УДК 504.3.054:621.039.7

РАДИОАКТИВНОЕ ОБЛАКО НАД МОСКВОЙ 12 – 14 АПРЕЛЯ 1993 г.

Г. А. Базилевская, А. К. Свиржевская, Н. С. Свиржевский, Ю. И. Стожков

12 – 14 апреля 1993 г. в атмосфере над Москвой было зарегистрировано радиоактивное облако. На высотах 10 – 35 км интенсивность ионизирующего излучения в эти дни на 30 – 80% превышала средний фоновый уровень за предшествующую неделю. Линейные размеры облака 800 – 1800 км, наибольшая активность, равная $2 \cdot 10^{-4}$ *расп/с · см*^{3}*, наблюдалась на высотах 12 – 16 км. Оценка снизу величины полной активности облака показала, что эта величина составляет около* $60 \cdot 10^6$ *Ки. Обсуждаются возможные источники радиоактивного облака.*

12 – 14 апреля 1993 г. при измерениях интенсивности потоков заряженных частиц в атмосфере, которые проводятся в районе Москвы лабораторией физики Солнца и космических лучей ФИАН, было отмечено возрастание радиации. До настоящего случая все сколько-нибудь значительные возрастания радиации в атмосфере над Москвой связывались либо с солнечными протонными вспышками, либо с радиоактивными облаками от ядерных взрывов. Излучение солнечной вспышки отличается от излучения радиоактивного облака по энергии и другим характерным признакам, и обычно не представляет труда отличить вспышку от облака. Нет сомнений в том, что в данном случае повышение интенсивности было связано с радиоактивным облаком; известно кроме того из других наблюдений, что солнечных протонных вспышек 12 – 14 апреля 1993 г. и в ближайшие предшествующие дни не было.

По нашим оценкам, радиоактивное облако, наблюдавшееся в течение двух суток над Москвой на высоте от 10 до 30 – 35 *км*, имело активность около $60 \cdot 10^6$ *Ки*.

В ежедневных зондовых измерениях интенсивности потоков заряженных частиц в атмосфере в качестве детекторов используются гейгеровский счетчик и телескоп из двух счетчиков с фильтром между ними. Различные энергетические пороги для счетчика и телескопа позволяют отличать жесткое излучение солнечных вспышек (протоны с энергией $\geq 1,5\,ГэВ$ в Москве) от малоэнергичного излучения радионуклидов в радиоактивных облаках (электроны и гамма-кванты с энергией до 5 $МэВ$). Для гейгеровского счетчика эффективность регистрации заряженных частиц близка к 100%, а эффективность регистрации гамма-квантов в интервале энергии 40 – 500 $кэВ$ в среднем около 1%.

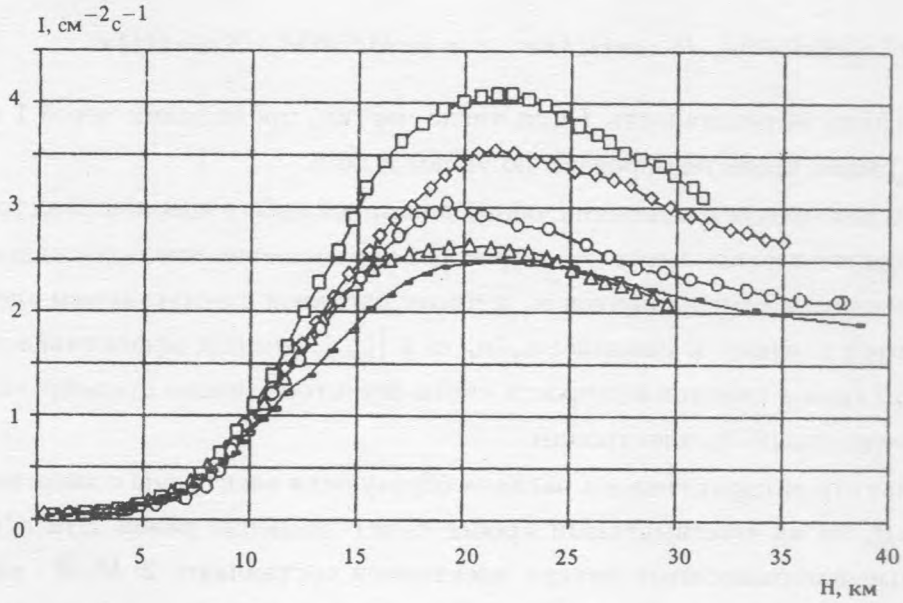

Рис. 1. *Интенсивность ионизирующего излучения I в атмосфере над Москвой 12 – 14 апреля 1993 г. в зависимости от высоты H: 12 апреля (Δ), 13 апреля утром (◇), 13 апреля днем (o), 14 апреля утром (□), среднее за 1 – 7 апреля 1993 г. значение интенсивности (–).*

Результаты измерений 12 – 14 апреля, а также среднее фоновое значение интенсивности 1 – 7 апреля, показаны на рис. 1. Небольшое повышение в интервале высот 10 – 25 *км* было отмечено 12 апреля; 13 апреля утром превышение над уровнем фона составляло 30 – 40%, 13-го днем – несколько меньше, и максимального значения 80% оно достигло утром 14 апреля. Измерения днем 14 апреля, а также в несколько последующих дней показали обычный фоновый уровень. Возможно, что следы радиоактивного облака были зарегистрированы повторно 19 – 21 апреля.

По существу облако полностью было расположено в стратосфере, а максимальная

интенсивность излучения была зарегистрирована на высоте 20 – 25 *км*. Данные, показанные на рис. 1, использовались для оценки активности облака.

Установим связь между интенсивностью излучения I, являющейся в данном случае измеряемой величиной, и активностью n. Пусть n – число распадов в 1 $см^3$ за 1 $с$, тогда число распадов за 1 $с$ в элементарном объеме величиной $r^2 \sin\Theta dr d\Theta d\varphi$ равно $nr^2 \sin\Theta dr d\Theta d\varphi$. Доля частиц, проходящих через расположенный в начале системы координат счетчик сферической формы с площадью сечения dS, будет равна $dS/4\pi r^2$, а число частиц, которые пройдут через площадку dS за 1 $с$, равно

$$nr^2 \sin\Theta dr d\Theta d\varphi dS \cos\Theta/4\pi r^2 = n \sin\Theta dr d\Theta d\varphi dS \cos\Theta/4\pi. \quad (1)$$

Чтобы вычислить интенсивность I или число частиц, проходящих через 1 $см^2$ за 1 $с$, выражение (1) надо проинтегрировать по углам и по r.

Известно, что для продуктов деления, образовавшихся либо в ядерном реакторе, либо в результате ядерного взрыва, через некоторое время отношение числа распадов радионуклидов с испусканием гамма-квантов n_γ к числу распадов с испусканием электронов n_e устанавливается близким к единице: $n_\gamma/n_e \approx 1$ [1]. С учетом эффективности регистрации, вкладом гамма-квантов в скорость счета детектора можно пренебречь, удвоив активность, определенную по электронам.

Если в результате радиоактивного распада образуются электроны с энергией E, измеряемой в $МэВ$, то их максимальный пробег будет численно равен $E/2$ $г/см^2$, так как минимальные ионизационные потери электронов составляют 2 $МэВ \cdot см^2/г$. Не учитывая зависимости ионизационных потерь электронов от энергии, проинтегрируем выражение (1) по переменной r от 0 до r_0, где r_0 определен из условия $r_0 D(p) = E/2$, а $D(p)$ – плотность воздуха при давлении p. В результате интегрирования для n_e получается следующее выражение:

$$n_e = I(p)/r_0 = 2I(p)D(p)/E. \quad (2)$$

При вычислении n_e предполагалось, что при распадах радиоактивных ядер образующиеся электроны имеют энергию 3 $МэВ$, хотя эта энергия близка к верхней границе электронного спектра продуктов деления. Это обстоятельство, как и учет только минимальных потерь энергии электронов на ионизацию, приводит к оценке величины n_e снизу. И в дальнейшем мы вводили только такие упрощения и округления, которые позволяют получить нижний предел значения n_e.

Вертикальная протяженность облака известна из наших измерений с точностью до сотен метров. Облако располагалось на высоте выше 9 *км*, а его максимальная высота в двух случаях была не ниже 35 *км*.

Оценить размеры облака в направлении ветра можно, зная скорость его перемещения (скорость ветра) и время, в течение которого облако наблюдалось. При оценке размеров облака было принято, что оно наблюдалось 24 *часа*, от утренних измерений 13 апреля до утренних измерений 14 апреля, то есть в расчет были заложены минимальные размеры облака. Размеры облака в направлении ветра на различных высотах меняются от 850 до 1800 *км* (табл. 1).

Таблица 1

Высота, *км*	Интенсивность I, $1/c \cdot см^2$	Скорость ветра, $м/c$	Длина облака, *км*	Удельная активность n_e, $расп/c \cdot см^3$	Общая активность, *Ки*
9–11	0,20	13	1100	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^6$
11–14	0,53	10	850	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^6$
14–18	0,87	14	1200	$9,9 \cdot 10^{-5}$	$9,8 \cdot 10^6$
18–22	1,00	21	1800	$5,9 \cdot 10^{-5}$	$9,1 \cdot 10^6$
22–25	0,95	21	1800	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^6$
25– 28	0,85	19	1600	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^6$
28–31	0,70	15	1300	$9,3 \cdot 10^{-5}$	$0,6 \cdot 10^6$

Линейные размеры облака в направлении ветра и в перпендикулярном к ветру направлении формируются, по существу, одним и тем же механизмом турбулентной диффузии, и поэтому, мы полагаем, не могут различаться значительно. Величина коэффициента диффузии, как следует из данных, полученных при изучении облаков от ядерных взрывов, значительно изменяется от одного взрыва к другому и различается по этим оценкам на 3 порядка [2]. В данных расчетах был выбран коэффициент диффузии, равный 10^5 $м^2/c$, что приводит к поперечному размеру облака, равному 1000 *км* на седьмые сутки после взрыва.

При вычислении n_e атмосфера, начиная с 9 *км*, была разбита на слои толщиной 3 – 4 *км*, и усредненные значения давления и плотности воздуха считались постоянными для слоя. Расчеты проводились по данным измерений 13 и 14 апреля и только для тех высот, на которых превышение радиации над уровнем фона было не меньше, чем 0,2

$см^{-2}с^{-1}$. Для каждого слоя в атмосфере вычисляли средние по трем запускам зондов интенсивности.

Значение n_e на различных высотах в атмосфере показаны в таблице 1 и на рис. 2. Наибольшая активность, равная 10^{-4} *расп/с · см*^{3} была на высоте 11 – 14 *км*, а активность всего облака, определенная по распадам радионуклидов с образованием электронов, равна $33 \cdot 10^6$ *Ки*. Учитывая приведенное выше соотношение $n_\gamma/n_e \approx 1$, удвоим активность, полученную по электронам, и получим полную активность облака, равную $\approx 60 \cdot 10^6$ *Ки*.

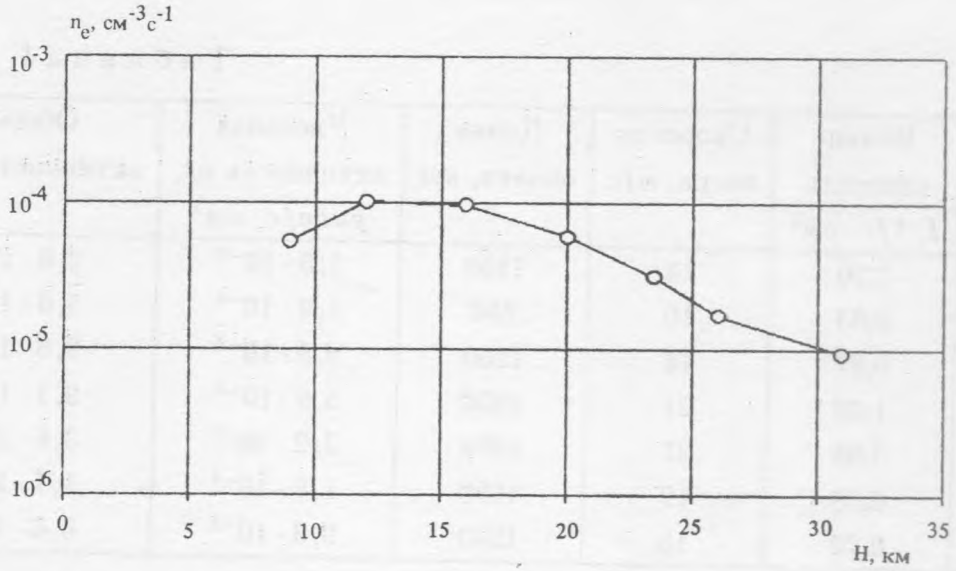

Рис. 2. *Число распадов n_e, $см^{-3}с^{-1}$, в облаке в зависимости от высоты H.*

Радиоактивное облако над Москвой 12 – 14 апреля 1993 г. – весьма среднее по своим параметрам. Его размеры – 850 – 1800 *км*, а в наших измерениях в стратосфере наблюдались облака размерами до 10000 *км* [2]. Наибольшая активность $n \approx 2 \cdot 10^{-4}$ *расп/с · см*^{3}, полученная в данном случае (про которую нельзя, конечно, сказать, что это максимальная активность в облаке), значительно уступает наблюдавшейся активности в облаках от ядерных взрывов, равной 10 *расп/с · см*^{3} и более. Из-за больших размеров облака полная его активность получилась достаточно большой – $60 \cdot 10^6$ *Ки*, что примерно совпадает с активностью выброса в чернобыльской аварии, но это довольно скромная величина по сравнению с активностью в облаках от ядерных взрывов, в которых может содержаться $10^{10} - 10^{12}$ *Ки*.

Источник радиоактивного облака не установлен. Облако появилось над Москвой с запада. Оно могло быть образовано в любом месте земного шара в интервале широт от 60 до 50° северного полушария. Если судить по большим размерам облака в направлении ветра, то с момента его образования до момента регистрации прошло по крайней мере несколько дней, а мы в расчетах принимали возраст облака равным одной неделе. Возможные источники облака – взрыв атомной бомбы высоко в атмосфере, авария на ядерном предприятии, разрушение в верхних слоях атмосферы ядерного реактора, установленного на спутнике. Облако активностью $60 \cdot 10^6$ *Ки* может образоваться в атмофере через неделю после взрыва атомной бомбы мощностью в несколько десятков килотонн. Такая же активность получается от продуктов деления ядерного топлива в реакторе чернобыльского типа, если вес продуктов деления составляет несколько тонн. Третий вариант – разрушение в атмосфере ядерного источника, установленного на спутнике, по-видимому, не проходит даже при самых грубых ошибках в оценке размеров облака. Ядерные реакторы для спутников мощностью 100 *кВт* (200 *кг* обогащенного U^{235} в качестве топлива) в настоящее время только разрабатываются и, по-видимому, это самые крупные реакторы, которые могут оказаться на орбите в ближайшем будущем. Разрушение отработавшего реактора такой мощности в атмосфере создаст облако, активность которого будет на два порядка меньше полученной в данном случае.

Авария в Томске-7 6 апреля 1993 г. по времени и по широте расположения Томска могла бы, в принципе, рассматриваться как источник облака. Обычно облака в стратосфере движутся вдоль той географической широты, на которой они образовались, а Томск расположен почти на той же широте, что и Москва. (Это довольно строгое правило, но исключения из него тоже известны. Например, взрыв мощной бомбы в Китае в Лобноре в октябре 1970 г. был зарегистрирован как в Алма-Ате, расположенной недалеко от места взрыва, так и в Москве и Мурманске, на совсем иных широтах.) Принято, однако, считать, что аварии типа томской, с тепловым, а не ядерным, взрывом, не приводят к выбросу радиации в стратосферу. Радиация от чернобыльской аварии 1986 г. не была зарегистрирована в стратосфере. Так же и скорость ветра на высоте 9 – 14 *км*, порядка 10 *м/с*, недостаточна, чтобы облако долетело за 6 суток от Томска до Москвы, двигаясь на восток – для этого требуется скорость ветра более 30 *м/с*. Отметим, что облако на высоте 9 – 14 *км* наблюдалось на сутки раньше, чем на высоте 20 *км*, где скорость ветра была примерно в два раза выше.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Лавренчик В. Н., Глобальное выпадение продуктов ядерных взрывов. М., 1965.

[2] Лихоед В. А. Исследование радиации естественного и искусственного происхождения в стратосфере (кандидатская диссертация). Алма-Ата, 1974.

Поступила в редакцию 21 июня 1994 г.