

# Радиация на Земле и на Луне

версия 3.1 09.03.2023

*С помощью дозиметра следует обнаружить радиоактивный объект (урановую смолку из набора минералов; радиоактивную кость из набора окаменелостей; слабый радиоактивный источник).*

*Оценить дозу, получаемую биологическим объектом (бобы или фасоль) при облучении пучком электронов или гамма-квантов.*

*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.*

*В упражнении «Активация тепловыми нейтронами» надо определить период полураспада металла, облученного тепловыми нейтронами и оценить эффективную дозу, «полученную» счетчиком Гейгера.*

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. Пример калибровки сцинтилляционного спектрометра по интенсивным гамма-линиям радия-226 в вековом равновесии с дочерними изотопами

Приложение 3. Спектр нейтральной компоненты излучения на поверхности Луны по данным детектора кремниевого детектора С1 толщиной 505 мкм аппарата Чанъэ-4

Приложение 4. Фрагмент NZ-диаграммы для определения активируемого материала

## 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 в СКЛ и ГКЛ это в основном протоны, ~ 10% - альфа-частицы и ~ 1% более тяжелые ядра с атомными номерами  $Z \geq 3$ <sup>1</sup>. 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 реакции<sup>2</sup>.

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 торцевой счетчик Гейгера, во внутреннем блоке — кремниевый детектор и цилиндрический счетчик Гейгера<sup>3</sup>. 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

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.

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

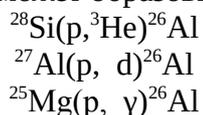
«Луна-17» от Земли к Луне и во время 11 лунных дней работы «Лунохода-1» на поверхности Луны. Измерения Лунохода-1 подтвердили сильную изменчивость потоков частиц на поверхности Луны. Число протонов с энергиями 1 - 5 МэВ менялось в 10 тысяч раз от 0,1 до  $10^3$  протонов/(см<sup>2</sup>·с·ср<sup>4</sup>). Альфа-частиц с энергией 4,5—8,5 МэВ регистрировалось от фоновых значений до 16/(см<sup>2</sup>·с·ср), протоны с энергией выше 30 МэВ наблюдались со средней интенсивностью от 12 до 25 протонов/(см<sup>2</sup>·с·ср)<sup>5</sup>.

Таблица 1. Качественные характеристики космических лучей

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

На Земле космические лучи (КЛ) встречает атмосфера толщиной<sup>6</sup> около 1000 г/см<sup>2</sup>. Пробеги высокоэнергичных протонов в воздухе 70-80 г/см<sup>2</sup>, а ядер гелия - 20-30 г/см<sup>2</sup>. На Земле вероятность дойти до уровня моря у протонов КЛ крайне мала. В результате ядерных реакций в атмосфере Земли до уровня моря излучение от КЛ в основном состоит из мюонов и нейтронов, потому что нейтроны не участвуют в электромагнитном взаимодействии, а мюоны не участвуют в сильном взаимодействии, и они достаточно долгоживущие<sup>7</sup>.

На Луне КЛ падают непосредственно на материал поверхности Луны — реголит<sup>8</sup>. 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 <sup>26</sup>Al с периодом полураспада около 0,7 млн. лет может образовываться в реакциях<sup>9</sup>:



Процессы ионизации, радиационные потери заряженных частиц, приводят к значительному увеличению гамма-фона на Луне. По доставленным на Землю колонкам выбуренного реголита измерены концентрации в зависимости от глубины для радиоактивных изотопов <sup>37</sup>Ar (35 дней), <sup>56</sup>Co (77 дней), <sup>22</sup>Na (2.6 лет), <sup>3</sup>H (12.3 лет), <sup>39</sup>Ar (270 лет), <sup>14</sup>C (5730 лет), <sup>26</sup>Al (0.7 млн.лет), <sup>53</sup>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 <sup>26</sup>Al и <sup>53</sup>Mn показали, что за последние ~ 10<sup>7</sup> лет, было лишь несколько солнечных вспышек, магнитудой выше, чем зарегистрированные за несколько последних солнечных циклов.

Для радиационной обстановки на Луне особенно важным является выбивание заряженными частицами нейтронов («скалывание нейтронов») и испускание нейтронов в

4 ср — стерадиан (международное обозначение sr square radian), единица измерения телесного угла

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

6 Толщину при прохождении излучения через вещество удобно измерять в г/см<sup>2</sup> — плотность материала умножается на его толщину. В этом случае учитываются изменения плотности поглотителя и материала поглотителя.

7 Среднее время жизни (mean life) свободного нейтрона  $879.4 \pm 0.6$  с, мюона  $2,2 \cdot 10^{-6}$  с.

8 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%).

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

ядерных реакциях типа  $^{56}\text{Fe}(p,n)^{56}\text{Co}$ . На поверхности Луны поток нейтронов с энергиями меньше 10 МэВ около 13 нейтронов/(см<sup>2</sup>·с), но с глубиной поток нейтронов сначала растет, а затем экспоненциально уменьшается (рис.1).

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

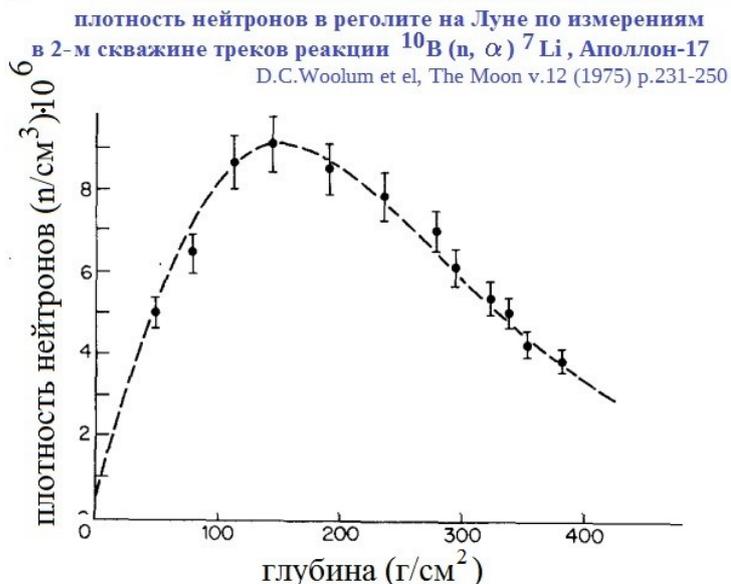


Рис. 1. Результаты измерений концентрации медленных нейтронов в 2-метровой скважине, Аполлон-17

## 2. Экспериментальные измерения радиационного фона на поверхности Луны

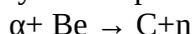
Измерения спектрометра-дозиметра RADOM (один кремниевый детектор толщиной 0,3 мм) на борту аппарата «Чандраян-1» показали среднее значение мощности дозы на орбите высотой 100 км 9,5 мкГр/час (с 20/11/2008 по 18/5/2009); на высоте 200 км — 10,7 мкГр/час (с 20/05/2009 по 28/08/2009). Телескоп космических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

Измерения на поверхности Луны в самом крупном лунном ударном бассейне Южный полюс — Эйткен<sup>11</sup> по лунным дням проводит телескоп LND (10 сегментированных кремниевых детекторов) китайского аппарата Чаньэ-4 (Chang'E 4)<sup>12</sup>. Среднее значение мощности полной поглощенной дозы в кремнии, согласно измерениям LND составило  $(10,2 \pm 1,1)$  мкГр/час. Для перевода дозы к поглощенной в воде используется множитель 1,33. Таким образом, среднее значение мощности полной поглощенной дозы для воды получается  $13 \pm 1$  мкГр/час.

Для сравнения мощность поглощенной дозы на Земле от космического излучения равна 32 нГр/час, а отдельно для нейтронов 0,8 нГр/час. За счет космического излучения большинство населения получает дозу, равную около ~0,35 мЗв в год.

## 3. Лабораторная установка

В настоящей работе используется плутоний-бериллиевый (интерметаллическое соединение PuBe<sub>13</sub>) источник нейтронов мощностью  $10^6$  -  $10^7$  нейтронов/с. <sup>239</sup>Pu (период полураспада 24 тысячи лет) излучает α-частицы. Они не могут вылететь из источника из-за ничтожно малых пробегов α-частиц и вступают в реакцию с ядрами бериллия:



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

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

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

Энергия получающегося нейтрона зависит от угла между импульсами  $\alpha$ -частицы и нейтрона, от степени замедления  $\alpha$ -частицы перед столкновением и от рассеяния нейтрона внутри источника. Pu-Be источник, используемый в данной лабораторной работе, испускает нейтроны с энергиями до 10 МэВ. Для замедления нейтронов до тепловых скоростей источник помещен в парафиновый блок в защите из кадмия и свинца (рис. 2а). В верхней части защиты имеется вырез для облучения образцов (рис. 2б). На этом участке гамма-фон по порядку величины совпадает с фоном от нейтральных частиц на Луне.



рис. 2а. Плутоний-бериллиевый источник нейтронов в защитном блоке из оргстекла, парафина, кадмия и свинца

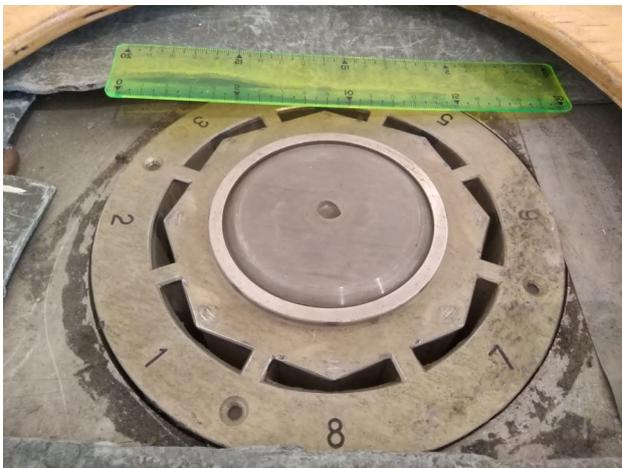


рис. 2б. Вырез в защите для облучения образцов

Шпаги с образцами вставляются в пазы, расположенные на расстоянии нескольких сантиметров от источника нейтронов, в блок из оргстекла. Наведенная  $\beta$ -активность измеряется при помощи **счетчика Гейгера** с толщиной стенки 0,065 г/см<sup>2</sup>. Схема установки для измерения периодов полураспада показана на рис. 3.

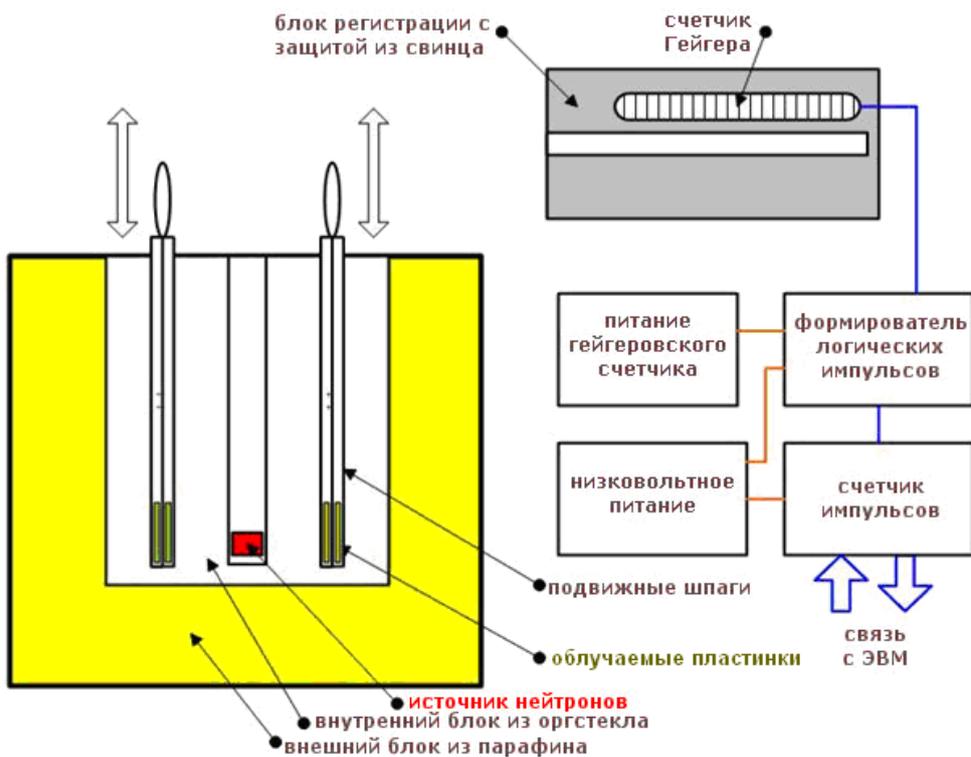


рис. 3: Схема облучения металлических пластинок нейтронами

Активацией называется процесс образования радиоактивного вещества при облучении стабильных ядер нейтронами, протонами и другими видами излучения. Количество активированных ядер зависит от количества атомов в мишени, времени облучения и эффективного сечения ядерной реакции, в которой образуется исследуемый изотоп.

Эффективное сечение  $\sigma$  характеризует вероятность взаимодействия частицы с ядром и определяется как отношение числа событий данного типа в единицу времени, приходящееся на одно ядро мишени, к потоку налетающих частиц через единицу поверхности мишени. Если слой вещества, содержащий  $n$  ядер, пересекают  $v$  частиц/(см<sup>2</sup>с), то число актов взаимодействия  $m$ , вызванных ими в единицу времени, будет равно

$$m = v \cdot n \cdot \sigma \quad (1)$$

Наглядный смысл понятия эффективного сечения ясен из следующего. Рассмотрим какую-либо ядерную реакцию. Заменим каждое ядро мишенью с площадью  $\sigma$ , тогда площадь, занимаемая  $n$  ядрами, будет равна  $n\sigma$  и число попаданий в мишени выразится формулой (1). Однако нужно подчеркнуть, что только в отдельных случаях эффективное сечение ядерной реакции примерно равно площади сечения ядра. Так, площадь сечения ядра около  $10^{-24} \div 10^{-25}$  см<sup>2</sup>, тогда как эффективное сечение различных ядерных реакций колеблется от  $10^{-20}$  см<sup>2</sup> (захват тепловых нейтронов, см. табл. 1) до  $10^{-30}$  см<sup>2</sup> (возбуждение ядер  $\gamma$ -квантами). В общем случае сечение захвата нейтрона сильно зависит от энергии нейтрона.

Эффективное сечение измеряется в *барнах*:  $1\text{б} = 10^{-24}$  см<sup>2</sup>

В 1935 г. Ферми обнаружил, что наведенная радиоактивность во много раз увеличивается, если источник нейтронов и облучаемую мишень окружить водородсодержащим веществом, например парафином. Как оказалось, это связано с тем, что нейтроны при соударениях с равными им по массе протонами быстро теряют энергию и распространяются в среде с тепловыми скоростями. Кроме того, тепловые нейтроны, испытывая в парафине большое число соударений, движутся хаотично и могут пересекать облучаемую мишень несколько раз, а *вероятность захвата нейтронов атомными ядрами обратно пропорциональна их скорости* (закон « $1/v$ »). При захвате теплового нейтрона ядром с массовым числом  $A$  образуется «компануд» ядро  $A+1$  в возбужденном состоянии. Избыток энергии, равный энергии связи нейтрона в ядре  $A+1$  ( $5 \div 8$  МэВ), может выделиться в виде  $\gamma$ -квантов. Такие реакции носят название радиационного захвата нейтрона.

Образованные в результате захвата теплового нейтрона ядра могут быть нестабильными. Если в образце в момент времени  $t$  имеется большое число  $N(t)$  радиоактивных ядер, то количество ядер  $dN$ , распавшихся за время  $dt$  пропорционально  $N$  (из независимости событий распада ядер).

$$dN = -\lambda \cdot N(t) \cdot dt \quad (2)$$

**Постоянная распада  $\lambda$**  – вероятность распада ядра в единицу времени. Интегрируя (2) получим закон радиоактивного распада

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (3)$$

где  $N_0$  количество радиоактивных ядер в момент времени  $t = 0$ .

**Период полураспада  $T_{1/2}$**  – время, в течение которого, первоначальное количество радиоактивных ядер уменьшится в два раза

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,693}{\lambda}$$

Таблица 1. Примеры сечений захвата тепловых нейтронов для некоторых веществ

вещество	сечение захвата тепловых нейтронов (со скоростью 2200 м/с), б
дейтерий	0.00052
графит	0.0035
водород	0.33
алюминий	0.231
серебро	63.3
родий	144.8
уран-235	$582.6 \pm 1.1$
америций-242m	$1290 \pm 300$
бор-10	3837
гадолиний-157	$259000 \pm 700$

$$\text{Среднее время жизни } \tau = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot N(t) dt}{\int_0^{\infty} N(t) dt} = \frac{1}{\lambda}$$

Вероятностный характер распада проявляется в том, что наблюдаемая кривая распада представляет совокупность случайных точек, расположенных в окрестности усредненной кривой, убывающей в соответствии с законом (3), см. рис. 4. Случайные отклонения наблюдаемых величин от их средних значений описываются статистическим распределением Пуассона - возможные случайные отклонения наблюдаемого значения  $N(t)$  от среднего значения  $\bar{N}$  имеют вероятность:

$$p(N) = \frac{\bar{N}^N}{N!} \cdot e^{-\bar{N}}$$

Дисперсия отклонений этого процесса равна  $\bar{N}$ , а указанный на рис. 4 для каждой экспериментальной точки доверительный интервал, в пределах которого наблюдаемая величина встречается с вероятностью примерно 68%, составляет  $\bar{N} \pm \sqrt{\bar{N}}$  (последнее справедливо при  $N(t) \gg 1$ ).

**Активность источника I** - среднее количество распадов ядер источника в единицу времени

$$I(t) = \lambda N(t)$$

За единицу в системе СИ активности принимают “беккерель”, 1 распад в секунду.

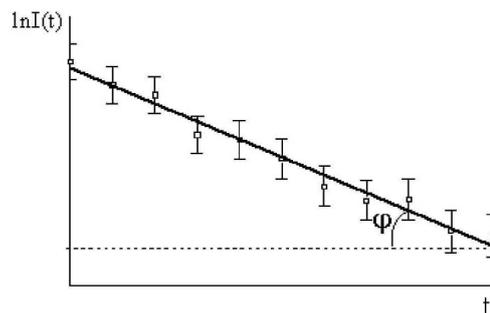


рис. 4: График распада радиоактивного препарата в полулогарифмическом масштабе. Усредненная жирная линия соответствует закону распада (4), пунктирная линия – фону.

#### 4. План работы

При подготовке к работе составьте план эксперимента. Изучите расположение детекторов в дозиметре (см. Приложение 1). Как Вы планируете располагать дозиметр относительно источника:

вертикально	боком	плашмя

#### Упражнение I. «Радиация на Земле»

1. С помощью дозиметра найти радиоактивный объект (урановую смолку из набора минералов; радиоактивную кость из набора окаменелостей; слабый радиоактивный источник).

Используя пластины разных материалов, определить вид излучения, испускаемый объектом. Проверить предположение с помощью спектрометра. Определить энергию испускаемого излучения. Рассчитать толщину необходимой защиты для безопасной работы с данным объектом и экспериментально проверить.

2. Оценить дозу, получаемую биологическим объектом (бобы или фасоль) при облучении пучком электронов или гамма-квантов. Доза рассчитывается по сравнению числа регистрируемых частиц прямого потока и прошедшего через объект.

## Упражнение II. «Реголит»

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 0,3 мкЗв/ч
- 4\* (см. Приложение 2) Сравнение спектра гамма-излучения на Луне по измерениям телескопа LND и спектра гамма-излучения рабочей области нейтронного источника
  - провести калибровку сцинтилляционного детектора с помощью источника Ra-226;
  - штатив со сцинтилляционным детектором перенести к рабочей области нейтронного источника и провести измерение спектра;
  - сравнить полученный спектр с данными детектора С1 аппарата Чаньэ-4.

## Упражнение III «Активация тепловыми нейтронами»

1. Выбрать шпагу с облучаемыми пластинками.
2. Запустить программу регистрации импульсов со счетчика Гейгера. Выбрать период времени для набора адекватного спектра активности образца.
3. Облучить шпагу в течение рекомендованного времени (порядка 3-5 с).
4. Вставить облученную шпагу в блок регистрации с защитой из свинца.
5. Определить из данных изменения активности образца период полураспада образца.
6. По фрагменту карты атомных ядер с указанными периодами полураспада определить материал образца.
7. Оценить эффективную дозу, «полученную» счетчиком Гейгера.

## 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, том 2 /под ред. В.Л. Барсукова Наука, М., 1978, - с.184.
5. CraTER Cosmic Ray Telescope for Effects of Radiation URL: <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. al. 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.

## 6. Вопросы и задачи

1. По таблице взвешивающих коэффициентов (коэффициентов качества) из НРБ-99<sup>13</sup> 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	$4.7 \pm 0.1$	$1.7 \pm 0.5$	
заряженные частицы	$13.7 \pm 0.4$	$3.5 \pm 0.8$	
полная	$18.4 \pm 0.4$	$5.2 \pm 0.6$	

Ошибки в измерениях считайте систематическими (и складывайте квадратично).

3. В установке используется источник быстрых нейтронов ИБН-9 с активностью  $5 \cdot 10^6$  нейтронов/с. Если бы у него не было защиты, на каком минимальном расстоянии от него можно было бы работать без дополнительной защиты? По санитарным нормам допустимая плотность потока быстрых нейтронов составляет  $I_0 = 20$  нейтронов/( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ )

4. Атмосфера на Марсе  $16 \text{ г/см}^2$ . Оцените интенсивность СКЛ и ГКЛ на его поверхности.

5. Для оценки потока нейтронов в миссиях Apollo использовались тонкие пластинки массой меньше 1 г из иридия и тантала<sup>14</sup>. Пластинки входили в состав пассивных дозиметров, которые помещались в одежду. Наведенная активность пластинок измерялась после 10-дневной лунной миссии и 21-дневного карантина. С помощью NZ-диаграммы (к примеру <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>) объясните, почему были выбраны иридий и тантал. Как вы думаете, какой замедлитель нейтронов использовался?

6. Измерения дозиметров показали, что доза от нейтронов, полученная астронавтами Apollo-12 от внешних источников оказалась меньше, чем доза от нейтронов использованного РИТЭГа (радиоизотопного термоэлектрогенератора) SNAP-27. К примеру, командир Apollo - 12 от РИТЭГа получил дозу 100 мбэр, а от других причин  $2.1 \pm 0.75$  мбэр. В РИТЭГе использовались «таблетки» из оксида плутония-238. Почему из РИТЭГа вылетали нейтроны?

<sup>13</sup> Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы. — М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999. — 116 с.

<sup>14</sup> English R. A.; Liles E. D. Iridium and Tantalum Foils for Spaceflight Neutron Dosimetry. Health Physics 22(5), May 1972, p. 503-507.

## 7. Приложения

### Приложение 1. Некоторые технические характеристики дозиметра SOEKS Quantum

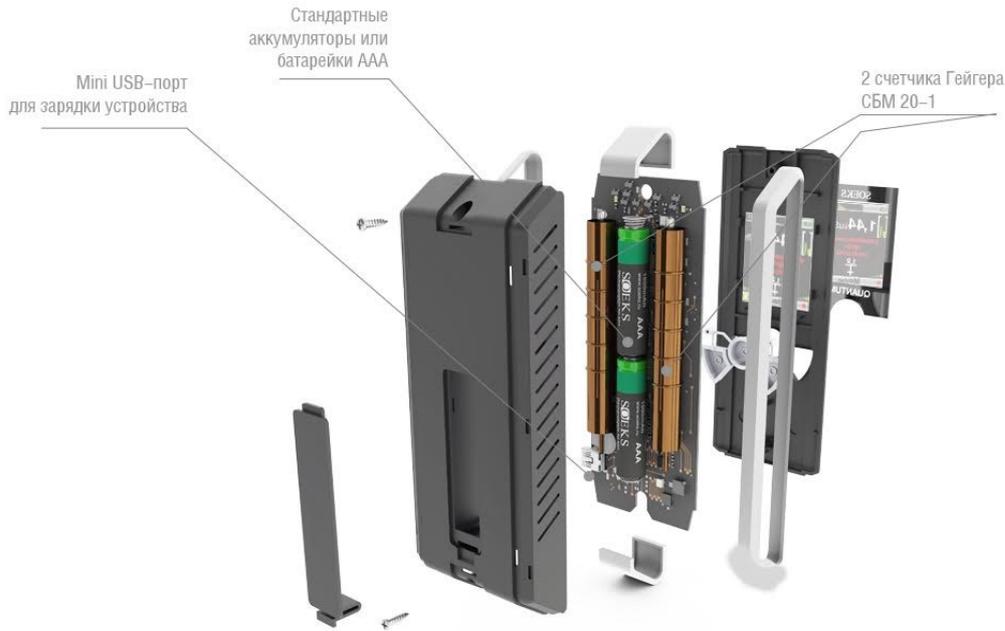


рис. Внутреннее устройство дозиметра SOEKS Quantum, использующего 2 счетчика Гейгера-Мюллера (СБМ 20-1) (URL:

[https://soeks.ru/image/catalog/products/quantum/manual\\_dozimetr\\_quantum.pdf](https://soeks.ru/image/catalog/products/quantum/manual_dozimetr_quantum.pdf))

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

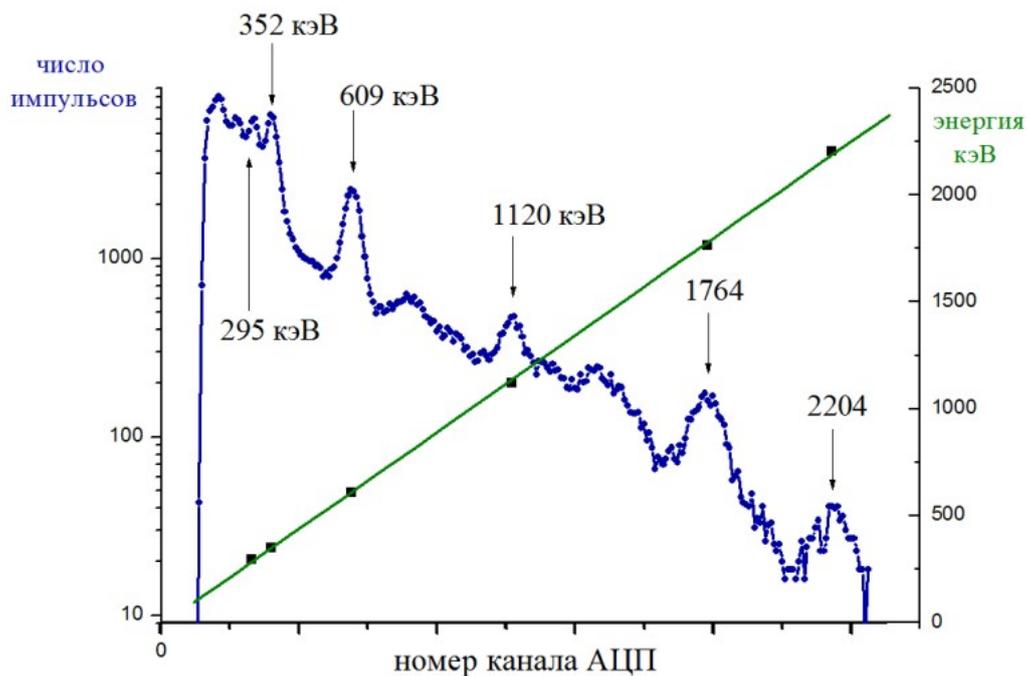
Диапазон измерения накопленной дозы: до 1 000 Зв

Регистрируемая энергия гамма-излучения: от 0,1 МэВ

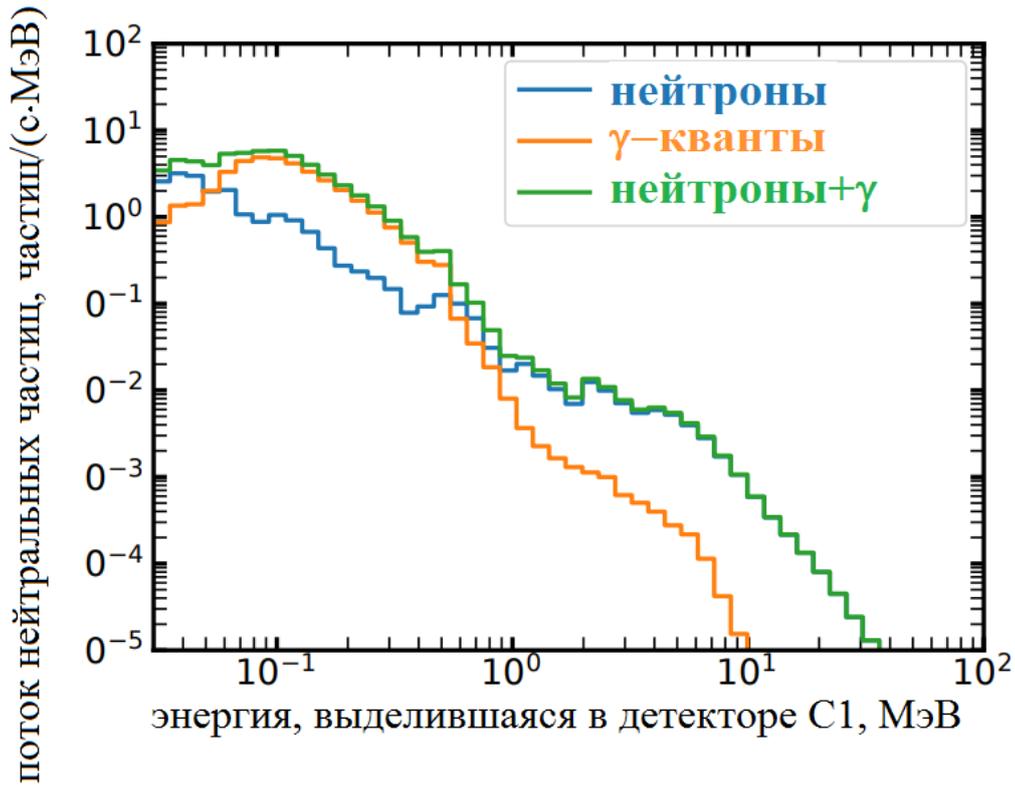
Пороги предупреждения: от 0,3 до 100 мкЗв/ч

Время измерения: 10 секунд

### Приложение 2. Пример калибровки сцинтиляционного спектрометра по интенсивным гамма-линиям радия-226 в вековом равновесии с дочерними изотопами



Приложение 3. Спектр нейтральной компоненты излучения на поверхности Луны по данным детектора кремниевый детектора С1 толщиной 505 мкм аппарата Чаньэ-4



Приложение 4. Фрагмент NZ-диаграммы для определения активируемого материала

число протонов	In107	In108	In109	In110	In111	In112	In113	In114	In115	In116
	32.4м	58м	4.2ч	4.9ч	2.8д	15 м	4.3%	71.9с	95.7% 4E14л	14.1с
	Cd106	Cd107	Cd108	Cd109	Cd110	Cd111	Cd112	Cd113	Cd114	Cd115
	1.3%	6.5ч	0.9%	461д	12.5%	12.8%	24.1%	12.2% 8E15л	28.7%	53.5ч
	Ag105	Ag106	Ag107	Ag108	Ag109	Ag110	Ag111	Ag112	Ag113	Ag114
41.3д	24м	51.8%	2.4м	48.2%	24.6с	7.5д	3.1ч	5.4ч	4.6с	
Pd104	Pd105	Pd106	Pd107	Pd108	Pd109	Pd110	Pd111	Pd112	Pd113	
11.1%	22.3%	27.3%	7E6 л	26.5%	13.7ч	11.7%	23.4м	21ч	93с	
Rh103	Rh104	Rh105	Rh106	Rh107	Rh108	Rh109	Rh110	Rh111	Rh112	
100%	42.3с	35.4ч	30с	21.7м	16.9с	80с	3.2с	11с	6.7с	
	58	число нейтронов								67