

# О гамма-фоне и как его измерять

Под термином гамма-фон обычно подразумевают количественную характеристику мощности дозы гамма-излучения, выраженную в числовом виде в единицах принятой размерности, которая присуща некоторому помещению или некоторой точке на местности. Мощность дозы (эквивалентную/амбиентную) фотонного излучения гамма-диапазона принято выражать в «Зв/час», она характеризует отношение поглощенной энергии гамма-квантов в теле массой  $m$  к массе тела за определенный временной промежуток [Дж/кг с],  $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж/кг}$ . Устаревшая размерность «Р/час» (изъята из употребления с 1990г.) относится к экспозиционной мощности дозы фотонного излучения и характеризует ионизирующую способность фотонного излучения в воздухе – отношение заряда ионов обоих пар в объеме воздуха к массе этого воздуха за временной интервал [Кл/кг с],  $1 \text{ Р} = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ . С небольшой погрешностью можно принять, что  $1 \text{ Зв}$  соответствует  $100 \text{ Р}$ , точнее,  $1 \text{ Зв}$  соответствует  $114 \text{ Р}$ .

При рассмотрении данного вопроса мы не будем касаться случая измерения мощности дозы от точечного или объемного источника гамма-излучения. Все нижесказанное применимо только для изотропного (равномерного в телесном угле  $4\pi$ ) поля гамма-излучения и с некоторыми допущениями для бесконечно большого распределенного в полуобъеме пространства (телесный угол  $2\pi$ ) источника, что мы реально имеем, измеряя гамма-фон на местности. Ведь по отношению к дозиметристу с измерительным прибором поверхность Земли соотносится как бесконечно большой источник гамма-излучения в указанном телесном угле. Изотропность потока гамма-квантов важна тем обстоятельством, что как бы мы ни расположили измерительный прибор, средний поток гамма-квантов за определенный временной интервал через чувствительный объем детектора будет неизменным.

Источниками естественного гамма-фона на местности или в помещении являются в порядке значимости:

- Естественные радионуклиды, содержащиеся в грунте и (или) строительных материалах и конструкциях – средняя мощность эквивалентной дозы на местности для России  $0,04 \text{ мкЗв/час}$ .
- Вторичное космическое фотонное излучение – средняя МАД на высоте  $0\text{м}$  над уровнем моря и нашей широты  $0,032 \text{ мкЗв/час}$ .
- Гамма-излучение дочерних продуктов распада радона в воздухе и радионуклидов, образующихся в атмосфере под воздействием космического излучения – из-за малости вклада в общую МАД внешнего облучения не учитывается.

(Суммируя эти значения с собственным фоном дозиметрического оборудования – обычно  $0,02$ ,  $0,03 \text{ мкЗв/час}$ , получаем  $0,09$ ,  $0,1 \text{ мкЗв/час}$ , что соответствует среднему значению МАД на местности).

При наличии загрязнения техногенными гамма-излучающими радионуклидами возможно повышение потока гамма-излучения в точке измерения (зависит от степени загрязнения и радионуклидного состава).

Основные (значимые) естественные радионуклиды (ЕРН) представлены рядом:

- семейство  $\text{U}^{238}$ ;
- семейство  $\text{Th}^{232}$ ;
- изотоп  $\text{K}^{40}$ .

У всех указанных радионуклидов период полураспада имеет порядок  $10^9$  лет, и все они находятся в почве (грунте) в связанном состоянии. Удельное содержание ЕРН в грунте в отсутствии хозяйственной деятельности человека стабильно в течение столетий и тысячелетий. Здесь необходимо отметить, что вклад во внешнее гамма-излучение на поверхности земли вносят ЕРН содержащиеся в толще грунта глубиной чуть более  $1\text{м}$ , те фотоны гамма-спектра которые были испущены с большей глубины поглощаются и рассеиваются в верхнем слое. Реальными причинами возникающими в результате хозяйственной деятельности, кроме случаев радиационных аварий или злонамеренных действий, способными изменить концентрацию естественных радионуклидов в верхнем слое грунта могут быть:

- Интенсивное использование минеральных удобрений;
- Постоянное осаждение на поверхность грунта золы из угольных котлов электростанций;
- Разлив нефтепродуктов с высоким содержанием ЕРН;
- Полив водой из скважин с высоким содержанием ЕРН;
- Снятие верхнего слоя грунта или засыпка привозным грунтом (золошлакоотвалы, щебень, песок и др.) в ходе строительных работ или для других целей.

Кроме последних двух пунктов все остальные причины, приведшие к достоверно измеряемому изменению удельного содержания ЕРН, будут иметь следствием такое сильное химическое загрязнение почвы, что в пору будет объявить пострадавшие участки зоной экологического бедствия, однако повышение гамма-фона на этих участках вряд ли превысит 10-20% от исходного. На территории России и за рубежом есть территории с большим содержанием ЕРН в верхних слоях грунта, где МАД достигает 2, 3 мкЗв/час (т.е. в 20-30 раз больше средней), даже 50 мкЗв/час и где проживают десятки тысяч человек. По современным нормам радиационной безопасности (НРБ-99) МАД на рабочем месте не должна превышать 2,5 мкЗв/час (250 мкР/час) при отсутствии других радиационно-опасных факторов, при этом рекомендуется принять меры к ее снижению.

Естественными причинами изменения содержания ЕРН в верхних слоях грунта (за достаточно непродолжительный промежуток времени) могут быть, наверное, только природные катаклизмы – извержение вулкана, наводнение, оползни и др. Данные неприятные природные явления случаются довольно редко и не везде они в принципе возможны.

Космическая компонента фотонного излучения на высоте 0 м над уровнем моря в основном обусловлена галактическим излучением и не испытывает сильных колебаний по времени. На высотах в несколько десятков километров колебания интенсивности могут возрастать из-за солнечной активности. Так, на высоте 10 км средняя МАД равна 2,9 мкЗв/час, т.е. экипажи авиалайнеров и пассажиры подвергаются повышенной по сравнению с обычной дозовой нагрузке.

Из всего вышесказанного можно сделать следующий вывод: **плотность потока гамма-излучения, а значит, и МАД в какой либо точке на поверхности Земли в случае отсутствия перечисленных аварий, катаклизмов и прочего, остается неизменной в ходе столетий и более.** Небольшие флуктуации гамма-фона относительно среднего значения, имеют в основе статистическую природу ядерных превращений, в результате которых испускаются гамма-кванты. Процесс регистрации (измерения) гамма-фона дозиметрическими приборами описывается теми же законами статистики.

Наиболее часто можно услышать вопрос – вчера я замерил гамма-фон 0,09, а сегодня 0,18 мкЗв/час, он что, вырос в два раза? Нет, не вырос, просто необходимо правильно трактовать результаты замеров.

Нижняя граница диапазона измерения МАД большинства профессиональных дозиметров 0,1 мкЗв/час. Т.е. к показаниям прибора менее 0,1 мкЗв/час нужно относиться критически и вместо значения например, «0,08 мкЗв/час» правильнее будет написать «<0,1 мкЗв/час». Основная погрешность измерения у нижнего диапазона достаточно высока  $15+4/N$  [%], где N – измеренная МАД [мкЗв/час]. Так, для измеренного среднего значения 0,15 мкЗв/час погрешность будет менее или равна 42% и «истинная» МАД может находиться в диапазоне от 0,09 до 0,21 мкЗв/час.

Легче понять статистическую природу процесса регистрации гамма-фона на конкретном примере. Было проведено 200 замеров гамма-фона в помещении в одной точке в течение **30 минут**. Результаты замеров сгруппированы в 40 серий по 5 измерений и приведены в таблице 1.

**Таблица 1**

Серия	МАД, $\cdot 10^{-8}$ Зв/час					Среднее в серии по 5	Среднее в серии по 10
1	12	12	18	15	5	<b>12,4</b>	<b>11,1</b>
2	8	12	12	10	7	<b>9,8</b>	

3	11	7	5	9	13	<b>9,0</b>	<b>9,5</b>
4	8	7	12	10	13	<b>10,0</b>	
5	9	5	10	9	11	<b>8,8</b>	<b>9,4</b>
6	7	9	11	12	11	<b>10,0</b>	
7	10	6	7	10	11	<b>8,8</b>	<b>7,9</b>
8	5	9	5	8	8	<b>7,0</b>	
				...			
33	8	9	9	6	6	<b>7,6</b>	<b>9,5</b>
34	13	8	14	9	13	<b>11,4</b>	
35	10	2	6	13	9	<b>8,0</b>	<b>8,0</b>
36	10	9	9	4	8	<b>8,0</b>	
37	17	12	11	15	5	<b>12,0</b>	<b>10,6</b>
38	6	14	8	7	11	<b>9,2</b>	
39	10	2	9	12	9	<b>8,4</b>	<b>9,7</b>
40	12	15	7	12	9	<b>11,0</b>	

Среднее значение = 9,79

Дисперсия = 9,42

Большой разброс значений замеров в серии, скажем, от 5 до 18 совершенно нормальное явление. Более того, если вы намеряли последовательно в одной точке, например: 11, 12, 11, 11, 12, 12, 12, 12, 11, 11, 12, то это не значит, что у вас стабильный гамма-фон – это означает, что у вас неисправен дозиметр.

Т.к. дисперсия равна среднему значению, а также исходя из самого процесса измерения, можно предположить, что вероятность получить определенное значение МАД описывается распределением (законом) Пуассона.

$$P_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a}, \text{ где}$$

m – значение МАД,

a – математическое ожидание (среднее значение).

### Таблица 2

Диапазон МАД, 10 <sup>-8</sup> Зв/час	< 2	2 – 4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16 – 18	> 18
Вероятность по опытным данным	0,00	0,02	0,07	0,055	0,10	0,11	0,12	0,125	0,085	0,125	0,07	0,055	0,04	0,025	0,00
Вероятность теоретическая по Пуассону	0,0006	0,033	0,042	0,068	0,096	0,117	0,128	0,125	0,111	0,091	0,068	0,048	0,031	0,036	0,0054

Проверку гипотезы о том, что полученное в опыте распределение описывается законом Пуассона, можно провести используя критерий  $\chi^2$  (Пирсона).

$$\chi^2 = n \sum_{i=1}^k \frac{(P_i^* - P_i)^2}{P_i}$$

Для нашего случая  $s^2 = 10,7$  и числа степеней свободы 11 получим вероятность превышения расхождения опытных данных с теоретическими  $P = 0,47$ . Это позволяет подтвердить выдвинутую гипотезу.

Рисунок 1.



Из таблицы 2 можно сделать некоторые выводы:

- Вероятность получить в единичном измерении значение МАД = 0,10 мкЗв/час (наиболее близкое к «истинному» 0,098) равна всего 12,5%.
- Вероятность получить значение МАД отличающееся от «истинного» более чем на 30% равна 26,5%
- Вероятность получить значение МАД отличающееся от «истинного» более чем на 100% хоть и мала, но не нулевая.

Далее. Оценка гамма-фона по среднему значению в серии из 5-10 последовательных замеров (наиболее распространенная практика измерения МАД) может выдавать «неожиданные» результаты. В нашем случае из таблицы 1 видно, что в серии по 5 можно получить наименьшее значение 0,066, а наибольшее 0,124 мкЗв/час. Вопрос, какое среднее — «истинно»? (На самом деле чаще всего так и бывает, меряют, меряют, а после говорят, например, «в апреле был такой гамма-фон, а в августе такой-то, отличие в 2 или 1,5 раза», а можно вообще и на новый Чернобыль подозрение замыслить).

Таблица 3

Серия	Минимальная МАД, ' $10^{-8}$ Зв/час	Максимальная МАД, ' $10^{-8}$ Зв/час
По 5	6,6	12,4
По 10	7,9	11,4
По 20	8,6	10,9
По 40	9,5	10,6

Очевидно, что если увеличивать количество замеров в серии, среднее значение МАД сходится к «истинному». Для наглядности можно выполнить расчет доверительных интервалов среднего значения МАД при разном числе замеров в серии для доверительной вероятности 0,95, т.е. что с вероятностью 95% диапазон МАД  $I_b$  накроем «истинную» МАД.

$$I_{\beta} = \left( \bar{m} - t_{\beta} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \bar{m} + t_{\beta} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right), \text{ где}$$

$\bar{m}$  – среднее в серии

$\sigma$  – среднее квадратическое отклонение замеров в серии

$t_{\beta}$  – коэффициент Стьюдента.

Т.к. среднее квадратическое отклонение в серии величина случайная, то и доверительный интервал в разных сериях будет случаен. Но в среднем наглядна тенденция к уменьшению доверительного интервала с увеличением числа замеров в серии.

Серия      Доверительный интервал МАД  
                   $\cdot 10^{-8}$ Зв/час

По 5                      3,5

По 10                    2,2

По 20                    1,4

По 40                    1,0

*В общем, чтобы в силу статистического характера процесса регистрации гамма-фона стабильно получать достаточно малую статистическую же погрешность в 0,01мкЗв/час необходимо проводить около 40 замеров в одной точке, но никак не 5 и не 10.*

Можно выполнить частотный анализ «средних из 5 замеров». В данном случае искомое распределение должно быть нормальным (распределение Гаусса).

Плотность вероятности

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}$$

$\sigma$  – среднее квадратическое отклонение;

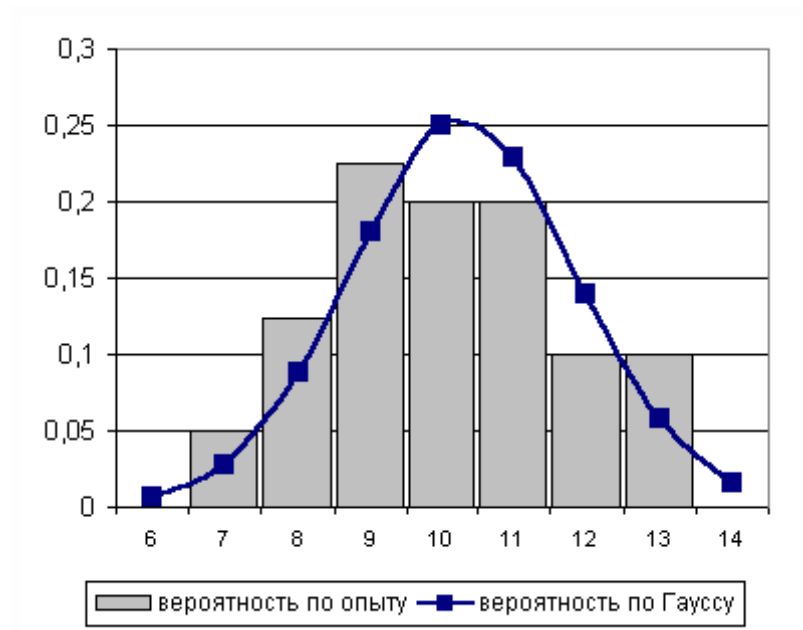
$m$  – математическое ожидание

**Таблица 4**

Диапазон МАД,  $\cdot 10^{-8}$ Зв/час,  
Среднее по 5 замерам

	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
Вероятность по опытным данным	0,05	0,125	0,225	0,20	0,20	0,10
Вероятность теоретическая по Гауссу	0,028	0,088	0,181	0,250	0,229	0,140

**Рисунок 2.**



$$s^2 = 4,95$$

число степеней свободы 6

вероятность превышения расхождения опытных данных с теоретическими  $P = 0,55$ .

Это позволяет принять выдвинутую гипотезу.

Практическая польза от построения подобного распределения может быть следующая. Допустим, вы измеряете гамма-фон в одной и той же точке на местности в течение длительного периода времени (всегда выполняя по  $n$  замеров), с целью контроля, а не шарахнуло ли где-нибудь с выбросом радиоактивных изотопов, так, что указанные изотопы осели на землю у порога вашего дома. Набрав достаточное количество замеров 50-200  $n$  (чем больше, тем лучше), вы можете построить подобное частотное распределение и определить по нему с определенной вероятностью тот порог среднего МАД в серии из  $n$  замеров, при превышении которого можно сделать вывод, либо где-то шарахнуло, либо вы вчера засыпали двор не той щебенкой, либо сосед подбросил к вашему забору мощный источник, или просто с вашим дозиметром что-то случилось.

Для того распределения, которое мы построили выше, с вероятностью 99% таким порогом будет округленно 0,14 мкЗв/час.

Коротко о нормах. По современным нормам радиационной безопасности (НРБ-99) МАД на рабочем месте не должна превышать 2,5 мкЗв/ч (250 мкР/ч) при отсутствии других радиационно-опасных факторов, при этом рекомендуется принять меры по ее возможному снижению. Для жилых помещений подход иной, в них МАД не должна превышать мощность дозы гамма-излучения на окружающей жилое строение местности более чем на 0,2 мкЗв/ч. То есть если МАД на местности составляет 0,1 мкЗв/ч, то в жилых помещениях допустимое значения МАД равно 0,3 мкЗв/ч, если же на местности МАД равна 3 мкЗв/ч (что в принципе возможно, об этом было сказано выше), то в жилых помещениях соответственно допускается 3,2 мкЗв/ч. На самом деле на территории с такой мощностью дозы внутри здания МАД будет гораздо меньше за счет экранирования внешнего гамма-излучения материалом стен и перекрытий.

После аварии на Чернобыльской АЭС о «радиации» не писал только ленивый. Мощность дозы гамма-излучения в 0,3 мкЗв/час (30 мкР/час) или чуть более – повод для экстаза только для безграмотного журналиста, несколько не разбирающегося в предмете, но любящего припугнуть легковверного читателя его трудов темой «радиации». Говорить о том, что его дозиметр «зашкалило» (при показании более чем 0,3 мкЗв/час), могут люди, которым противопоказано что-либо измерять, ибо грамотный знает – «зашкалило», значит, не хватает шкалы измерительного прибора для замера, а для большинства профессиональных дозиметров верхняя граница диапазона измерения равна 1 Зв/час, т.е. пишущий слово «зашкалило» – наверняка лежит на больничной койке с диагнозом - острая лучевая болезнь и слабеющей рукой доносит до народа «слово правды» об опасности радиации. Но здесь теория не стыкуется с практикой, пишущих много, заболевшие отсутствуют.