gamma)^{26}\text{Al}$. Процессы ионизации, радиационные потери заряженных частиц, приводят к значительному увеличению гамма-фона на Луне. Уже измерены концентрации в зависимости от глубины реголита для радиоактивных изотопов ^{37}Ar (35 дней), ^{56}Co (77 дней), ^{22}Na (2.6 лет), ^3H (12.3 лет), ^{39}Ar (270 лет), ^{14}C (5730 лет), ^{26}Al (0.7 млн. лет), ^{53}Mn (3.7 млн. лет). Получается, что Луна является огромным детектором, «записывающим» треки и интенсивности космических лучей за миллионы и миллиарды лет. Так, данные по измерениям ^{26}Al и ^{53}Mn показали, что за последние $\sim 10^7$ лет, было лишь несколько солнечных вспышек, магнитудой выше, чем зарегистрированные за несколько последних солнечных циклов.

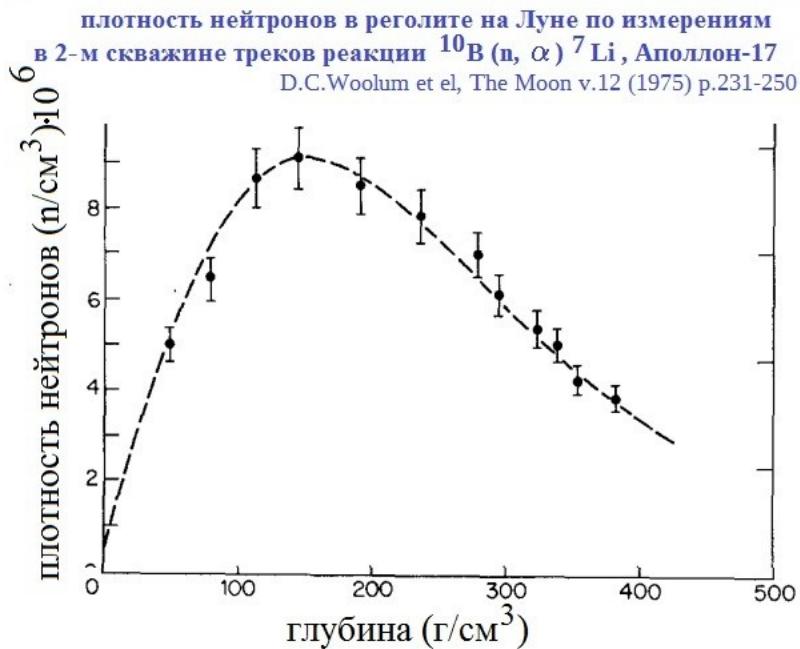


Рис. 1. Результаты измерений концентрации медленных нейтронов в 2-метровой скважине, Аполлон-17

³ Передвижная лаборатория на Луне: Луноход-1, т.1 / под ред. А.П. Виноградова Наука, М., 1971, - с.128.

⁴ Передвижная лаборатория на Луне: Луноход-1, т.2 / под ред. В.Л. Барсукова Наука, М., 1978, - с.184.

⁵ Толщину при прохождении излучения через вещество удобно измерять в г/см² — плотность материала умножается на его толщину. В этом случае учитывается изменения плотности поглотителя и материала поглотителя.

⁶ Типичный химический состав реголита лунных возвышенностей (ферроановый анортозит) по массе: кислород (45.6%), кремний (20.7%), алюминий (17.6%), кальций (13.6%), железо (1.5%), магний (0.5%), натрий (0.4%) и титан (0.1%).

⁸ Краткая запись ядерной реакции $\text{p} + ^{28}\text{Si} \rightarrow ^{26}\text{Al} + ^3\text{He}$

Для радиационной обстановки на Луне особенно важным является выбивание заряженными частицами нейтронов («скалывание нейтронов») и испускание нейтронов в ядерных реакциях типа $^{56}\text{Fe}(\text{p},\text{n})^{56}\text{Co}$. На поверхности Луны поток нейтронов с энергиями меньше 10 МэВ около 13 нейтронов/(см²·с), но с глубиной поток нейтронов сначала растет, а затем экспоненциально уменьшается.

В данной работе будет оцениваться защита только от гамма-излучения.

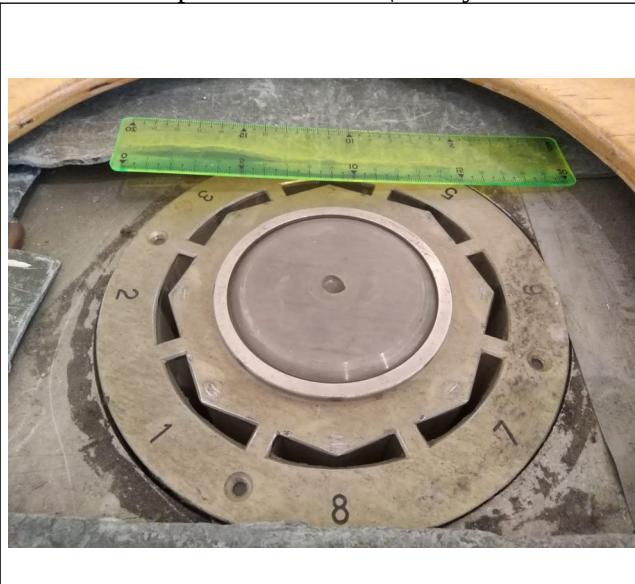
2. Экспериментальные измерения радиационного фона на поверхности Луны

Измерения спектрометра-дозиметра RADOM (один кремниевый детектор толщиной 0,3 мм) на борту аппарата «Чандраян-1» показали среднее значение мощности дозы на орбите высотой 100 км 9,5 мкГр/час (с 20/11/2008 по 18/5/2009); на высоте 200 км — 10,7 мкГр/час (с 20/05/2009 по 28/08/2009). Телескоп космических лучей CraTER (6 сегментированных кремниевых детекторов и два пластиковых сцинтиллятора с характеристиками, близкими к биологической ткани) на борту Lunar Reconnaissance Orbiter, двигающегося по орбите на высоте 50 км над поверхностью Луны, показывает средние значения 9,2 – 11,25 мкГр/час. Данные измерений выкладываются в общий доступ⁹.

Измерения на поверхности Луны в самом крупном лунном ударном бассейне Южный полюс — Эйткен¹⁰ по лунным дням проводит телескоп LND (10 сегментированных кремниевых детекторов) китайского аппарата Чанъэ-4 (Chang'E 4)¹¹. Среднее значение мощности полной поглощенной дозы в кремнии, согласно измерениям LND составило (10.2 ± 1.1) мкГр/час. Для перевода дозы к поглощенной в воде используется множитель 1,33. Таким образом, среднее значение мощности полной поглощенной дозы для воды получается 13.2 ± 1 мкГр/час.

3. Лабораторная установка

Излучение от нейтронного источника экранировано оргстеклом, парафином, кадмием и свинцом. В верхней части защиты имеется вырез для облучения образцов. На этом участке гамма-фон по порядку величины совпадает с фоном от нейтральных частиц на Луне.

	
рис. 1. Плутоний-бериллиевый источник нейтронов в защитном блоке из оргстекла, парафина, кадмия и свинца	рис. 2. Вырез в защите для облучения образцов

9 CraTER Cosmic Ray Telescope for Effects of Radiation <https://crater-web.sr.unh.edu/products.php>

10 Это второй по величине ударный кратер в Солнечной системе. Внешняя граница бассейна Южный полюс — Эйткен имеет размер 2400×2050 км. Породы бассейна содержат много железа, титана и тория.

11 The Lunar Lander Neutron and Dosimetry (LND) Experiment on Chang'E 4 / Robert F. Wimmer-Schweingruber et. el. URL: <https://arxiv.org/pdf/2001.11028.pdf>

4. План работы

1. Провести измерения мощности радиационного фона на поверхности защиты нейтронного источника:

- без «реголита»
- с 1 пакетом «реголита»
- с 2 пакетами «реголита»
- ...

2. Построить зависимость мощности радиационного фона от толщины защиты.

3. Рассчитать толщину защиты, обеспечивающую безопасный радиационный фон около 30 мкЗв/ч

4* (выполняется по желанию, см. Приложение 2) Сравнение спектра гамма-излучения на Луне по измерениям телескопа LND и спектра гамма-излучения рабочей области нейтронного источника

- провести калибровку сцинтиляционного детектора с помощью источника Ra-226;
- штатив со сцинтиляционным детектором перенести к рабочей области нейтронного источника и провести измерение спектра;
- сравнить полученный спектр с данными детектора C1 аппарата Чанъэ-4.

При подготовке к работе составьте план эксперимента.

- ✓ Изучите расположение детекторов в дозиметре (см. Приложение). Как Вы планируете располагать дозиметр:

вертикально	боком	плашмя
		

- ✓ во всех экспериментах на одинаковом расстоянии от выреза в защите для облучения образцов или вначале поверх выреза для облучения образцов, потом каждый раз сверху на очередном пакете с «реголитом»?

5. Литература

1. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы. — М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999. — 116 с.
2. Основы космической биологии и медицины. Совместное советско-американское издание в 3 томах: Наука, М., 1975. том 1 Космическое пространство как среда обитания
3. Передвижная лаборатория на Луне: Луноход-1, том 1 /под ред. А.П. Виноградова, Наука, М., 1971, - с.128.
4. Передвижная лаборатория на Луне: Луноход-1, т.2 /под ред. В.Л. Барсукова Наука, М., 1978, - с.184.
5. CraTER Cosmic Ray Telescope for Effects of Radiation
<https://crater-web.sr.unh.edu/products.php>
6. The Lunar Lander Neutron and Dosimetry (LND) Experiment on Chang'E 4 / Robert F.Wimmer-Schweingruber et. el. URL: <https://arxiv.org/pdf/2001.11028.pdf>
7. Reedy R. C., Arnold J. R., Lal D. Cosmic-ray record in Solar system matter Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 1983.33:505-538.
8. Zhang et al., First measurements of the radiation dose on the lunar surface Sci. Adv. 2020; 6 , 2020

6. Вопросы и задачи

1. По таблице взвешивающих коэффициентов (коэффициентов качества) из НРБ-99¹² определите:

- какой вид излучения не встречается на Луне?
- какие виды излучения на Луне представляют наибольшую опасность?

Взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения при расчете эквивалентной дозы (W_R) — используемые в радиационной защите множители поглощенной дозы, учитывающие относительную эффективность различных видов излучения в индуцировании биологических эффектов

вид излучения	W_R
фотоны любых энергий	1
электроны и мюоны любых энергий	1
нейтроны с энергией менее 10 кэВ	5
от 10 кэВ до 100 кэВ	10
от 100 кэВ до 2 МэВ	20
от 2 МэВ до 20 МэВ	10
более 20 МэВ	5
протоны с энергией более 2 МэВ, кроме протонов отдачи	5
альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра	20

2. Измерения на поверхности Луны в самом крупном лунном ударном бассейне Южный полюс — Эйткен по лунным дням проводит телескоп LND китайского аппарата Чанъэ-4 (Chang'E 4). Фон от радиоизотопного источника питания и трех обогревательных радиоизотопных элементов на Чанъэ-4 был измерен на Земле до отлета аппарата.

Заполните итоговые значения для измеренной им мощности дозы на Луне.

мощность дозы (мкЗв/час)	измеренная	фон	итоговая
нейтральные частицы	4.7 ± 0.1	1.7 ± 0.5	
заряженные частицы	13.7 ± 0.4	3.5 ± 0.8	
полная	18.4 ± 0.4	5.2 ± 0.6	

Ошибки в измерениях считайте систематическими (и складывайте квадратично).

12 Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы. — М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999. — 116 с.

7. Приложения

Приложение 1. Некоторые технические характеристики дозиметра SOEKS Quantum

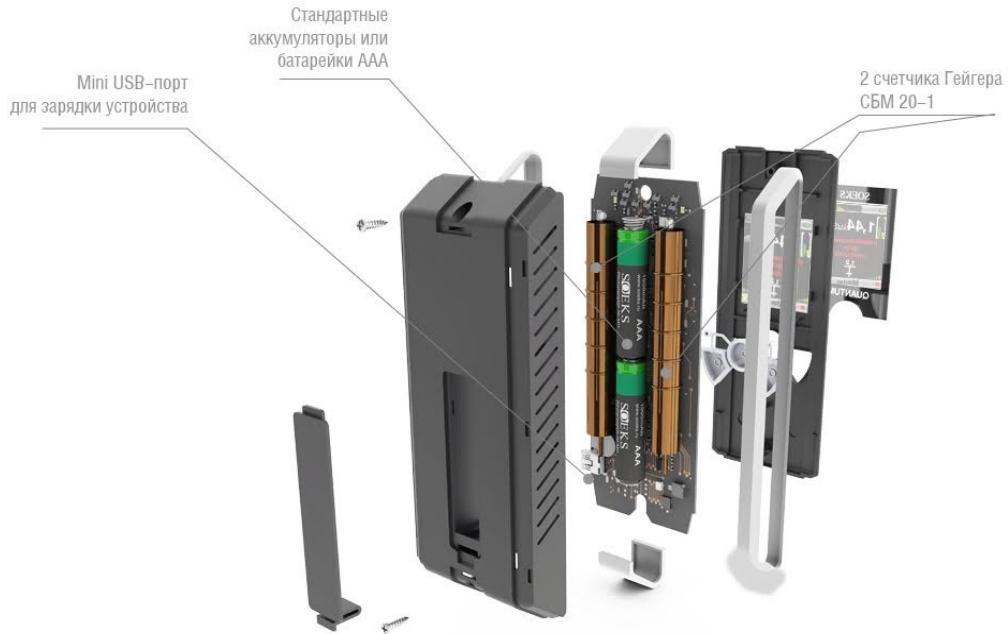


рис. Внутреннее устройство дозиметра SOEKS Quantum, использующего 2 счетчика Гейгера-Мюллера (СБМ 20-1) (URL:

https://soeks.ru/image/catalog/products/quantum/manual_dozimetr_quantum.pdf

Диапазон показаний уровня радиоактивного фона: до 1 000 мкЗв/ч

Диапазон измерения накопленной дозы: до 1 000 Зв

Регистрируемая энергия гамма-излучения: от 0,1 МэВ

Пороги предупреждения: от 0,3 до 100 мкЗв/ч

Время измерения: 10 секунд

Приложение 2. Спектр нейтральной компоненты излучения на поверхности Луны по данным детектора кремниевого детектора С1 толщиной 505 мкм аппарата Чанъэ-4

