Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования

Санкт-Петербургский государственный университет

Институт Наук о Земле

Кафедра геоэкологии и природопользования

**Коржова Карина Андреевна**

**Выпускная квалификационная работа**

**ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ РАДИОНУКЛИДАМИ СЕМЕЙСТВА 238-U ОТ НЕКОТОРЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ, НЕ СВЯЗАННЫХ С ЯТЦ**

Основная образовательная программа магистратуры

Направление 05.04.06 «Геоэкологический мониторинг и рациональное природопользование»

Профиль «Геоэкологический мониторинг»

Научный руководитель:

д.ф-м.н., профессор

Белозерский Геннадий Николаевич

Рецензент: Глав. научн. сотр., д. техн. наук,

ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева

Звонова Ирина Александровна

Санкт-Петербург

2019

Содержание

[Введение 4](#_Toc9010945)

[Глава 1 Литературный обзор 7](#_Toc9010946)

[1.1 Общие сведения о радиоактивном семействе 238U и о содержании 238U в земной коре 7](#_Toc9010947)

[1.2 Железная руда 14](#_Toc9010948)

[1.3 Фосфатные руды 15](#_Toc9010949)

[1.4 Обзор отчётов НКДАР ООН 18](#_Toc9010950)

[1.5 Оценки облучения населения 27](#_Toc9010951)

[Глава 2. Оценка изменения вклада 226Ra, 222Rn и продуктов его распада в естественный радиационный фон за счёт добычи фосфатов и железной руды 35](#_Toc9010952)

[2.1 Вычисление количества 226Ra(238U) поднятого на поверхность, сопутствующего добыче железной руды и фосфатов 35](#_Toc9010953)

[2.2 Оценка результатов 37](#_Toc9010954)

[Заключение 40](#_Toc9010955)

[Список литературы 42](#_Toc9010956)

[Приложение А Содержание железа в руде разных стран в % [38] 46](#_Toc9010957)

[Приложение Б Содержание фосфора в руде разных стран в % [38] 49](#_Toc9010958)

[Приложение В Статистика полезной железной руды с 1904-2015 года по миру [39] 52](#_Toc9010959)

[Приложение Г Статистика добычи железной руды (сырой) с 1904-2015 года по миру 54](#_Toc9010960)

[Приложение Д Статистика полезной фосфатной руды с 1904-2015 года по миру [40] 55](#_Toc9010961)

[Приложение Е Статистика добычи фосфатов (сырой руды) с 1904-2015 года по миру 57](#_Toc9010962)

[Приложение Ж Количество урана и радия, оценочно образовавшегося на поверхности в связи с добычей железной руды по миру с 1904-2015 г. 58](#_Toc9010963)

[Приложение И Количество урана и радия, оценочно образовавшегося на поверхности в связи с добычей фосфатов по миру с 1904-2015 г. 60](#_Toc9010964)

[Приложение К Значения концентраций 238U и 226Ra в почве разных стран [35] 62](#_Toc9010965)

[Приложение Л Динамика количества добытой железной руды с 1904-2015 г. 64](#_Toc9010966)

[Приложение М Динамика количества добычи фосфатов с 1904-2015 г. 65](#_Toc9010967)

## **Введение**

Естественный радиационный фон существовал на всех этапах эволюции Земли. Любой организм подвергается воздействию радиационного фона, характерного для данной местности. Он обусловлен радионуклидами, находящимися в окружающей среде, либо космическим излучением. Основной вклад в облучение человекадают радионуклиды семейства 238U. Доза от этого семейства, получаемая населением, обусловлена теми радионуклидами, которые находятся в атмосфере, воде и непосредственной близости от поверхности земли. Всё что глубже, будем считать, на человека не влияет.

Средняя доза от облучения человека естественным радиационным фоном составляет 2,4 мЗв/год [35]. Будем считать, что ~2/3 этого значения обусловлено семейством 238U, то есть примерно 1,6 мЗв в год.

Зададимся вопросом, какое же количество урана принимает участие в формировании этой части дозы? Вкладом членов семейства 238U до 226Ra в величину 1,6 мЗв/год пренебрежём. Основной вклад вносят 226Ra, 222Rn и продукты его распада. Ядра 222Rn, образующиеся при распаде 226Ra вылетают в произвольном направлении. Только ограниченная их часть может достигнуть поверхности земли. Чем глубже находится атомы 238U(226Ra), тем меньше вероятность вклада одного из них в 1,6 мЗв/год. Нам нужно рассматривать эффективный приповерхностный слой, атомы которого, прямо или косвенно, вносят вклад в естественно радиационный фон. Кроме того, испускание радона как в результате распада радия, так и вследствие отдачи при распаде изотропно.

О количестве 226Ra будем судить по количеству 238U (зная его содержание из таблиц [7]), считая, что имеет место вековое равновесие. T1>>T2, λ1<<λ2. В течение времени, равного многим периодам полураспада дочернего вещества, активность материнского вещества заметно не уменьшается при рассмотрении в пределах земной коры [3].

Возьмём площадь континентальной части земной коры за вычетом Антарктиды (135 млн. км2) [8] и слой земли толщиной всего 1м, примем что плотность рассматриваемого слоя земли составляет 2,5 т/м3.

Найдём объём — V и массу — M, выбранного нами участка земной коры:

V ≈ 1,35·1014 м2·0,5 м ≈ 14·1013 м3

M ≈ 14·1013 м3·2,5 т/м3 ≈ 3,5·1014 т.

Теперь, когда мы знаем массу, определим, сколько в этом слое содержится урана.

При содержании урана в верхней части земной коры 2,5 г/т в выбранном нами слое находится количество урана mU, равное

mU ≈ 3,5·1014 т·2,5 г/т ≈ 9·108 т

Количество 226Ra, находящегося в равновесии с таким количеством урана рассчитаем из соотношения [4] : *N*1/*N*2 = λ2/λ1, где *N*1, *N*2 - число атомов, λ2, λ1 - постоянная распада, которая равна ln2/$T\_{1/2}$. Нам нужно связать количество атомов с количеством вещества, поэтому воспользуемся формулой N = Na $\frac{m}{M}$, где Na – постоянная Авогадро, m – количество вещества, M – молярная масса вещества. Воспользуемся некоторыми константами, представленными в таблице 1.

Таблица 1 – Периоды полураспада и молярные массы 238U и 226Ra

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Радионуклид | Период полураспада  | Молярная масса |
| 238U | 4,2·108 лет | 238 г/моль |
| 226Ra | 1600 лет | 226 г/моль |

Получим соотношение для количества радия, которое, в рамках наших предположений, может определять вклад в невозмущенный естественный радиационный фон 1,6 мЗв в год:

mRa = mU /2,8·106 = 9·108 т /2,8·106 ≈ 300 т (Радия-226)

Полученное нами значения mU, mRa отражают количества соответствующих радионуклидов, которые могут принимать участие в формировании дозы для человека.

Так, например, за всё время человек добыл из недр земли около 2·106 т урана [4]. Т.е. это естественная добавка (в плане воздействия на человека) к 9·108 т урана, которые и так уже действуют.

Человек добывает и много других полезных ископаемых. А так как уран рассеянный элемент в земной коре, то вместе с рудой и сопутствующей ей пустой породой, на поверхность Земли поднимается какое-то количество 238U. Поэтому наша цель оценить изменение вклада продуктов распада 226Ra в естественный радиационный фон за счёт добычи фосфатов и железной руды.

Если мы определим, как меняется (возрастает) содержание 226Ra, 222Rn и продуктов его распада, то сможем определить, сколько человек добавляет своей горнодобывающей деятельностью к вкладу в естественный радиационный фон от этих радионуклидов.

**Цель исследования:** оценить изменение вклада 222Rn и продуктов его распада в естественный радиационный фон за счёт добычи фосфатов и железной руды.

**Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:**

1. Проанализировать литературу по теме исследования.
2. Оценить количество урана, которое поднято на поверхность в результате добычи железной руды и фосфатов.
3. Оценить изменение количества радия, а затем и радона в среде обитания человека.

## **Глава 1 Литературный обзор**

## **Общие сведения о радиоактивном семействе 238U и о содержании 238U в земной коре**

**Уран**, (лат. *Uranium*) - самый тяжёлый элемент из встречающихся в природе (таблица 2).

Таблица 2 – Общие сведения об уране [2]

|  |  |
| --- | --- |
| Обозначение | *U* |
| Группа в периодической системе | III |
| Порядковый номер | 92 |
| Атомная масса | 238,02891(3) |

Природный уран состоит в основном из трёх радиоактивных изотопов (таблица 3):

Таблица 3 – Содержание изотопов в природном уране и их период полураспада [2]

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Содержание в природном уране | Период полураспада, T | Удельная активность, кБк/г |
| 238U | 99,2739% | 4,47·109 лет | 12,32 |
| 235U | 0.7205% | 7,04·109 лет | 2,05 |
| 234U | 0.0056% | 2,48·105 лет | 10,42 |

 Изотопами 238U и 234U в основном обусловлена радиоактивность природного урана, их удельные активности равны в равновесии. Удельная радиоактивность природного урана 24,79 кБк/г, которая делится практически пополам между 234U и 238U; 235U вносит намного меньший вклад (удельная активность изотопа 235U в природном уране в 21 раз меньше чем в 234U или 238U)

 Рисунок 1 - Цепочка распада 238U [2]



 На начальном этапе эволюции Земли в ходе процессов дифференциации малораспространенные элементы концентрировались в жидких растворах в мантии, а затем выносились вверх и оказывались в конечном итоге в земной коре. Это приводило к тому, что мантия становилась относительно обедненной, а кора обогащенной такими элементами (таблица 4). Так для урана концентрация в нижней части коры составляет 0,7·10-6, а в верхней - 2,5·10-6, при средней концентрации 1,7·10-6 [2,4].

Таблица 4 – Типичные усредненные содержания примордиальных радионуклидов в горных породах разных типов [2]

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Типы пород | 40K | 238U | 226Ra | 232Th |
| Бк·кг-1 | Бк·кг-1 | Бк·кг-1 | Бк·кг-1 |
| Магматические породы | 810 | 48 | 48 | 48 |
| Осадочные породы |
| Песчаники | 330 | 15 | 26 | 24 |
| Глинистые сланцы | 810 | 15 | 40 | 41 |
| Известняки | 81 | 15 | 16 | 5 |

Уран обнаружен во многих горных породах, в океанах, а также в лунных породах и метеоритах. В земной коре его больше, чем серебра или ртути (он находится на 38-е место по распространённости), в основном в рассеянном состоянии. Уран встречается в различных точках земного шара в многочисленных минералах, либо в первичных залежах, прежде всего в виде урановой смоляной руды, либо в виде вторичных отложений в песчаниках, известняках, лигнитах (бурых угля) [2].

Его концентрация относительно низкая в основных породах, таких как базальт, и выше в кислых породах, таких как осадочные породы, насыщенные кремнеземом. Содержание урана в гранитах еще выше. Например, номинальная концентрация активности урана в почве составляет около 30 Бк/кг для 238U (1,2 мг/кг) с типичным диапазоном активности 10–50 Бк/кг (от 0,4 до 2 мг/кг). Гораздо более высокие концентрации обнаружены в районах добычи урана, таких как северный Саскачеван в Канаде, плато Колорадо и центральная Флорида, где добывается фосфат. Содержание урана в фосфоритовой породе, используемой для фосфорных удобрений, составляет от 50 до 2400 Бк/кг 238U (4–190 мг/кг). Одна из самых высоких концентраций активности в мире, локализована в регионе Ресифи в Бразилии с осадочными породами, которые содержат 30–500 мг/кг в среднем 150 мг/кг (диапазон 372–6 200 Бк/кг 238U) [35]. В таблице 5 приведен краткий обзор типичных концентраций 238U в различных горных породах.

Таблица 5 – Среднее содержание 238U (n\*10-4) в горных породах верхней части континентальной коры [7]

|  |  |
| --- | --- |
| Горные породы, слои | U |
| Пески и песчаники | 2,3 |
| Глины, глинистые сланцы | 4,5 |
| Карбонатные породы | 2,1 |
| Кремнистые породы | 5 |
| Эвапориты | 0,68 |
| Осадочные породы | 3,4 |
| Кислые вулканиты | 4,5 |
| Средние вулканиты | 1,1 |
| Основные вулканиты | 0,86 |
| Вулканиты в целом | 1,4 |
| Осадочный слой | 3,1 |
| Граниты  | 3,9 |
| Гранодиориты  | 2,7 |
| Базиты | 0,8 |
| Сиениты | 3 |
| Ультрабазиты | 0,001 |
| Магматические породы | 3,2 |
| Метапесчаники  | 1,7 |
| Парагнейсы, сланцы | 2,3 |
| Карбонатные породы | 0,7 |
| Железистые породы | - |
| Параметаморфиты  | 2,2 |
| Гранито-гнейсы  | 2,4 |
| Метабазиты  | 0,9 |
| Ортометаморфиты  | 2,1 |
| Гранитно-гнейсовый слой | 2,3 |
| Верхняя часть коры | 2,5 |

Шестым членом цепочки распада 238U (рисунок 1) является изотоп радия 226Ra (T1/2=1600 лет). При распаде каждого атома радия выбрасывается альфа-частица. Этот альфа-радионуклид распадается на 222Rn (период полураспада 3,82 дня), который представляет собой благородный газ. Вновь образованный атом радона отскакивает в противоположном направлении. Альфа-отдача является наиболее важным фактором, влияющим на выброс радона из зерен почвы. Когда атомы радона находятся внутри твердых зерен, они нелегко выбрасываются в атмосферу из-за их очень низкой диффузионной способности в твердых телах [23]. Однако если они расположены в пространстве между частицами почвы, они могут полностью диффундировать на поверхность в атмосферу в виде почвенного газа.

Генеалогия тория содержит газообразный элемент 220Rn. Из-за того, что период полураспада 220Rn составляет всего ~ 55 с, эта форма радона менее опасна, чем выделяемая ураном. Поэтому вклад 222Rn, а также его радиоактивного потомства, следует рассматривать в качестве основного естественного источника облучения. Начиная с 222Rn, происходит серия из шести кратковременных альфа- и бета-распадов (рисунок 1) , до 210Pb (период полураспада 22,3 года). 226Ra и 222Rn присутствуют во всех породах и почвах, равно как и уран, потому что они являются дочерними продуктами, образующимися в результате радиоактивного распада урана [27].

Согласно [3] и [14] в верхнем слое земной коры толщиной 1,6 км содержится 1,8·107 т 226Ra и 115 т 222Rn. Эти значения рассчитывались исходя из концентрации урана 80 г/т для 238U [17]. Докажем это, возьмём массу участка земной коры толщиной 0,5 м, равную ~1,7·1014 т. Теперь, когда мы знаем массу, определим, сколько в этом слое содержится урана при содержании 80 г/т. В выбранном нами слое с таким содержанием находится количество урана mU, равное ~1,4·1010 т.

Количество 226Ra найдём из соотношения выведенного ранее: mRa = 3,2·10-7 mU = 3,2·10-7·1,4·1010 т = 4,5·103 т. Это для толщины слоя 0,5 м, а в [3] говориться о верхнем слое земной коры толщиной 1,6 км, в котором содержится 1,8·107 т 226Ra. Решая простое соотношение, получаем, что по источнику [3] в слое верхней части земной коры толщиной 0,5 м содержится 5,6·103 т 226Ra. Что очень близко к получившемуся у нас значению 4,5·103 т 226Ra для содержания урана 80 г/т.

Бекман И. Н. в своей книге «Уран» [2] говорит о значении 2,5 г/т для 238U. Это содержание мы и будем использовать в работе, оно также подтверждается [7] .

Радон может перемещаться в дома из-за перепадов давления и большого градиента концентрации между зданием (домом) и коренной породой или почвой. Концентрации радона в домах тесно связаны с концентрацией радона в почве, хотя не существует полностью точного метода для оценки уровней радона в отдельных жилищах на основе данных о радоне в почве [27].

Среднее содержание 222Rn в воздухе континентальных областей равно 3,7 Бк/м3, в приморских районах и на островах — 0,37 Бк/м3, над океанами и полярными областями – 0,037 Бк/м3 [3].

При помещении в герметично закрытый объем, с температурой 0° С и атмосферным давлением 760 мм рт., 1 г радия, образуется 0,66 мм3 222Rn, и далее это количество не увеличивается, при пересчёте получается 6,5·10-6 г. При откачке из этого объёма 222Rn, процесс повторится до этого же значения. Возникает равновесное состояние, при котором число распадающихся в секунду атомов радия и радона одинаково и распад радона компенсируется его образованием, то есть радиоактивное равновесие [14].

Рисунок 3 – Процесс выброса радона в атмосферу [23]



Радон (222Rn) высвобождается из земли в атмосферу, где транспортируется в основном [диффузией](https://proxy.library.spbu.ru:2068/topics/earth-and-planetary-sciences/turbulent-diffusion)или конвекцией (рисунок 3). Активность выходящего с единицы площади пористого материала в единицу времени радона называется плотностью потока радона с поверхности материала (грунт, строительный материал и пр.) [14].

Величина плотности потока радона измеряется в Бк/м2с. Критерием потенциальной радоноопасности территорий в Российской Федерации, согласно введенным новым санитарным правилам ОСПОРБ-99, является величина плотности потока радона с поверхности грунта [14].

Согласно требованиям строительных норм, средневзвешенное значение плотности потока радона с поверхности грунта в пределах застраиваемой площади участка не должно превышать 80 мБк/м2с. Для участков застройки под дошкольные, общеобразовательные и лечебные учреждения плотности потока радона с поверхности грунта не должна превышать 40 мБк/м2с. Установленные нормативные значения являются одним из условий, при котором среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность радона в воздухе сдаваемых в эксплуатацию зданий жилого и общественного назначения не превысит 100 Бк/м3 [14].

## **Железная руда**

Железная руда представляет собой природные минеральные образования, содержащие железо и его соединения в таком объёме, когда промышленное извлечение железа из них целесообразно. Она является источником для получения чугуна, стали, ферросплавов. Железорудные месторождения промышленного значения весьма разнообразны. Они известны в эндогенных, экзогенных и метаморфогенных комплексах пород. Железо является четвертым по распространенности породообразующим элементом и составляет около 5% земной коры.

Железная руда почти всегда состоит из оксидов железа, основными формами которых являются магнетит (Fe3O4) и гематит (Fe2O3). Железная руда является основным источником чугуна для мировой металлургической промышленности. В производстве стали используется почти вся (98%) железная руда. Остальные 2% используются для производства цемента, тяжеловесных материалов, пигментов, сельскохозяйственных продуктов [19].

Добыча и переработка металлических руд, может генерировать большое количество отходов с повышенным содержанием естественных радионуклидов. Хвосты - это твердые материалы, оставшиеся после физического или химического обогащения (промывка, флотация, измельчение и сушка), после удаления ценных металлических составляющих руды. Шлак представляет собой массу стекловидного остатка, оставшуюся от плавки металлической руды для добычи и очистки. В исследовании [23] описаны отходы от добычи и переработки трех категорий металлов: редкоземельных, специального применения и получаемых в больших объемах в результате промышленных процессов экстракции (таблица 6).

Таблица 6 – Концентрации радионуклидов в отходах металлургии [23]

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Нуклид | Редкоземельные металлы (Бк/г) | Специальные металлы (Бк/г) | Крупномасштабные металлы промышленности (Бк/г) |
| 238U | 33,3 | 1,59 | 0,37 |
| 232Th | 74 | 0,81 | 0,37 |
| 226Ra | 33,3 | 1,59 | 0,19 |

Редкоземельные металлы: эта группа насчитывает 17 химических элементов. Сюда относятся: лантан, церий, неодим, празеодим, самарий, прометий, гадолиний, европий, тербий, гольмий, диспрозий, эрбий, иттербий, лютеций, тулий. Металлы особого назначения считаются металлами, которые имеют уникальное коммерческое и промышленное применение и включают гафний, олово, титан и цирконий. Металлы, добытые и переработанные навалом для промышленного применения, включают алюминий, медь, железо, свинец, цинк и драгоценные металлы, такие как золото и серебро.

Уровень естественных радионуклидов, обнаруженный в металлических рудах, в большей степени зависит от геологического образования или региона, чем от конкретного минерала [19].

## **1.3 Фосфатные руды**

Фосфор относится к числу широко распространенных элементов. Кларк его в земной коре – 0,093 % [30]. Основным источником фосфорсодержащего сырья являются апатитовые и фосфоритовые руды. Отложения фосфатных пород могут быть осадочными или магматическими, но более 80 % мирового производства фосфатных пород добывается из осадочных отложений, образующихся в результате осаждения богатых фосфатами материалов в морской среде. Большие осадочные отложения расположены в Китае, на Ближнем Востоке, в Северной Африке и в США. Магматические отложения связаны с карбонатитами и силикатными интрузиями. Они добываются в Бразилии, Канаде, Финляндии, России, Южной Африке и Зимбабве [30].

После добычи и обогащения фосфатной породы ее для удобства переработки измельчают до частиц одинакового размера. На заводах с влажным процессом производится фосфорная кислота, являющаяся исходным продуктом для получения фосфата аммония и тройных суперфосфатных удобрений. При этом в качестве побочного продукта или отхода получается фосфогипс. На заводах с термической технологией производится чистый фосфор, который используется в основном для получения концентрированной фосфорной кислоты. Отходами и сопутствующими продуктами термической технологии являются фосфорное железо и шлак [4].

Самая высокая концентрация урана (если не считать фосфатных пород на севере Африки) наблюдается в фосфатах из месторождений Северной Америки. 238U и его дочерние продукты в фосфатных породах обычно близки к радиоактивному равновесию (таблица 7) [30].

Таблица 7 – Концентрации радионуклидов в фосфатах некоторых стран [30]

|  |  |
| --- | --- |
| Страна | Уран (Бк / кг) |
| США | 259-3700 |
| Бразилия | 114-880 |
| Чили  | 40 |
| Алжир  | 1295 |
| Марокко  | 1500-1700 |
| Сенегал  | 1332 |
| Южная Африка  | 163-180 |
| Южная Африка  | 100-200 |
| Танзания  | 5000 |
| Того | 1360 |
| Тунис  | 590 |
| Египет  | 1520 |
| Израиль  | 1500-1700 |
| Иордания  | 1300-1850 |
| Австралия  | 15-900 |

Облучение населения обусловлено: а) сбросом в окружающую среду жидких отходов, содержащих радионуклиды: уранового семейства, при добыче и переработке фосфатов: б) использованием фосфатных удобрений; в) применением побочных продуктов и отходов фосфатного производства.

Уровень облучения в фосфатной промышленности для рабочих представлен в таблице 8. Следует иметь в виду, что эти оценки весьма неопределенны, их количественная корректи­ровка затруднена, и они призваны только дать общее представление о положении дел [4].

Таблица 8 – Максимальная мощность дозы, получаемая рабочими, связанная с работой различных отраслей промышленности в течение года [4]

|  |  |
| --- | --- |
| Источник  | Максимальная мощность дозы, мкЗв/год |
| Внешнее облучение | Ингаляция | Перорально |
| Отрасли промышленности, связанные с добычей и переработкой фос­фатных пород | 8 | ~2000а | 2 |
| Производство элементарного фосфора | 130 | 2 | <0,4 |
| Производство удобрений | 20 | <0,4 | 15 |
| Применение фосфатных удобрений  |  |  |  |
| Применение фосфогипса при строи­тельстве домов |  |  |  |

аОчень грубая оценка.

## **1.4 Обзор отчётов НКДАР ООН**

Существуют два основных источника естественного радиационного облучения, как и упоминалось ранее: космическое излучение, и радиоактивные нуклиды, которые возникли в земной коре и присутствуют повсюду в окружающей среде, включая само тело человека [35].

Встречающиеся в природе радионуклиды земного происхождения, также называемые первичными радионуклидами, присутствуют в различной степени во всех средах окружающей среды. Только те радионуклиды, период полураспада которых сопоставим с возрастом Земли, и продукты их распада существуют в достаточном количестве, чтобы внести существенный вклад в облучение населения [35].

Основной вклад во внешнее облучение вносят гамма-излучающие радионуклиды, присутствующие в следовых количествах в почве, в основном семейство 238U. Информация о наружном облучении поступает из прямых измерений мощности дозы или из оценок, основанных на измерениях концентраций радионуклидов в почве [11].

Некоторые значения концентраций 238U и 226Ra в почве, представлены в Приложении К согласно отчёту НКДАР-2000. Новые данные отчёта за 2008 год не оказывают существенного влияния на текущие среднемировые значения 33 Бк/кг для 238U, 32 Бк/кг для 226Ra. Результаты применения коэффициента дозы, связывающего концентрацию в почве с мощностью поглощенной дозы в воздухе, показаны в таблице 9.

Таблица 9 – Мощность поглощенной дозы в воздухе от семейства 238U [35]

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Радионуклид | Концентрация в почве (Бк/г) | Дозовый коэффициент | Мощность поглощенной дозы в воздухе (нГр/ч) |
| 238U | 0,033 | 0,462 | 15 |

Прямые измерения мощности поглощенной дозы в воздухе были проведены в последние несколько десятилетий во многих странах мира. Средние значения находятся в диапазоне от 5 до 24 нГр/ч [35].

Для оценки годовой эффективной дозы от семейства 238U необходимо учитывать коэффициент преобразования поглощенной дозы на воздухе в эффективную дозу и коэффициент занятости в помещении. Средние числовые значения этих параметров варьируются в зависимости от возраста населения и климата в рассматриваемом месте. В Отчете НКДАР-2000 комитет использовал 0,7 Зв/Гр для коэффициента преобразования из поглощенной дозы в воздухе в эффективную дозу, полученную взрослыми, и 0,8 для коэффициента занятости в помещении, т.е. доля времени, проведенного в помещении и на открытом воздухе, составляет 0,8 и 0,2 соответственно. Значения сохранялись и последующих отчётах. Из данных, приведенных выше, внешняя годовая эффективная доза от семейства 238U определяются следующим образом: 15 нГр/ч × 8,760 h × 0.2 × 0.7 Зв/Гр = 0,02 мЗв [33].

Шестым членом цепочки распада 238U является изотоп радия 226Ra (T1/2=1600 лет). Когда 226Ra распадается в частицах почвы, образующиеся атомы 222Rn должны сначала вырваться из частиц почвы в заполненные воздухом поры и пройти через эти поры, чтобы войти в атмосферу. Считается, что «побег» из частиц почвы в заполненные воздухом поры главным образом является результатом отдачи атомов радона после распада 226Ra: если они лежат близко к поверхности отдельных зерен, они могут быть выброшены в поры между зернами и далее за счёт диффузии выйти на поверхность [11].

 В повседневной жизни каждый человек подвергается воздействию радона, инертного радиоактивного газа, который встречается в природе и присутствует в атмосфере повсюду. В отчете НКДАР-1988 год [11] было подсчитано, что вдыхание короткоживущих продуктов распада радона (222Rn) c в среднем составляет примерно половину эквивалента эффективной дозы от всех естественных источников излучения и может иногда приводить к дозам, достаточно высоким для беспокойства о здоровье человека.

Продукты распада радона хорошо известны как канцерогены в легких. Тем не менее, дозы для других органов и тканей, возникающие при вдыхании радона и продуктов его распада, довольно малы, обычно, по крайней мере, на порядок меньше, чем дозы для легких. Кроме того, эпидемиологические данные мало поддерживают повышенный риск смертности, кроме рака легких [34].

 Радон растворим в воде, а подземные воды, которые проходят через урансодержащие почвы и породы, содержат радон. Когда богатые радоном грунтовые воды используются в качестве питьевой воды, люди подвергаются воздействию, как от потребления воды, так и от выброса радона из воды в воздух и вдыхании [34].

В отчёте НКДАР за 1988 год [11], так и в последующих отчётах, скорость выдоха определяется как скорость передачи активности на единицу площади на границе раздела грунт-воздух, выражается как: R = ƛRnFCsoil,RaƿsoilLRn, где R - скорость выдоха в Бк/м2с, ƛRn - постоянная распада 222Rn (2,1·10-6 c-1); F - мощность излучения (0.01-0.8), Csoil,Ra- массовая концентрация активности 226Ra в почве (Бк/кг), ƿsoil - плотность почвы (кг/м3); и LRn - длина диффузии радона в почве (м).

Средняя скорость выдоха радона по миру согласно отчёту 1998 года равна 0,016 Бк/м2с. При условии массовой концентрации в почве 226Raa в почве 25 Бк/кг и плотности почвы 1,6-3 кг/м3. Длина диффузии радона LRn составляет приблизительно 1 м [11].

Концентрации радона в окружающей среде зависят не только от величины скорости выброса из земли в атмосферу, но также от явлений смешивания в атмосфере. Солнечное отопление в дневное время вызывает турбулентность, поэтому радон легче переносится вверх и от земли. В докладе НКДАР за 2000 год [33] указывается, что типичные наружные уровни радона и торона составляют порядка 10 Бк/м3.

Воздействие на радиационный фон различных отраслей промышленности не связанных с добычей урана обычно мало. Оценка таких воздействий обычно основана на отрывочной информации, полученной из изолированных обследований. Например, по данным отчёта НКДАР-2016 [36] показывает, что обработка редкоземельных элементов может привести к дозе более 20 мЗв/год.

а) Добыча и использование угля.

Средняя удельная активность как 238U, так и 232Th в угле обычно составляет около 20 Бк/кг (диапазон 5–300 Бк/кг). Исключением являются угольные шахты в Фрайтале, Германия, в которых концентрация урана составляет 15000 Бк/кг угля. Во время сжигания угля органические соединения превращаются в газы (водяной пар и углекислый газ), в то время как неорганические элементы, которые включают в себя значительные природные радионуклиды, концентрируются в золе. В целом, коэффициент увеличения радионуклидов в золе составляет около 10. Выщелачивание из летучей золы является низким, и поэтому существует мало ограничений на использование летучей золы на полигонах и при строительстве дорог [36].

Сжигание угля для выработки электроэнергии является крупнейшим источником выработки электроэнергии в мире. На долю угля приходилось около 40% всей вырабатываемой электроэнергии в течение нескольких десятилетий, в то время как общая выработка электроэнергии из угля и других источников неуклонно росла. На географический регион ЮНЕП - Азиатско-Тихоокеанский регион - приходилось 57% общего производства электроэнергии из угля в 2010 году, причем на долю Китая приходилось около 70% этого. В отличие от этого, географический регион - Западная Азия - не использовал уголь для производства электроэнергии в 2010 году. Производство электроэнергии не является единственным конечным продуктом сжигания угля, другими являются, например, производство стали и цемента [36].

Содержание природного урана в угле из Бразилии колеблется от 30 до 2000 частей на миллион. По оценкам, при сжигании 2,2×106 т угля в год в окружающую среду выбрасывается около 270 т эквивалента U3O8 [36].

Облучение шахтеров обусловлено продуктами распада радона и торона, а также радионуклидами, содержащимися в угольной пыли. Для поддержания в воздухе низкой концентрации метана и угольной пыли шахты обычно оборудуют хорошими вентиляционными системами, поэтому и концентрация радона поддерживалась на относительно низком уровне. Концентрация радона в шахтах сравнима с концентрацией в жилых помещениях(105-500 Бк/м3) [11].

В 1980 году мировое производство электроэнергии при сжигании угля составляло около 600 ГВт в год. В результате была получена верхняя оценка общей коллективной эффективной дозы, эквивалентной для шахтеров в 2000 чел/Зв. Эта цифра используется для представления коллективного эквивалента эффективной дозы в мире за один год добычи угля [11].

Население подвергается воздействию радона, присутствующего в отработанном воздухе угольных шахт. Согласно [11], 20% радона, содержащегося в руде, выделяется в процессе добычи. Если принять, что для производства 1 ГВт за год требуется электроэнергии 3·109 кг угля и что средняя концентрация радона в угле равна 20 Бк/кг, то нормированный выброс радона из угольных шахт составит 36 ГБк.

Сводная информация о характерных индивидуальных дозах на единицу произведенной электроэнергии, интегрированных в 100 лет из-за атмосферных выбросов из источников на угольной электростанции представлена в таблице [36].

Таблица 10 – Индивидуальные дозы на единицу произведенной электроэнергии, интегрированных в 100 лет из-за атмосферных выбросов из источников на угольной электростанции (мЗв / (ГВт)) [36]

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Источник | Африка,n·10-4 | Азия и Тихий океан,n·10-4 | Европа,n·10-4 | Латинская Америка,n·10-4 | Северная Америка,n·10-4 |
| От добычи | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 |
| От старых угольных заводов | 3,8 | 4,0 | 4,2 | 3,9 | 4,2 |
| Из современных угольных заводов | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Из пепла1 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |

1 Предполагается, что годовые выбросы радона из угольной золы на единицу произведенной электроэнергии будут продолжаться в течение 100 лет.

Во время сжигания угля органические соединения превращаются в газы (водяной пар и углекислый газ), в то время как неорганические элементы, которые включают в себя значительные природные радионуклиды, концентрируются в золе [35]. Концентрация естественных радионуклидов в золе и шлаке, образующихся на угольных электростанциях, выше, чем соответствующие концентрации в земной коре (таблица 11).

Таблица 11 – Среднеарифметические значения удельной активности в выбрасываемой летучей золе [11]

|  |  |
| --- | --- |
| Радионуклид | Удельная активность, Бк/кг |
| 238U | 200 |
| 232Th | 70 |
| 226Ra | 240 |
| 210Pb  | 930 |
| 210Ро  | 1700 |

Наблюдается обогащение примерно в три раза 210Pb и в пять раз — 210Ро по сравнению с остальными продуктами распада цепочки 238U. Это, вероятно, происходит из-за того, что часть 210Pb и 210Ро улетучивается во время сгорания и конденсацией этих радионуклидов по линии дымовых газов на более мелких частицах зольной пыли.

При использовании угля в быту, за один год сжигания угля в домашних условиях, во всем мире в атмосферу выбрасывается по 0,3 ТБк 238U и 232Th (исключая радон и торон). Эти цифры увеличатся в 20 раз, если предположить, что удельная активность в дыме равна удельной активности в золе и что зольность угля составляет 5%. Можно оценить, что ожидаемая коллективная доза, обусловленная сжиганием угля для домашних нужд в течение года в мировом масштабе, составляет 2000 ­­­- 40 000 чел/Зв [11].

Ежегодно в мире образуется огромное количество угольной золы (летучей и комбинированной подовой). В 1985 г. мировое производство угля, выраженное в угольном эквиваленте, составило 3,1·109 т. Если предположить, что 70% общего количества потребляемого угля сжигается на электростанциях и что зольность угля равна 13%, то годовое производство золы на угольных электростанциях составило 280 млн. тонн. Принимая средние удельные активности в угле равными 20 Бк/кг для 238U и 232Th можно оценить, что средние удельные активности этих радионуклидов в угольной золе составляют 150 и 150 Бк/кг [11].

По оценкам НКДАР-1988 [11] около 5% золы (14 млн. тонн) используется в жилищном строительстве. Применение угольной золы для строительных целей может вызвать изменение доз облучения внутри помещений, обусловленных внешним облучением и вдыханием продуктов распада радона. Если при строительстве жилого дома используется бетон с зольным наполнителем, повышающим удельную активность 226Ra в бетоне на 13 Бк/кг, то годовая эффективная эквивалентная доза внешнего облучения в помещении увеличится на 20 мкЗв.

Таблица 12 – Оценки ожидаемых коллективных эффективных доз, обусловленных использованием угля в течение одного года [11]

|  |  |
| --- | --- |
| Источник  | Оценки ожидаемых коллективных доз эффективных эквивалентных доза за год работы, чел/Зв |
| Население  | персонал |
| Добыча угля  | 0,5-10 | 20000 |
| Производство электроэнергии | 2000 | 60 |
| Использование в домашних условиях | 2000-40000 | - |
| Коксовые печи | Не оценивалось | Не оценивалось |
| Применение угольной золы | 50000 | Не оценивалось |

В таблице 12 приведены дозы облучения на разных стадиях угольного топливного цикла. Уровень облучения представлен в виде ожидаемых коллективных эффективных эквивалентных доз, связанных с функционированием цикла в течение года в мировом масштабе. Наибольший вклад в дозу дает сжигание угля в домашних условиях и применение угольной золы для производства бетона.

б) Фосфатная промышленность

Фосфатная порода широко используется, во-первых, в качестве источника фосфора для удобрений, а во-вторых, для производства фосфорной кислоты и гипса. Руды обычно содержат около 1500 Бк/кг урана и радия, хотя некоторые фосфатные породы содержат до 20000 Бк/кг U3O8. В 90% случаев руда обрабатывается серной кислотой. Удобрения несколько обогащаются ураном (до 150% по отношению к руде), в то время как в фосфогипсе остается 80% 226Ra, 30% 232Th и 5% урана [35].

Обработка фосфорных пород может привести к образованию газовых и твердых частиц, которые содержат 238U и 226Ra; при попадании в окружающую среду эти нуклиды приводят к радиационному облучению населения. Места сброса фосфогипса обычно не защищены от осадков и становятся гидравлически связанными с поверхностными водами и мелкими водоносными горизонтами. Использование фосфатных удобрений в сельском хозяйстве и гипса в строительных материалах является еще одним источником возможного облучения населения. Можно также ожидать повышенного облучения радона населением на участках, разрабатываемых для жилья [35].

Фосфатная порода может быть расплавлена в печи при высокой температуре с песком, оксидом железа и углем для производства элементного фосфора. Остаточные твердые частицы в печи содержат железо-фосфор и силикат кальция, также известный как шлак.

Шлак с концентрацией 226Ra в диапазоне от 750 до 1100 Бк/кг использовался в качестве строительного материала в Соединенных Штатах, особенно в общинах на юго-востоке штата Айдахо. Обследования для внешнего облучения были проведены в 1472 резиденциях. Было подсчитано, что менее 12% домов в Soda Spring содержали шлак, в то время как в Pocatello и Fort Hall не было найдено домов, содержащих этот шлак. Максимальная индивидуальная мощность дозы была оценена в 1,3 мЗв / год, и только девять человек были определены как получающие более 1 мЗв / год выше фонового уровня. Однако значительная часть дорог общего пользования содержала шлак: 27% в Pocatello, 23% в Soda Spring и 20% в Fort Hall [35].

Таблица суммирует радиационные воздействия, связанные с использованием фосфатной породы за один год. Общая коллективная доза оценивается в 300 000 чел-Зв, в основном из-за использования фосфогипса в жилищах [11].

Таблица 13 – Коллективные дозы, связанные с использованием фосфатов за один год [11]

|  |  |
| --- | --- |
| Процесс | Коллективные дозы чел-Зв |
| Население | Рабочие |
| Добыча и переработка фосфатов | 601 | 201 |
| Использование фосфатных удобрений | 10000 | 501 |
| Использование побочных продуктов и отходов | 300000 | - |

1 Учитывалось только внешнее облучение

## **1.5 Оценки облучения населения**

Термин "ионизирующее излучение" используется для описания переноса энергии в виде электромагнитных волн либо субатомных частиц через пространство, при этом способных вызвать ионизацию вещества. Энергия из­лучения передается веществу, через которое оно проходит по мере образования ионов. Что касается возбуждения, то это — процесс, посредством которого энер­гия излучения также передается атому и переводит его в возбужденное состояние, но ионизации не происходит. Эта энергия возбуждения также может вызвать эффекты в среде, но они, в общем, другие и считаются менее важными, чем эффекты при иони­зации. В среднем в результате одного акта взаимодействия передается не более 100 эВ, и такие передачи происхо­дят за время ~10-16 с [4].

Так как вначале чаще всего имели дело с рентгеновским излучением, распространяющимся в воздухе, то в качестве ко­личественной меры поля излучения стали применять результат измерения ионизации воздуха вблизи рентгеновских трубок или аппа­ратов. Появилось понятие — экспозиционная доза. Эта величина была введена в дозиметрии только для характеристики поля фотонного излучения в воздухе. Она равна абсолютному значению полного заряда ионов одного знака, которые образу­ются в воздухе при полном торможении электронов и позитро­нов (возникают в тех случаях, когда энергия фотонов достаточна для образования пар – электрон-позитрон), освобожденных фотонами в единице массы воздуха. Обо­значим экспозиционную дозу через *D*exp, тогда *D*exp = d*Q*/d*m* [4], где d*Q* — суммарный заряд всех ионов одного знака, создан­ных в воздухе при полном торможении электронов и позитронов, освобожденных фотонным излучением в массе воздуха d*m*. Заряд d*Q* включает заряд всех ионов одного знака, созданных в результате полного использования кинети­ческой энергии электронов и позитронов в воздухе независимо от места образования этих ионов; имеется в виду, что эти ионы созданы только теми электронами и позитронами, которые воз­никли в массе воздуха d*m*. Единицей экспозицион­ной дозы в системе CИ является Кл/кг, однако продолжают широко ис­пользовать и старую внесистемную единицу рентген (Р): 1 Р = 2,58·10-4 Кл/кг [4].

Как *D*exp, так и любая другая доза излучения зависит от времени облучения; с течением времени доза накапливается. Изменение дозы в единицу вре­мени называется мощностью дозы. Мощность дозы мы будем обозначать буквой *Р* с индексом, указывающим на то, о какой дозе идет речь. Например, мощность экспозиционной дозы есть: *P*exp =d*D*exp/d*t,* где d*D*exp — изменение экспозиционной дозы за время d*t*. Мощность дозы в общем случае является функцией времени - *P*(*t*). Если эта функция известна, то легко можно сосчитать дозу за некоторый интервал времени от *t*1 до *t*2. Если мощность дозы постоянна во времени, то *D* = (*t*2 – *t*1)·*P* [4].

Для оценки радиационного воздействия проникающих излучений было предложено определять энергию, поглощенную облучаемым веществом. В дозиметрию вошло понятие: поглощенная доза, т. е. энергия, поглощенная единицей массы вещества, на которое действует поле излучения [4]. Поглощенная доза D является основной величиной физической дозы и используется для всех типов ионизирующих излучений. Она определяется как отношение dE к dm, где dE - средняя энергия, передаваемая веществу массы dm ионизирующим излучением: D = dE/dm.

Единица поглощенной дозы СИ составляет Дж/кг или «Грей» (Гр). Поглощенная доза выводится из среднего значения стохастического количества передаваемой энергии, и не отражает случайные флуктуации событий взаимодействия в ткани. Хотя она определена в любой точке материи, её значение получается, как среднее значение по элементу массы dm Поглощенная доза является измеримой величиной, и существуют первичные стандарты для определения ее величины [23].

Физической величиной, призванной учитывать пространственное распределение переданной энергии, является линейная передача энергии — ЛПЭ (LΔ): LΔ = (dE/dl)Δ

Здесь dE — средние энергетические потери, обусловленные такими столкновениями на пути dl, при которых переданная энергия меньше заданного значения Δ. Пороговую энергию Δ обычно соотносят с энергией δ-электронов. При рассмотрении проблем, связанных с радиационной экологией, пороговая энергия не ограничена и линейная передача энергии L совпадает с тормозной способностью [4].

В конечном итоге для целей радиационной защиты была введена так называемая эквивалент­ная доза,которая лучше, чем поглощенная доза, коррелирует с возможными неблагоприятны­ми последствиями профессионального облучения. Эквивалентная доза (*HT*,*R*) это поглощенная доза в *Т*-ом органе или ткани, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного вида излучения, *WR*: *HT*, *R*= *WR* × *DT*, *R*, где *DT*, *R* — средняя поглощенная доза в органе или ткани *T*, а *WR* — взвешивающий коэффициент для излучения *R* (таблица 14). При дозе 1 Зв и взвешивающем коэффициенте *WR* поглощенная энергия равна 1/*WR* Дж/кг [4].

Таблица 14 – Взвешивающие коэффициенты *WR* для отдельных видов излучения, необходимые для расчета эквивалентной дозы [4]

|  |  |
| --- | --- |
| Вид излучения | *WR* |
| Фотоны любых энергий | 1 |
| Электроны и мюоны любых энергий | 1 |
| Нейтроны: с энергией менее 10 кэВ | 2 |
|  от 10 кэВ до 100 кэВ | 4 |
| от 100 кэВ до 2 МэВ  | 12 |
| от 2 МэВ до 20 МэВ | 8 |
| более 20 МэВ | 5 |
| Протоны с энергией более 2 МэВ, кроме протонов отдачи | 5 |
| Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра | 20 |

Эффективная доза - величина, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов с учетом их радиочувствительности. Она представляет сумму произведений эквивалентной дозы в органах *HT*, на соответствующие взвешивающие коэффициенты для данных органов или тканей [4]: *Е* = ∑ *WT*× *HT=*∑ *WT*∑ *WRDT,R*, где *HT***–** эквивалентная доза в ткани *T* , а *WT* **–** взвешивающий коэффициент для ткани *T* (таблица 15), а ∑ *WT* = 1 [4]. Сумма производится по всем органам и тканям человеческого тела, которые считаются чувствительными к индукции стохастических эффектов. Эти значения *WT* выбраны для представления вклада отдельных органов и тканей в общий радиационный ущерб от стохастических эффектов. Единицей эффективной дозы является Дж/кг со специальным названием - зиверт (Зв). Единица измерения одинакова для эквивалентной дозы и эффективной дозы [23].

Таблица 15 – Взвешивающие коэффициенты WT для отдельных видов излучения, необходимые для расчета эффективной дозы [4]

|  |  |
| --- | --- |
| Орган или ткань человека | Взвешивающие коэффициенты, *WT*  |
| Гонады | 0,20 |
| Костный мозг (красный)  | 0,12 |
| Толстый кишечник | 0,12 |
| Легкие | 0,12 |
| Желудок | 0,12 |
| Мочевой пузырь | 0,05 |
| Грудная железа | 0,05 |
| Печень | 0,05 |
| Пищевод | 0,05 |
| Щитовидная железа | 0,05 |
| Кожа | 0,01 |
| Клетки костных поверхностей | 0,01 |
| Остальное | 0,05 |

В течение многих лет НКДАР-2016 [36] использовал две защитные величины, а именно эффективную дозу и общую эффективную дозу, для своих оценок уровней и тенденций воздействия. Они имеют преимущество в том, что они упрощают сравнение доз от разных типов излучения и разного распределения дозы в организме и усреднения по возрасту и полу; кроме того, многие регулирующие органы ведут учет этих количеств. Эффективная доза основана на другой базовой величине радиационной защиты, эквивалентной дозе, которая учитывает предполагаемые различия в различных типах излучения, применяя определенные весовые коэффициенты излучения к поглощенной дозе органом или тканью. Эквивалентные дозы для различных органов и тканей затем объединяются с использованием определенных весовых коэффициентов, которые принимают во внимание предполагаемые различия вреда от облучения конкретного органа или ткани, усредненные по половому и возрастному распределению. Это позволяет добавлять внешние и внутренние облучения от источника излучения для получения общей эффективной дозы от этого источника, которую затем можно сравнить с эффективными дозами из других источников [36].

Также, существуют различия между индивидуальной и коллективной дозами, хотя они рассчитываются аналогичным образом. Коллективная (эффективная) доза всегда оценивается для определенной популяции в течение определенного периода времени. Используемая здесь коллективная доза представляет собой произведение средней эффективной дозы на конкретную популяцию из определенного источника и количества людей в этой популяции, интегрированных за определенный период времени. Другими словами, коллективная доза - это доза, полученная всеми членами определенной совокупности за определенный период времени [36].

Методология использует опубликованные дозовые коэффициенты для оценки доз от внешнего и внутреннего облучения. Коэффициенты дозы, используемые для внутреннего облучения, являются такими же для взрослых людей и представляют собой эффективные дозы до 70 лет на единицу потребления радионуклидов, указанные НКДАР-2016 [36]. Основные дозовые коэффициенты, используемые для внутреннего и внешнего облучения, приведены в таблице 1 как для радионуклидов, которые выбрасываются, так и для их основного потомства. Следует отметить, что для коэффициентов дозы для внутреннего облучения вклад короткоживущего потомства включается в коэффициент дозы, назначенный родителю.

Таблица 16 – Коэффициенты доз, специфичных для радионуклидов, для внутреннего облучения при вдыхании и проглатывании, а также для внешнего облучения от шлейфа и осаждения [36]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Радионуклид  | Согласованные эффективные дозовые коэффициенты для взрослых до возраста 70 лет для расчёта внутреннего облучения | Коэффициенты эффективной дозы для внешнего облучения |
| Вдыхание *D*inh (Зв/Бк) | Прием пищиDinh (Зв/Бк) | Шлейф Dex,cloud(Зв/(Бк\*с/м3)) | ОсаждениеDex,deposit(Зв/(Бк/м2)) |
| 238U | 2.9 × 10−6 | 4.5 × 10−8 | 2.5 × 10−18 | 1.9 × 10−11 |
| 226Ra | 3.5 × 10−6 | 2.8 × 10−7 | 2.8 × 10−16 | 3.8 ×10−9 |

Методология применима к выбросам, которые можно считать непрерывными, и учитывает накопление долгоживущих радионуклидов в окружающей среде и продолжающееся воздействие долгоживущих радионуклидов после прекращения выбросов. Это делается с учетом годичного выброса радионуклида, его рассеивания в окружающей среде и последующего облучения людей в течение многих лет; результирующие мощности дозы затем интегрируются в различные моменты времени. Используя эти интегралы, также можно считать, что разряды могут продолжаться в течение многих лет с одного и того же участка. Это связано с тем, что интегрированная доза, скажем, 100 лет после годичного выброса, численно равна дозе в 100-й год от непрерывного выброса с постоянной скоростью [36].

Согласно НКДАР 2016 г. концентрация в воздухе 238U около 0,3 мкБк / м3 на площадке возле Аргоннской национальной лаборатории (Иллинойс, США). Сообщается, что средние уровни природного урана в атмосферном воздухе в Токио составляют 0,25 мкБк / м3 при 238U (0,02 нг/м3). Трейси и Прантл обнаружили, что средняя концентрация 238U в воздухе в сельской местности южного Онтарио составляет около 1,25 мкБк / м3 (0,1 нг / м3) на основе измерений 226Ra в пыли и предположения о равновесии между 238U и 226Ra. Взятые вместе, эти разные значения показывают средний уровень урана в воздухе около 1 мкБк / м3 [36].

По оценкам Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), взрослый человек среднего размера вдыхает 20 м3 воздуха в день с номинальной концентрацией природного урана 0,6 мкБк / м3, равной 238U (0,05 нг / м3), что соответствует 12,4 мкБк (1 нг) 238U. Эти значения приводят к расчетному годовому потреблению взрослыми при вдыхании приблизительно 0,0045 Бк 238U [36].

**Глава 2. Оценка изменения вклада 226Ra, 222Rn и продуктов его распада в естественный радиационный фон за счёт добычи фосфатов и железной руды**

**2.1 Вычисление количества 226Ra(238U) поднятого на поверхность, сопутствующего добыче железной руды и фосфатов**

В обзоре U.S. GEOLOGICAL SURVEY [39] даны количества добытой полезной (пригодной для использования железорудной промышленности) железной руды с 1904-2015 г., то мы сначала должны пересчитать на сырую (неочищенную) руду. Для этого мы вычисляем среднее содержание железа в руде по миру, из данных взятых с информационно-аналитического центра Минерал (приложение А) [38] , это значение составило 46,2 %.

Чтобы пересчитать с полезной на сырую руду за 1 год добычи по с миру воспользуемся соотношением: Сырая руда = Полезная руда · 100% / 46,2 %.

Данный вид пересчёта был использован в U.S. GEOLOGICAL SURVEY [39] для Китая. Также в докладе Министерства природных ресурсов и экологии РФ «О СОСТОЯНИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИИ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВЫХ РЕСУРСОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В 2015» даны данные о добыче из недр - 334,1 млн. т. и производстве товарных железных руд – 106,3 млн. т. В данных, взятых с информационно-аналитического центра Минерал (приложение А) [38] , значение для России составило 32 %.

Если мы воспользуемся соотношением, то получим: 106,3 млн. т.·100%/32 % = 332,2 млн. т.

Результаты пересчёта представлены в Приложении В, в графическом виде количество добытой железной руды с 1904-2015 г. в Приложении Л. Добывается всё больше и больше железной руды, что значит, на поверхности Земли с каждым годом увеличивается количество 226Ra(238U).

Для фосфатов поступаем аналогичным образом: Сырая руда = Полезная руда·100%/18,7%. Содержание фосфора в руде 18,7 % - это рассчитанное среднее значение, исходя из данных взятых с информационно-аналитического центра Минерал (приложение Б) [38].

Результаты пересчёта представлены в Приложении Г, в графическом виде количество фосфатов добытых с 1904-2015 г. в Приложении М. Можно сделать вывод, как и с железной рудой, на поверхности Земли с каждым годом увеличивается количество 226Ra(238U).

В статьях журналов «Journal of Environmental Radioactivity» и «Journal of Asian Earth Sciences» найдены содержания 238U в железной руде в некоторых странах: Китай – 3,1 г/т [37], Иран – 4,3 г/т [20], Южная Корея – 2,1 г/т [18]. В статье [9] года было найдено значение для России – 2,7 г/т. Так как найденные данные совпадают порядком с содержанием урана в верхней части земной коры (2,5 г/т), то в дальнейшем будем использовать его в качестве среднемирового содержания 238U в железной руде.

 Возьмём среднюю концентрацию 238U (равную 2,5 г/т) и количество добытой железной руды в мире из Приложения В. При перемножении получим, сколько урана подняли из недр земли вместе с рудой. Количество 226Ra, находящегося в равновесии с полученным количеством урана найдём из соотношения выведенного ранее mRa = mU /2,8·106 (приложение Д).

Содержание 238U и его дочерних продуктов повышено в фосфатах (содержание P2O5 в них достаточно для использования в фосфатной промышленности, остальное пустая порода с содержанием 238U на уровне верхней части земной коры - 2,5 г/т). Типичная удельная активность 238U в них составляет 1,5 Бк/г [30] или 120 г/т [2]. При перемножении фосфатов и пустой породы, на соответствующие содержания, и последующем сложении, получим, сколько урана подняли из недр земли вместе с рудой. Количество 226Ra, находящегося в равновесии с полученным количеством урана найдём по той же формуле, что и для железной руды (приложение Е).

Исходя из полученных результатов, мы можем сделать оценки, сколько появилось урана и соответственно радия за счёт добычи фосфатов и железной руды с 1904-2015 г., представленные таблице 17:

Таблица 17 – Количество урана и радия, оценочно образовавшегося на поверхности за счёт добычи фосфатов и железной руды с 1904-2015 г и в верхней части земной коры толщиной 1 м

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | За счёт добычи: | В верхней части земной коры толщиной 1 м |
| железной руды | фосфатов |
| Масса породы (т) | 1,5·1011 | 4,4·1010 | 3,5·1014 |
| Уран (т) | 3,5·105 | 1·106 | 9·108 |
| Радий (т) | 0,13 | 0,36 | 300  |

**2.2 Оценка результатов**

Возьмём участок верхней части земной коры площадью 1 м2 и глубиной 1 м. Объём этого участка 1 м3, количество вещества ~2,5 т. Среднее содержание урана в верхней части земной коры составляет 2,5 г/т, что значит, что в 1 м3 находится 6,3 г урана. Количество 226Ra, находящегося в равновесии с полученным количеством урана найдём из соотношения mRa = mU/2,8·106. Получаем 2,3·10-6 г 226Ra или 8,5·104 распадов/с, т.е. к появлению 8,5·104 атомов радона/с. Но, как мы знаем средняя скорость выхода атомов радона 0,02 Бк/м2с или же с 1 м2 испускается ~9·103 атомов радона. Таким образом, если предположить, что выйти на поверхность земли могли бы все атомы радона, образующиеся в земле, то слоя толщиной ~10 см оказывается вполне достаточным, чтобы объяснить наблюдаемый на опыте средний поток радона из почвы.

Значение из [29] для выхода радона из почвы в год, которое составляет ~9·1019 Бк, в данной работе нас не интересует. Его вычислили исходя из того, что площадь Земли 1,5·1014 м2, средняя скорость выхода радона из Земли 0,02 Бк/м2с и количества секунд в году равное 3,2·107. Также было найдено близкое значение ~10·1019 Бк в [26]. В [3] это значение составляет 9·1018 Бк, различие идёт в 10 раз. Это значение не может быть верным, так как при подсчёте представленных данных получается ~9·1019 Бк.

В таблице 18 представлены различные характеристики радионуклидов нужные нам для дальнейших рассуждений.

Таблица 18 – Различные характеристики 238U,226Ra222Rn

|  |  |
| --- | --- |
| Название характеристики | Радионуклид |
| 238U | 226Ra | 222Rn |
| Период полураспада, с | 1,4·1017 | 5,1·1010 | 3,3·105 |
| Постоянная распада, с-1 | 4,9·10-18 | 1,4·10-11 | 2,1·10-6 |
| Вес 1 Бк, г | 8·10-5 | 2,7·10-11 | 1,8·10-16 |
| Средняя удельная активность в почве [26,31,21,3], Бк/г |  | 3,7·10-2 |  |
| Средняя скорость выхода из почвы [26,31,21,3,29], Бк/м2с |  |  | 0,02 |
| Допустимая скорость выхода из почвы в пределах застраиваемой площади [14], Бк/м2с |  |  | 0,08 |
| Допустимая скорость выхода из почвы в пределах застраиваемой площади для дошкольных, общеобразовательных и лечебных учреждений [14], Бк/м2с |  |  | 0,04 |

Таким образом, слоя толщиной ~10 см, содержащий ~0,6 г урана оказывается достаточным, чтобы объяснить «в первом приближении» указанный выше вклад 1,6 мЗв/год в среднюю дозу, получаемую человеком на Земле. В этом слое, согласно таблице 17 содержится ~108 т урана.

Как на возрастание среднего радиационного фона может сказаться добыча полезных ископаемых? Очевидно, что само по себе, появление «нового, добавочного» урана и радия в среде обитания обязано увеличивать и среднюю дозу на какой-то увеличивающий коэффициент - К, заметно больший единицы.

Два вклада определяют величину этого коэффициента: просто добавление урана, содержащегося в добываемых породах, и диспергирование связанного с ним радия в результате различных технологических процессов. К сожалению, количественно определить величину этих вкладов пока невозможно.

Просто добавление, обусловленное добычей железной руды, составляет ~0,35%; от добычи фосфатов ~1%, от добычи урана >2%. Суммарно, добыча этих трех полезных ископаемых дает возрастание содержания урана в среде обитания ~4%. По нашим оценкам «возрастание» за счет диспергирования может достигать значительной величины ~5%. Еще к более серьезному возрастанию вклад в радиационный фон приводит то обстоятельство, что весь, рассмотренный сценарий относится не ко всей поверхности планеты, а только к областям не очень удаленным от места добычи ископаемых, т.к. период полураспада радона всего 3,8 дня, что не позволяет распределиться ему гомогенно над всей поверхностью Земли. Следовательно, в странах, где имеется интенсивная промышленная деятельность, включающая перемещение больших масс вещества этот вклад может составлять десятки процентов по отношению к тому, что было там еще лет 30 – 50 тому назад. Численную информацию, подтверждающую это удалось найти только для США.

## **Заключение**

Перемещение огромных масс веществ на нашей планете не только из одного места в другое, но и из глубины наружу не может не сказываться на экологической обстановке в разных местах континентов. В работе показано, что отрасли промышленности, связанные с добычей и переработкой полезных ископаемых, действительно приводит к заметному возрастанию вклада 222Rn и продуктов его распада в естественный радиационный фон (добыча фосфатов, урана, железной руды…).

На основе анализа литературных и статистических данных оценено количество урана, которое поднято на поверхность в результате добычи железной руды и фосфатов. Это было необходимо, чтобы оценить количество «добавочного» радия в среде обитания человека, оказавшихся там, в результате добычи железной руды и фосфатов. Нами был выделен поверхностный слой толщиной ~10 см, содержащий ~0,6 г урана, который в рамках определенных предположений оказался достаточным, чтобы объяснить наблюдаемый вклад 1,6 мЗв/год в среднюю дозу, получаемую человеком на Земле.

Появление «нового, добавочного» урана и радия в среде обитания увеличивает среднюю дозу. Это увеличение приводит не просто к возрастанию фона за счет суммирования количеств веществ. Происходит значительно более сильное, чем линейное возрастание этого фона.

Определяющими оказываются: во-первых, диспергирование веществ, содержащих радий в результате различных технологических процессов. Во-вторых, то обстоятельство, что возрастание содержания радия происходит не монотонно по всей поверхности земли, а в областях не очень удаленных от места добычи ископаемых и их переработки, т.к. период полураспада радона всего 3,8 дня. Следовательно, в странах, где имеется интенсивная промышленная деятельность, включающая перемещение больших масс вещества этот вклад может составлять десятки процентов по отношению к тому, что было там еще лет 30 – 50 тому назад.

Для получения более уточненных данных необходимо проводить исследования в это направлении, но концентрируясь на районах, наиболее подверженных таким процессам.

## **Список литературы**

1. Андреев А. И., Тесленко И. М., Цыцарева М. Б. Вариации почвенного радона и плотности потока радона с поверхности почвы экспериментального полигона //Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2014. – №. 3. – С. 113-122.
2. Бекман И. Н. Уран //Учебное пособие/ИН Бекман.—М.: МГУ. – 2009. – 300 с.
3. Бекман И. Н. Радиохимия. В 2 т //М.: Издательство Юрайт. - 2015. – 473 с.
4. Белозерский Г.Н. Радиационная экология, Учебник. — СПб.: 2006. - 466 стр.
5. Высоцкий Э. А., Губин В. Н., Данкевич И. В. Прогнозирование месторождений металлических полезных ископаемых: курс лекций/ЭА Высоцкий, ВН Губин, ИВ Данкевич. - 2008 - 147 с.
6. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов в Российской Федерации»: ФГБУ «ВИМС»,2016 – 339с
7. Григорьев Н. А. О кларковом содержании химических элементов в верхней части континентальной коры //Литосфера. – 2002. – №. 1. – С. 61-71.
8. Дедеев В. А., Куликов П. К. Происхождение структур земной коры. – Наука. Ленингр. отд-ние, 1988.
9. Ершов В. В. и др. Уран и торий в рудах Бакчарского железорудного месторождения //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2012. – Т. 321. – №. 1.
10. Несмеянов Ан. А. Радиохимия, 2-е изд., перераб.— М.: Химия, 1978. — 560 с.
11. НКДАР-1988, Доклад Научного комитета ООН по действию атомной радиации Генеральной Ассамблее за 1988 г., Т. 1, М., Мир 1993 - 552 с.
12. Смыслов А. А. Уран и торий в земной коре. – Недра, Ленингр. отд-ние, 1974. - 231 с.
13. Шулейкин В. Н. Радон почвенного и атмосферного воздуха и дегазация земли //Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитика. М.: Ин-т проблем нефти и газа РАН. – 2010. – №. 1. – С. 1.
14. Яковлева В. С. Методы измерения плотности потока радона и торона с поверхности пористых материалов //Томский политехнический университет. – 2011. – С. 20-21. - 173 с.
15. Яковлева В. С. Диффузионно-адвективный перенос радона в многослойных геологических средах //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2009. – Т. 315. – №. 2.
16. Яковлева В. С. Полевой метод измерения коэффициента диффузии радона и торона в грунте //Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2014. – №. 1 (8).
17. Asimov I. The natural occurrence of short-lived radioisotopes //Journal of Chemical Education. – 1953. – Т. 30. – №. 12. – С. 616.
18. Chang B. U. et al. Nationwide survey on the natural radionuclides in industrial raw minerals in South Korea //Journal of environmental radioactivity. – 2008. – Т. 99. – №. 3. – С. 455-460.
19. Christopher A. Tuck, IRON ORE [ADVANCE RELEASE], U.S. Geological Survey: Minerals Yearbook, 2015 – 15 с.
20. Hassanlouei B. T., Rajabzadeh M. A. Iron ore deposits associated with Hormuz evaporitic series in Hormuz and Pohl salt diapirs, Hormuzgan province, southern Iran //Journal of Asian Earth Sciences. – 2019. – Т. 172. – С. 30-55.
21. Ielsch G. et al. Study of a predictive methodology for quantification and mapping of the radon-222 exhalation rate //Journal of environmental radioactivity. – 2002. – Т. 63. – №. 1. – С. 15-33.
22. International Atomic Energy Agency. Extent of Environmental Contamination by Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) and Technological Options for Mitigation. – International Atomic Energy Agency, 2004. - 419 p.
23. Ishimori Y. et al. Measurement and calculation of radon releases from NORM residues. – IAEA, 2013. – С. 68.
24. Kennedy Jr W. E. Naturally occurring radioactive material (NORM V): proceedings of an international symposium, Seville, Spain, 19–22 March 2007. – 2009. – 534 с.
25. Kovler K. Basic aspects of natural radioactivity: - Woodhead Publishing, 2017 – 14-35 p.
26. NCRP, 1984. Exposures from the uranium series with emphasis on radon and its daughters, NCRP Report No. 77, NCRP, Bethesda, MD.
27. Nguyen P. T. H. et al. Soil radon gas in some soil types in the rainy season in Ho Chi Minh City, Vietnam //Journal of environmental radioactivity. – 2018. – Т. 193. – С. 27-35.
28. Ojovan M. I., Lee W. E., Kalmykov S. N. An introduction to nuclear waste immobilisation. – Elsevier, 2019. -250 p.
29. Stanley R. E., Moghissi A. A. (ed.). Noble gases. – US Environmental Protection Agency, 1975. – Т. 1.
30. Stephen M. Jasinski, PHOSPHATE ROCK [ADVANCE RELEASE], U.S. Geological Survey: Minerals Yearbook, 2015 – 10 с.
31. Stranden E., Kolstad A. K. Radon exhalation from the ground; Method of measurements and preliminary results //Science of The Total Environment. – 1985. – Т. 45. – С. 165-171.
32. Streffer C. The ICRP 2007 recommendations //Radiation protection dosimetry. – 2007. – Т. 127. – №. 1-4. – С. 2-7.
33. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation et al. UNSCEAR 2000 Report, volume I: sources //United Nations. – 2000.
34. United Nations. Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2006 report to the general assembly, with scientific annexes. – United nations publications, 2008. – Т. 2.
35. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation et al. UNSCEAR 2008 report Vol. II //Effects of ionizing radiation. Annex D: Health effects due to radiation from the Chernobyl accident (United Nations, New York, 2011). – 2011.
36. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation et al. UNSCEAR 2016 Report—Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation //Report to the General Assembly. Scientific Annexes A, B, C, and D. Available on http://www. unscear. org/unscear/en/publications/2016. html.(accessed 15 Oct 2017). – 2017.
37. Wu H. et al. Geology and geochemistry of the Macheng Algoma-type banded iron-formation, North China Craton: Constraints on mineralization events and genesis of high-grade iron ores //Journal of Asian Earth Sciences. – 2015. – Т. 113. – С. 1179-1196.

Электронные ресурсы:

1. <http://www.mineral.ru> Дата обращения [21.03.2019]
2. U.S. Geological Survey, 2017, Iron ore statistics, *in* Kelly, T.D., and Matos, G.R., comps., Historical statistics for mineral and material commodities in the United States: U.S. Geological Survey. Дата обращения [15.09.2018], <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/historical-statistics/>
3. U.S. Geological Survey, 2017, Phosphate rock statistics, *in* Buckingham D.A. and Jasinski S.M., comps., Historical statistics for mineral and material commodities in the United States: U.S. Geological Survey. Дата обращения [01.11.2018], <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/historical-statistics/>

## Приложение А

## Содержание железа в руде разных стран в % [38]

|  |  |
| --- | --- |
| Страна | Содержание железа в руде в % |
| Россия | 36 |
| Европа | ... |
| Австрия | 32 |
| Албания | 45 |
| Бельгия | 32 |
| Болгария | 31 |
| Великобритания | 26 |
| Германия | 28 |
| Греция | 45 |
| Испания | 45 |
| Италия | 44 |
| Люксембург | 24 |
| Норвегия | 33 |
| Польша | 30 |
| Португалия | 37 |
| Румыния | 36 |
| Украина | 35 |
| Финляндия | 30 |
| Франция | 41 |
| Швеция | 53 |
| Югославия | 38 |
| Азия | ... |
| Азербайджан | 43 |
| Армения | 28 |
| Афганистан | 58 |
| Вьетнам | 59 |
| Индия | 61 |
| Индонезия | 59 |
| Иран | 56 |
| Йемен | ... |
| Казахстан | 39 |
| Китай | 33 |
| Корея Северная | 39 |
| Корея Южная | 35 |
| Лаос | 60 |
| Ливан | 45 |
| Малайзия | 58 |
| Монголия | 55 |
| Пакистан | 42 |
| Сауд. Аравия | 42 |
| Сирия | 34 |
| Таиланд | 47 |
| Турция | 46 |
| Филиппины | 50 |
| Япония | 26 |
| Африка | ... |
| Алжир | 49 |
| Ангола | 47 |
| Бенин | 49 |
| Буркина-Фасо | 45 |
| Габон | 64 |
| Гана | 40 |
| Гвинея | 57 |
| Дем.респ.Конго | 47 |
| Египет | 43 |
| Замбия | 58 |
| Западная Сахара | 64 |
| Зимбабве | 55 |
| Камерун | 40 |
| Конго | 45 |
| Кот-д'Ивуар | 44 |
| Либерия | 67 |
| Ливия | 50 |
| Мавритания | 50 |
| Мадагаскар | 55 |
| Малави | 67 |
| Мали | 58 |
| Марокко | 50 |
| Мозамбик | 49 |
| Намибия | 43 |
| Нигер | 50 |
| Нигерия | 36 |
| Свазиленд | 62 |
| Сенегал | 58 |
| Сомали | 42 |
| Судан | 60 |
| Сьерра-Леоне | 60 |
| Танзания | 49 |
| Того | 52 |
| Тунис | 56 |
| ЮАР | 62 |
| Америка | ... |
| Аргентина | 45 |
| Боливия | 56 |
| Бразилия | 58 |
| Венесуэла | 60 |
| Гайана | ... |
| Гватемала | 50 |
| Гренландия | 34 |
| Канада | 40 |
| Колумбия | 48 |
| Коста-Рика | 55 |
| Куба | 42 |
| Мексика | 48 |
| Парагвай | 35 |
| Перу | 54 |
| Суринам | 57 |
| США | 24 |
| Чили | 53 |
| Ок. и Авст. | ... |
| Австралия | 64 |
| Новая Зеландия | 16 |
| Новая Каледония | 40 |

## Приложение Б

## Содержание фосфора в руде разных стран в % [38]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Страна | Ресурсы | Содержание |
| Россия | Апатиты | 12 |
|   | Фосфориты | 9 |
| Европа |   | ... |
| Белоруссия | Фосфориты | 10 |
| Бельгия | Фосфориты | 20 |
| Великобритания | Апатиты | 2 |
| Венгрия | Фосфориты | ... |
| Греция | Фосфориты | 15 |
| Дания | Апатиты | ... |
| Испания | Апатиты | 20 |
| Италия | Фосфориты | 15 |
| Нидерланды | Фосфориты | ... |
| Норвегия | Апатиты | 8 |
| Украина | Апатиты | 2,93 |
|   | Фосфориты | 6 |
| Финляндия | Апатиты | 4,2 |
| Франция | Апатиты | ... |
|   | Фосфориты | 6 |
| Швеция | Апатиты | 3 |
| Эстония | Фосфориты | 12,5 |
| Югославия | Фосфориты | 11 |
| Азия |   | ... |
| Вьетнам | Апатиты | 25 |
|   | Фосфориты | ... |
| Израиль | Фосфориты | 28 |
| Индия | Апатиты | 25 |
|   | Фосфориты | 24,5 |
| Индонезия | Фосфориты | 33 |
| Иордания | Фосфориты | 25 |
| Ирак | Фосфориты | 20 |
| Иран | Фосфориты | 15 |
| Казахстан | Апатиты | ... |
|   | Фосфориты | 20 |
| Китай | Апатиты | 20 |
|   | Фосфориты | 21,5 |
| Корея Северная | Апатиты | 13,6 |
|   | Фосфориты | ... |
| Ливан | Фосфориты | ... |
| Малайзия | Апатиты | ... |
| Монголия | Фосфориты | 20 |
| Пакистан | Фосфориты | 25 |
| Сауд. Аравия | Фосфориты | 21 |
| Сирия | Фосфориты | 25 |
| Таджикистан | Фосфориты | 6 |
| Турция | Апатиты | 7 |
|   | Фосфориты | 15,6 |
| Узбекистан | Фосфориты | 19 |
| Шри-Ланка | Апатиты | 35 |
| Африка |   | ... |
| Алжир | Фосфориты | 30 |
| Ангола | Фосфориты | 20 |
| Буркина-Фасо | Фосфориты | 17,6 |
| Бурунди | Апатиты | ... |
| Габон | Апатиты | 24 |
|   | Фосфориты | 24 |
| Гвинея-Бисау | Фосфориты | 30 |
| Дем. респ. Конго | Апатиты | ... |
|   | Фосфориты | ... |
| Египет | Фосфориты | 28 |
| Замбия | Апатиты | 20 |
| Западная Сахара | Фосфориты | ... |
| Зимбабве | Апатиты | 16 |
| Кения | Апатиты | ... |
| Конго | Фосфориты | 20 |
| Мавритания | Фосфориты | 22 |
| Малави | Апатиты | 20 |
| Мали | Фосфориты | 25 |
| Марокко | Апатиты | ... |
|   | Фосфориты | 30,5 |
| Мозамбик | Апатиты | 9 |
| Намибия | Апатиты | ... |
|   | Фосфориты | ... |
| Нигер | Фосфориты | 27,5 |
| Нигерия | Фосфориты | ... |
| Сенегал | Фосфориты | 32 |
| Сомали | Фосфориты | ... |
| Танзания | Апатиты | 5 |
|   | Фосфориты | 19 |
| Того | Фосфориты | 32 |
| Тунис | Фосфориты | 15 |
| Уганда | Апатиты | 10 |
|   | Фосфориты | ... |
| ЮАР | Апатиты | 7 |
|   | Фосфориты | 10 |
| Америка |   | ... |
| Бразилия | Апатиты | 9,6 |
|   | Фосфориты | 16 |
| Венесуэла | Фосфориты | 25 |
| Канада | Апатиты | 17,7 |
| Колумбия | Фосфориты | 24 |
| Мексика | Апатиты | ... |
|   | Фосфориты | 12 |
| Перу | Фосфориты | 20 |
| США | Апатиты | ... |
|   | Фосфориты | 20,5 |
| Чили | Апатиты | 25 |
|   | Фосфориты | 11 |
| Эквадор | Фосфориты | 22 |
| Ок. и Авст. |   | ... |
| Австралия | Апатиты | 17,9 |
|   | Фосфориты | 23 |
| Науру | Фосфориты | 38,5 |
| Новая Зеландия | Фосфориты | 11 |
| Рождества о-в | Фосфориты | 33 |
| Фр. Полинезия | Фосфориты | 40 |

## Приложение В

## Статистика полезной железной руды с 1904-2015 года по миру [39]

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Год | Вес полезной руды | Год | Вес полезной руды |
| 1900 | NA | 1959 | 432 000 000 |
| 1901 | NA | 1960 | 514 000 000 |
| 1902 | NA | 1961 | 495 000 000 |
| 1903 | NA | 1962 | 499 000 000 |
| 1904 | 95 500 000 | 1963 | 510 000 000 |
| 1905 | 116 000 000 | 1964 | 573 000 000 |
| 1906 | 100 000 000 | 1965 | 611 000 000 |
| 1907 | 135 000 000 | 1966 | 626 000 000 |
| 1908 | 109 000 000 | 1967 | 616 000 000 |
| 1909 | 126 000 000 | 1968 | 668 000 000 |
| 1910 | 142 000 000 | 1969 | 701 000 000 |
| 1911 | 133 000 000 | 1970 | 757 000 000 |
| 1912 | 151 000 000 | 1971 | 767 000 000 |
| 1913 | 177 000 000 | 1972 | 757 000 000 |
| 1914 | 118 000 000 | 1973 | 832 000 000 |
| 1915 | 116 000 000 | 1974 | 881 000 000 |
| 1916 | 139 000 000 | 1975 | 888 000 000 |
| 1917 | 142 000 000 | 1976 | 886 000 000 |
| 1918 | 127 000 000 | 1977 | 844 000 000 |
| 1919 | 110 000 000 | 1978 | 833 000 000 |
| 1920 | 124 000 000 | 1979 | 898 000 000 |
| 1921 | 73 000 000 | 1980 | 884 000 000 |
| 1922 | 104 000 000 | 1981 | 843 000 000 |
| 1923 | 136 000 000 | 1982 | 783 000 000 |
| 1924 | 130 000 000 | 1983 | 728 000 000 |
| 1925 | 151 000 000 | 1984 | 823 000 000 |
| 1926 | 155 000 000 | 1985 | 845 000 000 |
| 1927 | 171 000 000 | 1986 | 855 000 000 |
| 1928 | 174 000 000 | 1987 | 869 000 000 |
| 1929 | 201 000 000 | 1988 | 967 000 000 |
| 1930 | 179 000 000 | 1989 | 999 000 000 |
| 1931 | 119 000 000 | 1990 | 982 000 000 |
| 1932 | 76 200 000 | 1991 | 956 000 000 |
| 1933 | 91 200 000 | 1992 | 930 000 000 |
| 1934 | 120 000 000 | 1993 | 953 000 000 |
| 1935 | 138 000 000 | 1994 | 982 000 000 |
| 1936 | 170 000 000 | 1995 | 1 020 000 000 |
| 1937 | 212 000 000 | 1996 | 1 020 000 000 |
| 1938 | 162 000 000 | 1997 | 1 040 000 000 |
| 1939 | 200 000 000 | 1998 | 1 050 000 000 |
| 1940 | 212 000 000 | 1999 | 1 020 000 000 |
| 1941 | 233 000 000 | 2000 | 969 000 000 |
| 1942 | 235 000 000 | 2001 | 937 000 000 |
| 1943 | 227 000 000 | 2002 | 982 000 000 |
| 1944 | 199 000 000 | 2003 | 1 080 000 000 |
| 1945 | 159 000 000 | 2004 | 1 200 000 000 |
| 1946 | 154 000 000 | 2005 | 1 320 000 000 |
| 1947 | 184 000 000 | 2006 | 1 470 000 000 |
| 1948 | 211 000 000 | 2007 | 1 680 000 000 |
| 1949 | 223 000 000 | 2008 | 1 730 000 000 |
| 1950 | 250 000 000 | 2009 | 1 710 000 000 |
| 1951 | 294 000 000 | 2010 | 1 870 000 000 |
| 1952 | 298 000 000 | 2011 | 2 030 000 000 |
| 1953 | 331 000 000 | 2012 | 2 070 000 000 |
| 1954 | 301 000 000 | 2013 | 2 230 000 000 |
| 1955 | 364 000 000 | 2014 | 2 330 000 000 |
| 1956 | 389 000 000 | 2015 | 2 280 000 000 |
| 1957 | 423 000 000 |  |  |
| 1958 | 397 000 000 |  |  |

NA данных не обнаружено.

## Приложение Г

## Статистика добычи железной руды (сырой) с 1904-2015 года по миру

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Год | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
| Железная руда (n·109 т) | 3,6 | 3,7 | 3,7 | 4,0 | 4,4 | 4,5 | 4,8 | 5,0 | 4,9 |
| Год | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 |
| Железная руда (n·109 т) | 2,3 | 2,2 | 2,1 | 2,0 | 2,1 | 2,3 | 2,6 | 2,9 | 3,2 |
| Год | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 |
| Железная руда (n·109 т) | 2,2 | 2,1 | 2,1 | 2,0 | 2,1 | 2,1 | 2,2 | 2,2 | 2,3 |
| Год | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | 1985 | 1986 | 1987 | 1988 |
| Железная руда (n·109 т) | 1,9 | 1,8 | 1,7 | 1,6 | 1,8 | 1,8 | 1,9 | 1,9 | 2,1 |
| Год | 1971 | 1972 | 1973 | 1974 | 1975 | 1976 | 1977 | 1978 | 1979 |
| Железная руда (n·109 т) | 1,7 | 1,6 | 1,8 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,8 | 1,8 | 1,9 |
| Год | 1962 | 1963 | 1964 | 1965 | 1966 | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 |
| Железная руда (n·109 т) | 1,1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 |
| Год | 1953 | 1954 | 1955 | 1956 | 1957 | 1958 | 1959 | 1960 | 1961 |
| Железная руда (n·109 т) | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,1 | 1,1 |
| Год | 1944 | 1945 | 1946 | 1947 | 1948 | 1949 | 1950 | 1951 | 1952 |
| Железная руда (n·109 т) | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,6 |
| Год | 1935 | 1936 | 1937 | 1938 | 1939 | 1940 | 1941 | 1942 | 1943 |
| Железная руда (n·109 т) | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Год | 1926 | 1927 | 1928 | 1929 | 1930 | 1931 | 1932 | 1933 | 1934 |
| Железная руда (n·109 т) | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,3 |
| Год | 1917 | 1918 | 1919 | 1920 | 1921 | 1922 | 1923 | 1924 | 1925 |
| Железная руда (n·109 т) | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Год | 1908 | 1909 | 1910 | 1911 | 1912 | 1913 | 1914 | 1915 | 1916 |
| Железная руда (n·109 т) | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Год | 1904 | 1905 | 1906 | 1907 |  |  |  |  |  |
| Железная руда (n·109 т) | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,3 |  |  |  |  |  |

## Приложение Д

## Статистика полезной фосфатной руды с 1904-2015 года по миру [40]

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Год | Вес (т) | Год | Вес (т) |
| 1904 | 3 870 000 | 1962 | 63 300 000 |
| 1905 | 3 850 000 | 1963 | 54 600 000 |
| 1906 | 4 190 000 | 1964 | 63 700 000 |
| 1907 | 4 720 000 | 1965 | 71 400 000 |
| 1908 | 5 380 000 | 1966 | 84 500 000 |
| 1909 | 4 950 000 | 1967 | 87 300 000 |
| 1910 | 5 430 000 | 1968 | 94 100 000 |
| 1911 | 5 940 000 | 1969 | 92 100 000 |
| 1912 | 6 730 000 | 1970 | 95 100 000 |
| 1913 | 7 230 000 | 1971 | 94 000 000 |
| 1914 | 5 420 000 | 1972 | 101 000 000 |
| 1915 | 4 120 000 | 1973 | 111 000 000 |
| 1916 | 4 830 000 | 1974 | 123 000 000 |
| 1917 | 4 710 000 | 1975 | 109 000 000 |
| 1918 | 4 190 000 | 1976 | 109 000 000 |
| 1919 | 4 150 000 | 1977 | 121 000 000 |
| 1920 | 6 870 000 | 1978 | 127 000 000 |
| 1921 | 5 430 000 | 1979 | 134 000 000 |
| 1922 | 5 940 000 | 1980 | 147 000 000 |
| 1923 | 7 120 000 | 1981 | 145 000 000 |
| 1924 | 7 780 000 | 1982 | 129 000 000 |
| 1925 | 8 900 000 | 1983 | 143 000 000 |
| 1926 | 9 380 000 | 1984 | 154 000 000 |
| 1927 | 9 990 000 | 1985 | 151 000 000 |
| 1928 | 10 100 000 | 1986 | 141 000 000 |
| 1929 | 10 400 000 | 1987 | 147 000 000 |
| 1930 | 11 800 000 | 1988 | 166 000 000 |
| 1931 | 7 860 000 | 1989 | 163 000 000 |
| 1932 | 7 110 000 | 1990 | 162 000 000 |
| 1933 | 8 900 000 | 1991 | 150 000 000 |
| 1934 | 9 510 000 | 1992 | 139 000 000 |
| 1935 | 10 500 000 | 1993 | 119 000 000 |
| 1936 | 11 300 000 | 1994 | 127 000 000 |
| 1937 | 12 900 000 | 1995 | 130 000 000 |
| 1938 | 12 900 000 | 1996 | 135 000 000 |
| 1939 | 12 800 000 | 1997 | 143 000 000 |
| 1940 | 10 300 000 | 1998 | 144 000 000 |
| 1941 | 10 800 000 | 1999 | 137 000 000 |
| 1942 | 8 800 000 | 2000 | 132 000 000 |
| 1943 | 9 250 000 | 2001 | 126 000 000 |
| 1944 | 9 330 000 | 2002 | 136 000 000 |
| 1945 | 10 900 000 | 2003 | 138 000 000 |
| 1946 | 15 300 000 | 2004 | 142 000 000 |
| 1947 | 18 300 000 | 2005 | 152 000 000 |
| 1948 | 19 400 000 | 2006 | 151 000 000 |
| 1949 | 19 700 000 | 2007 | 160 000 000 |
| 1950 | 23 400 000 | 2008 | 166 000 000 |
| 1951 | 24 600 000 | 2009 | 162 000 000 |
| 1952 | 26 400 000 | 2010 | 183 000 000 |
| 1953 | 27 200 000 | 2011 | 200 000 000 |
| 1954 | 30 500 000 | 2012 | 216 000 000 |
| 1955 | 30 500 000 | 2013 | 232 000 000 |
| 1956 | 34 200 000 | 2014 | 237 000 000 |
| 1957 | 33 200 000 | 2015 | 241 000 000 |
| 1958 | 33 700 000 |  |  |
| 1958 | 33 700 000 |  |  |
| 1959 | 38 400 000 |  |  |
| 1960 | 41 800 000 |  |  |
| 1961 | 45 500 000 |  |  |

## Приложение Е

## Статистика добычи фосфатов (сырой руды) с 1904-2015 года по миру

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Год | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
| Фосфаты(n·106 т) | 855,6 | 887,7 | 866,3 | 978,6 | 1069,5 | 1155,1 | 1240,6 | 1267,4 | 1288,8 |
| Год | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 |
| Фосфаты(n·106 т) | 770,1 | 732,6 | 705,9 | 673,8 | 727,3 | 738,0 | 759,4 | 812,8 | 807,5 |
| Год | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 |
| Фосфаты(n·106 т) | 871,7 | 866,3 | 802,1 | 743,3 | 636,4 | 679,1 | 695,2 | 721,9 | 764,7 |
| Год | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | 1985 | 1986 | 1987 | 1988 |
| Фосфаты(n·106 т) | 786,1 | 775,4 | 689,8 | 764,7 | 823,5 | 807,5 | 754,0 | 786,1 | 887,7 |
| Год | 1971 | 1972 | 1973 | 1974 | 1975 | 1976 | 1977 | 1978 | 1979 |
| Фосфаты(n·106 т) | 502,7 | 540,1 | 593,6 | 657,8 | 582,9 | 582,9 | 647,1 | 679,1 | 716,6 |
| Год | 1962 | 1963 | 1964 | 1965 | 1966 | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 |
| Фосфаты(n·106 т) | 338,5 | 292,0 | 340,6 | 381,8 | 451,9 | 466,8 | 503,2 | 492,5 | 508,6 |
| Год | 1953 | 1954 | 1955 | 1956 | 1957 | 1958 | 1969 | 1960 | 1961 |
| Фосфаты(n·106 т) | 163,1 | 163,1 | 182,9 | 177,5 | 180,2 | 180,2 | 205,3 | 223,5 | 243,3 |
| Год | 1944 | 1945 | 1946 | 1947 | 1948 | 1949 | 1950 | 1951 | 1952 |
| Фосфаты(n·106 т) | 58,3 | 81,8 | 97,9 | 103,7 | 105,3 | 125,1 | 131,6 | 141,2 | 145,5 |
| Год | 1935 | 1936 | 1937 | 1938 | 1939 | 1940 | 1941 | 1942 | 1943 |
| Фосфаты(n·106 т) | 60,4 | 69,0 | 69,0 | 68,4 | 55,1 | 57,8 | 47,1 | 49,5 | 49,9 |
| Год | 1926 | 1927 | 1928 | 1929 | 1930 | 1931 | 1932 | 1933 | 1934 |
| Фосфаты(n·106 т) | 53,4 | 54,0 | 55,6 | 63,1 | 42,0 | 38,0 | 47,6 | 50,9 | 56,1 |
| Год | 1917 | 1918 | 1919 | 1920 | 1921 | 1922 | 1923 | 1924 | 1925 |
| Фосфаты(n·106 т) | 22,4 | 22,2 | 36,7 | 29,0 | 31,8 | 38,1 | 41,6 | 47,6 | 50,2 |
| Год | 1908 | 1909 | 1910 | 1911 | 1912 | 1913 | 1914 | 1915 | 1916 |
| Фосфаты(n·106 т) | 28,8 | 29,0 | 31,8 | 36,0 | 38,7 | 29,0 | 22,0 | 25,8 | 25,2 |
| Год | 1904 | 1905 | 1906 | 1907 |  |  |  |  |  |
| Фосфаты(n·106 т) | 20,6 | 22,4 | 25,2 | 26,5 |  |  |  |  |  |

## Приложение Ж

## Количество урана и радия, оценочно образовавшегося на поверхности в связи с добычей железной руды по миру с 1904-2015 г.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Год | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
| Железная руда (n·109 т) | 3,6 | 3,7 | 3,7 | 4,0 | 4,4 | 4,5 | 4,8 | 5,0 | 4,9 |
| Уран(n·102 т) | 90,9 | 93,6 | 92,5 | 101,2 | 109,8 | 112,0 | 120,7 | 126,1 | 123,4 |
| Радий(n·10-4 т) | 32,3 | 33,2 | 32,8 | 35,9 | 39,0 | 39,7 | 42,8 | 44,7 | 43,8 |
| Год | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 |
| Железная руда (n·109 т) | 2,3 | 2,2 | 2,1 | 2,0 | 2,1 | 2,3 | 2,6 | 2,9 | 3,2 |
| Уран(n·102 т) | 56,8 | 55,2 | 52,4 | 50,7 | 53,1 | 58,4 | 64,9 | 71,4 | 79,5 |
| Радий(n·10-4 т) | 20,2 | 19,6 | 18,6 | 18,0 | 18,8 | 20,7 | 23,0 | 25,3 | 28,2 |
| Год | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 |
| Железная руда (n·109 т) | 2,2 | 2,1 | 2,1 | 2,0 | 2,1 | 2,1 | 2,2 | 2,2 | 2,3 |
| Уран(n·102 т) | 54,1 | 53,1 | 51,7 | 50,3 | 51,6 | 53,1 | 55,2 | 55,2 | 56,3 |
| Радий(n·10-4 т) | 19,2 | 18,8 | 18,3 | 17,8 | 18,3 | 18,8 | 19,6 | 19,6 | 20,0 |
| Год | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | 1985 | 1986 | 1987 | 1988 |
| Железная руда (n·109 т) | 1,9 | 1,8 | 1,7 | 1,6 | 1,8 | 1,8 | 1,9 | 1,9 | 2,1 |
| Уран(n·102 т) | 47,8 | 45,6 | 42,4 | 39,4 | 44,5 | 45,7 | 46,3 | 47,0 | 52,3 |
| Радий(n·10-4 т) | 17,0 | 16,2 | 15,0 | 14,0 | 15,8 | 16,2 | 16,4 | 16,7 | 18,6 |
| Год | 1971 | 1972 | 1973 | 1974 | 1975 | 1976 | 1977 | 1978 | 1979 |
| Железная руда (n·109 т) | 1,7 | 1,6 | 1,8 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,8 | 1,8 | 1,9 |
| Уран(n·102 т) | 41,5 | 41,0 | 45,0 | 47,7 | 48,1 | 47,9 | 45,7 | 45,1 | 48,6 |
| Радий(n·10-4 т) | 14,7 | 14,5 | 16,0 | 16,9 | 17,1 | 17,0 | 16,2 | 16,0 | 17,2 |
| Год | 1962 | 1963 | 1964 | 1965 | 1966 | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 |
| Железная руда (n·109 т) | 1,1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 |
| Уран(n·102 т) | 27,0 | 27,6 | 31,0 | 33,1 | 33,9 | 33,3 | 36,1 | 37,9 | 41,0 |
| Радий(n·10-4 т) | 9,6 | 9,8 | 11,0 | 11,7 | 12,0 | 11,8 | 12,8 | 13,4 | 14,5 |
| Год | 1953 | 1954 | 1955 | 1956 | 1957 | 1958 | 1969 | 1960 | 1961 |
| Железная руда (n·109 т) | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,1 | 1,1 |
| Уран(n·102 т) | 17,9 | 16,3 | 19,7 | 21,1 | 22,9 | 21,5 | 23,4 | 27,8 | 26,8 |
| Радий(n·10-4 т) | 6,4 | 5,8 | 7,0 | 7,5 | 8,1 | 7,6 | 8,3 | 9,9 | 9,5 |
| Год | 1944 | 1945 | 1946 | 1947 | 1948 | 1949 | 1950 | 1951 | 1952 |
| Железная руда (n·109 т) | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,6 |
| Уран(n·102 т) | 10,8 | 8,6 | 8,3 | 10,0 | 11,4 | 12,1 | 13,5 | 15,9 | 16,1 |
| Радий(n·10-4 т) | 3,8 | 3,1 | 2,9 | 3,5 | 4,0 | 4,3 | 4,8 | 5,6 | 5,7 |
| Год | 1935 | 1936 | 1937 | 1938 | 1939 | 1940 | 1941 | 1942 | 1943 |
| Железная руда (n·109 т) | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Уран(n·102 т) | 7,5 | 9,2 | 11,5 | 8,8 | 10,8 | 11,5 | 12,6 | 12,7 | 12,3 |
| Радий(n·10-4 т) | 2,7 | 3,3 | 4,1 | 3,1 | 3,8 | 4,1 | 4,5 | 4,5 | 4,4 |
| Год | 1926 | 1927 | 1928 | 1929 | 1930 | 1931 | 1932 | 1933 | 1934 |
| Железная руда (n·109 т) | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,3 |
| Уран(n·102 т) | 8,4 | 9,3 | 9,4 | 10,9 | 9,7 | 6,4 | 4,1 | 4,9 | 6,5 |
| Радий(n·10-4 т) | 3,0 | 3,3 | 3,3 | 3,9 | 3,4 | 2,3 | 1,5 | 1,7 | 2,3 |
| Год | 1917 | 1918 | 1919 | 1920 | 1921 | 1922 | 1923 | 1924 | 1925 |
| Железная руда (n·109 т) | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Уран(n·102 т) | 7,7 | 6,9 | 6,0 | 6,7 | 4,0 | 5,6 | 7,4 | 7,0 | 8,2 |
| Радий(n·10-4 т) | 2,7 | 2,4 | 2,1 | 2,4 | 1,4 | 2,0 | 2,6 | 2,5 | 2,9 |
| Год | 1908 | 1909 | 1910 | 1911 | 1912 | 1913 | 1914 | 1915 | 1916 |
| Железная руда (n·109 т) | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Уран(n·102 т) | 5,9 | 6,8 | 7,7 | 7,2 | 8,2 | 9,6 | 6,4 | 6,3 | 7,5 |
| Радий(n·10-4 т) | 2,1 | 2,4 | 2,7 | 2,6 | 2,9 | 3,4 | 2,3 | 2,2 | 2,7 |
| Год | 1904 | 1905 | 1906 | 1907 |  |  |  |  |  |
| Железная руда (n·109 т) | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,3 |  |  |  |  |  |
| Уран(n·102 т) | 5,2 | 6,3 | 5,4 | 7,3 |  |  |  |  |  |
| Радий(n·10-4 т) | 1,8 | 2,2 | 1,9 | 2,6 |  |  |  |  |  |

### Приложение И

### Количество урана и радия, оценочно образовавшегося на поверхности в связи с добычей фосфатов по миру с 1904-2015 г.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Год | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
| Фосфаты (n·107 т) | 85,6 | 88,8 | 86,6 | 97,9 | 107,0 | 115,5 | 124,1 | 126,7 | 128,9 |
| Уран(n·103 т) | 20,2 | 21,0 | 20,5 | 23,1 | 25,3 | 27,3 | 29,3 | 30,0 | 30,5 |
| Радий(n·10-3 т) | 7,2 | 7,4 | 7,3 | 8,2 | 9,0 | 9,7 | 10,4 | 10,6 | 10,8 |
| Год | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 |
| Фосфаты (n·107 т) | 77,0 | 73,3 | 70,6 | 67,4 | 72,7 | 73,8 | 75,9 | 81,3 | 80,8 |
| Уран(n·103 т) | 18,2 | 17,3 | 16,7 | 15,9 | 17,2 | 17,5 | 18,0 | 19,2 | 19,1 |
| Радий(n·10-3 т) | 6,5 | 6,1 | 5,9 | 5,7 | 6,1 | 6,2 | 6,4 | 6,8 | 6,8 |
| Год | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 |
| Фосфаты (n·107 т) | 87,2 | 86,6 | 80,2 | 74,3 | 63,6 | 67,9 | 69,5 | 72,2 | 76,5 |
| Уран(n·103 т) | 20,6 | 20,5 | 19,0 | 17,6 | 15,1 | 16,1 | 16,4 | 17,1 | 18,1 |
| Радий(n·10-3 т) | 7,3 | 7,3 | 6,7 | 6,2 | 5,3 | 5,7 | 5,8 | 6,1 | 6,4 |
| Год | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | 1985 | 1986 | 1987 | 1988 |
| Фосфаты (n·107 т) | 78,6 | 77,5 | 69,0 | 76,5 | 82,4 | 80,8 | 75,4 | 78,6 | 88,8 |
| Уран(n·103 т) | 18,6 | 18,3 | 16,3 | 18,1 | 19,5 | 19,1 | 17,8 | 18,6 | 21,0 |
| Радий(n·10-3 т) | 6,6 | 6,5 | 5,8 | 6,4 | 6,9 | 6,8 | 6,3 | 6,6 | 7,4 |
| Год | 1971 | 1972 | 1973 | 1974 | 1975 | 1976 | 1977 | 1978 | 1979 |
| Фосфаты (n·107 т) | 50,3 | 54,0 | 59,4 | 65,8 | 58,3 | 58,3 | 64,7 | 67,9 | 71,7 |
| Уран(n·103 т) | 11,9 | 12,8 | 14,0 | 15,6 | 13,8 | 13,8 | 15,3 | 16,1 | 16,9 |
| Радий(n·10-3 т) | 4,2 | 4,5 | 5,0 | 5,5 | 4,9 | 4,9 | 5,4 | 5,7 | 6,0 |
| Год | 1962 | 1963 | 1964 | 1965 | 1966 | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 |
| Фосфаты (n·107 т) | 33,9 | 29,2 | 34,1 | 38,2 | 45,2 | 46,7 | 50,3 | 49,3 | 50,9 |
| Уран(n·103 т) | 8,0 | 6,9 | 8,1 | 9,0 | 10,7 | 11,0 | 11,9 | 11,6 | 12,0 |
| Радий(n·10-3 т) | 2,8 | 2,5 | 2,9 | 3,2 | 3,8 | 3,9 | 4,2 | 4,1 | 4,3 |
| Год | 1953 | 1954 | 1955 | 1956 | 1957 | 1958 | 1969 | 1960 | 1961 |
| Фосфаты (n·107 т) | 16,3 | 16,3 | 18,3 | 17,8 | 18,0 | 18,0 | 20,5 | 22,4 | 24,3 |
| Уран(n·103 т) | 3,9 | 3,9 | 4,3 | 4,2 | 4,3 | 4,3 | 4,9 | 5,3 | 5,8 |
| Радий(n·10-3 т) | 1,4 | 1,4 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,7 | 1,9 | 2,0 |
| Год | 1944 | 1945 | 1946 | 1947 | 1948 | 1949 | 1950 | 1951 | 1952 |
| Фосфаты (n·107 т) | 5,8 | 8,2 | 9,8 | 10,4 | 10,5 | 12,5 | 13,2 | 14,1 | 14,6 |
| Уран(n·103 т) | 1,4 | 1,9 | 2,3 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,1 | 3,3 | 3,4 |
| Радий(n·10-3 т) | 0,5 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,2 |
| Год | 1935 | 1936 | 1937 | 1938 | 1939 | 1940 | 1941 | 1942 | 1943 |
| Фосфаты (n·107 т) | 6,0 | 6,9 | 6,9 | 6,8 | 5,5 | 5,8 | 4,7 | 5,0 | 5,0 |
| Уран(n·103 т) | 1,4 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,3 | 1,4 | 1,1 | 1,2 | 1,2 |
| Радий(n·10-3 т) | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| Год | 1926 | 1927 | 1928 | 1929 | 1930 | 1931 | 1932 | 1933 | 1934 |
| Фосфаты (n·107 т) | 5,3 | 5,4 | 5,6 | 6,3 | 4,2 | 3,8 | 4,8 | 5,1 | 5,6 |
| Уран(n·103 т) | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,5 | 1,0 | 0,9 | 1,1 | 1,2 | 1,3 |
| Радий(n·10-3 т) | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,5 |
| Год | 1917 | 1918 | 1919 | 1920 | 1921 | 1922 | 1923 | 1924 | 1925 |
| Фосфаты (n·107 т) | 2,2 | 2,2 | 3,7 | 2,9 | 3,2 | 3,8 | 4,2 | 4,8 | 5,0 |
| Уран(n·103 т) | 0,5 | 0,5 | 0,9 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,1 | 1,2 |
| Радий(n·10-3 т) | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,4 |
| Год | 1908 | 1909 | 1910 | 1911 | 1912 | 1913 | 1914 | 1915 | 1916 |
| Фосфаты (n·107 т) | 2,9 | 2,9 | 3,2 | 3,6 | 3,9 | 2,9 | 2,2 | 2,6 | 2,5 |
| Уран(n·103 т) | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,7 | 0,5 | 0,6 | 0,6 |
| Радий(n·10-3 т) | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Год | 1904 | 1905 | 1906 | 1907 |  |  |  |  |  |
| Фосфаты (n·107 т) | 2,1 | 2,2 | 2,5 | 2,7 |  |  |  |  |  |
| Уран(n·103 т) | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,6 |  |  |  |  |  |
| Радий(n·10-3 т) | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |  |  |  |  |  |

### Приложение К

### Значения концентраций 238U и 226Ra в почве разных стран [35]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Страна | Население(106) | Концентрация в почве (Бк/кг) |
| 238U | 226Ra |
| Среднее | Разброс | Среднее | Разброс |
| Алжир | 28,78 | 30 | 2–110 | 50 | 5–180 |
| Египет | 63,27 | 37 | 6–120 | 17 | 5–64 |
| Ливия | 1,5 | 10,5 | 8.7-12.8 | 8,8 | 8.3–9.4 |
| США | 269,4 | 35 | 4–140 | 40 | 8–160 |
| Куба | 11,2 |   |   | 21,4 | 0.5–115 |
| Бангладеш | 57,08 | 52 | 18–95 | 51 | 18–98 |
| Китай | 1 232 | 33 | 2–690 | 32 | 2–440 |
| Индия | 944,6 | 29 | 7–81 | 29 | 7–81 |
| Япония | 125,4 | 29 | 2–59 | 33 | 6–98 |
| Казахстан | 15,14 |   | 30–60 |   |   |
| Индонезия | 213,67 |   |   | 13,8 | 7–54 |
| Малайзия | 20,58 | 66 | 49–86 | 67 | 38–94 |
| Филиппины | 75,9 | 14 | 2–53 |   |   |
| Таиланд | 58,7 | 114 | 3–370 | 48 | 11–78 |
| Армения | 3,64 | 46 | 28–70 | 51 | 32–77 |
| Азербайджан | 8 | 26 | 26–50 | 25 | 15–35 |
| Иран | 63,76 |   |   | 30 | 20–97 |
| Ирак |   |   |   | 16,8 | 0.5–35 |
| Кувейт | 2,26 | 19 | 6–65 | 12 | 2–28 |
| Дания | 5,2 |   |   | 17 | 8.5–29 |
| Эстония | 1,47 |   |   | 35 | 6–310 |
| Финляндия | 5,2 | 41 | 13–110 | 41 | 13–110 |
| Исландия |   | 10 |   | 8,5 |  2–15  |
| Литва | 3,45 |   |   | 41 | 10–96 |
| Норвегия | 4,35 | 50 |   | 50 |   |
| Швеция | 8,88 |   | 10–1000 |   | 10–1000 |
| Бельгия | 10,22 |   |   | 32 | 6–70 |
| Германия | 81,92 |   | 11–330 | 70 | 5–200 |
| Ирландия | 3,92 | 39 | 4–543 | 46 | 6–292 |
| Люксембург | 0,41 |   |   | 35 | 6–52 |
| Нидерланды | 15,58 |   | 5–53 | 23 | 6–63 |
| Португалия | 9,81 | 49 | 26–82 | 44 | 8–65 |
| Испания | 39,67 |  |  |  38 | 8–310 |
| Швейцария | 7,5 | 26 |  9–80  | 37 | 17–140 |
| Великобритания | 58,14 |   | 2–330 | 37 |   |
| Болгария | 8,47 | 40 | 8–190 | 45 | 12–210 |
| Чехия | 10,3 |   |   | 44 | 18–275 |
| Венгрия | 10,05 | 29 | 12–66 | 33 | 14–76 |
| Польша | 38,12 | 25,2 | 4.2–124 | 25,2 | 4.2–124 |
| Румыния | 21,83 | 32 | 8–60 | 32 | 8–60 |
| Российская Федерация | 148,1 | 19 | 0–67 | 27 | 1–76 |
| Словакия | 5,35 | 32 | 15–130 | 32 | 12–120 |
| Словения | 2,02 |   |   | 41 | 2–208 |
| Албания | 3,4 | 34 | 2.5–141 |   |   |
| Хорватия | 4,5 | 53 | 19–135 | 43 | 18–80 |
| Кипр | 0,76 |   |   | 17 | 0–120 |
| Греция | 10,36 | 45 | 10–190 | 29 | 1–310 |
| Черногория | 0,6 |   |   | 29,3 | 7–166 |
| Новая Зеландия | 4,1 |   |   | 23 | <4–56 |

## Приложение Л

## Динамика количества добытой железной руды с 1904-2015 г.



## Приложение М

## Динамика количества добычи фосфатов с 1904-2015 г.

