

# КОСМИЧЕСКАЯ РАДИАЦИЯ

## СОДЕРЖАНИЕ.

1. СОСТАВ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.
2. ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА МАГНИТОСФЕРЫ И АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ.
3. ВТОРИЧНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ.
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

## СОСТАВ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Первые представления о существовании в околоземном пространстве испускаемого Солнцем корпускулярного излучения возникли в начале века. Биркеланд и Штёмер считали, что полярные сияния обусловлены струйными солнечными потоками частиц, но объяснить их происхождение в то время они не могли. Еще в самых первых экспериментах, связанных с регистрацией с радиоактивности, было обнаружено, что существует некоторый постоянный фон событий, не связанный с наличием радиоактивного источника, причем толстая защита только частично снижала его. Предполагалось, что этот эффект связан с собственной активностью материалов детекторов. Однако уже в 1911 г. Гесс выполнил измерения в атмосфере, установив счетчик частиц на воздушном шаре, и обнаружил рост показаний детекторов с высотой. Таким образом, было установлено, что главной причиной фона является излучение, входящее в атмосферу извне, из космического пространства. Исследования космической радиации оказали огромное влияние на развитие ядерной физики в целом. Когда Чедвик в 1932 г. открыл существование нейтрона, картина материального мира казалась завершенной. Вся материя казалась состоящей из 4-х фундаментальных частиц: протонов, нейтронов, электронов и гамма-квантов. Однако в том же 1932 г. Андерсеном при изучении космического излучения был открыт позитрон, т. е. первая античастица. Пятью годами позже Андерсоном и Нидермеером была открыта отрицательно заряженная частица с массой около 200 масс электрона – мюон. С тех пор было открыто множество субядерных частиц, многие из которых впервые наблюдались в космических лучах (например,  $\pi$ -мезоны, открытые в 1948 г. при просмотре эмульсий, облученных в течение нескольких месяцев на большой высоте). В нашей стране большой вклад в изучение космических лучей внес академик Алиханян (эксперименты по их изучению на г. Арагац). Оказалось, что в составе космических лучей имеются частицы с чрезвычайно высокой энергией, недостижимой для современных ускорителей. В настоящее время только исследования взаимодействий этих частиц с веществом позволяет получать информацию по физике сверхвысоких энергий (более  $10^{15}$  МэВ), т. е. энергий, при которых проявляется структура самих элементарных частиц.

Источниками космического излучения являются звезды на различных стадиях развития. Особо мощные вспышки излучения наблюдаются при взрывах сверхновых. Точного представления о том, какие процессы могут приводить к

ускорению частиц до рекордных энергий (до  $10^{20}$  МэВ), пока не существует. Наше звезда (Солнце) также испускает электромагнитное и корпускулярное излучение в широком энергетическом диапазоне. Интенсивность излучения Солнца не постоянна, а зависит от его активности. Исследования, выполненные в последние десятилетия со спутников позволили надежно выделить в пространстве и исследовать как направленное солнечное излучение, так и практически изотропное галактическое излучение.

В зависимости от происхождения и условий формирования все космическое излучение можно подразделить на:

1. "Солнечный ветер" (СВ) – постоянный поток высокотемпературной плазмы в межпланетном космическом пространстве, обусловленный непрерывным расширением солнечной короны. СВ представляет собой низкоэнергетическую часть корпускулярного излучения Солнца ( $E < \text{десятков КэВ}$ ).

2. Солнечные космические лучи (СКЛ) с  $E$  от 0,1 МэВ до сотен МэВ (но иногда и до нескольких десятков ГэВ) – генерируются при вспышках на Солнце, которые наблюдаются в виде гигантских протуберанцев над его поверхностью. Природа вспышек связана с выбросом из глубин солнечного вещества и его взаимодействия с мощнейшим магнитным полем Солнца. Максимальной яркости протуберанцы достигают примерно за 10 минут, а затем медленно гаснут. При вспышках испускается громадное количество энергии в виде электромагнитного (в диапазоне от видимого до рентгеновского) и корпускулярного излучения. Активность Солнца подвержена циклическим вариациям с периодом около 11 лет. Основная доля частиц, долетающих при вспышках до Земли – протоны, но есть также небольшое количество легких ядер (изотопы водорода, ядра гелия). Спектр  $\sim E^{-(2-5)}$ . Нейтронов в СКЛ на орбите Земли практически нет, т. к. они успевают распасться за время полета от Солнца до Земли. Реально, земную орбиту могут достигнуть только нейтроны с энергией более 150 МэВ за счет релятивистского замедления времени. Запаздывание прихода СКЛ на Землю составляет от нескольких десятков минут до нескольких часов в зависимости от средней энергии потока. Длительность солнечных вспышек обычно не превышает нескольких суток, однако потоки корпускулярного излучения при этом могут быть весьма значительными. За время наблюдения регистрировались вспышки, при которых мощность поглощенной дозы вблизи Земли увеличивалась в несколько сотен раз (наиболее мощная вспышка была в 1973 г.). При пилотируемых космических полетах внутри солнечной системы мощные солнечные вспышки представляют собой основную потенциальную радиационную опасность для космонавтов.

3. Галактические космические лучи (ГКЛ) рождаются в глубоком космосе и отличаются сложным компонентным составом. "Возраст" ГКЛ, приходящих в Солнечную систему, составляет 2,5 – 33 млн. лет. Предполагается, что частицы с относительно небольшой энергией приходят из нашей галактики, а частицы сверхвысоких энергий имеют внегалактическое происхождение. Угловое распределение ГКЛ практически изотропно. Энергетический спектр ГКЛ простирается до десятков ТэВ/нуклон. Вследствие распада нейтронная компонента космических лучей в их составе практически отсутствует за пределами земной атмосферы. В составе ГКЛ содержатся электроны ( $\sim 1\%$ ), протоны ( $\sim 70\%$ ), легкие и тяжелые ядра различных элементов (таблица 1).

Таблица 1. Зарядовый состав ГКИ в верхних слоях атмосферы на широте с магнитной отсечкой 1,3 ГВ (континентальный район США).

Заряд частицы	Вертикальный поток частиц, $\text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	
	Солнечный минимум	Солнечный максимум
1	2000	800
2	300	120
3-5	6	2
6-9	16	6
10-20	6	2
20 и более	2	1

Из таблицы видно, что интенсивность ГКИ меняется примерно вдвое в противофазе с солнечной активностью. Связано это с тем фактом, что в периоды максимальной солнечной активности магнитосфера Солнца значительно возрастает, достигая орбиты Юпитера, и отклоняет заряженные частицы из глубокого космоса.

В зарядовом спектре ГКИ выделяются (помимо протонов) три интенсивные группы ядер: с  $Z = 5 \div 8$  (группа углерода);  $10 \div 15$  (группа магния);  $25 \div 30$  (группа железа). Энергетическое распределения частиц ГКИ более жесткое, чем частиц СКЛ и примерно пропорционально  $E^{-1.6}$ . На рис. 1 показаны для сравнения спектральные составы СКЛ и ГКИ в периоды минимума и максима солнечной активности.

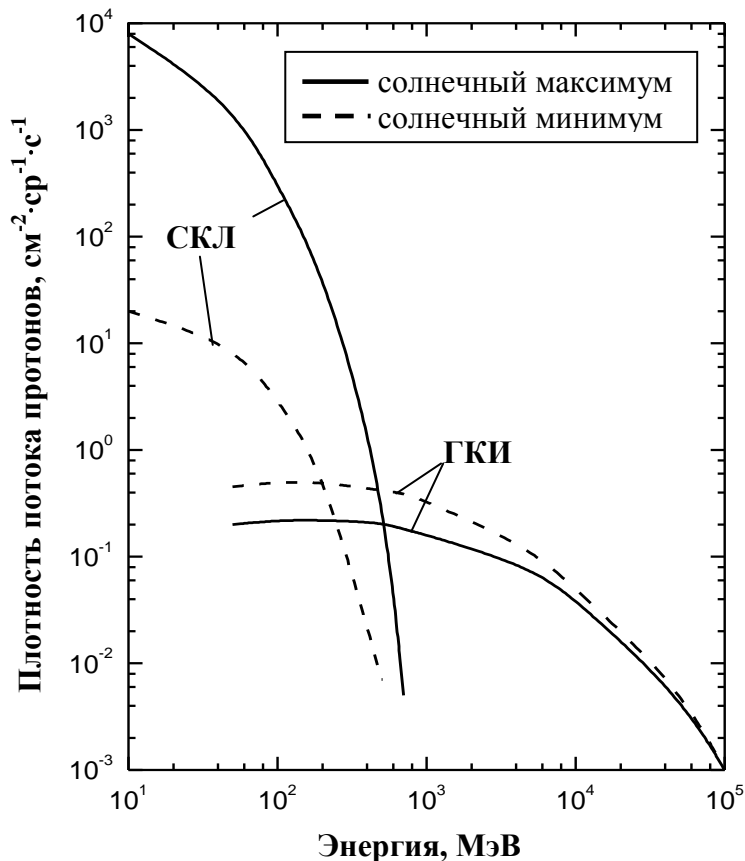


Рис. 1. Энергетические спектры протонов ГКИ и СКЛ в периоды максимума и минимума солнечной активности.

В открытом космосе эффективная эквивалентная доза от протонов ГКИ составляет около 40%, а 60% – эквивалентная доза от высокоэнергетичных ядер. Тяжелые ядра ГКИ с очень высокой энергией рождают в результате взаимодействия с земной атмосферой мощные космические ливни вторичных частиц с меньшей энергией (развитие каскада ливня происходит в относительно узком конусе вблизи направления движения первичной частицы). По этому эффекту было открыто существование ГКИ. Примерный компонентный состав частиц с  $Z > 1$  представлен в таблице 1.

Таблица.1. Содержание различных ядер с  $Z \geq 2$  в составе космических лучей (%).

Элемент	Космические лучи	
	Галактические	Солнечные
He	86.9	0.955
Li	0.0054	0.02677
Be-B	0.0145	< 0.00018
C	0.0326	0.00526
N	<0.0145	0.0017
O	0.0181	0.00892
F	<0.0018	<0.00027
Ne	0.0054	0.00116
Na	0.00344	—
Mg	0.00145	0.00038
Al	0.0011	—
Si	0.00217	0.00029
P-Sc	0.00235	0.00051
Ti-Ni	0.00507	<0.00018

## ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА МАГНИТОСФЕРЫ И АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Реальное геомагнитное поле Земли в первом приближении можно рассматривать как дипольное, искаженное давлением солнечного ветра и магнитным полем токов, создаваемых движением заряженных частиц внутри магнитосферы.

Магнитное поле Земли отклоняет заряженные частицы и не позволяет частицам с энергией меньше пороговой достигать атмосферы. Значение этой пороговой энергии зависит от заряда и массы частицы, угла её входа в атмосферу и широты местности. Например, значение магнитной отсечки (порогового момента частиц) на широте  $\sim 50^{\circ}$  N в таблице 1 соответствует кинетической энергии протонов 0,66 ГэВ и около 1,3 ГэВ для альфа-частиц. Наибольшее значение магнитной отсечки на экваторе, наименьшее – на геомагнитных полюсах. В этой связи, проникающий в атмосферу поток частиц космического происхождения, сильно зависит от широты местности.

Заряженные частицы с относительно небольшой энергией могут захватываться магнитным полем Земли и движутся затем по замкнутым траекториям вдоль силовых линий магнитного поля, создавая пояса радиации

(внутренний, состоящий преимущественно из протонов с энергией от нескольких МэВ до сотен МэВ и внешний – протоны и электроны с энергией до 100 кэВ и небольшое количество альфа-частиц). Из-за наклона магнитной оси Земли относительно оси вращения радиационные пояса располагаются несимметрично над земной поверхностью. Наиболее близко радиационные пояса подходят к земной атмосфере в районе южной Атлантики – ЮАА (южная Атлантическая аномалия).

Толщина атмосферы и её характеристики различны у полюсов и экватора. Принято считать толщину стандартной атмосферы равной  $1030 \text{ г/см}^2$ . Наличие атмосферы подавляет непосредственное облучение поверхности Земли первичным космическим излучением. Общая энергия корпускулярного космического излучения, входящего в верхние слои атмосферы оценивается в  $1,4 \cdot 10^9 \text{ Вт}$  (общее количество частиц и  $\gamma$ -квантов приходящих в атмосферу  $\sim 8 \cdot 10^{17} \text{ част/сек}$ ). Общая же энергия достигающего поверхности Земли излучения существенно меньше. Энергия протонов, необходимая для того, чтобы пробить, с учетом только ионизационных потерь, толщину земной атмосферы перпендикулярно составляет примерно 2,3 ГэВ. Частицы же падают на неё под разными углами. Однако, главным с точки зрения прохождения излучения через вещество и ослабления в нем первичного излучения, является факт, что при таких энергиях основным каналом диссипации энергии первичной частицы становятся не ионизационные и радиационные потери энергии при торможении, а образование за счет ядерных реакций с воздухом большого числа вторичных частиц с меньшей энергией.

## ВТОРИЧНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

При вхождении в атмосферу частицы космического излучения испытывают ядерные взаимодействия, приводящие к образованию вторичных  $p$ ,  $n$ ,  $e$ ,  $\gamma$ ,  $\mu$ ,  $\pi$ . Основные типы ядерных реакций:

- |  |                    |
|--|--------------------|
| а) $p + \text{ядра воздуха} \rightarrow p + n + \pi^\pm + \pi^0;$                  | } нуклонный каскад |
| б) $n + \text{ядра воздуха} \rightarrow p + n + \pi^\pm + \nu^0;$                  |                    |
| в) $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \gamma;$   |                    |
| г) $\pi^0 \rightarrow 2\gamma \rightarrow 4 e^\pm \rightarrow \gamma$ и так далее; |                    |
| д) $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + 2\nu \rightarrow \gamma$ и так далее.              |                    |

В верхних слоях атмосферы за счет развития межядерного каскада происходит накопление вторичных нейтронов. С ростом глубины атмосферы количество нуклонов уменьшается, и вблизи земной поверхности присутствуют практически только одни нейтроны (доля протонной компоненты вблизи земной поверхности пренебрежимо мала). С другой стороны, с уменьшением высоты количество электронов и  $\gamma$ -квантов сначала растет за счет генерации фотон-электронных ливней (их максимум достигается на высотах 13–20 км). Высокоэнергетичные  $\gamma$ -кванты, генерирующие ливни, образуются, в основном, за счет распада  $\pi^0$ -мезонов. С дальнейшим уменьшением высоты доля электронно-фотонной компоненты быстро снижается. Весьма важную роль в формировании космического излучения вблизи земной поверхности играет распад  $\pi^\pm$ -мезонов на мюоны и нейтрино. Мюоны не участвуют в межъядерном каскаде и обладают большой проникающей способностью, т. к. диссипация их энергии происходит только за счет ионизационного торможения. Поэтому их количество слабо

меняется с высотой и, следовательно, с уменьшением высоты их относительная доля резко возрастает. Таким образом, вблизи земной поверхности формируется вторичное космическое излучение, которое является одним из источников внешнего облучения населения. Другим источником облучения (внутренним) являются радионуклиды, образующиеся в атмосфере в результате ядерных реакций. Высотный ход интенсивности различных компонент КИ на  $50^{\circ}$  с.ш. в вертикальном направлении показан на рис.2.

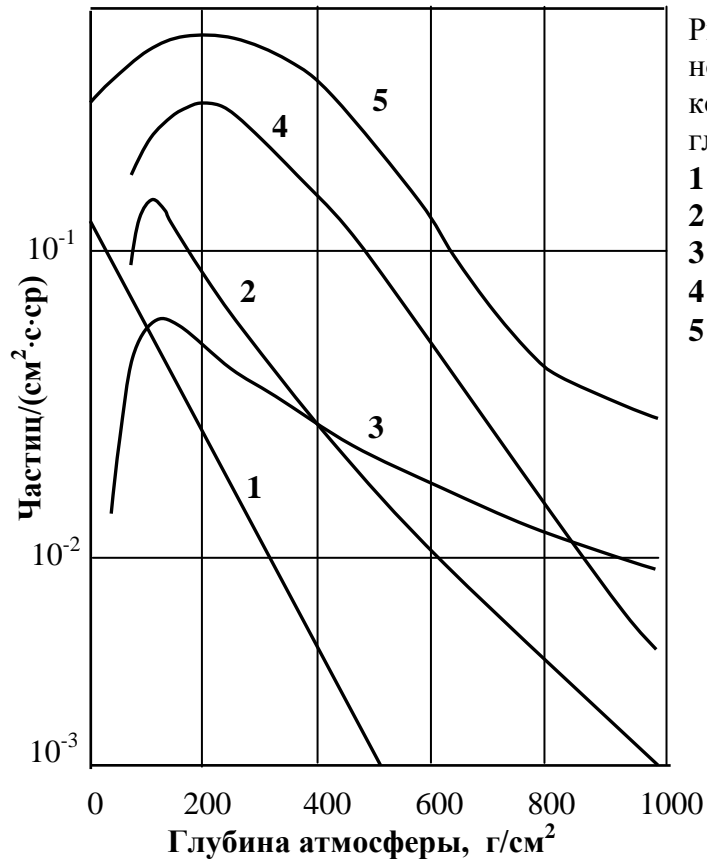


Рис. 2. Зависимость интенсивности различных компонент космического излучения от глубины земной атмосферы.

- 1 – протонная ( $E > 400$  МэВ);
- 2 – нейтронная;
- 3 – мюонная;
- 4 – электронная ( $E > 10$  МэВ);
- 5 – полная интенсивность.

Мюоны (в основном) образуют жесткую компоненту вторичного космического излучения у земной поверхности, обладающую большой проникающей способностью. Мюоны у земной поверхности составляют  $\sim 50\%$  всех заряженных частиц. Мягкая компонента – электрон-позитронные пары и  $\gamma$ -кванты. Поток вторичных частиц на уровне моря в средних широтах составляет примерно:

- заряженные частицы (мюоны)  $\sim 1,5 \cdot 10^{-2}$  мюонов/ $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ ;
- нейтроны с  $E < 10$  МэВ  $\sim 3 \cdot 10^{-3}$  нейтронов/ $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ ;
- нейтроны с  $E > 10$  МэВ  $\sim 4 \cdot 10^{-3}$  нейтронов/ $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ .

Интенсивность вторичного космического излучения зависит от солнечной активности, географического расположения (широты) и высоты над уровнем моря. Широтная зависимость наиболее сильно проявляется для нуклонной компоненты излучения – различие в интенсивности в северных широтах и у экватора достигает для нейтронов фактора  $7 \div 9$  и возрастает с увеличением высоты (таблица 2). На

уровне моря для полной интенсивности всех вторичных частиц широтный эффект не превышает 20 %. Угловая зависимость потока заряженных частиц у земной поверхности близка к  $\cos^2\varphi$ , где  $\varphi$  - угол относительно нормали к поверхности земли.

Таблица 2. Высотная зависимость эквивалентной дозы вторичного космического излучения (усредненная в полосе широт  $43^0 - 55^0$  N и по двум периодам солнечной активности – максимуме и минимуме).

Высота, км	H, мкЗв/час	Высота, км	E, мкЗв/час
0	0,035	12	4,93
4	0,20	14	7,56
6	0,51	16	9,70
8	1,35	18	11,64
10	2,88	20	12,75

На уровне моря среднее годовое значение эффективной эквивалентной дозы космического излучения составляет  $\sim 300$  мкЗв/год для средних широт, причем соотношения доз, обусловленных заряженными частицами (мюонами), гамма-квантами и нейтронами оцениваются приблизительно как 50 : 40 : 10. Высотная зависимость эквивалентной дозы от космического излучения, как видно из таблицы, довольно сильная. Население Земли расселено, в основной массе, в диапазоне высот 0-3 км и с учетом широтного эффекта среднегодовое значение эффективной эквивалентной дозы от космического излучения для населения различных ареалов может различаться до 10 раз. В последние годы встал вопрос о профессиональном облучении пилотов межконтинентальных пассажирских авиалиний, находящихся в течение года значительную часть времени на больших высотах. Как оказалось, годовые дозы пилотов за счет космического излучения могут стать сравнимыми с установленными дозовыми пределами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Галактическое космическое излучение обусловлено процессами, сопровождающими эволюцию звезд и состоит, в основном, из высокоэнергетичных протонов, легких и тяжелых ядер, попадающих в Солнечную систему из межзвездного пространства. Солнце также является источником электромагнитного и корпускулярного излучения (постоянный солнечный ветер и спорадические вспышки на Солнце, порождающие мощные потоки корпускулярного излучения). Солнечная активность (и зависящая от него интенсивность галактического космического излучения) подвержены периодическим колебаниям (циклам). Магнитное поле Земли и газовая атмосфера служат естественной защитой от космического излучения. Облучение населения Земли происходит за счет вторичного космического излучения, образующегося при взаимодействии первичного излучения с земной атмосферой. Основным дозообразующим компонентом вторичного космического излучения вблизи земной поверхности являются мюоны. Интенсивность и эффективная эквивалентная доза от вторичного космического излучения зависит от солнечной активности, географического расположения (широты) и высоты над уровнем моря.