



## 2. КОСМИЧЕСКОЕ ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

*Ионизация* – процесс дестабилизации нейтральных атомов и молекул в виде отрыва орбитальных электронов. Оставшаяся электрически заряженная часть атома называется ионом. Ионизировать можно двумя способами: либо за счет увеличения кинетической энергии частицы (повышая её температуру), либо за счет высокоэнергетического внешнего воздействия с помощью квантов света (УФИ, РИ) или других заряженных частиц. *Плазмой* называют совокупность ионизированных атомов или молекул, причём если ионы и электроны остаются вместе – это электрически нейтральная плазма, а в случае их разделения плазма считается электрически заряженной.

### 2.1. ИСТОЧНИКИ КОСМИЧЕСКИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

#### ПЕРВИЧНОЕ ГАЛАКТИЧЕСКОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ (ГКИ)

**Состав ГКИ.** ГКИ создаётся потоком межзвездной плазмы (как правило, намагниченной), через которую пролетает Солнечная система при движении вокруг центра Галактики. За пределами магнитного поля Земли (высоты более 75...100 тыс. километров) представляет собой изотропный поток протонов высокой энергии (примерно 85...87 %), ядер гелия (около 12..14 %). Оставшиеся 1...2 % приходятся на ядра более тяжелых элементов, а также элементарные частицы: электроны, нейтроны, фотоны и т.п. (табл. 1.2) . Плотность потока группы ядер углерода, азота, кислорода (С, N, O) примерно на два порядка ниже плотности потока протонов (H). Плотность потока группы ядер марганца, железа, кобальта (Mn, Fe, Co) и группы ядер Ne, Mg, Si соответственно на три порядка ниже протонного (H). Группа ядер Ar, Ca, Ti, Cr на четыре порядка ниже протонного (H).

Таблица 1.2

#### Состав первичного ГКИ

Атомный номер, Z	Поток, J, част./ $(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{сп})$	Плотность потока, % к сумме	Диапазон энергии, E, МэВ	Средняя энергия, $E_{\text{ср}}$ , МэВ
1 (H)	1700...1900	85..87	$1 \dots 10^{14}$	200...300
2 (He)	88	12...14	$1 \dots 10^{14}$	200...300
3-5	1,9	0,08...0,1	$1 \dots 10^{14}$	200...300
6-9 (C, O, N)	5,7	0,8..1	$1 \dots 10^{14}$	200...300
10-19(	1,9	0,08...0,1	$1 \dots 10^{14}$	200...300
20	0,5	0,008...0,01	$1 \dots 10^{14}$	200...300
электрон				
фотоны	30000		0,045...0,450	
фотоны	10000		0,0045...0,045	



Плотность потока ГКИ изменяется во времени и в зависимости от расстояния от Солнца. Наибольшее влияние на него оказывает фаза активности Солнца: с увеличением солнечной активности межпланетное магнитное поле усиливается, возрастает его экранирующая способность и плотность потока ГКИ в Солнечной системе уменьшается. Таким образом, максимальное значение плотности ГКИ наблюдается в годы минимума солнечной активности (1975, 1986, 1997 и будет в 2008 гг), а минимальное значение в годы максимума солнечной активности (1980, 1991, 2002 гг).

**Энергетические спектры** заряженных частиц ГКИ близки по форме: имеют максимум в области 200...300 МэВ и экспоненциально падают за границами интервала. Экранирующее действие межпланетного магнитного поля сказывается и на энергетическом спектре ГКИ. Плотность потока частиц ГКИ с энергией более 1000 МэВ в период 11-летнего цикла изменяется на 20 %. Плотность потока частиц ГКИ с энергией 100...1000 МэВ уменьшается в 3...5 раз при переходе к максимуму солнечной активности. Например, максимальные значения плотности потока ядер железа на орбите Земли составляют  $55 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$  для диапазона энергий 100...1000 МэВ и  $33 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$  для диапазона энергии более 1000 МэВ.

## **ПЕРВИЧНОЕ СОЛНЕЧНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ (СКИ)**

**Состав СКИ.** СКИ образуется потоками солнечной плазмы, выбрасываемыми во время солнечных вспышек и достигающими орбиты Земли через 10...15 минут. В составе СКИ обнаружены главным образом протоны,  $\alpha$ -частицы и электроны. Примесь более тяжелых ядер не превышает 0,1 %. Соотношение протонов и ядер гелия в плазме СКИ меняется от вспышки к вспышке: отношение флюенсов изменяется в диапазоне от 1 до 100.

Плотность потока, энергетическое и угловое распределение, а также состав частиц изменяется не только от одной вспышки к другой, но и во время самой вспышки. В частности, максимум излучений приходится на 10...15-е минуты от начала активности вспышки, хотя полная её продолжительность может достигать суток.

**Энергетический спектр** СКИ характеризуется меньшей, чем у ГКИ, энергией частиц (на 2-3 порядка меньше, чем ГКИ). Радиационные характеристики некоторых протонных солнечных вспышек 20-го цикла солнечной активности представлены в табл. 1.3.



Таблица 1.3

**Радиационные характеристики солнечных вспышек**

№ вспышки	Дата вспышки	Флюенс протонов, см <sup>-2</sup>	Жесткость R <sub>0</sub> , МВ	Экв.доза за вспышку, 10 <sup>-2</sup> Зв
1	03.09.60	3,5·10 <sup>7</sup>	128	23,3
2	12.11.60	100·10 <sup>7</sup>	124	666
3	15.07.61	1·10 <sup>7</sup>	80	6,6
4	18.07.61	30·10 <sup>7</sup>	102	200
5	28.08.66	2·10 <sup>7</sup>	130	13,3
6	13.09.66	1·10 <sup>7</sup>	164	6,66
7	28.01.67	7·10 <sup>7</sup>	114	46,6
8	06.06.67	2·10 <sup>7</sup>	118	13,3
9	18.11.68	35·10 <sup>7</sup>	58	233
10	03.12.68	4·10 <sup>7</sup>	50	26,6
11	30.03.69	3·10 <sup>7</sup>	160	20,0
12	10.04.69	20·10 <sup>7</sup>	45	133
13	23.03.70	6·10 <sup>7</sup>	109	40,0
14	29.03.70	3·10 <sup>7</sup>	220	20,0
15	24.01.71	30·10 <sup>7</sup>	58	200
16	01.09.71	20·10 <sup>7</sup>	93	133
17	04.08.72	800·10 <sup>7</sup>	85	5330
18	07.08.72	40·10 <sup>7</sup>	54	266

Для многих солнечных вспышек радиационная опасность оказывается очень высокой. Среди приведенных в табл. 1.3 вспышек наиболее примечательной оказывается событие 04.08.72. Флюенс протонов с энергией более 3 МэВ составил  $8 \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup> (при этом флюенс протонов с энергией более 10 МэВ достигал  $2 \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup> - 25 %). Оценка дозы облучения за эту вспышку дает значение более 50 Зв (5000 бэр) – десять смертельных доз.

Интенсивность потока СКИ зависит от частоты солнечных вспышек  $W$  (число Вольфа – количество темных пятен на Солнце за месяц наблюдений). Диаграмма солнечной активности за 22 и 23 солнечный цикл показана на рис 1.4. В период максимума активности наблюдается 120...200 вспышек за месяц, в то время как при минимуме активности – всего 5...20. Фоновая интенсивность СКИ при этом изменяется на 30...50 %.

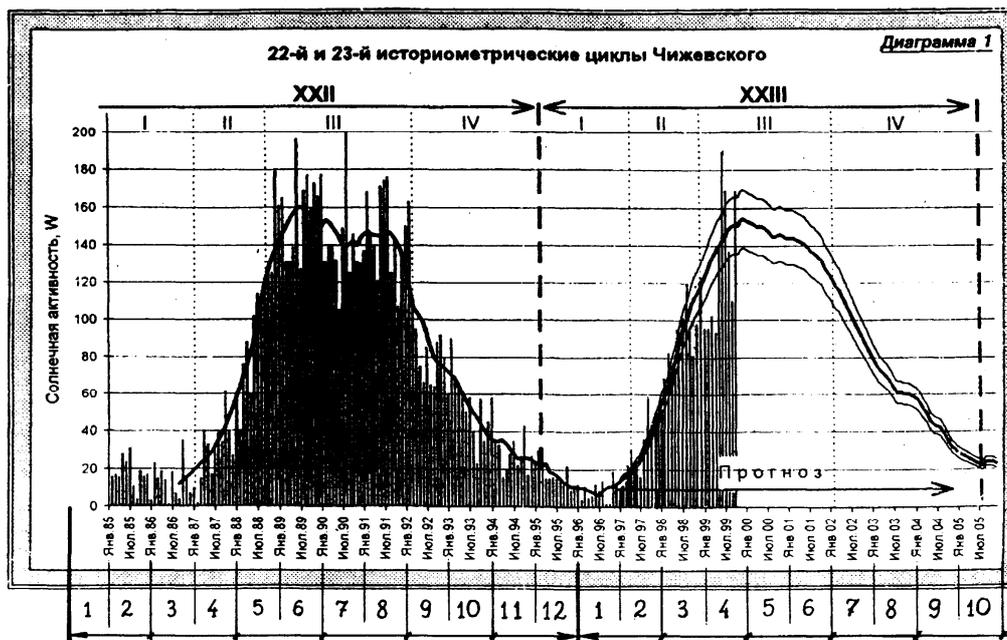


Рис. 1.4. Характеристики прошедшего 22-го и ожидаемого 23-го цикла солнечной активности:  $W$  - число Вольфа. Вертикальные столбики – фактические среднемесячные значения солнечной активности. Кривые – осредненный "портрет" цикла и статистическая погрешность прогноза 10 %.

## 2.2. РАДИАЦИОННЫЕ ПОЯСА ЗЕМЛИ (РПЗ)

При полетах космических летательных аппаратов (КЛА) на высотах ниже 100 тыс. км радиационная обстановка претерпевает существенное изменение. Это связано с тем, что гравитационное и магнитное поля Земли производят отклонение, "сепарацию" и "гашение энергии" частиц ГКИ и СКИ. Общая тенденция состоит в постоянном снижении уровня ионизирующих излучений по мере приближения к поверхности Земли. Другими словами, магнитосфера Земли является естественной "системой защиты" планеты и всего живого на ней от действия космической радиации. При взаимодействии магнитосферы с СКИ и ГКИ формируются специфические образования – радиационные пояса Земли (РПЗ), в которых "хранятся" уловленные частицы космической радиации.



**Плазменный слой (хвост).** Находится на ночной стороне от Солнца на удалении 50000...75000 км от поверхности Земли. Представляет собой потоки электронов и протонов с энергиями от 1 до 10 кэВ. Плотность частиц составляет 1 частица на кубический сантиметр. Плазма неизотропна, наблюдается движение частиц вдоль силовых линий магнитного поля. Поскольку силовые линии в “хвосте” магнитосферы Земли разомкнуты, потоки частиц направлены от Земли в межпланетное пространство и наоборот (в зависимости от заряда). Протяженность “хвоста” составляет не менее 1000 радиусов Земли. В высоких широтах планеты плазменный слой образует две воронки (ночные полярные каспы), достигающие поверхности Земли. Приходящие на Землю потоки плазмы выпадают в атмосферу через “окна” диаметром 90...200 км, которые постоянно “блуждают” в соответствии с состоянием магнитосферы. Аналогичное образование – дневные полярные каспы – имеются на дневной стороне: энергия заряженных частиц там составляет 0,1...1 кэВ.

**Электронный (внешний) РПЗ.** Магнитосфера Земли является электромагнитной “ловушкой” для заряженных частиц ГКИ и СКИ. Внутренние более мощные магнитные силовые линии тормозят или отражают частицы, а внешние более слабые – не выпускают ослабленные после торможения частицы. Первыми в такую “ловушку” попадают электроны, атомная масса которых почти в 2 тыс. раз меньше протона. В итоге на расстоянии 10...50 тыс. км в средних широтах 30...60° возникает первый (внешний) радиационный пояс. Попавшие в него электроны образуют кольцевой ток с общим направлением с востока на запад. Основная масса электронов имеет энергию порядка 10...100 кэВ и плотность потока  $10^{10}$  частиц/см<sup>2</sup>·сек. Примерно в середине РПЗ – на высоте 22 тыс. км – имеется четко выраженный максимум плотности потока электронов, диапазон спектра энергии электронов 0,07...7 МэВ. Распределения электронов в нём для различных широт даны в табл. 1.4.

Таблица 1.4

**Плотность потока электронов РПЗ, см<sup>-2</sup>·сут<sup>-1</sup>**

Расстояние от поверхности Земли, км	Угол наклона плоскости орбиты $i$ , град			
	0	30	60	90
3000 (1-й максимум)	$3,0 \cdot 10^{12}$	$1,0 \cdot 10^{12}$	$0,9 \cdot 10^{12}$	$0,8 \cdot 10^{12}$
22000 (2-й максимум)	$2,0 \cdot 10^{11}$	$1,7 \cdot 10^{11}$	$0,9 \cdot 10^{11}$	$0,8 \cdot 10^{11}$

**Протонный (внутренний) РПЗ.** Протоны, обладающие значительно большей массой, проходят первую ловушку насквозь и “застревают” в магнитосфере Земли на более низких высотах. В итоге на расстоянии 1...5 тыс. км в средних широтах 30...60° возникает второй (внутренний) радиационный пояс. Попавшие в него протоны образуют кольцевой ток с общим направлением с запада на восток. Основная масса протонов имеет энергию порядка 10...300 МэВ и плотность потока  $3 \cdot 10^{12}$  частиц/см<sup>2</sup>·сут (концентрация частиц 0,1...10 см<sup>-3</sup>). Примерно в середине РПЗ - на высоте 3 тыс. км - имеется четко



выраженный максимум плотности потока протонов  $1,44 \cdot 10^{13}$  частиц/см<sup>2</sup>·сут с энергией 1...500 МэВ. На этой же высоте находится второй максимум плотности электронов (табл. 1.4), диапазон спектра энергии электронов 0,07...7 МэВ. Распределения протонов в внутреннем РПЗ для различных широт даны в табл. 1.5.

Таблица 1.5

**Плотность потока протонов РПЗ, см<sup>-2</sup>·сут<sup>-1</sup>**

Расстояние от поверхности Земли, км	Угол наклона плоскости орбиты $i$ , град			
	0	30	60	90
445	0	$2,55 \cdot 10^{10}$	$1,42 \cdot 10^{10}$	$1,26 \cdot 10^{10}$
2780	$1,44 \cdot 10^{13}$	$7,0 \cdot 10^{12}$	$3,43 \cdot 10^{12}$	$3,00 \cdot 10^{12}$
5500	$2,25 \cdot 10^{12}$	$9,79 \cdot 10^{11}$	$5,11 \cdot 10^{11}$	$4,37 \cdot 10^{11}$
8350	$2,83 \cdot 10^{11}$	$1,21 \cdot 10^{11}$	$6,07 \cdot 10^{10}$	$5,24 \cdot 10^{10}$
11100	$5,87 \cdot 10^9$	$2,06 \cdot 10^9$	$1,11 \cdot 10^9$	$9,11 \cdot 10^8$

Над южной частью Атлантического океана внутренний радиационный пояс образует так называемую Южно-Атлантическую аномалию. Плотность потока протонов в центре аномалии ( $33^0$  ю.ш,  $325^0$  в.д на высоте 445 км достигает  $1,5 \cdot 10^3$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, т.е. в 100 раз выше, чем среднее для этой высоты. Средняя энергия протонов около 200 МэВ.

**2.3. АТМОСФЕРНОЕ ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ**

*Ионизирующее излучение ионосферы.* Ионосфера располагается в диапазоне высот от 100 до 1000 км над поверхностью Земли. Она обладает переходными свойствами между атмосферой и радиационными поясами. В состав входят “остатки” ГКИ и СКИ в виде протонов и нейтронов, которые прошли магнитную ловушку планеты за счет высокой энергии. Вместе с этим есть ионизированные частицы O, N, NO, OH, которые формируются в результате разрушения молекул воздуха, теряемых планетой. Пилотируемые полеты выполняются в нижней части ионосферы на высотах 200 ... 500 км от поверхности Земли. Плотность потока частиц ГКИ представлена в табл. 1.6. Для расчетов доз облучения можно принять, что это поток низкоэнергетических протонов со средней энергией 200...1000 эВ.

Таблица 1.6

**Плотность потока ГКИ, см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>**

Расстояние от поверхности Земли, км	Угол наклона плоскости орбиты $i$ , град			
	0	30	60	90
200	8	10	10	8
300	10	12	14	10
500	12	15	18	15
800	20	25	30	20
1000	10	12	14	10



**Высотное излучение в мезосфере.** Область мезосферы распространяется от 50 до 100 км над поверхностью Земли и относится к верхним слоям атмосферы. Первичное космическое излучение, потеряв низкоэнергетические частицы в более высоких слоях, изменяется по своему составу. Поток космических частиц состоит из 37 % протонов, 60 % нейтронов и 3 % различных ядер.

В силу большой разреженности воздуха образования каскадных ливней не происходит. Поэтому ионизационный эффект в этих условиях практически определяется только первичными частицами, интенсивность которых не может меняться с высотой и от нее не зависит. Наряду с этим в дневное время на высоте 60 км происходит дополнительная ионизация молекул под действием фотонного излучения Солнца. Именно этот слой имеет большое значение для распространения радиоволн короткого и ультракороткого диапазона.

Энергетические спектры ионизирующих частиц ГКИ и СКИ близки по форме: имеют максимум в области 20...30 кэВ и экспоненциально падают за границами интервала.

Таблица 1.7

**Состав первичного ГКИ**

Атомный номер, $Z$	Поток, $J$ , част/(см <sup>2</sup> ·с)	Плотность потока, % к сумме	Диапазон энергии, $E$ , кэВ	Средняя энергия, $E_{ср}$ , кэВ
1 (H)	9...10	37	$1...10^4$	20...30
2 (n- нейтроны)	15	60	$1...10^4$	20...30
3 (He)	0,1...0,25	1	$1...10^4$	20...30
3...5	0,01...0,025	0,08...0,1	$1...10^4$	20...30
6...9 (C, O, N)	0,1...0,25	1	$1...10^4$	20...30
10...19	0,01...0,025	0,08...0,1	$1...10^4$	20...30
20	0,001...0,0025	0,008...0,01	$1...10^4$	20...30
электрон	0,01...0,025	0,08...0,1	$1...10^4$	20...30
фотоны	30000		0,045...0,450	
фотоны	10000		0,0045...0,045	

**Высотное излучение в стратосфере.** Область стратосферы распространяется от 15 до 50 км над поверхностью Земли. Поток космических частиц сохраняется примерно постоянным до высоты около 30 км, состоит из 37 % протонов, 60 % нейтронов и 3 % различных ядер.

**Вторичные космические лучи.** На высотах 20...30 км первичные космические лучи исчезают, образуя так называемое вторичное космическое излучение. На этой высоте плотность воздуха резко увеличивается и образовавшаяся “воздушная подушка” гасит последнюю часть частиц ГКИ и СКИ. Взаимодействуя с атомами воздуха, частицы высоких энергий космического излучения образуют нейтроны, электроны, протоны и мезоны (элементарные



заряженные частицы в 200...300 раз тяжелее электрона). Этот процесс происходит лавинообразно и называется *каскадными ливнями*.

В зависимости от энергии космических частиц формируются *электронно-фотонные* или *электронно-ядерные* ливни. Сущность электронно-фотонных ливней (энергия частиц менее 3000 МэВ): возникающие при торможении заряженных частиц в поле атомных ядер фотоны образуют пары электронов и позитронов. Последние, в свою очередь, порождают новые фотоны, и каскадный процесс нарастания лавины развивается, пока энергия новых частиц не разменяется до предельно мелких порций и не трансформируется в энергию возбуждения ионизированных атомов. Электронно-ядерные ливни (энергия частиц более 3000 МэВ) протекают аналогично: в результате столкновения с ядром вещества возникает большое количество осколков ядра – протонов, нейтронов, мезонов. Энергия последних трансформируется в фотоны и электроны, которые вызывают электронно-фотонные ливни. Максимум каскадных ливней и интенсивности ионизации приходится на высоту 20 км.

Энергетические спектры ионизирующих частиц ГКИ и СКИ близки по форме: имеют максимум в области 20...30 кэВ и экспоненциально падают за границами интервала.

Таблицы 1.8, 1.9

**Плотность потока нейтронов и ионизирующего компонента**

Высота над уровнем моря, км	Плотность потока нейтронов, см <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup>				Ионизирующий компонент, пар ионов·см <sup>-3</sup> ·с <sup>-1</sup>			
	Широта <i>i</i> , град				Широта <i>i</i> , град			
	0	30	60	90	0	30	60	90
0...0,1 (прибрежная зона)	0,006	0,007	0,008	0,008	1,9	2,2	2,6	2,6
0,1...0,5 (равнины)	0,008	0,008	0,008	0,008	2,6	2,8	3,0	3,0
0,5...1,5 (предгорья)	0,017	0,017	0,017	0,017	3,0	4,3	5,6	5,6
1,5...2,5 (альпийские луга)	0,04	0,05	0,064	0,064	5,6	6,1	6,5	6,5
2,5...4 ( плоскогорья)	0,12	0,15	0,18	0,18	6,5	10,5	14,6	14,6
4 (высокогорья)	0,24	0,30	0,36	0,36	12	14	18	18
6 (высокогорья)	0,54	0,63	0,72	0,72	23	28	34	34
8 (гражданские самолеты)	0,76	0,88	1,0	0,72	35	50	60	60
10	1,1	1,25	1,4	1,4	50	75	100	100
12	2	2,5	3	3	60	100	140	140
14 (военные самолеты)	4	5	6	6	70	125	180	180
16	7	8,5	10	10	80	150	220	220
18	11	13	15	15	90	175	260	260
20	16	18	20	20	100	200	300	300
22	15,5	17,5	19	19	95	185	280	280
24	16	17	18	18	90	170	260	260
26	15	16	17	17	85	155	240	240
28	14	15	16	16	80	140	220	220
30	13	14	15	15	75	135	200	200



**Высотное излучение в тропосфере.** Область тропосферы распространяется от 0 до 15 км над поверхностью Земли. Поток первичных космических частиц незначителен и составляет около 0,02 %. Поток вторичных излучений видоизменяется по высоте. Жесткое излучение (высокоэнергетические мезоны проникающие через свинцовую пластину толщиной 10 см) на высоте 15 км составляет 20...25 %, на уровне моря – 60...70 %. Мягкое излучение (электроны, позитроны,  $\gamma$ -кванты, задерживаемые 10 см пластиной свинца), наоборот, на 15 км составляет 75...80 % и на уровне моря – 20...30 %.

**Космогенные радионуклиды.** На высотах 10...20 км жесткая часть вторичного космического излучения вступает в радиационное взаимодействие с ядрами атомов азота и кислорода и создает третичное космическое излучение, так называемые радионуклиды космогенного происхождения. Состав, плотность потока и распределение радионуклидов представлены в табл. 1.10.

Таблица 1.10

**Распределение космогенных радионуклидов в атмосфере**

Характеристика радионуклида	Тритий ( $^3\text{H}$ )	Бериллий ( $^7\text{Be}$ )	Углерод-14 ( $^{14}\text{C}$ )	Натрий-22 ( $^{22}\text{Na}$ )
Период полураспада	12,3 года	53,6 сут	5730 лет	2,62 года
Плотность потока, атом $\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$				
в тропосфере	0,084	0,027	1,1	$2,4\cdot 10^{-5}$
во все атмосфере	0,25	0,081	1,6...2,5	$8,6\cdot 10^{-5}$
Суммарная активность $A_{\text{сум}}$ , ПБк	1300	37	8500	0,4
Распределение, % от $A_{\text{сум}}$				
стратосфера	6,8	60	0,3	25
тропосфера	0,4	11	1,6	1,7
поверхность Земли и биосфера	27	8	4	21
верхние слои океана	35	20	2,2	44
глубокие слои океана	30	0,2	92	8
донные отложения океана	-	-	0,4	-
Концентрация в воздухе у Земли, мБк/м $^3$	-	3	-	$3,0\cdot 10^{-4}$
Концентрация в воде у побережья, мБк/м $^3$	200...900	-	-	-