

Электронная структура: 5f-электроны

Нахождение в природе

Природный плутоний
Техногенный плутоний

Изотопы

Изотопы и синтез
Синтез плутония
Плутоний-238
Плутоний-239
Тяжёлые изотопы плутония
Свойства некоторых изотопов

Сплавы

Виды сплавов

Меры предосторожности

Токсичность
Критическая масса
Самовоспламенение

Методы отделения

Применение

Ядерное оружие
Ядерное загрязнение
Источник энергии
Космические аппараты
На Луне
Реакторы-размножители
Противопожарные датчики

Стоимость плутония

См. также

Примечания

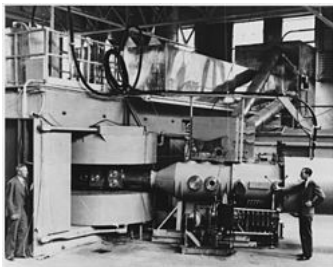
Ссылки

Структура решётки	Моноклинная
Параметры решётки	a=6,183 Å b=4,822 Å c=10,963 Å β=101,8° ^[9]
Температура Дебая	162 К
Прочие характеристики	
Теплопроводность	(300 К) 6,74 Вт/(м·К)
Скорость звука	2260 ^[6] м/с
Номер CAS	7440-07-5 (https://chem.nlm.nih.gov/chemidplus/rn/7440-07-5)

История

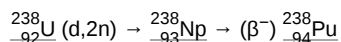
Открытие

Энрико Ферми вместе со своими сотрудниками в Университете Рима сообщил, что они обнаружили химический элемент с порядковым номером 94, в 1934 году^[31]. Ферми назвал этот элемент *геспериум*, сделав таким образом предположение о существовании *трансурановых элементов* и став их теоретическим первооткрывателем. Он придерживался этой позиции и в своей Нобелевской лекции в 1938 году, однако, узнав об открытии Отто Фришм и Фрицем Штрассманом деления ядра, был вынужден сделать в печатной версии, вышедшей в Стокгольме в 1939 году, примечание, указывающее на необходимость пересмотра «всей проблемы трансурановых элементов». Работа немецких учёных показала, что активность, обнаруженная Ферми в его экспериментах, была обусловлена именно делением, а не открытием трансурановых элементов, как он ранее полагал^{[32][33][34]}.



Циклотрон в Беркли, использовавшийся для получения нептуния и плутония.

Открытие плутония группой сотрудников Калифорнийского университета в Беркли под руководством Г. Т. Сиборга было совершено с помощью 60-дюймового циклотрона. Первая бомбардировка октаоксида триурана-238 (²³⁸U₃O₈) дейтронами, разогнанными в циклотроне до 14—22 МэВ и проходящими через алюминиевую фольгу толщиной 0,002 дюйма (50,8 мкм), была произведена 14 декабря 1940 года. Сравнивая образцы, полученные и выдержанные в течение 2,3 суток, с выделенной фракцией чистого нептуния, учёные обнаружили существенную разницу в их альфа-активностях и предположили, что её рост через 2 суток обусловлен влиянием нового элемента, являющегося дочерним по отношению к нептунью. Дальнейшие физические и химические исследования продолжались 2 месяца. В ночь с 23 на 24 февраля 1941 года был проведён решающий эксперимент по окислению предполагаемого элемента с помощью пероксидсульфат-ионов и ионов серебра в качестве катализатора, который показал, что *нептуний-238* спустя два дня претерпевает бета-минус-распад и образует химический элемент под номером 94 в следующей реакции:



Таким образом, существование нового химического элемента было подтверждено экспериментально Г. Т. Сиборгом, Э. М. Макмилланом, Дж. В. Кеннеди и А. К. Валем благодаря изучению его первых химических свойств — возможностью обладать, по крайней мере, двумя степенями окисления^{[38][39][40][41][10][42][40][43][44][45][~ 2]}.

Немного позднее было установлено, что этот изотоп является *неделяющимся* (пороговым), а следовательно, неинтересным для дальнейших исследований в военных целях, так как пороговые ядра не могут служить основой цепной реакции деления. Поняв это, физики-ядерщики США направили свои усилия на получение делящегося изотопа-239 (который по расчётам должен был быть более мощным источником атомной энергии, чем уран-235^[41]). В марте 1941 года 1,2 кг чистой соли урана, замурованной в большой парафиновый блок, подвергли в циклотроне бомбардировке нейтронами. На протяжении двух суток длилась бомбардировка урановых ядер, в результате чего были получены приблизительно 0,5 мкг плутония-239. Появление нового элемента, как и было предсказано теорией, сопровождалось потоком альфа-частиц^[46].

28 марта 1941 года проведённые эксперименты показали, что ²³⁹Pu способен делиться под действием медленных нейтронов, с сечением, весьма значительно превышающим сечение для ²³⁵U, причём нейтроны, полученные в процессе деления, пригодны для получения следующих актов ядерного деления, то есть позволяют рассчитывать на осуществление цепной ядерной реакции. С этого момента были начаты опыты по созданию плутониевой ядерной бомбы и строительства реакторов для его наработки^{[40][42][47]}. Первое чистое соединение элемента было получено в 1942 году^[40], а первые весовые количества металлического плутония — в 1943 году^[48].

Внешние изображения

В работе, отправленной на публикацию в журнал *Physical Review* в марте 1941 г., был описан метод получения и изучения элемента^[42]. Однако публикация этой работы была остановлена после того, как были получены данные, что новый элемент может быть использован в ядерной бомбе. Публикация работы произошла спустя год после Второй мировой войны из соображений безопасности^[49] и с некоторыми корректировками^[50].

В Третьем рейхе исследователи атома также не оставались бездейственными. В лаборатории Манфреда фон Ардена были разработаны методы получения 94-го элемента. В августе 1941 года физик Фриц Хоутерманс закончил свой секретный доклад «К вопросу о развязывании цепных ядерных реакций». В нём он указывал на теоретическую возможность изготовления в урановом «котле» нового взрывчатого вещества из природного урана.

Происхождение названия

В 1930 году была открыта новая планета, о существовании которой давно говорил Персиваль Ловелл — астроном, математик и автор фантастических очерков о жизни на Марсе. На основе многолетних наблюдений за движениями Урана и Нептуна он пришёл к заключению, что за Нептуном в Солнечной системе должна быть ещё одна, девятая планета, располагающаяся от Солнца в сорок раз дальше, чем Земля. Элементы орбиты новой планеты были им рассчитаны в 1915 году. Плутон был обнаружен на фотографических снимках, полученных 21, 23 и 29 января 1930 г. астрономом Клайдом Томбо в обсерватории Лоуэлла во Флагстаффе (США). Планета была открыта 18 февраля 1930 года^[51]. Название планете было дано одиннадцатилетней школьницей из Оксфорда Венецией Бёрни^[52]. В греческой мифологии Аид (в римской Плутон) является богом царства мёртвых.

Первое печатное упоминание термина *плутоний* датируется 21 марта 1942 года^[53]. Название 94-му химическому элементу было предложено Артуром Валем и Гленном Сиборгом^[54]. В 1948 году Эдвин Макмиллан предложил назвать 93-й химический элемент *нептунием*, так как планета Нептун — первая за Ураном. По аналогии в честь второй планеты за Ураном, Плутона, был назван плутоний^[55]^[56]. Открытие плутония произошло через 10 лет после открытия карликовой планеты (примерно такой же отрезок времени понадобился на открытие Урана и на именование 92-го химического элемента)^[15]^[~ 3].

Первоначально Сиборг предложил назвать новый элемент «плутием», однако позже решил, что название «плутоний» звучит лучше^[57]. Для обозначения элемента он в шутку привёл две буквы «Pu» — это обозначение представилось ему наиболее приемлемым в периодической таблице^[~ 4]. Также Сиборгом были предложены некоторые другие варианты названий, например, *ультимий* (англ. *ultimium* от лат. *ultimus* — последний), *экстремий* (*extremium* от лат. *extremus* — крайний), из-за ошибочного в то время суждения, что плутоний станет последним химическим элементом в периодической таблице^[54]. Однако элемент назвали «плутоний» в честь последней планеты Солнечной системы^[15].

Первые исследования

После нескольких месяцев первоначальных исследований химия плутония стала считаться похожей на химию урана^[42]^[*уточнить*]. Дальнейшие исследования были продолжены в секретной металлургической лаборатории Чикагского университета. Благодаря^[*уточнить*] Каннингему и Вернеру 18 августа 1942 года был выделен первый микрограмм чистого соединения плутония из 90 кг уранилнитрата, облученного нейтронами на циклотроне^[50]^[58]^[59]^[60]. 10 сентября 1942 года — спустя месяц, на протяжении которого учёные увеличивали количество соединения — произошло взвешивание. Этот исторический образец весил 2,77 мкг и состоял из^[*уточнить*] диоксида плутония^[61]; в настоящее время хранится в Лоуренсовском зале в Беркли^[13]. К концу 1942 года было накоплено 500 мкг соли элемента. Для более подробного изучения нового элемента в США было сформировано несколько групп^[50]:

- группа учёных, которая должна была выделить чистый плутоний химическими методами (Лос-Аламос: J. W. Kennedy, C. S. Smith, A. C. Wahl, C. S. Garner, I. B. Johns),
- группа, которая изучала поведение плутония в растворах, включая изучение его степеней окисления, потенциалов ионизации и кинетику реакций (Беркли: W. M. Latimer, E. D. Eastman, R. E. Connik, J. W. Gofman и др.),
- группа, которая изучала химию комплексообразования ионов плутония (Айова: F. H. Spedding, W. H. Sullivan, A. F. Voigt, A. S. Newton) и другие группы.

В ходе исследований было установлено, что плутоний может находиться в степенях окисления от 3 до 6, и что более низкие степени окисления, как правило, более стабильны по сравнению с нептунием. Тогда же было установлено сходство химических свойств плутония и нептуния^[50]. В 1942 году неожиданным стало открытие Стэна Томсона, входящего в группу Гленна Сиборга, которое показало, что четырёхвалентный плутоний получается в больших количествах при нахождении в кислом растворе в присутствии фосфата висмута(III) (BiPO_4)^[41]. В дальнейшем это привело к изучению и применению висмут-фосфатного метода экстракции плутония^[62]. В ноябре 1943 г. некоторые количества фторида плутония(III) (PuF_3) были подвергнуты разделению для получения чистого образца элемента в виде нескольких микрограммов мелкодисперсного порошка. Впоследствии были получены образцы, которые можно было бы рассмотреть невооружённым глазом^[63].

В СССР первые опыты по получению ^{239}Pu были начаты в 1943—1944 гг. под руководством академиков И. В. Курчатова и В. Г. Хлопина. В короткий срок в СССР были выполнены обширные исследования свойств плутония^[64]. В начале 1945 года на первом в Европе циклотроне, построенном в 1937 году в Радиовом институте, был получен первый советский образец плутония путём нейтронного облучения ядер урана^[38]^[65]. В городе Озёрск с 1945 года началось строительство первого промышленного ядерного реактора по производству плутония, первый объект ПО Маяк, пуск которого был осуществлён 19 июня 1948 года^[66].

Производство в Манхэттенском проекте

Манхэттенский проект берёт своё начало с так называемого письма Эйнштейна Рузвельту, в котором внимание президента обращалось на то, что нацистская Германия ведёт активные исследования, в результате которых может вскоре обзавестись атомной бомбой^[67]. В результате положительного ответа Франклина Рузвельта в США был образован Манхэттенский проект^[68].

Во время Второй мировой войны целью проекта являлось создание ядерной бомбы. Проект атомной программы (англ. *atomic program*), из которой образовался Манхэттенский проект, был одобрен и одновременно создан указом Президента США 9 октября 1941 года. Свою деятельность Манхэттенский проект начал 12 августа 1942 года^[69]. Тремя его основными направлениями являлись^[70]:

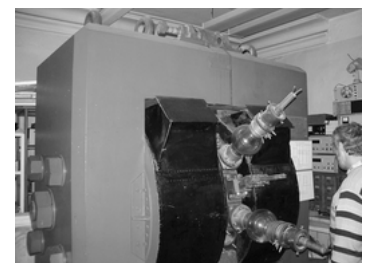
- организация производства плутония на территории Хэнфордского комплекса,
- организация обогащения урана в городе Оук-Ридж, штат Теннесси,
- исследования в области ядерного оружия и создания атомной бомбы на территории Лос-Аламосской национальной лаборатории.



Гленн Теодор Сиборг (1912—1999) вместе с сотрудниками в Беркли впервые синтезировал плутоний. Он был руководителем или ключевым членом команд, получивших ещё восемь элементов: Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No^[35]. В его честь назван элемент сиборгий^[36]. Эдвин Макмиллан и Гленн Сиборг в 1951 году были удостоены Нобелевской премии за «изучение химии трансурановых элементов»^[37].



С помощью этого астрографа были получены первые снимки Плутона.



Первый циклотрон в СССР, использовавшийся для получения плутония.



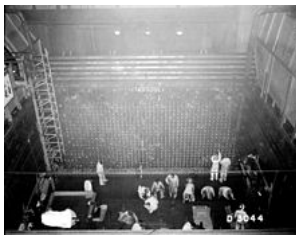
Памятная фотография учёных, принимавших участие на Чикагской поленице-1. В первом ряду, второй справа: Лео Силлард; первый слева: Энрико Ферми.

Первым ядерным реактором, позволявшим получать большие количества элемента по сравнению с циклотронами, была Чикагская поленица-1^[40]. Он был введён в эксплуатацию 2 декабря 1942 года благодаря Энрико Ферми и Лео Силларду^[71] (последнему принадлежит предложение об использовании графита как замедлителя нейтронов^[72]); в этот день была произведена первая самоподдерживающаяся ядерная цепная реакция^[73]. Для производства плутония-239 использовались уран-238 и уран-235. Реактор был сооружён под трибунами стадиона Stagg Field Чикагского университета^[40]. Он состоял из 6 тонн металлического урана, 34 тонн оксида урана

и 400 тонн «чёрных кирпичей» графита. Единственным, что могло остановить цепную ядерную реакцию, были стержни из кадмия, которые хорошо захватывают тепловые нейтроны и, как следствие, могут предотвратить возможное происшествие^[74]. Из-за отсутствия радиационной защиты и охлаждения его обычная мощность была всего 0,5...200 Вт^[40].

Вторым реактором, который позволил получать плутоний-239, был Графитовый реактор X-10^[42]. Он был введён в эксплуатацию 4 ноября 1943 года^[75] (строительство длилось 11 месяцев) в городе Оук-Ридж, в настоящее время он располагается на территории Оук-Риджской национальной лаборатории. Этот реактор был вторым в мире после Чикагской поленицы-1 и первым реактором, который был создан в продолжении Манхэттенского проекта^[76]. Реактор был первым шагом на пути к созданию более мощных ядерных реакторов (на территории Хэнфорда, Вашингтон), то есть он был экспериментальным. Окончание его работы наступило в 1963 г.^[77]; открыт для посещения с 1980-х годов и является одним из старейших ядерных реакторов в мире^[78].

Пятого апреля 1944 года Эмилио Сегре получил первые образцы плутония, произведённого в реакторе X-10^[77]. В течение 10-ти дней он обнаружил, что концентрация плутония-240 в реакторе очень высока, по сравнению с циклотронами. Данный изотоп имеет очень высокую способность к спонтанному делению, в результате чего повышается общий фон нейтронного облучения^[79]. На данном основании был сделан вывод, что использование особо чистого плутония в ядерной бомбе пушечного типа, в частности, в бомбе Худой, может привести к преждевременной детонации^[80]. Благодаря тому, что технология разработок ядерных бомб всё более улучшалась, было установлено, что для ядерного заряда лучше всего использовать имплозионную схему с зарядом сферической формы.



Строительство реактора В — первого ядерного реактора, способного получать плутоний в промышленном масштабе.

Первым промышленным ядерным реактором по производству ²³⁹Pu является реактор В, расположенный в США. Строительство началось с июня 1943 г. и закончилось в сентябре 1944 г. Мощность реактора составила 250 МВт (в то время как у X-10 всего 1000 кВт). В качестве теплоносителя в этом реакторе впервые применялась вода^[81]. Реактор В (вместе с реактором D и реактором F — остальными двумя) позволил получить плутоний-239, который был впервые использован в испытании Тринити. Ядерные материалы, полученные на этом реакторе, были использованы в бомбе, сброшенной на Нагасаки 9 августа 1945 г.^[82]. Построенный реактор был закрыт в феврале 1968 года и расположен^[прояснить] в пустынном районе штата Вашингтон, недалеко от города Ричланд^[83].

В ходе Манхэттенского проекта на Хэнфордском комплексе (образован в 1943 г. для производства плутония и закрыт в 1988 году вместе с окончанием производства^[84]) было создано множество объектов, предназначенных для получения, хранения, переработки и использования ядерных материалов. На этих захоронениях расположено около 205 кг изотопов плутония (²³⁹Pu—²⁴¹Pu)^[85]. Множественные объекты были образованы для хранения девяти ядерных реакторов, которые производили химический элемент, многочисленных вспомогательных построек, которые загрязняли окружающую среду. Другие из этих объектов были созданы с целью отделения плутония и урана от примесей химическими способами. По закрытию этого комплекса (по состоянию на 2009 г.) утилизировано более 20 т плутония в безопасных формах (для предотвращения ядерного деления)^[84].

В 2004 г. в результате раскопок были обнаружены захоронения на территории Хэнфордского комплекса. В числе них был найден оружейный плутоний, который находился в стеклянном сосуде. Этот образец оружейного плутония оказался самым долгоживущим и был исследован Тихоокеанской национальной лабораторией. Результаты показали, что этот образец был создан на графитовом реакторе X-10 в 1944 году^{[86][87][88][89]}.

Один из участников проекта (Алан Мэй) был причастен к тайной передаче чертежей о принципах устройства урановой и плутониевой бомб, а также образцов урана-235 и плутония-239^[67].

Тринити и Толстяк

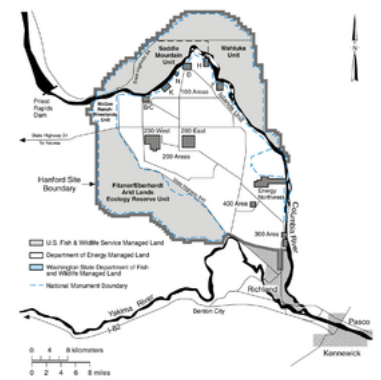
Первое ядерное испытание под названием Тринити, проведённое 16 июля 1945 г. возле города Аламогордо, Нью-Мексико, использовало плутоний в качестве ядерного заряда^{[63][90][91]}. В Штучке (взрывное устройство) использовались обычные линзы^[~ 5] для того, чтобы сжать плутоний для достижения критической массы. Это устройство было создано для пробы нового типа ядерной бомбы «Толстяк» на основе плутония^[92]. Одновременно с этим из Ежа начали поступать нейтроны для ядерной реакции. Устройство было сделано из полиния и бериллия^[42]; этот источник применялся в первом поколении ядерных бомб^[93], так как в то время единственным источником нейтронов считалась эта композиция^{[38][~ 6]}. Вся эта композиция позволила достичь мощного ядерного взрыва. Полная масса бомбы, использованной при ядерном испытании Тринити, составляла 6 т, хотя в ядре бомбы было всего 6,2 кг плутония^[94], а предполагаемая высота для взрыва над городом составляла 225—500 м^[95]. Приблизительно 20 % использованного плутония в этой бомбе составило 20000 т в тротиловом эквиваленте^[96].



Наиболее важные места для Манхэттенского проекта.



Работники на Графитовом реакторе X-10.



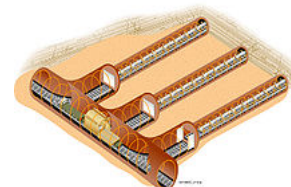
Хэнфордский комплекс. Реакторы В, D, F и др. расположены вдоль течения реки в верхней части схемы.

Бомба Толстяк была сброшена на Нагасаки 9 августа 1945. В результате взрыва моментально погибло 70 тыс. человек и ранено ещё 100 тыс.^[42]. Она имела схожий механизм: сделанное из плутония ядро помещалось в сферическую алюминиевую оболочку, которая обкладывалась химической взрывчаткой. Во время детонирования оболочки плутониевый заряд сжимался со всех сторон и его плотность перерастала критическую, после чего начиналась цепная ядерная реакция^[97]. В Мальше, сброшенном на Хиросиму тремя днями ранее, использовался уран-235, но не плутоний. Япония 15 августа подписала соглашение о капитуляции. После этих случаев в СМИ было опубликовано сообщение о применении нового химического радиоактивного элемента — плутония.

Холодная война

Большие количества плутония были произведены во время Холодной войны США и СССР. Реакторы США, находящиеся в Savannah River Site (Северная Каролина) и Хэнфорде, во время войны произвели 103 т плутония^[98], в то время как СССР произвел 170 т оружейного плутония^[99]. На сегодня около 20 т плутония в ядерной энергетике производится как побочный продукт ядерных реакций^[100]. На 1000 т плутония, находящегося в хранилищах, приходится 200 т плутония, извлечённого из ядерных реакторов^[42]. На 2007 год СИИПМ оценил мировое количество плутония в 500 т, который примерно одинаково разделён на оружейные и энергетические нужды^[101].

Сразу же по окончании Холодной войны все ядерные запасы стали проблемой распространения ядерного оружия. Например, в США из извлечённого из ядерного оружия плутония были сплавлены двухтонные блоки, в которых элемент находится в виде инертного оксида плутония(IV)^[42]. Данные блоки застеклены боросиликатным стеклом с примесью циркония и гадолиния^[~ 7]. Затем эти блоки были покрыты нержавеющей сталью и захоронены на глубине 4 км^[42]. Местная и государственная власть США не позволила складировать ядерные отходы в гору Юкка. В марте 2010 г. власти США решили отозвать лицензию на право складировать ядерные отходы. Барак Обама предложил провести ревизию политики хранения отходов и предоставить рекомендации по разработке новых эффективных методов по контролю над отработанным топливом и отходами^[102].



Предполагаемая схема туннельного хранилища ядерных отходов в репозитории Юкка Маунтин.

Медицинские эксперименты

На протяжении Второй мировой войны и после её окончания учёные проводили эксперименты на животных и людях, вводя внутривенно дозы плутония^[103]. Исследования на животных показали, что несколько миллиграммов плутония на килограмм ткани — смертельная доза^[104]. «Стандартная» доза составляла 5 мкг плутония^[103], а в 1945 году эта цифра уменьшилась до 1 мкг за счёт того, что плутоний склонен к накоплению в костях и из-за этого более опасен, чем радий^[104].

Восемнадцать испытаний плутония на людях были проведены без предварительного согласия испытуемых для того, чтобы выяснить, где и как концентрируется плутоний в человеческом организме, и выработать стандарты безопасности обращения с ним. Первые места, в которых проводились эксперименты в рамках Манхэттенского проекта, были: Хэнфорд, Беркли, Лос-Аламос, Чикаго, Оук-Ридж, Рочестер^[103].

Свойства

Физические свойства

Плутоний, как и большинство металлов, имеет яркий серебристый цвет, похожий на никель или железо^[1], но на воздухе окисляется, меняя свой цвет сначала на бронзовый, затем на синий цвет закалённого металла и после превращается в тусклый чёрный или зелёный цвета из-за образования рыхлого окисного покрытия^[105]. Также есть сообщения об образовании жёлтого и оливкового цвета оксидной плёнки^{[106][107]}. При комнатной температуре плутоний находится в α-форме — это наиболее распространённая для плутония аллотропная модификация. Данная структура примерно такая же жёсткая, как серый чугун, если она не легирована другими металлами, которые придадут сплаву пластичность и мягкость. В отличие от большинства металлов, он не является хорошим проводником тепла и электричества^[106].



Плутоний в пакете^[~ 8].

Плутоний имеет аномально низкую для металлов температуру плавления (примерно 640 °C)^[108] и необычно высокую температуру кипения (3235 °C)^[11~ 9]. Свинец является более лёгким металлом, чем плутоний^[109] примерно в два раза (разница в плотности составляет 19,86 – 11,34 ≈ 8,52 г/см³)^[11].

Некоторые физические свойства плутония^[1]

Атомные радиусы различных модификаций плутония при 298 К и при температурах их существования

Фаза	α	β	γ	δ	δ'	ε
T, К	298	366	508	593	738	763
Атомный радиус, нм	0,158	0,160	0,1601	0,1640	0,1638	0,1622
Радиус при 298 К, нм	0,158	0,159	0,1589	0,1644	0,1644	0,1594

Эффективное поперечное сечение захвата тепловых нейт для некоторых изотопов плутония

Изотоп	²³⁸ Pu	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu
Эффективное поперечное сечение, 10 ⁻²⁸ м²	403±10	1028±13	287±7	1400±80

Удельное электрическое сопротивление различных фаз плутония и их температурный коэффициент электрического сопротивления Абсолютный коэффициент термоэлектродвижущей силы пл в зависимости от температуры и модификации

Фаза	T, К	ρ, мкОм·м	α·10 ⁻³ , К ⁻¹	Фаза	T, К	среднее значение e, мкВ/К
α	26	0,648	+18,405 (26—50 К) и -0,418 (126—273 К)	α	20	1,75
α	50	1,280		α	100	9,8
α	100	1,569	α	300	11,5	
α	150	1,535	β	400	9,1	
α	273	1,465	γ	500	8,4	
α	376	1,414	δ	600	3,0	
β	420	1,085	δ'	725	2,3	
γ	505	1,078	ε	800	3,5	
δ	625	1,004				
δ'	735	1,021				



Как и у остальных металлов, коррозия плутония увеличивается с увеличением влажности. Некоторые исследования утверждают, что влажный аргон может быть более корродирующим элементом, чем кислород; это связано с тем, что аргон не реагирует с плутонием, и, как следствие, плутоний начинает растрескиваться^{[110][~10]}.

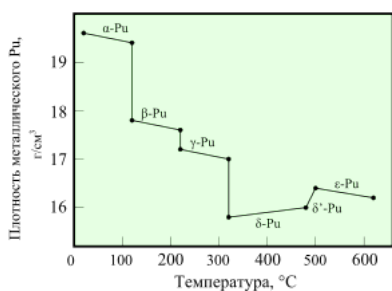
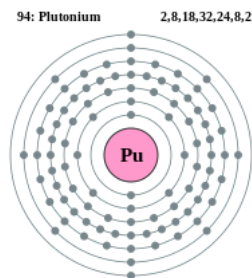


Диаграмма плотности плутония^[64].

Альфа-распад, который сопровождается испусканием ядер гелия, является наиболее распространённым видом радиоактивного распада изотопов плутония^[111]. Типичный ядерный боеприпас имеет около 5 кг плутония, в котором находится примерно $12,5 \cdot 10^{24}$ атомов. С учётом периода полураспада 24000 лет каждую секунду в таком заряде распадается около $11,5 \cdot 10^{12}$ атомов, выделяя 5,157 МэВ благодаря альфа-частицам. В пересчёте на количество энергии это составляет 9,58 Вт. Тепло, производимое благодаря распаду ядер и испусканию ими альфа-частиц, делает плутоний тёплым на ощупь^{[56][112]}.

Как известно, электрическое сопротивление характеризует способность материала проводить электрический ток. Удельное сопротивление плутония при комнатной температуре очень велико для металла, и эта особенность будет усиливаться с понижением температуры, что для металлов не свойственно^[63]. Эта тенденция продолжается вплоть до 100 К^[108]; ниже этой отметки электрическое сопротивление будет уменьшаться^[63]. С понижением отметки до 20 К сопротивление начинает возрастать из-за радиационной активности металла, причём данное свойство будет зависеть от изотопного состава металла^[63].



Строение атома плутония. Электронная конфигурация внешних оболочек $5s^2 p^6 d^{10} f^6 6s^2 p^6 7s^2 [4]$.

Плутоний обладает самым высоким удельным электрическим сопротивлением среди всех изученных актиноидов (на данный момент), которое составляет 150 мкОм·см (при +22 °C)^[73]. Его твёрдость составляет 261 кг/мм³ (для α-Pu)^[10].

Благодаря тому, что плутоний радиоактивен, он со временем претерпевает изменения в своей кристаллической решётке^[113]. Плутоний претерпевает некое подобие отжига также благодаря самооблучению из-за повышения температуры выше 100 К.

В отличие от большинства материалов, плотность плутония увеличивается при нагревании его до температуры плавления на 2,5 %, в то время как у обычных металлов наблюдается уменьшение плотности при повышении температуры^[63]. Ближе к точке плавления жидкий плутоний имеет очень высокий показатель поверхностного натяжения и самую высокую вязкость среди других металлов^{[108][113]}. Характерной особенностью плутония является его уменьшение в объёме в диапазоне температур от 310 до 480 °C, в отличие от других металлов^[64].

Аллотропические модификации

Плутоний имеет семь аллотропных модификаций. Шесть из них (см. рисунок выше) существуют при обычном давлении, а седьмая — только при высокой температуре и определённом диапазоне давления^[12]. Эти аллотропы, которые различаются по своим структурным характеристикам и показателями плотности, имеют очень похожие значения внутренней энергии. Это свойство делает плутоний очень чувствительным к колебаниям температуры и давления, и приводит к скачкообразному изменению своей структуры^[113]. Показатель плотности всех аллотропных модификаций плутония варьируется от 15,9 г/см³ до 19,86 г/см³^{[100][~11]}. Наличие многих аллотропных модификаций у плутония делает его трудным металлом в обработке и выкатывании^[1], так как он претерпевает фазовые переходы. Причины существования столь разных аллотропных модификаций у плутония не совсем ясны.

Свойства кристаллических решёток плутония^{[13][114][115]}

Жение	Область устойчивости, °C	Симметрия и пространственная группа	Параметры решётки, Å				Число атомов в элементарной ячейке	Рентгеновская плотность, г/см ³	Температура перехода, °C	$\Delta H_{\text{перехода}}$, Дж/моль
			a	b	c	β				
	Ниже 122	ПМ, $P2_1/m$	При 21 °C				16	19,86	—	—
			6,183	4,882	10,963	101,79°				
—	122—207	ОЦМ, $12/m$	При 100 °C				34	17,7	$\alpha \rightarrow \beta$ 122±4	3430
			9,284	10,463	7,859	93,13°				
—	207—315	ГЦО, $Fddd$	При 235 °C				8	17,14	$\beta \rightarrow \gamma$ 207±5	565

			3,159	5,768	10,162	—				
	315—457	ГЦК, $Fm\bar{3}m$	При 320 °С				4	15,92	$\gamma \rightarrow \delta$ 315±3	586
			4,6371	—	—	—				
	457—479	ОЦТ, $14/mmm$	При 465 °С				2	16	$\delta \rightarrow \delta'$ 457±2	84
			3,34	—	4,44	—				
	479—640	ОЦК, $Im\bar{3}m$	При 490 °С				2	16,51	$\delta' \rightarrow \epsilon$ 479±4	1841
			3,634	—	—	—				

Первые три кристаллические модификации — α -, β - и γ -Pu — обладают сложной кристаллической структурой с четырьмя ярко выраженными связями ковалентного характера. Другие — δ -, δ' - и ϵ -Pu — более высокотемпературные модификации характеризуются более простой структурой^[116].

Альфа-форма существует при комнатной температуре в виде нелегированного и необработанного плутония. Она имеет схожие свойства с чугуном, однако имеет свойство превращаться в пластичный материал и образовывать ковкую β -форму при более высоких интервалах температуры^[63]. Альфа-форма плутония имеет низкосимметричную моноклинную структуру (кристаллическая структура фаз, которые существуют при комнатных температурах, является низкосимметричной, что более характерно для минералов, чем для металлов), отсюда становится ясным, что она является прочной и плохо проводящей электрический ток модификацией^[12]. В данной форме плутоний очень хрупок, однако имеет самую высокую плотность из всех аллотропных модификаций^[117]. Фазы плутония характеризуются резким изменением механических свойств — от совершенно хрупкого до пластичного металла^[108].

Плутоний в δ -форме обычно существует при значениях температуры от 310 °С до 452 °С, однако может быть стабилен и при комнатной температуре, если он легирован с малопроцентным содержанием галлия, алюминия или церия. Если он находится в сплаве с этими металлами, то это позволяет ему быть использованным при сварке^[63]. Дельта-форма имеет более ярко выраженные характеристики металла, а по прочности и ковкости сравнима с алюминием. В ядерной промышленности ударная волна после микроядерного взрыва используется для того, чтобы сжать плутониевое ядро, основным свойством которого будет увеличение плотности по сравнению с α -формой. Данные действия позволяют достичь критической массы плутония для его дальнейшего использования^[118]. Последняя эpsilon-фаза показывает аномально высокий показатель атомной самодиффузии^[113].

Плутоний начинает уменьшаться в объёме, когда переходит в δ и δ' -фазы, что объясняется отрицательным коэффициентом термического расширения^[108].

Соединения и химические свойства

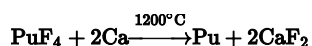
Актиноиды имеют схожие между собой химические свойства. Меньше всего степеней окисления имеют первые два актиноида и актиний (разброс значений от 3 до 5), далее эти значения увеличиваются и достигают своего пика у плутония и нептуния, затем, после америция, это число опять уменьшается. Данное свойство можно объяснить сложностью поведения электронов у ядер элементов. В 1944 году Гленном Сиборгом была выдвинута гипотеза об актиноидном сжатии, которая предполагает постепенное уменьшение радиусов ионов актиноидов (это же характерно и для лантаноидов). До её выдвижения первые актиноиды (торий, протактиний и уран) относили к элементам 4, 5 и 6-й групп соответственно^{[73][119]}.

Плутоний является химически активным металлом^[106]. В 1967 году советские учёные установили, что высшая степень окисления нептуния и плутония не 6, а 7^[120]. Для этого учёным пришлось окислять озном PuO_2^{2+} в щелочной среде^[7]. Плутоний проявляет четыре степени окисления в водных растворах и одну очень редкую^[100].

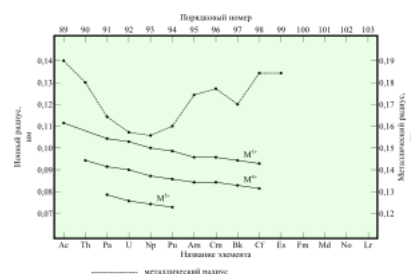
- Pu^{III} , в качестве Pu^{3+} (светло-фиолетовый),
- Pu^{IV} , в качестве Pu^{4+} (шоколадный),
- Pu^{V} , в качестве PuO_2^+ (светлый)^[12],
- Pu^{VI} , в качестве PuO_2^{2+} (светло-оранжевый),
- Pu^{VII} , в качестве PuO_5^{3-} (зелёный) — также присутствуют семивалентные ионы.

Цвета водных растворов плутония зависят от степени окисления и солей кислот^[121]. В них плутоний может находиться сразу в нескольких степенях окисления, что объясняется близостью его редокс-потенциалов^[122], что, в свою очередь, объясняется наличием 5f-электронов, которые расположены на локализованной и делокализованной зоне электронной орбитали^[123]. При pH 5—8 доминирует четырёхвалентный плутоний^[122], который наиболее устойчив среди остальных валентностей (степеней окисления)^[4].

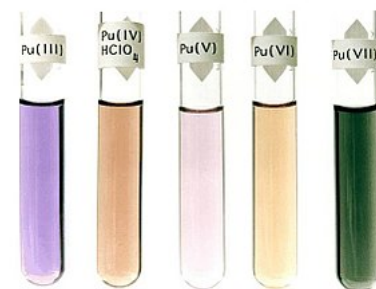
Металлический плутоний получается благодаря реакции его тетрафторида с барием, кальцием или литием при температуре 1200 °С^[124].



Он реагирует с кислотами, кислородом и их парами, но только не с щелочами^[63] (в растворах которых заметно не растворяется^[7], как и большинство актиноидов^[73]). Быстро растворяется в хлороводороде, иодоводороде, бромоводороде, 72 % хлорной кислоте, 85 % ортофосфорной кислоте, концентрированной CCl_3COOH , сульфаминовой кислоте и кипящей концентрированной азотной кислоте^[106]. Плутоний инертен к концентрированным серной и уксусной кислотам; в их растворах медленно растворяется, то есть реагирует и образует соответствующие соли^[10]. При температуре 135 °С металл самовоспламенится благодаря реакции с кислородом, а если его поместить в атмосферу тетрахлометана, то взорвётся^[42].



Изученный ионный и металлический радиусы для плутония^[2].



Различные степени окисления плутония в водных растворах.

Реакционная способность плутония в растворах ^[13]	
Раствор	Реакционная способность
Вода	При комнатной температуре реагирует очень медленно, не намного быстрее при температуре кипения; образуется H_2 и чёрный порошок $Pu(O)H$
$NaCl$ (водн.)	Даёт H_2 и чёрный порошок $Pu(O)H$
HNO_3	Не реагирует при любых концентрациях из-за пассивации; в присутствии 0,005 М HF кипящая концентрированная кислота сравнительно быстро растворяет плутоний
HCl , HBr	Очень быстро растворяется в концентрированных и умеренно разбавленных кислотах
HF	Реагирует очень медленно. Брикетты, полученные прессованием стружки металлического плутония, часто растворяются быстро и полностью с образованием нерастворимого PuF_3 ^[125]
72%-ая $HClO_4$	Быстрое растворение
H_2SO_4	Концентрированная кислота образует на металле защитное покрытие, которое останавливает начавшуюся медленную реакцию. Умеренно разбавленная медленно взаимодействует с металлом; образцы металла, содержащие примеси, могут полностью раствориться в 5 н. кислоте
85%-ая H_3PO_4	Реагирует сравнительно быстро
Уксусная кислота	Не взаимодействует с ледяной уксусной кислотой, даже с горячей; медленно взаимодействует с разбавленной кислотой
Трихлоруксусная кислота	Быстро растворяется в концентрированной кислоте; с разбавленной реагирует медленнее
Трифторуксусная кислота	Медленно растворяется в концентрированной кислоте; часто образуется остаток нерастворившегося оксида ^[126]
Сульфаминовая кислота	Довольно быстро растворяется в 1,7 М кислоте, причём температура должна быть ниже 40 °С, чтобы избежать разложения кислоты. Остаётся небольшое количество потенциально пирофорного осадка; в присутствии HNO_3 количество осадка больше ^[127]

Во влажном кислороде металл быстро окисляется, образуя оксиды и гидриды. Металлический плутоний реагирует с большинством газов при повышенных температурах^[106]. Если металл достаточно долго подвергается воздействию малых количеств влажного воздуха, то на его поверхности образуется диоксид плутония. Кроме того, может образоваться и его дигидрид, но только при недостатке кислорода^[63]. Ионы плутония во всех степенях окисления склонны к гидролизу и комплексообразованию^[64]. Способность образовывать комплексные соединения увеличивается в ряду $Pu^{5+} < Pu^{6+} < Pu^{3+} < Pu^{4+}$ [5].

При комнатной температуре свежий срез плутония имеет серебристый цвет, который затем тускнеет до серого^[56]. Благодаря тому, что поверхность металла становится пассивированной, он становится пирофорным, то есть способным к самовозгоранию, поэтому металлический плутоний, как правило, обрабатывается в инертной атмосфере аргона или азота. Расплавленный металл должен храниться в вакууме, либо в атмосфере инертного газа, чтобы избежать реакции с кислородом^[63].

Плутоний обратимо реагирует с чистым водородом, образуя гидрид плутония при температурах 25–50 °С^{[10][113]}. Кроме того, он легко взаимодействует с кислородом, образуя монооксид и диоксид плутония, а также оксиды (но не только их, см. раздел ниже) переменного состава (бертоллиды). Оксиды расширяют плутоний на 40 % от его изначального объёма. Металлический плутоний энергично реагирует с галогеноводородами и галогенами, в соединениях с которыми обычно проявляет степень окисления +3, однако известные галогениды состава PuF_4 и $PuCl_4$ ^{[10][128]}. При реакции с углеродом образует его карбид (PuC), с азотом — нитрид (при 900 °С), с кремнием — силицид ($PuSi_2$)^{[42][100]}. Карбид, нитрид, диоксид плутония имеют температуру плавления больше 2000 °С и потому применяются в качестве ядерного топлива^[7].

Тигли, используемые для хранения плутония, должны выдерживать его сильные окислительно-восстановительные свойства. Тугоплавкие металлы, такие, как тантал и вольфрам, наряду с более стабильными оксидами, боридами, карбидами, нитридами и силицидами, также могут выдержать свойства плутония. Плавка в электродуговой печи может быть использована для получения малых количеств металла без применения тиглей^[63].

Четырёхвалентный церий применяется в качестве химического симулянта плутония(IV)^[129].

Электронная структура: 5f-электроны

Плутоний является элементом, в котором 5f-электроны расположены на границе локализованных и делокализованных электронов, поэтому он считается одним из самых комплексных и трудных элементов для изучения^[123].

Аномальное поведение плутония обусловлено его электронной структурой. Энергетическая разница между 6d и 5f-электронами очень мала. Размеров 5f-оболочки вполне достаточно для того, чтобы они формировали атомную решётку между собой; это происходит на самой границе между локализованными и соединёнными между собой электронами. Близость электронных уровней приводит к формированию низкоэнергетической электронной конфигурации, с примерно одинаковыми уровнями энергии. Это приводит к формированию $5f^6 7s^2$ и $5f^5 7s^2 6d^1$ электронных оболочек, что приводит к сложности его химических свойств. 5f-электроны участвуют в формировании ковалентных связей и комплексных соединений у плутония^[113].

H																H						
PuH ₂ -a-27 PuH ₃																						
Li	Be	Соединения не образуются			Разрыв смешиваемости			Общая смешиваемость			B	C	N	O	F	N						
PuBe ₁₁																PuB ₂ PuB ₄ PuB ₆ PuB ₁₂	Pu ₂ C ₂ PuC PuC ₃ PuC ₂	PuN	(PuO)PuO ₂ Pu ₂ O ₃ Pu ₂ O ₅ Pu ₂ O ₇	PuF ₃ PuF ₄ PuF ₆		
Na	Mg	▲ потенциальные дельта-стабилизаторы			○ соли			△ дельта-стабилизаторы при резком охлаждении			○ сплавы получаются методами осаждения напылением или охлаждения при разбрызгивании			Al	Si	P	S	Cl	A			
PuNa ₁₁	PuMg ₂																PuAl (γ) PuAl (η) PuAl ₂ (θ) PuAl ₃ (I) PuAl ₄ (Z)	Pu ₂ Si ₂ Pu ₂ Si ₃ Pu ₂ Si ₄ Pu ₂ Si ₅ Pu ₂ Si ₆ Pu ₂ Si ₇ Pu ₂ Si ₈	PuP	PuS Pu ₂ S ₃ Pu ₂ S ₅ Pu ₂ S ₇	PuCl ₃ [PuCl ₄]	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	K					
PuK ₁₁	PuCa ₁₁	Pu ₃ Sc ₂ (C) Pu ₁₁ Sc ₃	Pu ₂ Ti ₃ (δ) Pu ₂ Ti ₃ (γ)			PuMn ₃ (C)	Pu ₂ Fe PuFe ₂	Pu ₂ Co Pu ₂ Co Pu ₂ Co ₂ PuCo ₃	Pu ₂ Ni PuNi ₂ PuNi ₃ Pu ₂ Ni ₁₇	PuCu ₂ PuCu ₄ PuCu ₆	PuZn ₂ Pu ₂ Zn ₉ Pu ₂ Zn ₂₂ PuZn ₁₇	Pu ₂ Ga Pu ₃ Ga Pu ₅ Ga Pu ₇ Ga Pu ₉ Ga Pu ₁₁ Ga Pu ₁₃ Ga Pu ₁₅ Ga Pu ₁₇ Ga Pu ₁₉ Ga Pu ₂₁ Ga Pu ₂₃ Ga Pu ₂₅ Ga Pu ₂₇ Ga Pu ₂₉ Ga Pu ₃₁ Ga Pu ₃₃ Ga Pu ₃₅ Ga Pu ₃₇ Ga Pu ₃₉ Ga Pu ₄₁ Ga Pu ₄₃ Ga Pu ₄₅ Ga Pu ₄₇ Ga Pu ₄₉ Ga Pu ₅₁ Ga Pu ₅₃ Ga Pu ₅₅ Ga Pu ₅₇ Ga Pu ₅₉ Ga Pu ₆₁ Ga Pu ₆₃ Ga Pu ₆₅ Ga Pu ₆₇ Ga Pu ₆₉ Ga Pu ₇₁ Ga Pu ₇₃ Ga Pu ₇₅ Ga Pu ₇₇ Ga Pu ₇₉ Ga Pu ₈₁ Ga Pu ₈₃ Ga Pu ₈₅ Ga Pu ₈₇ Ga Pu ₈₉ Ga Pu ₉₁ Ga Pu ₉₃ Ga Pu ₉₅ Ga Pu ₉₇ Ga Pu ₉₉ Ga Pu ₁₀₁ Ga Pu ₁₀₃ Ga Pu ₁₀₅ Ga Pu ₁₀₇ Ga Pu ₁₀₉ Ga Pu ₁₁₁ Ga Pu ₁₁₃ Ga Pu ₁₁₅ Ga Pu ₁₁₇ Ga Pu ₁₁₉ Ga Pu ₁₂₁ Ga Pu ₁₂₃ Ga Pu ₁₂₅ Ga Pu ₁₂₇ Ga Pu ₁₂₉ Ga Pu ₁₃₁ Ga Pu ₁₃₃ Ga Pu ₁₃₅ Ga Pu ₁₃₇ Ga Pu ₁₃₉ Ga Pu ₁₄₁ Ga Pu ₁₄₃ Ga Pu ₁₄₅ Ga Pu ₁₄₇ Ga Pu ₁₄₉ Ga Pu ₁₅₁ Ga Pu ₁₅₃ Ga Pu ₁₅₅ Ga Pu ₁₅₇ Ga Pu ₁₅₉ Ga Pu ₁₆₁ Ga Pu ₁₆₃ Ga Pu ₁₆₅ Ga Pu ₁₆₇ Ga Pu ₁₆₉ Ga Pu ₁₇₁ Ga Pu ₁₇₃ Ga Pu ₁₇₅ Ga Pu ₁₇₇ Ga Pu ₁₇₉ Ga Pu ₁₈₁ Ga Pu ₁₈₃ Ga Pu ₁₈₅ Ga Pu ₁₈₇ Ga Pu ₁₈₉ Ga Pu ₁₉₁ Ga Pu ₁₉₃ Ga Pu ₁₉₅ Ga Pu ₁₉₇ Ga Pu ₁₉₉ Ga Pu ₂₀₁ Ga Pu ₂₀₃ Ga Pu ₂₀₅ Ga Pu ₂₀₇ Ga Pu ₂₀₉ Ga Pu ₂₁₁ Ga Pu ₂₁₃ Ga Pu ₂₁₅ Ga Pu ₂₁₇ Ga Pu ₂₁₉ Ga Pu ₂₂₁ Ga Pu ₂₂₃ Ga Pu ₂₂₅ Ga Pu ₂₂₇ Ga Pu ₂₂₉ Ga Pu ₂₃₁ Ga Pu ₂₃₃ Ga Pu ₂₃₅ Ga Pu ₂₃₇ Ga Pu ₂₃₉ Ga Pu ₂₄₁ Ga Pu ₂₄₃ Ga Pu ₂₄₅ Ga Pu ₂₄₇ Ga Pu ₂₄₉ Ga Pu ₂₅₁ Ga Pu ₂₅₃ Ga Pu ₂₅₅ Ga Pu ₂₅₇ Ga Pu ₂₅₉ Ga Pu ₂₆₁ Ga Pu ₂₆₃ Ga Pu ₂₆₅ Ga Pu ₂₆₇ Ga Pu ₂₆₉ Ga Pu ₂₇₁ Ga Pu ₂₇₃ Ga Pu ₂₇₅ Ga Pu ₂₇₇ Ga Pu ₂₇₉ Ga Pu ₂₈₁ Ga Pu ₂₈₃ Ga Pu ₂₈₅ Ga Pu ₂₈₇ Ga Pu ₂₈₉ Ga Pu ₂₉₁ Ga Pu ₂₉₃ Ga Pu ₂₉₅ Ga Pu ₂₉₇ Ga Pu ₂₉₉ Ga Pu ₃₀₁ Ga Pu ₃₀₃ Ga Pu ₃₀₅ Ga Pu ₃₀₇ Ga Pu ₃₀₉ Ga Pu ₃₁₁ Ga Pu ₃₁₃ Ga Pu ₃₁₅ Ga Pu ₃₁₇ Ga Pu ₃₁₉ Ga Pu ₃₂₁ Ga Pu ₃₂₃ Ga Pu ₃₂₅ Ga Pu ₃₂₇ Ga Pu ₃₂₉ Ga Pu ₃₃₁ Ga Pu ₃₃₃ Ga Pu ₃₃₅ Ga Pu ₃₃₇ Ga Pu ₃₃₉ Ga Pu ₃₄₁ Ga Pu ₃₄₃ Ga Pu ₃₄₅ Ga Pu ₃₄₇ Ga Pu ₃₄₉ Ga Pu ₃₅₁ Ga Pu ₃₅₃ Ga Pu ₃₅₅ Ga Pu ₃₅₇ Ga Pu ₃₅₉ Ga Pu ₃₆₁ Ga Pu ₃₆₃ Ga Pu ₃₆₅ Ga Pu ₃₆₇ Ga Pu ₃₆₉ Ga Pu ₃₇₁ Ga Pu ₃₇₃ Ga Pu ₃₇₅ Ga Pu ₃₇₇ Ga Pu ₃₇₉ Ga Pu ₃₈₁ Ga Pu ₃₈₃ Ga Pu ₃₈₅ Ga Pu ₃₈₇ Ga Pu ₃₈₉ Ga Pu ₃₉₁ Ga Pu ₃₉₃ Ga Pu ₃₉₅ Ga Pu ₃₉₇ Ga Pu ₃₉₉ Ga Pu ₄₀₁ Ga Pu ₄₀₃ Ga Pu ₄₀₅ Ga Pu ₄₀₇ Ga Pu ₄₀₉ Ga Pu ₄₁₁ Ga Pu ₄₁₃ Ga Pu ₄₁₅ Ga Pu ₄₁₇ Ga Pu ₄₁₉ Ga Pu ₄₂₁ Ga Pu ₄₂₃ Ga Pu ₄₂₅ Ga Pu ₄₂₇ Ga Pu ₄₂₉ Ga Pu ₄₃₁ Ga Pu ₄₃₃ Ga Pu ₄₃₅ Ga Pu ₄₃₇ Ga Pu ₄₃₉ Ga Pu ₄₄₁ Ga Pu ₄₄₃ Ga Pu ₄₄₅ Ga Pu ₄₄₇ Ga Pu ₄₄₉ Ga Pu ₄₅₁ Ga Pu ₄₅₃ Ga Pu ₄₅₅ Ga Pu ₄₅₇ Ga Pu ₄₅₉ Ga Pu ₄₆₁ Ga Pu ₄₆₃ Ga Pu ₄₆₅ Ga Pu ₄₆₇ Ga Pu ₄₆₉ Ga Pu ₄₇₁ Ga Pu ₄₇₃ Ga Pu ₄₇₅ Ga Pu ₄₇₇ Ga Pu ₄₇₉ Ga Pu ₄₈₁ Ga Pu ₄₈₃ Ga Pu ₄₈₅ Ga Pu ₄₈₇ Ga Pu ₄₈₉ Ga Pu ₄₉₁ Ga Pu ₄₉₃ Ga Pu ₄₉₅ Ga Pu ₄₉₇ Ga Pu ₄₉₉ Ga Pu ₅₀₁ Ga Pu ₅₀₃ Ga Pu ₅₀₅ Ga Pu ₅₀₇ Ga Pu ₅₀₉ Ga Pu ₅₁₁ Ga Pu ₅₁₃ Ga Pu ₅₁₅ Ga Pu ₅₁₇ Ga Pu ₅₁₉ Ga Pu ₅₂₁ Ga Pu ₅₂₃ Ga Pu ₅₂₅ Ga Pu ₅₂₇ Ga Pu ₅₂₉ Ga Pu ₅₃₁ Ga Pu ₅₃₃ Ga Pu ₅₃₅ Ga Pu ₅₃₇ Ga Pu ₅₃₉ Ga Pu ₅₄₁ Ga Pu ₅₄₃ Ga Pu ₅₄₅ Ga Pu ₅₄₇ Ga Pu ₅₄₉ Ga Pu ₅₅₁ Ga Pu ₅₅₃ Ga Pu ₅₅₅ Ga Pu ₅₅₇ Ga Pu ₅₅₉ Ga Pu ₅₆₁ Ga Pu ₅₆₃ Ga Pu ₅₆₅ Ga Pu ₅₆₇ Ga Pu ₅₆₉ Ga Pu ₅₇₁ Ga Pu ₅₇₃ Ga Pu ₅₇₅ Ga Pu ₅₇₇ Ga Pu ₅₇₉ Ga Pu ₅₈₁ Ga Pu ₅₈₃ Ga Pu ₅₈₅ Ga Pu ₅₈₇ Ga Pu ₅₈₉ Ga Pu ₅₉₁ Ga Pu ₅₉₃ Ga Pu ₅₉₅ Ga Pu ₅₉₇ Ga Pu ₅₉₉ Ga Pu ₆₀₁ Ga Pu ₆₀₃ Ga Pu ₆₀₅ Ga Pu ₆₀₇ Ga Pu ₆₀₉ Ga Pu ₆₁₁ Ga Pu ₆₁₃ Ga Pu ₆₁₅ Ga Pu ₆₁₇ Ga Pu ₆₁₉ Ga Pu ₆₂₁ Ga Pu ₆₂₃ Ga Pu ₆₂₅ Ga Pu ₆₂₇ Ga Pu ₆₂₉ Ga Pu ₆₃₁ Ga Pu ₆₃₃ Ga Pu ₆₃₅ Ga Pu ₆₃₇ Ga Pu ₆₃₉ Ga Pu ₆₄₁ Ga Pu ₆₄₃ Ga Pu ₆₄₅ Ga Pu ₆₄₇ Ga Pu ₆₄₉ Ga Pu ₆₅₁ Ga Pu ₆₅₃ Ga Pu ₆₅₅ Ga Pu ₆₅₇ Ga Pu ₆₅₉ Ga Pu ₆₆₁ Ga Pu ₆₆₃ Ga Pu ₆₆₅ Ga Pu ₆₆₇ Ga Pu ₆₆₉ Ga Pu ₆₇₁ Ga Pu ₆₇₃ Ga Pu ₆₇₅ Ga Pu ₆₇₇ Ga Pu ₆₇₉ Ga Pu ₆₈₁ Ga Pu ₆₈₃ Ga Pu ₆₈₅ Ga Pu ₆₈₇ Ga Pu ₆₈₉ Ga Pu ₆₉₁ Ga Pu ₆₉₃ Ga Pu ₆₉₅ Ga Pu ₆₉₇ Ga Pu ₆₉₉ Ga Pu ₇₀₁ Ga Pu ₇₀₃ Ga Pu ₇₀₅ Ga Pu ₇₀₇ Ga Pu ₇₀₉ Ga Pu ₇₁₁ Ga Pu ₇₁₃ Ga Pu ₇₁₅ Ga Pu ₇₁₇ Ga Pu ₇₁₉ Ga Pu ₇₂₁ Ga Pu ₇₂₃ Ga Pu ₇₂₅ Ga Pu ₇₂₇ Ga Pu ₇₂₉ Ga Pu ₇₃₁ Ga Pu ₇₃₃ Ga Pu ₇₃₅ Ga Pu ₇₃₇ Ga Pu ₇₃₉ Ga Pu ₇₄₁ Ga Pu ₇₄₃ Ga Pu ₇₄₅ Ga Pu ₇₄₇ Ga Pu ₇₄₉ Ga Pu ₇₅₁ Ga Pu ₇₅₃ Ga Pu ₇₅₅ Ga Pu ₇₅₇ Ga Pu ₇₅₉ Ga Pu ₇₆₁ Ga Pu ₇₆₃ Ga Pu ₇₆₅ Ga Pu ₇₆₇ Ga Pu ₇₆₉ Ga Pu ₇₇₁ Ga Pu ₇₇₃ Ga Pu ₇₇₅ Ga Pu ₇₇₇ Ga Pu ₇₇₉ Ga Pu ₇₈₁ Ga Pu ₇₈₃ Ga Pu ₇₈₅ Ga Pu ₇₈₇ Ga Pu ₇₈₉ Ga Pu ₇₉₁ Ga Pu ₇₉₃ Ga Pu ₇₉₅ Ga Pu ₇₉₇ Ga Pu ₇₉₉ Ga Pu ₈₀₁ Ga Pu ₈₀₃ Ga Pu ₈₀₅ Ga Pu ₈₀₇ Ga Pu ₈₀₉ Ga Pu ₈₁₁ Ga Pu ₈₁₃ Ga Pu ₈₁₅ Ga Pu ₈₁₇ Ga Pu ₈₁₉ Ga Pu ₈₂₁ Ga Pu ₈₂₃ Ga Pu ₈₂₅ Ga Pu ₈₂₇ Ga Pu ₈₂₉ Ga Pu ₈₃₁ Ga Pu ₈₃₃ Ga Pu ₈₃₅ Ga Pu ₈₃₇ Ga Pu ₈₃₉ Ga Pu ₈₄₁ Ga Pu ₈₄₃ Ga Pu ₈₄₅ Ga Pu ₈₄₇ Ga Pu ₈₄₉ Ga Pu ₈₅₁ Ga Pu ₈₅₃ Ga Pu ₈₅₅ Ga Pu ₈₅₇ Ga Pu ₈₅₉ Ga Pu ₈₆₁ Ga Pu ₈₆₃ Ga Pu ₈₆₅ Ga Pu ₈₆₇ Ga Pu ₈₆₉ Ga Pu ₈₇₁ Ga Pu ₈₇₃ Ga Pu ₈₇₅ Ga Pu ₈₇₇ Ga Pu ₈₇₉ Ga Pu ₈₈₁ Ga Pu ₈₈₃ Ga Pu ₈₈₅ Ga Pu ₈₈₇ Ga Pu ₈₈₉ Ga Pu ₈₉₁ Ga Pu ₈₉₃ Ga Pu ₈₉₅ Ga Pu ₈₉₇ Ga Pu ₈₉₉ Ga Pu ₉₀₁ Ga Pu ₉₀₃ Ga Pu ₉₀₅ Ga Pu ₉₀₇ Ga Pu ₉₀₉ Ga Pu ₉₁₁ Ga Pu ₉₁₃ Ga Pu ₉₁₅ Ga Pu ₉₁₇ Ga Pu ₉₁₉ Ga Pu ₉₂₁ Ga Pu ₉₂₃ Ga Pu ₉₂₅ Ga Pu ₉₂₇ Ga Pu ₉₂₉ Ga Pu ₉₃₁ Ga Pu ₉₃₃ Ga Pu ₉₃₅ Ga Pu ₉₃₇ Ga Pu ₉₃₉ Ga Pu ₉₄₁ Ga Pu ₉₄₃ Ga Pu ₉₄₅ Ga Pu ₉₄₇ Ga Pu ₉₄₉ Ga Pu ₉₅₁ Ga Pu ₉₅₃ Ga Pu ₉₅₅ Ga Pu ₉₅₇ Ga Pu ₉₅₉ Ga Pu ₉₆₁ Ga Pu ₉₆₃ Ga Pu ₉₆₅ Ga Pu ₉₆₇ Ga Pu ₉₆₉ Ga Pu ₉₇₁ Ga Pu ₉₇₃ Ga Pu ₉₇₅ Ga Pu ₉₇₇ Ga Pu ₉₇₉ Ga Pu ₉₈₁ Ga Pu ₉₈₃ Ga Pu ₉₈₅ Ga Pu ₉₈₇ Ga Pu ₉₈₉ Ga Pu ₉₉₁ Ga Pu ₉₉₃ Ga Pu ₉₉₅ Ga Pu ₉₉₇ Ga Pu ₉₉₉ Ga Pu ₁₀₀₁ Ga Pu ₁₀₀₃ Ga Pu ₁₀₀₅ Ga Pu ₁₀₀₇ Ga Pu ₁₀₀₉ Ga Pu ₁₀₁₁ Ga Pu ₁₀₁₃ Ga Pu ₁₀₁₅ Ga Pu ₁₀₁₇ Ga Pu ₁₀₁₉ Ga Pu ₁₀₂₁ Ga Pu ₁₀₂₃ Ga Pu ₁₀₂₅ Ga Pu ₁₀₂₇ Ga Pu ₁₀₂₉ Ga Pu ₁₀₃₁ Ga Pu ₁₀₃₃ Ga Pu ₁₀₃₅ Ga Pu ₁₀₃₇ Ga Pu ₁₀₃₉ Ga Pu ₁₀₄₁ Ga Pu ₁₀₄₃ Ga Pu ₁₀₄₅ Ga Pu ₁₀₄₇ Ga Pu ₁₀₄₉ Ga Pu ₁₀₅₁ Ga Pu ₁₀₅₃ Ga Pu ₁₀₅₅ Ga Pu ₁₀₅₇ Ga Pu ₁₀₅₉ Ga Pu ₁₀₆₁ Ga Pu ₁₀₆₃ Ga Pu ₁₀₆₅ Ga Pu ₁₀₆₇ Ga Pu ₁₀₆₉ Ga Pu ₁₀₇₁ Ga Pu ₁₀₇₃ Ga Pu ₁₀₇₅ Ga Pu ₁₀₇₇ Ga Pu ₁₀₇₉ Ga Pu ₁₀₈₁ Ga Pu ₁₀₈₃ Ga Pu ₁₀₈₅ Ga Pu ₁₀₈₇ Ga Pu ₁₀₈₉ Ga Pu ₁₀₉₁ Ga Pu ₁₀₉₃ Ga Pu ₁₀₉₅ Ga Pu ₁₀₉₇ Ga Pu ₁₀₉₉ Ga Pu ₁₁₀₁ Ga Pu ₁₁₀₃ Ga Pu ₁₁₀₅ Ga Pu ₁₁₀₇ Ga Pu ₁₁₀₉ Ga Pu ₁₁₁₁ Ga Pu ₁₁₁₃ Ga Pu ₁₁₁₅ Ga Pu ₁₁₁₇ Ga Pu ₁₁₁₉ Ga Pu ₁₁₂₁ Ga Pu ₁₁₂₃ Ga Pu ₁₁₂₅ Ga Pu ₁₁₂₇ Ga Pu ₁₁₂₉ Ga Pu ₁₁₃₁ Ga Pu ₁₁₃₃ Ga Pu ₁₁₃₅ Ga Pu ₁₁₃₇ Ga Pu ₁₁₃₉ Ga Pu ₁₁₄₁ Ga Pu ₁₁₄₃ Ga Pu ₁₁₄₅ Ga Pu ₁₁₄₇ Ga Pu ₁₁₄₉ Ga Pu ₁₁₅₁ Ga Pu ₁₁₅₃ Ga Pu ₁₁₅₅ Ga Pu ₁₁₅₇ Ga Pu ₁₁₅₉ Ga Pu ₁₁₆₁ Ga Pu ₁₁₆₃ Ga Pu ₁₁₆₅ Ga Pu ₁₁₆₇ Ga Pu ₁₁₆₉ Ga Pu ₁₁₇₁ Ga Pu ₁₁₇₃ Ga Pu ₁₁₇₅ Ga Pu ₁₁₇₇ Ga Pu ₁₁₇₉ Ga Pu ₁₁₈₁ Ga Pu ₁₁₈₃ Ga Pu ₁₁₈₅ Ga Pu ₁₁₈₇ Ga Pu ₁₁₈₉ Ga Pu ₁₁₉₁ Ga Pu ₁₁₉₃ Ga Pu ₁₁₉₅ Ga Pu ₁₁₉₇ Ga Pu ₁₁₉₉ Ga Pu ₁₂₀₁ Ga Pu ₁₂₀₃ Ga Pu ₁₂₀₅ Ga Pu ₁₂₀₇ Ga Pu ₁₂₀₉ Ga Pu ₁₂₁₁ Ga Pu ₁₂₁₃ Ga Pu ₁₂₁₅ Ga Pu ₁₂₁₇ Ga Pu ₁₂₁₉ Ga Pu ₁₂₂₁ Ga Pu ₁₂₂₃ Ga Pu ₁₂₂₅ Ga Pu ₁₂₂₇ Ga Pu ₁₂₂₉ Ga Pu ₁₂₃₁ Ga Pu ₁₂₃₃ Ga Pu ₁₂₃₅ Ga Pu ₁₂₃₇ Ga Pu ₁₂₃₉ Ga Pu ₁₂₄₁ Ga Pu ₁₂₄₃ Ga Pu ₁₂₄₅ Ga Pu ₁₂₄₇ Ga Pu ₁₂₄₉ Ga Pu ₁₂₅₁ Ga Pu ₁₂₅₃ Ga Pu ₁₂₅₅ Ga Pu ₁₂₅₇ Ga Pu ₁₂₅₉ Ga Pu ₁₂₆₁ Ga Pu ₁₂₆₃ Ga Pu ₁₂₆₅ Ga Pu ₁₂₆₇ Ga Pu ₁₂₆₉ Ga Pu ₁₂₇₁ Ga Pu ₁₂₇₃ Ga Pu ₁₂₇₅ Ga Pu ₁₂₇₇ Ga Pu ₁₂₇₉ Ga Pu ₁₂₈₁ Ga Pu ₁₂₈₃ Ga Pu ₁₂₈₅ Ga Pu ₁₂₈₇ Ga Pu ₁₂₈₉ Ga Pu ₁₂₉₁ Ga Pu ₁₂₉₃ Ga Pu ₁₂₉₅ Ga Pu ₁₂₉₇ Ga Pu ₁₂₉₉ Ga Pu ₁₃₀₁ Ga Pu ₁₃₀₃ Ga Pu ₁₃₀₅ Ga Pu ₁₃₀₇ Ga Pu ₁₃₀₉ Ga Pu ₁₃₁₁ Ga Pu ₁₃₁₃ Ga Pu ₁₃₁₅ Ga Pu ₁₃₁₇ Ga Pu ₁₃₁₉ Ga Pu ₁₃₂₁ Ga Pu ₁₃₂₃ Ga Pu ₁₃₂₅ Ga Pu ₁₃₂₇ Ga Pu ₁₃₂₉ Ga Pu ₁₃₃₁ Ga Pu ₁₃₃₃ Ga Pu ₁₃₃₅ Ga Pu ₁₃₃₇ Ga Pu ₁₃₃₉ Ga Pu ₁₃₄₁ Ga Pu ₁₃₄₃ Ga Pu ₁₃₄₅ Ga Pu ₁₃₄₇ Ga Pu ₁₃₄₉ Ga Pu ₁₃₅₁ Ga Pu ₁₃₅₃ Ga Pu ₁₃₅₅ Ga Pu ₁₃₅₇ Ga Pu ₁₃₅₉ Ga Pu ₁₃₆₁ Ga Pu ₁₃₆₃ Ga Pu ₁₃₆₅ Ga Pu ₁₃₆₇ Ga Pu ₁₃₆₉ Ga Pu ₁₃₇₁ Ga Pu ₁₃₇₃ Ga Pu ₁₃₇₅ Ga Pu ₁₃₇₇ Ga Pu ₁₃₇₉ Ga Pu ₁₃₈₁ Ga Pu ₁₃₈₃ Ga Pu ₁₃₈₅ Ga Pu ₁₃₈₇ Ga Pu ₁₃₈₉ Ga Pu ₁₃₉₁ Ga Pu ₁₃₉₃ Ga Pu ₁₃₉₅ Ga Pu ₁₃₉₇ Ga Pu ₁₃₉₉ Ga Pu ₁₄₀₁ Ga Pu ₁₄₀₃ Ga Pu ₁₄₀₅ Ga Pu ₁₄₀₇ Ga Pu ₁₄₀₉ Ga Pu ₁₄₁₁ Ga Pu ₁₄₁₃ Ga Pu ₁₄₁₅ Ga Pu ₁₄₁₇ Ga Pu ₁₄₁₉ Ga Pu ₁₄₂₁ Ga Pu ₁₄₂₃ Ga Pu ₁₄₂₅ Ga Pu ₁₄₂₇ Ga Pu ₁₄₂₉ Ga Pu ₁₄₃₁ Ga Pu ₁₄₃₃ Ga Pu ₁₄₃₅ Ga Pu ₁₄₃₇ Ga Pu ₁₄₃₉ Ga Pu ₁₄₄₁ Ga Pu ₁₄₄₃ Ga Pu ₁₄₄₅ Ga Pu ₁₄₄₇ Ga Pu ₁₄₄₉ Ga Pu ₁₄₅₁ Ga Pu ₁₄₅₃ Ga Pu ₁₄₅₅ Ga Pu ₁₄₅₇ Ga Pu ₁₄₅₉ Ga Pu ₁₄₆₁ Ga Pu ₁₄₆₃ Ga Pu ₁₄₆₅ Ga Pu ₁₄₆₇ Ga Pu ₁₄₆₉ Ga Pu ₁₄₇₁ Ga Pu ₁₄₇₃ Ga Pu ₁₄₇₅ Ga Pu ₁₄₇₇ Ga Pu ₁₄₇₉ Ga Pu ₁₄₈₁ Ga Pu ₁₄₈₃ Ga Pu ₁₄₈₅ Ga Pu ₁₄₈₇ Ga Pu ₁₄₈₉ Ga Pu ₁₄₉₁ Ga Pu ₁₄₉₃ Ga Pu ₁₄₉₅ Ga Pu ₁₄₉₇ Ga Pu ₁₄₉₉ Ga Pu ₁₅₀₁ Ga Pu ₁₅₀₃ Ga Pu ₁₅₀₅ Ga Pu ₁₅₀₇ Ga Pu ₁₅₀₉ Ga Pu ₁₅₁₁ Ga Pu ₁₅₁₃ Ga Pu ₁₅₁₅ Ga Pu ₁₅₁₇ Ga Pu ₁₅₁₉ Ga Pu ₁₅₂₁ Ga Pu ₁₅₂₃ Ga Pu ₁₅₂₅ Ga Pu ₁₅₂₇ Ga Pu ₁₅₂₉ Ga Pu ₁₅₃₁ Ga Pu ₁₅₃₃ Ga Pu ₁₅₃₅ Ga Pu ₁₅₃₇ Ga Pu ₁₅₃₉ Ga Pu ₁₅₄₁ Ga Pu ₁₅₄₃ Ga Pu ₁₅₄₅ Ga Pu ₁₅₄₇ Ga Pu ₁₅₄₉ Ga Pu ₁₅₅₁ Ga Pu ₁₅₅₃ Ga Pu ₁₅₅₅ Ga Pu ₁₅₅₇ Ga Pu ₁₅₅₉ Ga Pu ₁₅₆₁ Ga Pu ₁₅₆₃ Ga Pu ₁₅₆₅ Ga Pu ₁₅₆₇ Ga Pu ₁₅₆₉ Ga Pu ₁₅₇₁ Ga Pu ₁₅₇₃ Ga Pu ₁₅₇₅ Ga Pu ₁₅₇₇ Ga Pu ₁₅₇₉ Ga Pu ₁₅₈₁ Ga Pu ₁₅₈₃ Ga Pu ₁₅₈₅ Ga Pu ₁₅₈₇ Ga Pu ₁₅₈₉ Ga Pu ₁₅₉₁ Ga Pu ₁₅₉₃ Ga Pu ₁₅₉₅ Ga Pu ₁₅₉₇ Ga Pu ₁₅₉₉ Ga Pu ₁₆₀₁ Ga Pu ₁₆₀₃ Ga Pu ₁₆₀₅ Ga Pu ₁₆₀₇ Ga Pu ₁₆₀₉ Ga Pu ₁₆₁₁ Ga Pu ₁₆₁₃ Ga Pu ₁₆₁₅ Ga Pu ₁₆₁₇ Ga Pu ₁₆₁₉ Ga Pu ₁₆₂₁ Ga Pu ₁₆₂₃ Ga Pu ₁₆₂₅ Ga Pu ₁₆₂₇ Ga Pu ₁₆₂₉ Ga Pu ₁₆₃₁ Ga Pu ₁₆₃₃ Ga Pu ₁₆₃₅ Ga Pu ₁₆₃₇ Ga Pu ₁₆₃₉ Ga Pu ₁₆										

Минимальные количества плутония гипотетически могут находиться в человеческом организме, учитывая, что было проведено около 550 ядерных испытаний, так или иначе связанных с плутонием. Большинство подводных и воздушных ядерных испытаний было прекращено благодаря договору о запрещении ядерных испытаний, который был подписан в 1963 году и ратифицирован СССР, США, Великобританией и другими государствами. Некоторые государства продолжили ядерные испытания.

Именно потому, что плутоний-239 был синтезирован специально для ядерных испытаний, на сегодняшний день он является самым распространённым и часто используемым синтезированным нуклидом из всех изотопов плутония^[42].

Изотопы

Открытие изотопов плутония началось с 1940 года, когда был получен плутоний-238. В настоящее время он считается одним из важнейших нуклидов. Годом позднее был открыт самый важный нуклид — плутоний-239^[55], впоследствии нашедший своё применение в ядерной и космической промышленности. Химический элемент является актиноидом, один из его изотопов, который упомянут выше, входит в основную тройку делящихся изотопов^[49] (уран-233 и уран-235 являются остальными двумя)^[136]. Как и изотопы всех актиноидов, все изотопы плутония являются радиоактивными^[137].

Наиболее важные ядерные свойства нуклидов плутония перечислены в таблице:

Ядерные свойства изотопов плутония ^{[13][138][139][140]}				
Массовое число	Период полураспада	Тип распада	Основное излучение, МэВ (выход, в %)	Способ получения
228	1,1 с	$\alpha \approx 100\%$ $\beta^+ < 0,1$	7,950	
229	$> 2 \cdot 10^{-5}$ с	α	7,590	
230	1,7 мин	$\alpha \leq 100\%$	7,175	
231	8,6 мин	$\beta^+ \leq 99,8\%$ $\alpha \geq 0,2\%$	4,007	
232	34 мин	$\alpha \geq 80\%$ $\alpha \leq 20\%$	α 6,60 (62 %) 6,54 (38 %)	${}^{233}_{92}\text{U}(\alpha, 5n)$
233	20,9 мин	α 99,88 % α 0,12 %	α 6,30 γ 0,235	${}^{233}_{92}\text{U}(\alpha, 4n)$
234	8,8 ч	α 94 % α 6 %	α 6,202 (68 %) 6,151 (32 %)	${}^{235}_{92}\text{U}(\alpha, 3n)$
235	25,6 мин	α $> 99\%$ α $3 \cdot 10^{-3}\%$	α 5,85 γ 0,049	${}^{235}_{92}\text{U}(\alpha, 4n)$ ${}^{235}_{92}\text{U}(\alpha, 2n)$
236	2,85 лет $3,5 \cdot 10^9$ лет	α СД	α 5,768 (69 %) 5,721 (31 %)	${}^{235}_{92}\text{U}(\alpha, 3n)$ Доч. ${}^{236}_{93}\text{Np}$
237	45,4 сут	α $> 99\%$ α $3,3 \cdot 10^{-3}\%$	α 5,65 (21 %) 5,36 (79 %)	${}^{235}_{92}\text{U}(\alpha, 2n)$ ${}^{237}_{93}\text{Np}(d, 2n)$
238	87,74 лет $4,8 \cdot 10^{10}$ лет	α СД	α 5,499 (70,9 %) 5,457 (29 %)	Доч. ${}^{242}_{96}\text{Cm}$ Доч. ${}^{238}_{93}\text{Np}$
239	$2,41 \cdot 10^4$ лет $5,5 \cdot 10^{15}$ лет	α СД	α 5,155 (73,3 %) 5,143 (15,1 %) γ 0,129	Доч. ${}^{239}_{93}\text{Np}$ Захват нейтронов
240	$6,563 \cdot 10^3$ лет $1,34 \cdot 10^{11}$ лет	α СД	α 5,168 (72,8 %) 5,123 (27,1 %)	Многokратный захват нейтронов
241	14,4 года	$\beta^- > 99\%$ α $2,41 \cdot 10^{-3}\%$	α 4,896 (83,2 %) 4,853 (21,1 %) β^- 0,021 γ 0,149	Многokратный захват нейтронов
242	$3,76 \cdot 10^5$ лет $6,8 \cdot 10^{10}$ лет	α СД	α 4,901 (74 %) 4,857 (26 %)	Многokратный захват нейтронов
243	4,956 ч	β^-	β^- 0,58 γ 0,084	Многokратный захват нейтронов
244	$8,26 \cdot 10^7$ лет $6,6 \cdot 10^{10}$ лет	α СД	α 4,589 (81 %) 4,546 (19 %)	Многokратный захват нейтронов
245	10,5 ч	β^-	β^- 1,28 γ 0,327	${}^{244}_{94}\text{Pu}(n, \gamma)$
246	10,85 сут	β^-	β^- 0,384 γ 0,224	${}^{245}_{94}\text{Pu}(n, \gamma)$

Из изотопов плутония на данный момент известно о существовании 19-ти его нуклидов с массовыми числами 228—247^[140]. Только 4 из них нашли своё применение^[15]. Свойства изотопов имеют некоторую характерную особенность, по которой можно судить об их дальнейшем изучении — чётные изотопы имеют большие периоды полураспада, чем нечётные (однако данное предположение относится только к менее важным его нуклидам).

Министерство энергетики США делит смеси плутония на три вида^[141]:

1. оружейный плутоний (содержание ^{240}Pu в ^{239}Pu менее 7 %)
2. топливный плутоний (от 7 до 18 % ^{240}Pu) и
3. реакторный плутоний (содержание ^{240}Pu более 18 %)

Термин «сверхчистый плутоний» используется для описания смеси изотопов плутония, в которых содержится 2—3 процента ^{240}Pu ^[141].

Всего два изотопа этого элемента (^{239}Pu и ^{241}Pu) являются более способными к ядерному делению, нежели остальные; более того, это единственные изотопы, которые подвергаются ядерному делению при действии тепловых нейтронов^[141]. Среди продуктов взрыва термоядерных бомб обнаружены также ^{247}Pu и ^{255}Pu ^[4], периоды полураспада которых несоизмеримо малы.



Кольцо чистого, электрорафинированного оружейного плутония (99,9 %).

Изотопы и синтез

Известны около 20 изотопов плутония, все они радиоактивны. Самым долгоживущим из них является плутоний-244, с периодом полураспада 80,8 млн лет; плутоний-242 имеет более короткий период полураспада — 372 300 лет; плутоний-239 — 24 110 лет. Все остальные изотопы имеют период полураспада меньше 7 тыс. лет. Этот элемент имеет 8 метастабильных состояний, периоды полураспада этих изомеров не превышают 1 с^[111].

Массовое число известных изотопов элемента варьируется от 228 до 247. Все они испытывают один или несколько типов радиоактивного распада:

- электронный захват (и, при достаточной энергии, позитронный бета-распад) с образованием изотопов нептуния;
- бета-минус-распад с образованием изотопов америция;
- альфа-распад с образованием изотопов урана;
- спонтанное деление с образованием широкого спектра дочерних изотопов элементов из средней части периодической таблицы, многие из которых β^- -активны.

Основным каналом распада наиболее лёгких изотопов плутония (с 228 по 231) является альфа-распад, хотя канал электронного захвата для них также открыт. Основным каналом распада лёгких изотопов плутония (с 232 по 235 включительно) является электронный захват, с ним конкурирует альфа-распад. Основными каналами радиоактивного распада изотопов с массовыми числами между 236 и 244 (кроме ^{237}Pu ^[142], ^{241}Pu ^[142] и ^{243}Pu) являются альфа-распад и (с меньшей вероятностью) спонтанное деление. Основным каналом распада изотопов плутония, массовые числа которых превосходят 244 (а также ^{243}Pu и ^{241}Pu), является бета-минус-распад в изотопы америция (95 протонов). Плутоний-241 является членом «вымершего» радиоактивного ряда нептуния^{[56][111]}.

Бета-стабильными (то есть испытывающими лишь распад с изменением массового числа) являются изотопы с массовыми числами 236, 238, 239, 240, 242, 244.

Синтез плутония

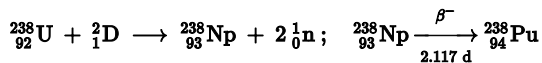
Плутоний в промышленных масштабах получается двумя путями^[141]:

1. облучением урана (см. реакцию ниже), содержащегося в ядерных реакторах;
2. облучением в реакторах трансурановых элементов, выделенных из отработанного топлива.

После облучения в обоих случаях выполняется отделение химическими способами плутония от урана, трансурановых элементов и продуктов деления.

Плутоний-238

Плутоний-238, использующийся в радиоизотопных генераторах энергии, лабораторно может синтезироваться в обменной (d, 2n)-реакции на уране-238:



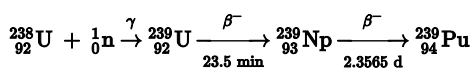
В данном процессе дейтрон попадает в ядро урана-238, в результате чего образуется нептуний-238 и два нейтрона. Далее нептуний-238 испытывает бета-минус-распад в плутоний-238. Именно в этой реакции был впервые получен плутоний (1941, Сиборг). Однако она неэкономична. В промышленности плутоний-238 получают двумя путями:

- выделением из облучённого ядерного топлива (в смеси с другими изотопами плутония, разделение которых очень дорого), поэтому чистый плутоний-238 таким методом не нарабатывается
- с помощью нейтронного облучения в реакторах нептуния-237.

Цена одного килограмма плутония-238 составляет примерно 1 млн долларов США^[143].

Плутоний-239

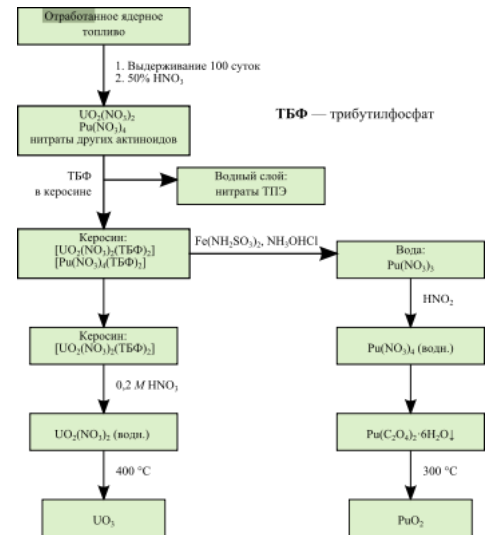
Плутоний-239, делящийся изотоп, используемый в ядерном оружии и в ядерной энергетике, промышленно синтезируется^[10] в ядерных реакторах (в том числе в энергетических как побочный продукт) с помощью следующей реакции при участии ядер урана и нейтронов с помощью бета-минус-распада и с участием изотопов нептуния как промежуточного продукта распада^[144]:



Нейтроны, излучаемые при делении урана-235, захватываются ураном-238 с образованием урана-239; затем через цепочку двух β^- -распадов образуются нептуний-239 и далее плутоний-239^[145]. Сотрудники засекреченной британской группы Tube Alloys, которые занимались изучением плутония во время Второй мировой войны, предсказали существование данной реакции в 1940 г.

Тяжёлые изотопы плутония

Более тяжёлые изотопы нарабатываются в реакторах из ^{239}Pu по цепочке последовательных нейтронных захватов, каждый из которых увеличивает массовое число нуклида на единицу.

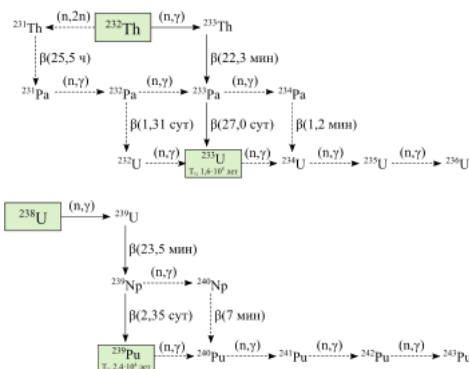


Методы экстракции плутония и урана.

Свойства некоторых изотопов

Изотопы плутония претерпевают радиоактивный распад, вследствие которого выделяется тепловая энергия. Разные изотопы излучают разное количество тепла. Тепловыделение обычно записывается в пересчёте на Вт/кг или мВт/кг. В случаях, когда плутоний присутствует в больших количествах и нет теплоотвода, тепловая энергия может расплавить содержащий плутоний материал.

Все изотопы плутония способны к ядерному делению (при воздействии нейтрона)^[146] и излучают γ -частицы.



Ядерные циклы, позволяющие получать более тяжёлые изотопы плутония.

Изотоп	Тип распада	Период полураспада (в годах)	Тепловыделение (Вт/кг)	Спонтанное деление нейтроны (1/(г·с))	Комментарий
²³⁸ Pu	альфа в ²³⁴ U	87,74	560	2600	Очень высокая температура распада. Даже в небольших количествах может привести к саморазогреву. Используется в РТГ.
²³⁹ Pu	альфа в ²³⁵ U	24100	1,9	0,022	Основной ядерный продукт.
²⁴⁰ Pu	альфа в ²³⁶ U, спонтанное деление	6560	6,8	910	Является основной примесью в плутонии-239. Высокий показатель спонтанного деления не позволяет использовать в ядерной промышленности.
²⁴¹ Pu	бета в ²⁴¹ Am	14,4	4,2	0,049	Распадается до америция-241; его накопление представляет угрозу для полученных образцов.
²⁴² Pu	альфа в ²³⁸ U	376000	0,1	1700	—

Плутоний-236 был найден в плутониевой фракции, полученной из природного урана, при измерении радионизлучения которой наблюдался пробег α -частиц, равный 4,35 см (что соответствует 5,75 МэВ). Было установлено, что данная группа относилась к изотопу ²³⁶Pu, образуемому благодаря реакции ²³⁵U($\alpha,3n$)²³⁶Pu. Позднее было обнаружено, что возможны такие реакции, как: ²³⁷Np($\alpha, p4n$)²³⁶Pu; ²³⁷Np($\alpha,5n$)²³⁶Am \rightarrow (³³)²³⁶Pu. В настоящее время его получают благодаря взаимодействию дейтрона с ядром урана-235. Изотоп образуется благодаря α -излучателю ²⁴⁰Cm ($T_{1/2}$ 27 сут) и β -излучателем ²³⁶Np ($T_{1/2}$ 22 ч). Плутоний-236 является альфа-излучателем, способным к спонтанному делению. Скорость самопроизвольного деления составляет $5,8 \cdot 10^7$ делений на 1 г/ч, что соответствует периоду полураспада для этого процесса $3,5 \cdot 10^9$ лет^[40].

Плутоний-238 имеет интенсивность самопроизвольного деления $1,1 \cdot 10^6$ делений/(с·кг), что в 2,6 раза больше ²⁴⁰Pu, и очень высокую тепловую мощность: 567 Вт/кг. Изотоп обладает очень сильным альфа-излучением (при воздействии на него нейтронов^[56]), которое в 283 раза сильнее ²³⁹Pu, что делает его более серьёзным источником нейтронов при реакции $\alpha \rightarrow n$. Содержание плутония-238 редко когда превышает 1 % от общего состава плутония, однако излучение нейтронов и нагрев делают его очень неудобным для обращения^[153]. Его удельная радиоактивность составляет 17,1 Ки/г^[154].

Плутоний-239 имеет большие сечения рассеивания и поглощения, чем уран, и большее число нейтронов в расчёте на одно деление, и меньшую критическую массу^[153], которая составляет 10 кг в альфа-фазе^[147]. При ядерном распаде плутония-239 посредством воздействия на него нейтронами этот нуклид распадается на два осколка (примерно равные между собой более лёгкие атомы), выделяя примерно 200 МэВ энергии. Это приблизительно в 50 млн раз больше выделяемой при горении энергии ($C+O_2 \rightarrow CO_2$). «Сгорая» в ядерном реакторе, изотоп выделяет $2 \cdot 10^7$ ккал^[15]. Чистый ²³⁹Pu имеет среднюю величину испускания нейтронов от спонтанного деления примерно 30 нейтронов/с·кг (примерно 10 делений в секунду на килограмм). Тепловая мощность составляет 1,92 Вт/кг (для сравнения: теплота обмена веществ у взрослого человека составляет меньшую тепловую мощность), что делает его тёплым на осязание. Удельная активность равна 61,5 мКи/г^[153].

Плутоний-240 является основным изотопом, загрязняющим оружейный ²³⁹Pu. Уровень его содержания главным образом важен из-за интенсивности спонтанного деления, которая составляет 415 000 делений/с·кг, но испускается примерно $1 \cdot 10^5$ нейтронов/(с·кг), так как каждое деление рождает приблизительно 2,2 нейтрона, что примерно в 30 000 раз больше, чем у ²³⁹Pu. Плутоний-240 хорошо делится, чуть лучше, чем ²³⁵U. Тепловой выход больше, чем у плутония-239 и составляет 7,1 Вт/кг, что обостряет проблему перегрева. Удельная активность равна 227 мКи/г^[153].

Плутоний-241 имеет низкий нейтронный фон и умеренную тепловую мощность и потому непосредственно не влияет на удобство применения плутония (Тепловая мощность равна 3,4 Вт/кг). Однако он с периодом полураспада 14 лет превращается в америций-241, который плохо делится и обладает большой тепловой мощностью, ухудшая качество оружейного плутония. Таким образом, плутоний-241 влияет на старение оружейного плутония. Удельная активность — 106 Ки/г^[153].

Интенсивность испускания нейтронов плутония-242 составляет 840 000 делений/(с·кг) (вдвое выше ²⁴⁰Pu), плохо подвержен ядерному делению. При заметной концентрации серьёзно увеличивает требуемую критическую массу и нейтронный фон. Имея большую продолжительность жизни и маленькое сечение захвата, нуклид накапливается в переработанном реакторном топливе. Удельная активность составляет 4 мКи/г^[153].

Сплавы

Сплавы плутония, или интерметаллические соединения, обычно получают прямым взаимодействием элементов в нужных отношениях^[13]. В большинстве случаев для получения гомогенного вещества применяют дуговую плавку; иногда нестабильные сплавы можно получить расплывительным осаждением^{[155][156]} или охлаждением расплавов^[157].

Легированные алюминием, галлием или железом, сплавы плутония имеют промышленное значение^[1].

Группа	Растворенный металл	Разница в размерах, %	Минимальное количество растворенного металла, необходимое для стабилизации δ -фазы, %
III A	Sc	-0,2	2,75±0,25

Нуклид	Критическая масса, кг	Диаметр, см	Источник
Уран-233	15	11	[148]
Уран-235	52	17	[148]
Нептуний-236	7	8,7	[149]
Нептуний-237	60	18	[150]
Плутоний-238	9,04—10,07	9,5—9,9	[151]
Плутоний-239	10	9,9	[148][151]
Плутоний-240	40	15	[148]
Плутоний-241	12	10,5	[152]
Плутоний-242	75—100	19—21	[152]


Плутоний может образовывать сплавы и промежуточные соединения с большинством металлов. Исключениями являются литий, натрий, калий и рубидий из щелочных металлов; магний, кальций, стронций и барий из щелочноземельных металлов; европий и иттербий из РЗЭ ^[63] . Частичными исключениями являются тугоплавкие металлы: хром, молибден, ниобий, тантал и вольфрам, которые растворимы в жидком плутонии, но почти нерастворимы или малорастворимые в твёрдом плутонии ^[63] . Галлий, алюминий, америций, скандий и церий могут стабилизировать δ-плутоний при комнатной температуре. Кремний, индий, цинк и цирконий способны к формированию метастабильного δ-плутония (δ-фаза) при быстром охлаждении. Большие количества гафния, гольмия и таллия иногда позволяют сохранить некоторое количество δ-плутония при комнатной температуре. Нептуний является единственным элементом, который может стабилизировать α-плутоний при высоких температурах. Титан, гафний и цирконий стабилизируют структуру β-плутония при комнатной температуре при резком охлаждении ^[113] .		Lu	+5,5	4,1±0,3
		Tm	+6,2	<5
		Er	+6,9	4,1±0,3
		Dy	+7,8	4,1±0,3
		Ce	+4,3	5[-14]
III B	Ga	-14,2	2[-15] 1[-16]	
	Al	-12,9	1±0,2	
	In	+1,2	3,6±0,5	
IV A	Tl	+4,4	4,4±0,6	
	Hf	-3,9	4,6±0,5	
	Zr	-2,6	7,0±0,5	


Сплавы плутония могут быть получены при добавлении металла в расплавленный плутоний. Если легирующий металл является достаточно сильным восстановителем, то в этом случае плутоний используется в виде оксидов или галогенидов. Сплавы δ-плутоний-галлий и плутоний-алюминий получают путём добавления фторида плутония(III) в расплавленный галлий или алюминий, который имеет особенность, заключающуюся в том, что алюминий не реагирует с высокоактивным плутонием^[158].

Сплавы плутония могут быть получены при добавлении металла в расплавленный плутоний. Если легирующий металл является достаточно сильным восстановителем, то в этом случае плутоний используется в виде оксидов или галогенидов. Сплавы δ-плутоний-галлий и плутоний-алюминий получают путём добавления фторида плутония(III) в расплавленный галлий или алюминий, который имеет особенность, заключающуюся в том, что алюминий не реагирует с высокоактивным плутонием^[158].

Виды сплавов

- Плутоний-галлий** — сплав, использующийся для стабилизации δ-фазы плутония, который позволяет избежать переход α—δ фазы^[110].
- Плутоний-алюминий** — альтернативный сплав, по своим свойствам аналогичен сплаву Pu-Ga. Данный сплав может быть использован в качестве компонента ядерного топлива^[159].
- Плутоний-галлий-кобальт** (PuGaCo₂) — сверхпроводниковый сплав при температуре, составляющей 18,5 К. Необычно высокая температура перехода может свидетельствовать о том, что вещества на основе плутония представляют собой новый класс сверхпроводников^{[123][160][14]}.
- Плутоний-цирконий** — сплав, который иногда может быть использован в качестве ядерного топлива^[161].
- Плутоний-церий и плутоний-церий-кобальт** — сплавы, используемые в качестве ядерного топлива^[162].
- Плутоний-уран** — сплав, содержание плутония в котором примерно равно 15—30 молей в процентном содержании. Используется в ядерных реакторах, работающих на быстрых нейтронах. Сплав имеет пиррофорный характер, высокую восприимчивость к коррозии при достижении точки самовоспламенения, или способен к разложению при воздействии на него кислородом. Данный сплав требует легирования с другими металлами. Добавление алюминия, углерода или меди не сможет существенно улучшить свойства сплава; добавление циркония или сплавов железа повысят коррозионную стойкость данного сплава, однако после нескольких месяцев воздействия воздуха на легированный сплав данные качества теряются. Добавление титана и/или циркония позволит существенно повысить температуру плавления сплава^[163].
- Плутоний-уран-титан и плутоний-уран-цирконий** — сплав, исследование которого предполагало его использование в качестве ядерного топлива. Добавление третьего элемента (титан и/или цирконий) в эти сплавы позволит улучшить устойчивость к коррозии, снизить возможность воспламенения, повысить пластичность, технологичность, прочность и тепловое расширение. Сплав **плутоний-уран-молибден** имеет наилучшую устойчивость к коррозии, так как образует на своей поверхности оксидную плёнку^[163].
- Сплав **торий-уран-плутоний** был исследован в качестве топлива для ядерных реакторов, работающих на быстрых нейтронах^[163].

 **Внешние изображения**

 **Сплав плутоний-галлий** (<http://nuclearweaponsarchive.org/Library/Plutonium/Puingot.jpg>)

Меры предосторожности

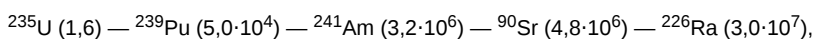
Токсичность

Все химические элементы в той или иной степени токсичны, если их концентрация в организме превышает установленные нормы. Например, некоторые **лантаноиды** щериевой группы могут находиться в молоке, крови и костях животных, а остальные — в люпине, сахарной свёкле, чернике, разных водорослях и др.^[164]



Все соединения плутония являются ядовитыми. Данные свойства проявляются как следствие α-излучения, так как зачастую приходится работать с α-активными изотопами (например, ²³⁹Pu). **Альфа-частицы** представляют серьёзную опасность в том случае, если их источник находится в теле заражённого. При этом они повреждают окружающие элемент ткани организма. Хотя плутоний способен излучать γ-лучи и нейтроны, которые могут проникать в тело снаружи, их уровень слишком мал для того, чтобы причинить вред здоровью. Разные изотопы плутония обладают разной токсичностью, например, типичный реакторный плутоний в 8—10 раз токсичнее чистого ²³⁹Pu, так как в нём преобладают нуклиды ²⁴⁰Pu, который является мощным источником альфа-излучения^[40].

Плутоний самый радиотоксичный элемент из всех актиноидов^[165], однако считается отнюдь не самым опасным элементом. Если принять радиологическую токсичность ²³⁸U за единицу, этот же показатель для плутония и некоторых других элементов образует ряд:



из которого следует вывод, что радий почти в тысячу раз опаснее самого ядовитого изотопа плутония — ²³⁹Pu^{[40][63]}.

При ингаляции плутоний обладает канцерогенными свойствами и способен вызвать рак лёгких. Однако следует помнить, что при попадании с пищей ¹⁴C и ⁴⁰K гораздо более канцерогенны. Тем не менее, плутоний токсичен, так как имеет свойство концентрироваться в кроветворных участках костей и может вызвать заболевания через много лет после его попадания^[40].

Альфа-частицы обладают относительно малой проникающей способностью: для ²³⁹Pu пробег α-частиц в воздухе составляет 3,7 см, а в мягкой биологической ткани — 43 мкм. В совокупности с высокой полной ионизацией (1,47·10⁷ пар ионов на одну α-частицу) небольшая величина пробега обуславливает значительную величину плотности ионизации; а чем выше её плотность, тем выше воздействие на организм. В связи с тем, что α-излучение приводит к необратимым изменениям в скелете, печени, селезёнке и почках, все изотопы элемента относят к группе элементов с особо высокой радиотоксичностью (группа А токсичности). Эти изменения трудно диагностировать; они не проявляются настолько быстро, что можно констатировать о нахождении элемента в организме^[40]. Несмотря на малую проникающую способность, плутоний-239, в условиях эксперимента оказался способен вызывать хромосомные мутации и микроядра в клетках растений при контакте с живой тканью^[166]. Плутоний-238 в эксперименте по воздействию на клетки китайского хомяка оказался способен повышать частоту хромосомных aberrаций и сестринских хроматидных обменов при дозе в 0,5 рад (0,005 грей)^[167]

Плутоний склонен к образованию аэрозолей^[20]. Хотя плутоний и является металлом, он очень летуч^[40]. Например, стоит пронести его образец по комнате, как допустимое содержание элемента будет превышено. Поэтому в процессе дыхания он склонен проникать в лёгкие и бронхи. Значимы два типа воздействия: острое и хроническое отравление. Если уровень облучения достаточно высок, ткани могут страдать острым отравлением, и токсическое воздействие проявляется очень быстро. Если уровень облучения мал, то образуется накапливающийся канцерогенный эффект^[40].

Попавшее количество элемента определяется коэффициентом всасывания, составляющим $K = 1 \cdot 10^{-3}$. Для биологически связанного элемента коэффициент выше: $K = 1 \cdot 10^{-2}$, причём коэффициент всасывания возрастает в 10—100 раз для детей по сравнению к взрослым. Плутоний может попадать в организм через раны и ссадины, путём вдыхания или заглатывания. Однако наиболее опасным путём попадания в организм является поглощение из лёгких^[40].

Попавший в лёгкие плутоний частично оседает на поверхности лёгких, частично переходит в кровь, а затем в лимфоузлы и костный мозг. Примерно 60 % попадает в костную ткань, 30 % в печень и 10 % выводится естественным путём. Количество попавшего в организм плутония зависит от величины аэрозольных частиц и растворимости в крови^[40].

Плутоний очень плохо всасывается через желудочно-кишечный тракт. Плутоний в четырёхвалентном состоянии в течение нескольких суток на 70—80 % отлагается в печени человека и на 10—15 % в костных тканях. Попавший в организм элемент менее ядовит, чем такие известные яды, как цианид или стрихнин. Поглощение всего 0,5 г плутония привело бы к смерти за несколько дней или недель за счёт острого облучения пищеварительной системы (для цианида это значение составляет 0,1 г). Вдыхание 0,1 г плутония в виде частиц оптимального размера для удержания в лёгких приведёт к смерти из-за отёка лёгких за 1—10 дней. Вдыхание 0,2 г приведёт к смерти от фиброза за один месяц. Для намного меньших величин, попавших в организм, возникает высокий риск появления хронического канцерогенного эффекта^[40].

Самой вероятной формой попадания плутония в организм является его практически не растворимый в воде оксид. Он применяется на АЭС в качестве источника электроэнергии^[40]. Следовательно, плутоний, из-за нерастворимости его оксида, имеет большие показатели полувыведения из организма^[165].

В природе плутоний чаще всего находится в четырёхвалентном состоянии, которое по своим химическим свойствам напоминает трёхвалентное железо. Если он проникает в систему кровообращения, то с большой вероятностью начнет концентрироваться в тканях, содержащих железо: костный мозг, печень, селезёнка. Организм путает плутоний с железом, следовательно, белок трансферина забирает плутоний вместо железа, в результате чего останавливается перенос кислорода в организме. Микрофаги растаскивают плутоний по лимфоузлам. Если 0,14 г разместятся в костях взрослого человека, то риск ухудшения иммунитета будет очень велик и через несколько лет может развиться рак^[40]. Проведённые исследования элемента на токсичность показали, что для человека весом 70 кг смертельная доза составляет 0,22 г^[165].

Попавший в организм плутоний выводится из него очень долго — на протяжении 50 лет из организма выведется всего 80 %. Период биологического полувыведения из костной ткани составляет 80—100 лет^[40]. Получается, что его концентрация в костях живого человека практически постоянна^[64]. Период полувыведения из печени составляет 40 лет. Максимально безопасным значением количества плутония в организме для ²³⁹Pu составляет 0,047 мКи, что эквивалентно 0,0075 г. Молоко выводит плутоний в 2—10 раз активнее воды^[40].

Критическая масса

Критическая масса — минимальная масса делящегося вещества, при которой в нём может происходить самоподдерживающаяся ядерная реакция деления. Если масса вещества ниже критической, то слишком много нейтронов, необходимых для реакции деления, теряется, и цепная реакция не идёт. При массе больше критической цепная реакция может лавинообразно ускоряться, что приводит к ядерному взрыву.

Критическая масса зависит от размеров и формы делящегося образца, так как они определяют утечку нейтронов из образца через его поверхность. Минимальную критическую массу имеет образец сферической формы, так как площадь его поверхности наименьшая. Критическая масса чистого металлического плутония-239 сферической формы 11 кг (диаметр такого шара 10 см), чистого урана-235 — 47 кг (диаметр шара 17 см)^[168]. Отражатели и замедлители нейтронов, окружающие делящееся вещество, могут существенно снизить критическую массу^[168]. Критическая масса также зависит от химического состава образца и его плотности.

Самовоспламенение

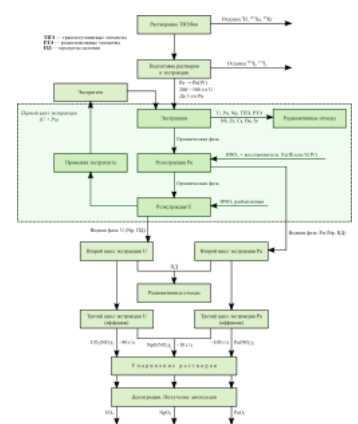
В мелкодисперсном состоянии плутоний, как и все актиниды, пребывает в состоянии пирофорности^[73]. Во влажной среде плутоний на его поверхности образует гидриды переменного состава; реагируя с кислородом, плутоний воспламеняется даже при комнатной температуре. В результате окисления плутоний расширяется на 70 % и может повредить содержащий его контейнер^[169]. Радиоактивность плутония является препятствием для тушения. Песок из оксида магния наиболее эффективный материал для тушения: он охлаждает плутоний, а также блокирует доступ кислорода. Плутоний следует хранить либо в атмосфере инертного газа^[169], либо при наличии циркулирующего воздуха (учитывая, что 100 г плутония-239 выделяют 0,2 Вт тепла)^[73]. Элемент имеет исключительно высокую пирофорность при нагреве до 470—520 °C^[1].

Методы отделения

Обобщённое представление о способах отделения плутония от примесей, предшествующих элементов и их продуктов деления состоит из трёх стадий. В первой стадии отработавшие тепловыделяющие сборки демонтируются, и оболочка, содержащая отработавший плутоний и уран, удаляется физическими и химическими способами. На втором этапе извлечённое ядерное топливо растворяют в азотной кислоте. На третьем и самом комплексном этапе отделения плутония от других актинидов и продуктов деления применяют технологию, известную как «solvent process» (с англ. — «экстракция растворителем»). Трибутилфосфат обычно используется в качестве экстрагента в керосиноподобном растворителе в пьюрек-процессе. Как правило, очищение плутония и урана происходит в несколько этапов для достижения необходимой чистоты элементов^[141]. Первоначально вышеупомянутый процесс был создан для переработки ядерного топлива реакторов, созданных для военных целей. Позднее эту технологию удалось применять и на энергетических реакторах^[13].

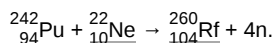
Применение

Металлический плутоний используется в ядерном оружии и служит в качестве ядерного топлива. Оксиды плутония используются в качестве энергетического источника для космической техники и находят своё применение в ТВЭЛах^[110]. Плутоний используется в элементах питания космических аппаратов^[170]. Ядра плутония-239 способны к цепной ядерной реакции при воздействии на них нейтронов, поэтому этот изотоп можно использовать как источник атомной энергии (энергия, освобождающаяся при расщеплении 1 г ²³⁹Pu, эквивалентна теплоте, выделяющейся при сгорании 4000 кг угля)^[64]. Более частое использование плутония-239 в ядерных бомбах обусловлено тем, что плутоний занимает меньший объём в сфере (где расположено ядро бомбы), следовательно, можно выиграть во взрывной силе бомбы за счёт этого свойства. Ядро плутония при ядерной реакции испускает в среднем около 2,895 нейтрона против 2,452 нейтрона у урана-235. Однако затраты на производство плутония примерно в шесть раз больше по сравнению с ураном-235^[117].



Пьюрек-процесс применяется для извлечения оксидов плутония, урана и нептуния высокой чистоты.

Изотопы плутония нашли своё применение при синтезе трансплутониевых (последующих после плутония) элементов^[4]. Таким образом, смешанный оксид плутония-242 в 2009 г. и бомбардировки ионами кальция-48 в 2010 году того же изотопа были использованы для получения флеровия^{[171][172][173][174]}. В Оук-Риджской национальной лаборатории длительное нейтронное облучение ²³⁹Pu используется для получения ²⁴⁴Cm (в количестве 100 г), ²⁴²Cm, ²⁴⁹Bk, ²⁵²Cf и ²⁵³Es (в миллиграммовых количествах) и ²⁵⁷Fm (в микрограммовых количествах). За исключением ²³⁹Pu, все оставшиеся трансурановые элементы производились в прошлом в исследовательских целях^[73]. Благодаря нейтронному захвату изотопов плутония в 1944 году Г. Т. Сиборгом и его группой был одержан первый изотоп америция — ²⁴¹Am^[122] (реакция ²³⁹Pu(2n, e)²⁴¹Am)^[42]. Для подтверждения того, что актиноидов всего 14 (по аналогии с лантаноидами) был произведён в 1966 году в Дубне синтез ядер резерфордия (в то время курчатовия) под руководством академика Г. Н. Флёрова^{[175][176]}:



δ-Стабилизированные сплавы плутония применяются при изготовлении топливных элементов, так как они обладают лучшими металлургическими свойствами по сравнению с чистым плутонием, который при нагревании претерпевает фазовые переходы^[13].

«Сверхчистый» плутоний (смесь изотопов плутония, содержание в которой не превышает 2—3 % ²⁴⁰Pu) используется в ядерном оружии ВМФ США и применяется на кораблях и подводных лодках под ядерной защитой из свинца, что снижает дозовую нагрузку на команду^[177].

Плутоний-238 и плутоний-239 являются самыми широко синтезируемыми изотопами^[56].

- Первый ядерный заряд на основе плутония был взорван 16 июля 1945 года на полигоне Аламогордо (испытание под кодовым названием «Тринити»).

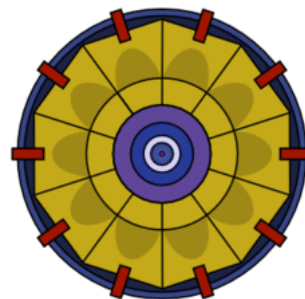
Ядерное оружие

Плутоний очень часто применялся в ядерных бомбах. Бомба, сброшенная в 1945 году на Нагасаки, содержала в себе 6,2 кг плутония. Мощность взрыва составила 21 килотонну (взрыв оказался на 40 % больше, по сравнению с бомбардировкой Хиросимы)^[178]. К концу 1945 года погибло 60—80 тыс. человек^[179]. По истечении 5 лет, общее количество погибших, с учётом умерших от рака и других долгосрочных воздействий взрыва, могло достичь или даже превысить 140 000 человек^[178].

Внешние изображения

- Акриловая сфера (http://farm4.staticflickr.com/3323/3294370001_54cb33f451_b.jpg) (в диаметре 8,26 см), имитирующая плутониевый заряд бомбы, сброшенной на Нагасаки.

Принцип, по которому происходил ядерный взрыв с участием плутония, заключался в конструкции ядерной бомбы. «Ядро» бомбы состояло из сферы, наполненной плутонием-239, которая в момент столкновения с землёй сжималась до миллиона атмосфер за счёт конструкции^[117] и благодаря окружающему эту сферу взрывчатому веществу^[180]. После удара ядро расширилось в объёме и в плотности за десяток микросекунд, при этом сжимаемая сборка проскакивала критическое состояние на тепловых нейтронах и становилась существенно сверхкритической на быстрых нейтронах, то есть начиналась цепная ядерная реакция с участием нейтронов и ядер элемента^[181]. При этом следовало учитывать, что бомба не должна была взорваться преждевременно. Однако это практически невозможно, так как, чтобы сжать плутониевый шар за десяток наносекунд всего на 1 см, требуется придать веществу ускорение, в десятки триллионов раз превышающее ускорение свободного падения. При конечном взрыве ядерной бомбы температура повышается до десятков миллионов градусов^[117]. Следует отметить, что в наше время для создания полноценного ядерного заряда достаточно 8—9 кг этого элемента^[182].



Принцип имплозии, по которому действует ядерная бомба^[17].

Всего один килограмм плутония-239 может произвести взрыв, который будет эквивалентен 20000 т тротила^[56]. Даже 50 г элемента при делении всех ядер произведут взрыв, равный детонации 1000 т тротила^[183]. Данный изотоп является единственным подходящим нуклидом для применения в ядерном оружии, так как присутствие хотя бы 1 % ²⁴⁰Pu приведёт к образованию большого количества нейтронов, которые не позволят эффективно применять пушечную схему заряда ядерной бомбы. Остальные изотопы рассматриваются только из-за их вредного действия^[153].

Плутоний-240 может находиться в ядерной бомбе в малых количествах, однако если его содержание будет повышено, произойдет преждевременная цепная реакция. Данный изотоп имеет высокую вероятность спонтанного деления (примерно 440 делений в секунду на грамм; высвобождается примерно 1000 нейтронов в секунду на грамм^[184]), что делает невозможным большой процент его содержания в делящемся материале^[80].

По данным телеканала Al-Jazeera, Израиль имеет около 118 боеголовок с плутонием в качестве радиоактивного вещества^[185].

Считается, что Южная Корея имеет около 40 кг плутония, количества которого достаточно для производства 6 ядерных ракет^[186]. По оценкам МАГАТЭ в 2007 году, производимого в Иране плутония хватало на две ядерные боеголовки в год^[187]. В 2006 г. Пакистан начал строительство ядерного реактора, который позволит нарабатывать около 200 кг радиоактивного элемента в год. В пересчёте на количество ядерных боеголовок, эта цифра будет составлять приблизительно 40—50 бомб^[188].

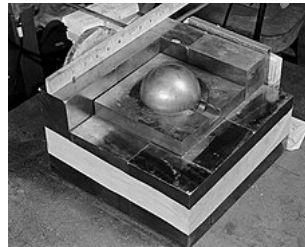
Между Россией и США было подписано несколько договоров на протяжении первого десятилетия 21-го века (на данный момент). Так, в частности, в 2003 г. был подписан договор^[какой?] о переработке 68 т (по 34 т с каждой стороны) плутония в МОХ-топливо до 2024 года^[22]. В 2007 г. страны подписали план об утилизации Россией 34 т плутония, созданного для российских оружейных программ^{[182][189]}. В 2010 году был подписан протокол к договору об утилизации плутония, количества которого хватило бы на производство 17 тыс. ядерных боеголовок^[190].

В 1999 между США и Казахстаном было подписано соглашение о закрытии промышленного ядерного реактора БН-350 в городе Актау, который вырабатывал электроэнергию за счёт плутония^[191]. Этот реактор был первым в мире и Казахстане опытно-промышленным реактором на быстрых нейтронах; срок его работы составил 27 лет^[192].

3 октября 2016 года Россия приостановила договор с США по ликвидации плутония. «Соглашение об утилизации плутония» (*Plutonium Management and Disposition Agreement*) между двумя странами было подписано 29 августа 2000 года и ратифицировано в 2011 году^{[193][194]}. Согласно договоренностям, оружейный плутоний должен был перерабатываться в оксидное топливо для использования в ядерных реакторах, а также переводиться в формы, непригодные для создания вооружений. Каждая из сторон брала обязательство по утилизации 34 тонн запасов плутония, по последним оценкам, процесс уничтожения мог бы начаться в 2018 году. Условиями возобновления программы указано множество маловероятных событий^[195]: отмена Вашингтоном всех антироссийских санкций, компенсаций ущерба, полученного в результате введений антироссийских и контрсанкций, сокращение военного присутствия США в странах НАТО. Соответствующий указ подписан 3 октября 2016 года президентом России Владимиром Путиным^[196].

Ядерное загрязнение

В период, когда начинались ядерные испытания (1945—1963 гг.) в основе которых лежал плутоний, и когда его радиоактивные свойства только начинали изучаться, в атмосферу было выброшено свыше 5 т элемента^[165]. С 1970-х годов доля плутония в радиоактивном заражении атмосферы Земли начала возрастать^[1].



Ядерный заряд в виде сферы^[17].

В северо-западную часть Тихого океана плутоний попал в основном благодаря ядерным испытаниям. Повышенное содержание элемента объясняется проведением США ядерных испытаний на территории Маршалловых Островов в Тихоокеанском полигоне в 1950-х годах. Основное загрязнение от этих испытаний пришлось на 1960 год. Исходя из оценки учёных, нахождение плутония в Тихом океане повышено по сравнению с общим распространением ядерных материалов на земле^[197]. По некоторым расчетам, доза облучения, исходящего от цезия-137, на атоллах Маршалловых островов составляет примерно 95 %, а на остальные 5 приходится изотопы стронция, америция и плутония^[198].

Плутоний в океане переносится благодаря физическим и биогеохимическим процессам. Время нахождения плутония в поверхностных водах океана составляет от 6 до 21 года, что, как правило, короче, чем у цезия-137. В отличие от этого изотопа, плутоний является элементом, частично реагирующим с окружающей средой и образующим 1—10 % нерастворимых соединений от общей массы, попавшей в окружающую среду (у цезия это значение составляет менее 0,1 %). Плутоний в океане выпадает на дно вместе с биогенными частицами, из которых он восстанавливается в растворимые формы в результате микробного разложения. Наиболее распространёнными из его изотопов в морской среде являются плутоний-239 и плутоний-240^[197].

В январе 1968 года американский самолёт В-52 с четырьмя зарядами ядерного оружия в результате неудачной посадки разбился на льду вблизи Туле, на территории Гренландии. Столкновение вызвало взрыв и фрагментацию оружия, в результате чего плутоний попал на льдину. После взрыва верхний слой загрязнённого снега была снесён, и в результате образовалась трещина, через которую плутоний попал в воду^[199]. Для уменьшения урона природе было собрано примерно 1,9 млрд литров снега и льда, которые могли подвергнуться радиоактивному загрязнению. В 2008 году было высказано предположение, что один из четырёх зарядов так и не был найден^[200], однако Датский институт международных отношений в отчёте, подготовленном по поручению министра иностранных дел Дании Пер Стиг Меллер, пришёл к выводу, что существуют неопровержимые доказательства того, что ни одна из бомб не могла остаться в рабочем или хотя бы более или менее сохранном состоянии, а утверждения об утерянной бомбе лишены фактических оснований. В качестве наиболее вероятной цели подводного поиска называется урановый сердечник второй ступени одной из бомб^[201].

Известен случай, когда советский космический аппарат Космос-954 24 января 1978 года с ядерным источником энергии на борту при неконтролируемом сходе с орбиты упал на территорию Канады. Данное происшествие привело к попаданию в окружающую среду 1 кг плутония-238 на площадь около 124 000 м²^{[202][203]}.

Попадание плутония в окружающую среду связано не только с техногенными происшествиями. Известны случаи утечки плутония как из лабораторных, так и из заводских условий. Было около 22 аварийных случаев утечки из лабораторий урана-235 и плутония-239. На протяжении 1953—1978 гг. аварийные случаи привели к потере от 0,81 (Маяк, 15 марта 1953 г.) до 10,1 кг (Томск, 13 декабря 1978 г.) ²³⁹Pu. Происшествия на промышленных предприятиях суммарно привели к смерти двух человек в г. Лос-Аламос (21.08.1945 и 21.05.1946) из-за двух случаев аварий и потерь 6,2 кг плутония. В городе Саров в 1953 и 1963 гг. примерно 8 и 17,35 кг попало за пределы ядерного реактора. Один из них привёл к разрушению ядерного реактора в 1953 году^[204].

Известен случай аварии на Чернобыльской АЭС, который произошёл 26 апреля 1986 года. В результате разрушения четвёртого энергоблока в окружающую среду было выброшено 190 т радиоактивных веществ на площадь около 2200 км². Восемь из 140 т радиоактивного топлива реактора оказались в воздухе. Загрязнённая площадь составила 160 000 км²^[205]. Для ликвидации последствий были мобилизованы значительные ресурсы, более 600 тыс. человек участвовали в ликвидации последствий аварии. Суммарная активность веществ, выброшенных в окружающую среду, составила, по различным оценкам, до 14·10¹⁸ Бк (или 14 ЭБк), в том числе^[206]:

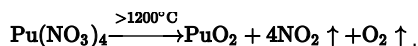
- 1,8 ЭБк — ¹³¹₅₃I,
- 0,085 ЭБк — ¹³⁷₅₅Cs,
- 0,01 ЭБк — ⁹⁰₃₈Sr
- 0,003 ЭБк — изотопы плутония,
- на долю благородных газов приходилось около половины от суммарной активности.

В настоящее время большинство жителей загрязнённой зоны получает менее 1 мЗв в год сверх естественного фона^[206].

Источник энергии

Как известно, атомная энергия применяется для преобразования в электроэнергию за счёт нагревания воды, которая, испаряясь и образуя перегретый пар, вращает лопатки турбин электрогенераторов. Преимуществом данной технологии является отсутствие каких-либо парниковых газов, которые оказывают пагубное воздействие на окружающую среду. По состоянию за 2009 год 438 атомных станций по всему миру генерировали примерно 371,9 ГВт электроэнергии (или 13,8 % от общего объёма производства электроэнергии)^[207]. Однако минусом ядерной промышленности являются ядерные отходы, которых в год отработывается приблизительно 12000 т^[19]. Данное количество отработанного материала представляет собой довольно сложную задачу перед сотрудниками АЭС^[208]. К 1982 году было подсчитано, что накоплено ~300 т плутония^[209].

Жёлто-коричневый порошок, состоящий из диоксида плутония, способен выдерживать нагревание до температуры 1200 °С. Синтез соединения происходит с помощью разложения тетрагидроксида или тетранитрата плутония в атмосфере кислорода^[2]:



Полученный порошок шоколадного цвета спекается и нагревается в токе влажного водорода до 1500 °С. При этом образуются таблетки плотностью 10,5—10,7 г/см³, которые можно использовать в качестве ядерного топлива^[2]. Диоксид плутония является самым стабильным и инертным из оксидов плутония и посредством нагревания до высоких температур разлагается на составляющие, и потому применяется при переработке и хранении плутония, а также его дальнейшего использования как источника электроэнергии^[210]. Один килограмм плутония эквивалентен примерно 22 млн кВт·ч тепловой энергии^[209].

Плутоний-236 и плутоний-238 применяется для изготовления атомных электрических батареек, срок службы которых достигает 5 и более лет. Их применяют в генераторах тока, стимулирующих работу сердца (кардиостимулятор)^{[1][211]}. По состоянию на 2003 г. в США было 50—100 человек, имеющих плутониевый кардиостимулятор^[212]. Применение плутония-238 может распространиться на костымы водолазов и космонавтов^{[164][213]}. Бериллий вместе с вышеуказанным изотопом применяется как источник нейтронного излучения^[42].

Космические аппараты



Внешние изображения
Диоксид плутония (http://www.webelements.com/media/elements/element_pictures/Pu.jpg)



Таблетка диоксида плутония-238, нагревшаяся до красного каления под действием собственного тепловыделения^[20].

В СССР было произведено несколько РИТЭГов Топаз, которые были предназначены для генерации электричества для космических аппаратов. Эти аппараты были предназначены работать с плутонием-238, который является α -излучателем. После развала Советского Союза США было закуплено несколько таких аппаратов для изучения их устройства и дальнейшего применения в своих долговременных космических программах^[214].



РИТЭГ зонда Новые Горизонты.

Вполне достойной заменой плутонию-238 можно было бы назвать полоний-210. Его тепловыделение составляет 140 Вт/г, а всего один грамм может разогреться до 500 °С. Однако из-за его чрезвычайно малого для космических миссий периода полураспада (140 сут) применение этого изотопа в космической отрасли сильно ограничено^[93] (например, он был использован в каждой миссии Луноходов, а также нашёл своё применение в искусственных спутниках Земли^[215]).

Плутоний-238 в 2006 г. при запуске зонда New Horizons к Плутону нашёл своё применение в качестве источника питания для зонда^[216]. Радиоизотопный генератор содержал 11 кг высокочистого диоксида ^{238}Pu , производившего в среднем 220 Вт электроэнергии на протяжении всего пути (240 Вт в начале пути и 200 Вт к концу)^{[217][218]}. Высказывались опасения о неудачном запуске зонда (шанс неудачи составлял 1:350), однако он всё-таки состоялся. После запуска зонд развил скорость 36000 миль/ч благодаря силам гравитации Земли. В 2007 году благодаря гравитационному манёвру вокруг Юпитера его скорость повысилась ещё на 9 тыс. миль (суммарно примерно 72420 км/ч или 20,1 км/с), что позволит ему приблизиться на минимальное расстояние к Плутону 14 июля 2015 года, а затем продолжить своё наблюдение за поясом Койпера^{[219][220][221]}.

Зонды Галилео и Кассини были также оборудованы источниками энергии, в основе которых лежал плутоний^[222]. Марсоход Curiosity получает энергию благодаря плутонию-238^[223]. Его спуск на поверхность Марса состоялся 6 августа 2012 года. Марсоход использует Многоцелевой РИТЭГ (англ. *Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator*), производящий 125 Вт электрической мощности, а по истечении 14 лет — примерно 100 Вт^[224]. Для работы марсохода производится 2,5 кВт·ч энергии за счёт распада ядер (солнечная энергия составит 0,6 кВт·ч)^[225]. Плутоний-238 является оптимальным источником энергии, выделяющим 0,56 Вт·г⁻¹. Применение этого изотопа с теллуридом свинца (PbTe), который используется в качестве термоэлектрического элемента, образует очень компактный и долговременный источник электричества без каких бы то ни было движущих частей конструкции^[73], что позволяет не увеличивать габариты космических аппаратов.

Для будущих миссий НАСА был создан проект Усовершенствованного РИТЭГа Стирлинга (англ. *Advanced Stirling radioisotope generator*), который оказался бы в 4 раза эффективнее предыдущих поколений РИТЭГов. Обычный РИТЭГ преобразует 6 % тепловой энергии, выделяющейся в результате распада (8 кг ^{238}Pu генерируют 4,4 кВт тепла, дающие аппарату 300 Вт электроэнергии), а улучшенный вариант позволил бы увеличить этот показатель до 25 % (те же 300 Вт электроэнергии вырабатывались бы из 2 кг изотопа). Космическое агентство дало начало этому проекту из-за недостатка, в частности, плутония-238 в мире^{[226][227]}.

На Луне

Несколько килограммов $^{238}\text{PuO}_2$ использовались не только на Галилео, но и на некоторых миссиях Аполлонов^[73]. Генератор электроэнергии SNAP-27 (англ. *Systems for Nuclear Auxiliary Power*), тепловая и электрическая мощность которого составляла 1480 Вт и 63,5 Вт соответственно, содержал 3,735 кг диоксида плутония-238^[228]. Для уменьшения риска взрыва или иных возможных происшествий использовался бериллий в качестве термостойкого, лёгкого и прочного элемента^[229]. SNAP-27 был последним типом генераторов, использовавшихся NASA для космических миссий; предыдущие типы (1, 7, 9, 11, 19, 21 и 23) использовали другие источники электроэнергии^{[230][231][232][233]} (например, SNAP-19 (<http://history.nasa.gov/SP-349/p44a.jpg>) был использован в миссии Пионера-10^{[229][234]}).



РИТЭГ SNAP-27, применявшийся в миссии Аполлон-14 (в центре).

При проведении пассивного сейсмического эксперимента (PSEP) на Луне в миссии Аполлон-11 были использованы два радиоизотопных тепловых источника мощностью 15 Вт, которые содержали 37,6 г диоксида плутония в виде микросфер^[13]. Генератор был использован в миссиях Аполлона-12 (отмечается, что это был первый случай использования ядерной энергосистемы при полёте на Луну), 14, 15, 16, 17^[235]. Он был призван обеспечивать электроэнергией научное оборудование (англ. *ALSEP*), установленное на космических аппаратах^[228]. Во время миссии Аполлона-13 произошло схождение лунного модуля с траектории, в результате чего он сторел в плотных слоях атмосферы. Внутри SNAP-27 был использован вышеупомянутый изотоп, который окружён устойчивыми к коррозии материалами и будет храниться в них ещё 870 лет^{[236][237]}.

Первый китайский луноход Юйту, запуск которого произведён 1 декабря 2013 года, использует плутоний для подзарядки своих аккумуляторов в продолжительное ночное время^[238].

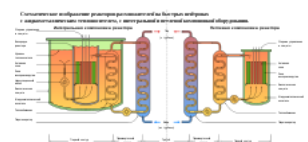
Есть вероятность использования оружейного плутония в качестве дополнительного источника энергии на космических станциях, которые планируется посадить на полюсе спутника (Луна-25, Луна-27), так как солнечного света для их потребностей будет недостаточно^{[239][240]}. Предположительно, старты аппаратов Луна-25 и Луна-27 должны быть произведены в 2018 и 2019 гг. соответственно; одной из их задач будет являться исследование грунта на южном полюсе^[241].

Реакторы-размножители

Для получения больших количеств плутония строятся реакторы-размножители («бридеры», от англ. *to breed* — размножать), которые позволяют нарабатывать значительные количества плутония^[2]. Реакторы названы именно «размножителями» потому, что с их помощью возможно получение делящегося материала в количестве, превышающем его затраты на получение^[73].

В США строительство первых реакторов данного типа началось ещё до 1950 г. В СССР и Великобритании к их созданию приступили в начале 1950 г. Однако первые реакторы были созданы для изучения нейтронно-физических характеристик реакторов с жёстким спектром нейтронов. Поэтому первые образцы должны были продемонстрировать не большие производственные количества, а возможность реализации технических решений, закладываемых в первые реакторы такого типа («Клементина», EBR-1, БР-1, БР-2)^[242].

Отличие реакторов-размножителей от обычных ядерных реакторов состоит в том, что нейтроны в них не замедляются, то есть отсутствует замедлитель нейтронов (например, графит), для того, чтобы их как можно больше прореагировало с ураном-238. После реакции образуются атомы урана-239, который в дальнейшем и образует плутоний-239^[214]. В таких реакторах центральная часть, содержащая диоксид плутония в обедненном диоксиде урана, окружена оболочкой из ещё более обедненного диоксида урана-238 ($^{238}\text{UO}_2$), в которой и образуется ^{239}Pu . Используя вместе ^{238}U и ^{235}U , такие реакторы могут производить из природного урана энергии в 50—60 раз больше, позволяя таким образом использовать запасы наиболее пригодных для переработки урановых руд^[73]. Коэффициент воспроизводства рассчитывается отношением произведённого ядерного топлива к затраченному. Однако достижение высоких показателей воспроизводства — нелёгкая задача. ТВЭЛы в них должны охлаждаться чем-то отличным от воды, которая уменьшает их энергию (а чем она выше, тем больше коэффициент воспроизводства). Было предложено использование жидкого натрия в качестве охлаждающего элемента. В реакторах-размножителях используют обогащенный более 15 % по массе уран-235, для достижения необходимого нейтронного облучения и коэффициента воспроизводства примерно 1—1,2^[214].



Схематическое изображение реакторов-размножителей на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем, с интегральной и петлевой компоновкой оборудования.

В настоящее время экономически более выгодно получение урана из урановой руды, обогащенной до 3 % ураном-235, чем размножение урана в плутоний-239 с применением урана-235, обогащенного на 15 %^[214]. Проще говоря, преимуществом бридеров является способность в процессе работы не только производить электроэнергию, но и утилизировать непригодный в качестве ядерного горючего уран-238^[243].

Противопожарные датчики



РИД-1

Плутоний-239 широко использовался в серийно выпускаемых ионизационных извещателях РИД-1, работа которых основана на эффекте ослабления ионизации воздушного межэлектродного промежутка дымом^{[244][245]}. Данные дымоизвещатели достаточно массово устанавливались в самых различных учреждениях и организациях, включая в систему противопожарной безопасности помещения. Дымоизвещатель состоит из двух ионизационных камер, рабочей и контрольной. В каждой камере находится источник ионизирующего излучения АДИ, содержащий реакторный плутоний (главным образом Pu-239). Принцип работы состоит в следующем: в ионизационной камере за счёт альфа-излучения плутония сопротивление ионизированного воздуха уменьшается, воздух из изолятора превращается в проводник. При подаче напряжения через ионизационные камеры протекает некоторый ток. При установке дымоизвещателя путём регулировки одного из источников АДИ (в рабочей камере, открытой для внешнего воздуха) добиваются протекания такого же тока, как и во второй, контрольной (закрытой) камере. Если в процессе эксплуатации в помещении возникает пожар и в рабочую камеру попадает дым, ток в рабочей камере меняется по сравнению с контрольной, это определяется электроникой и срабатывает тревога^[246].

Стоимость плутония

Один грамм плутония-238 (используется в РИТЭГ) до 1971 года стоил около тысячи долларов США^[164], в 2010-х стоимость оценивалась в 4 тысячи^[247].

В 1992 г. США договорились купить у России 30 кг плутония-238 за 6 млн долларов США (200 тыс/кг); в итоге было доставлено около 20 кг^[226].

См. также

- Разделение изотопов
- Оружейный плутоний
- Актиноиды

Примечания

Комментарии

- Отношение $\frac{^{239}\text{Pu}}{^{238}\text{Pu}} \approx 15 \cdot 10^{-12}$. См. раздел *нахождение в природе*.
- Для того, чтобы считать новый химический элемент открытым, следовало доказать, что он обладает новыми свойствами: как физическими, так и химическими. Предположения о свойствах плутония высказывались ещё в мае 1940 года Льюисом Тернером
- С 24 августа 2006 года по решению *Международного астрономического союза* Плутон более не является планетой Солнечной системы
- По сообщению источника, во время интервью Сиборг сказал: «Очевидным выбором для меня были две буквы Pl, однако я в шутку предложил обозначить элемент Pu, как иногда дети кричат „Pee-yoo!“; когда кто-то плохо пахнет.» Сиборг считал, что именно Pl будет принято в качестве обозначения плутония, однако комитет выбрал Pu
David L. Clark. Reflections on the Legacy of a Legend: Glenn T. Seaborg, 1912—1999 (<http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/pubs/00818011.pdf>) . — Журнал *Los Alamos Science*, 2000. — Вып. 26. — С. 56—61, 57.
- Применение взрывчатых линз, которые имели форму футбольного мяча, внутри которого, условно, находился плутониевый заряд, позволяло достичь увеличения мощности взрыва. Чем равномернее со всех сторон сжимался ядерный заряд, тем мощнее был ядерный взрыв.
- По сообщению источника латунная ампула, на которой располагается бериллий и полоний, диаметром в 2 и высотой 4 см позволяет достичь выхода 90 млн нейтронов в секунду.
В. В. Станцо. Полоний (http://wsyachina.com/chemistry/poloniy_1.html). «Всякая всячина» — wsyachina.com. Дата обращения 7 января 2011. Архивировано (https://www.webcitation.org/618bOz1mj?url=http://wsyachina.com/chemistry/poloniy_1.html) 22 августа 2011 года.
- Соединение гадолиния и циркония с кислородом (Gd₂Zr₂O₇) было создано в связи с тем, что оно позволяет удерживать плутоний на протяжении 30 млн лет.
- Плутоний находится в пакете для того, чтобы предотвратить альфа-излучение и, возможно, для термоизоляции.
- Температура кипения плутония в пять раз больше температуры плавления. Для сравнения: у вольфрама этот показатель составляет 1,6 (темп. плавления 3422 °C и кипения 5555 °C).
- Данный эффект связан с тем, что кислород, реагируя с плутонием и образуя смешанные оксиды на поверхности плутония, препятствует коррозии плутония, по крайней мере, снаружи. Аргон не реагирует с плутонием и одновременно препятствует химическим реакциям плутония, в итоге его поверхность ничем не пассивирована и подвергается коррозии вследствие саморазогрева.
- Амплитуда колебаний показателей плотности плутония составляет 4 г/см³ (точнее: 3,94 г/см³).
- PuO₂⁺ ион нестабильный в водном растворе и может диспропорционировать в Pu⁴⁺ и PuO₂²⁺; Pu⁴⁺ затем может окислиться с PuO₂⁺ до PuO₂²⁺, будучи ионом Pu³⁺. Таким образом, с течением времени водные растворы Pu³⁺ могут соединяться с кислородом образуя оксид PuO₂²⁺
Crooks, William J. Nuclear Criticality Safety Engineering Training Module 10 — Criticality Safety in Material Processing Operations, Part 1 (<http://ncsp.llnl.gov/ncset/Module10.pdf>) (недоступная ссылка) (2002). Дата обращения 5 сентября 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618bU2hOi?url=http://ncsp.llnl.gov/ncset/Module10.pdf>) 22 августа 2011 года.
- Например, нейтронов из космического излучения, нейтронов от спонтанного деления урана-238 и от (α,n)-реакций на лёгких ядрах.
- Предполагается, что у церия валентность равна 3,6
- δ-фаза стабилизируется при комнатной температуре растворением 2 ат.% Ga
- δ-фаза остаётся при комнатной температуре в метастабильном состоянии, если растворить 1 ат.% Ga и быстро охладить
- Следует учитывать, что выработка наиболее оптимальной конструкции ядерной бомбы выработывалась годами.
- Образец.
- Однако эта цифра сильно разнится. Из этого количества плутоний можно получить в сотни раз меньших количествах.
- Остальные изотопы имеют чрезвычайно малые показатели тепловыделения по сравнению с ²³⁸Pu, и потому не применяются в качестве источника энергии. См. таблицу в разделе *свойства некоторых изотопов*.

Источники

- Дриц М. Е. и др. Свойства элементов* (<https://books.google.com/books?id=2FxdHQAACAААJ>). — Справочник. — М.: Металлургия, 1985. — 672 с. — 6500 экз.
- Неорганическая химия в трёх томах / Под ред. Ю. Д. Третьякова. — М.: Издательский центр «Академия», 2007. — Т. 3. — 400 с. — (Химия переходных элементов). — 3000 экз. — ISBN 5-7695-2533-9.

3. Plutonium (<http://www.americanelements.com/ptu.html>) (англ.). AmericanElements.com. Дата обращения 11 января 2011. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618ascBic?url=http://www.americanelements.com/ptu.html>) 22 августа 2011 года.
4. *Плутоний* (http://www.femto.com.ua/articles/part_2/2895.html) — статья из Физической энциклопедии
5. Радиоактивные вещества (<https://books.google.com/books?id=8qzwOAAACAAJ>) / Под общ. ред. акад. АМН СССР Ильина Л. А. и др. — Справ. изд. — Д.: "Химия", 1990. — 464 с. — (Вредные химические вещества). — 35 150 экз. — ISBN 5-7245-0216-X.
6. Plutonium: the essentials (<http://www.webelements.com/plutonium/>) (англ.). WebElements. Дата обращения 29 декабря 2010.
7. Мед—Пол // Химическая энциклопедия (<https://books.google.com/books?id=LRIМAАААСААА>) / Глав. ред. И. Л. Кнунянц. — М.: Большая Российская Энциклопедия, 1992. — Т. 3. — С. 580. — 639 с. — (Химическая энциклопедия в 5^{ти} томах). — 50 000 экз. — ISBN 5-85270-039-8.
8. *David R. Lide*. Vapor Pressure // CRC handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data (<https://books.google.com/books?id=OmkbNgAACAAJ>). — 90-е изд. — Taylor and Francis, 2009. — С. 6-77. — 2828 с. — ISBN 1420090844, 9781420090840.
9. Plutonium: crystal structure (http://www.webelements.com/plutonium/crystal_structu.html) (англ.). Дата обращения 25 августа 2010.
10. *Млюкова М. С., Гусев Н. И., Сентюрин И. Г., Скляренко И. С.* Аналитическая химия плутония. — М.: "Наука", 1965. — 447 с. — (Аналитическая химия элементов). — 3400 экз.
11. Plutonium (<http://www.ead.anl.gov/pub/doc/plutonium.pdf>) (англ.) (недоступная ссылка). Human Health Fact Sheet. Argonne National Laboratory (August 2005). Дата обращения 21 ноября 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618aukWW2?url=http://www.ead.anl.gov/pub/doc/plutonium.pdf>) 22 августа 2011 года.
12. *Richard D. Baker*. Plutonium: A Wartime Nightmare but a Metallurgist's Dream (<http://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?07-16.pdf>) // *Соавт.: Hecker, Siegfried S.; Harbur, Delbert R.* Los Alamos Science. — Los Alamos National Laboratory, 1983. — С. 148, 150—151.
13. Ф. *Вайгель, Др. Кац, Г. Сиборг и др.* Химия актиноидов = The Chemistry of the Actinide Elements / Пер. с англ. под ред. Дж. Каца, Г. Сиборга, Л. Морсса. — Москва: «Мир», 1997. — Т. 2. — 664 с. — (Химия актиноидов). — 500 экз. — ISBN 5-03-001885-9.
14. Плутоний (<http://www.allmetals.ru/metals/plutonium/index.php?p=interest>). allmetals.ru. Дата обращения 26 ноября 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618bdtsd?url=http://www.allmetals.ru/metals/plutonium/index.php?p=interest>) 22 августа 2011 года.
15. Плутоний // Серебро—Нильсборий и далее (<https://books.google.com/books?id=VJzFQwAACAAJ>) / Ред.: Петрянов-Соколов И. В. — 3-е изд. — М.: "Наука", 1983. — Т. 2. — 570 с. — (Популярная библиотека химических элементов). — 50 000 экз.
16. *Transuranium element* (<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/603220/transuranium-element/81183/Discovery-of-the-first-transuranium-elements>) — статья из Британской энциклопедии
17. *Edwin McMillan, Philip Hauge Abelson*. Radioactive Element 93 (<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.57.1185.2>) (англ.) // *Phys. Rev.* : статья. — American Physical Society, 1940. — Iss. 57. — No. 12. — P. 1185—1186. — DOI:10.1103/PhysRev.57.1185.2 (<https://dx.doi.org/10.1103%2FPhysRev.57.1185.2>).
18. *Gregory R. Choppin, Jan-Olov Liljenzin, Jan Rydberg*. Radiochemistry and Nuclear Chemistry (<https://books.google.ru/books?id=OPr7aMRxLZ8C>). — 3-е изд. — Butterworth-Heinemann, 2002. — 709 с. — ISBN 0750674636, 9780750674638.
19. *Glenn T. Seaborg*. The Transuranium Elements (<https://www.jstor.org/pss/1675046>) (англ.) // *Журнал Science* : статья. — 25 октября 1946. — Iss. 104. — No. 2704. — P. 379—386. — DOI:10.1126/science.104.2704.379 (<https://dx.doi.org/10.1126%2Fscience.104.2704.379>). — PMID 17842184.
20. Пирометаллургия—С // Краткая химическая энциклопедия (<https://books.google.com/books?id=XtouPwAACAAJ>) / Глав. ред.: И. Л. Кнунянц и др. — М.: "Советская энциклопедия", 1965. — Т. 4. — С. 90—92. — 1182 с. — (Энциклопедии. Словари. Справочники). — 81 000 экз.
21. *Владимир Тучков*. Советская бомба с американским акцентом (<http://www.vokrugsveta.ru/telegraph/technics/988/>) (рус.) // *Журнал «Вокруг Света»* : рубрика «телеграф». — «Вокруг Света», 27.08.2009.
22. *Аркадий Круглов*. Американцы заплатили за уничтожение плутония (<http://www.kommersant.ru/doc.aspx?DocsID=405577>) (рус.) // *Газета Коммерсантъ* : статья. — Томск: Коммерсантъ, 2003. — Вып. 2753. — № 150.
23. *Пятый канал*. Остановлен последний в мире реактор по производству оружейного плутония (<http://www.5-tv.ru/news/28283/>) (рус.), 5 канал (15 апреля 2010). Дата обращения 20 сентября 2010.
24. *Татьяна Паньшина*. Прекращено производство оружейного плутония (<http://www.ntv.ru/novosti/190774/video>) (рус.), Телеканал НТВ (15 апреля 2010). Дата обращения 20 сентября 2010.
25. *Екатерина Дятловская*. В России остановлен последний реактор по наработке плутония (http://www.fox.ru/authority/defense/2010/04/15/N_Rossii_o_stanoviyen.phtml) (рус.) // *Infox.ru* : статья. — 2010.
26. *GZT.RU*. В Японии запустили закрытый 14 лет назад аварийный реактор (<http://www.gzt.ru/topnews/world-v-yaponii-zapustili-zakrytyi-14-let-nazad-/304506.html>) (рус.), gzt.ru (6 мая 2010). Дата обращения 22 октября 2010.
27. *Dennis Normile*. Japan Nears Restart of Experimental Fast Reactor (<http://news.sciencemag.org/scienceinsider/2010/03/japan-nears-restart-of-experimen.html?ref=hp>) (англ.). news.sciencemag.org (25 March 2010). Дата обращения 3 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/6EhuUfUnd?url=http://news.sciencemag.org/scienceinsider/2010/03/japan-nears-restart-of-experimen.html?ref=hp>) 26 февраля 2013 года.
28. *Monju prototype reactor, once a key cog in Japan's nuclear energy policy, to be scrapped* (<http://www.japantimes.co.jp/news/2016/12/21/national/monju-prototype-reactor-key-cog-japans-nuclear-energy-policy-scrapped/#.WGJYPLaLSV5>)
29. *Uncovering the Secrets of Actinides* (https://www.llnl.gov/str/pdfs/06_00_2.pdf) (англ.) (pdf). *Actinides Can Mean Nuclear Chemistry 17*. Lawrence Livermore National Laboratory (June 2000). Дата обращения 22 марта 2011.
30. Хронология испытаний ядерного оружия // Испытания ядерного оружия и ядерные взрывы в мирных целях СССР (1949—1990) (<http://npc.sarov.ru/issues/peaceful/peaceful.pdf>) / Ред. кол.: Андрюшин, И. А. и др. — Информационное издание. — Саров: РЯЯЦ-ВНИИЭФ, 1996. — С. 11—49. — 66 с. — ISBN 5-85165-062-1. Архивная копия (<http://web.archive.org/web/20101008141556/http://npc.sarov.ru/issues/peaceful/peaceful.pdf>) от 8 октября 2010 на Wayback Machine
31. *Holden, Norman E.* A Short History of Nuclear Data and Its Evaluation (<http://www.ndc.bnl.gov/content/evaluation.html>) (англ.). *51st Meeting of the USDOE Cross Section Evaluation Working Group*. Upton (NY): National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory (2001). Дата обращения 11 сентября 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618awyT4x?url=http://www.ndc.bnl.gov/content/evaluation.html>) 22 августа 2011 года.
32. *Fermi, Enrico* Artificial radioactivity produced by neutron bombardment: Nobel Lecture (<http://www.nobel.se/physics/laureates/1938/fermi-lecture.pdf>) (англ.). Royal Swedish Academy of Sciences (12 December 1938). Дата обращения 11 сентября 2010. Архивировано (https://www.webcitation.org/618axR4iN?url=http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1938/fermi-lecture.pdf) 22 августа 2011 года.
33. *Darden, Lindley*. Enrico Fermi: "Transuranium" Elements, Slow Neutrons // *The Nature of Scientific Inquiry* (<http://www.philosophy.umd.edu/Faculty/LDarden/scin/q/>). — College Park (MD): Department of Philosophy, University of Maryland, 1998.
34. *Курьячев П. С.* Курс истории физики (<http://nplit.ru/books/item/f00/s00/z000004/s070.shtml>). — М.: Просвещение, 1982. — С. 70. — 448 с.
35. *Michael McClure*. The New Alchemy. *The Search Went On...* (http://portal.acs.org/p/portal/fileFetch/CTP_005396/pdf/CTP_005396.pdf) (англ.) // *Журнал ChemMatters* : статья. — American Chemical Society (ACS), октябрь 2006. — P. 17.
36. *Алексей Левин*. Хассий-долгожитель (<http://elementy.ru/news/430417>). Элементы.ру (19 декабря 2006). Дата обращения 27 декабря 2010. Архивировано (<http://www.webcitation.org/618ay0N25?url=http://elementy.ru/news/430417>) 22 августа 2011 года.
37. The Nobel Prize in Chemistry 1951 (http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1951/) (англ.). NobelPrize.org (2 January 2011). Дата обращения 2 января 2011. Архивировано (https://www.webcitation.org/618azY8NV?url=http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1951/) 22 августа 2011 года.
38. *Boris E. Burakov, Michael I. Ojovan, William (Bill) E. Lee*. Introduction to the Actinides // *Crystalline Materials for Actinide Immobilisation* (<http://www.worldscibooks.com/engineering/p652.html>). — World Scientific Publishing Company, Inc, 2010. — Т. 1. — 197 с. — ISBN 1848164181, 9781848164185.
39. *Edwin M. McMillan*. The transuranium elements: early history (http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1951/mcmillan-lecture.pdf) (англ.) (pdf). Nobel Lecture (12 December 1951). Дата обращения 24 декабря 2010. Архивировано (https://www.webcitation.org/618b0WGLR?url=http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1951/mcmillan-lecture.pdf) 22 августа 2011 года.
40. *Бекман И. Н.* Плутоний (<http://profbeckman.narod.ru/PlutonSS.htm>). — Учебное пособие. — М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2009.
41. *National Research Council (U.S.). Subcommittee on Nuclear and Radiochemistry*. A Review of the accomplishments and promise of U.S. transplutonium research, 1940—1981 (<https://books.google.ru/books?id=CD8rAAAAYAAJ>). — National Academies, 1982. — 83 с.
42. *John, Emsley*. Plutonium // *Nature's Building Blocks: An A—Z Guide to the Elements* (<https://books.google.com/books?id=j-Xu07p3cKwC>). — Oxford: Oxford University Press, 2003. — 538 с. — ISBN 0198503407, 9780198503408.
43. *Wahl, professor* who discovered plutonium; 89 (<http://news.wustl.edu/news/Pages/7048.aspx>) (англ.). *Newsroom*. Washington University in St. Louis (27 April 2006). Дата обращения 13 января 2011. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618b119HY?url=http://news.wustl.edu/news/Pages/7048.aspx>) 22 августа 2011 года.
44. *Joseph W. Kennedy* (http://www.lanl.gov/history/people/J_Kennedy.shtml) (англ.). *Staff Biographies*. Los Alamos National Laboratory. Дата обращения 13 января 2011. Архивировано (https://www.webcitation.org/618b1dnCY?url=http://www.lanl.gov/history/people/J_Kennedy.shtml) 22 августа 2011 года.
45. *Glenn T. Seaborg*. The Plutonium Story (<http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/5808140-15UMe115808140.pdf>) (англ.). Lawrence Berkeley Laboratory, University of California. Дата обращения 2 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618b2D5GS?url=http://www.osti.gov/bridge/purl.cover.jsp?url=%2F5808140-15UMe1%2F>) 22 августа 2011 года.
46. *Gerhart Friedlander, Alfred M. Holtzer, Demetrios G. Sarantides, Lee G. Sobotka, Samuel I. Weissman*. Arthur C. Wahl (http://www.physicstoday.org/obits/notice_074.shtml) (англ.) (недоступная ссылка — *история* (https://web.archive.org/web/http://www.physicstoday.org/obits/notice_074.shtml)). *Death notice*. *Physics Today* (11 July 2006). Дата обращения 13 января 2011.
47. *Seaborg, G. T.* The Transuranium Elements (англ.) // *Katz, J. J., and Manning, W. M. (eds) Natl Nucl. En. Ser., Div IV, 14B* : статья. — New-York: McGraw-Hill, 1949. — P. 1, 2, 5.
48. *Scott F. A., Peekema R. M.* Progress in Nuclear Energy. — 1-е изд. — London: Pergamon Press, 1959. — С. 65.
49. *Albert Stwertka*. Plutonium // *Guide to the Elements*. — Oxford: Oxford University Press, 1998. — ISBN 0-19-508083-1.
50. *Glenn T. Seaborg*. Modern alchemy: selected papers of Glenn T. Seaborg (<https://books.google.com/books?id=e53sNAOXrdMC>). — World Scientific, 1994. — 696 с.
51. *Гребеников Е. А., Рябов Ю. А.* Открытие Плутона // *Поиски и открытия планет* (<https://books.google.ru/books?id=GEm4AAAAIAAJ>). — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: "Наука", 1984. — С. 156—162. — 224 с. — 100 000 экз.
52. *Rincon, Paul*. The girl who named a planet (<http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/4596246.stm>) (англ.). BBC News (13 January 2006). Дата обращения 7 ноября 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618b2k9l?url=http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/4596246.stm>) 22 августа 2011 года.

53. Plutonium (<http://elements.vanderkrogt.net/element.php?num=94>) (англ.). *History & Etymology. Elementymology & Elements Multidict*. Дата обращения 14 января 2011. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618b3etAe?url=http://elements.vanderkrogt.net/element.php?num=94>) 22 августа 2011 года.
54. *PBS contributors*. Frontline interview with Seaborg (<https://www.pbs.org/wgbh/pages/frontline/shows/reaction/interviews/seaborg.html>) (англ.). *Frontline*. Public Broadcasting Service (1997). Дата обращения 11 сентября 2010. Архивировано (<https://web.archive.org/web/20090105073016/http://www.pbs.org/wgbh/pages/frontline/shows/reaction/interviews/seaborg.html>) 5 января 2009 года.
55. *Химический факультет МГУ*. Плутоний, Plutonium, Pu (94) (<http://www.chem.msu.ru/su/rus/history/element/Pu.html>). *Открытие элементов и происхождение их названий*. МГУ. Дата обращения 9 ноября 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618bXEe7v?url=http://www.chem.msu.ru/su/rus/history/element/Pu.html>) 22 августа 2011 года.
56. *Heiserman, David L.* Element 94: Plutonium // *Exploring Chemical Elements and their Compounds*. — New York: TAB Books, 1992. — С. 337—340. — ISBN 0-8306-3018-X.
57. *David L. Clark*. Reflections on the Legacy of a Legend: Glenn T. Seaborg, 1912—1999 (<http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/pubs/00818011.pdf>) . — Журнал *Los Alamos Science*, 2000. — Вып. 26. — С. 56—61, 57.
58. *NPS contributors*. Room 405, George Herbert Jones Laboratory (<http://tps.cr.nps.gov/nhl/detail.cfm?ResourceId=735&ResourceType=Building>) (англ.). National Park Service. Дата обращения 11 сентября 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618b4QsSi?url=http://tps.cr.nps.gov/nhl/detail.cfm?ResourceId=735>) 22 августа 2011 года.
59. *Cunningham, B. B. and Werner, L. B.* The Transurium Elements (англ.) // *Пед. кол.*: G. T. Seaborg, J. J. Katz, W. M. Manning Natl Nucl. En. Ser., Div IV, 14B : статья. — New-York: McGraw-Hill, 1949. — P. 1.8, 51.
60. *Seaborg, G. T.* History of Met Lab Section C1 (англ.) // Report P-112 : статья. — 1942—1943. — Iss. 1.
61. *Glenn T. Seaborg u др.* The First Weighing of Plutonium (<http://www.osti.gov/accomp/plishments/documents/fullText/ACC0071.pdf>) (англ.) (pdf) vi. United States Atomic Energy Commission. University of Chicago (10 September 1967). Дата обращения 13 января 2011. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618b54t0b?url=http://www.osti.gov/accomp/plishments/documents/fullText/ACC0071.pdf>) 22 августа 2011 года.
62. *Thompson's Process* (<http://www.bonestamp.com/sgt/process.htm>) (англ.). The University of California (16 October 2006). Дата обращения 16 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618b5ZhuV?url=http://www.bonestamp.com/sgt/process.htm>) 22 августа 2011 года.
63. *William N. Miner*. The Encyclopedia of the Chemical Elements / Под ред. Clifford A. Hampel; соавт. Schonfeld, Fred W. — New York: Reinhold Book Corporation, 1968.
64. Плутоний // *Большая советская энциклопедия* : [в 30 т.] / гл. ред. А. М. Прохоров. — 3-е изд. — М.: Советская энциклопедия, 1969—1978.
65. История создания первой в СССР радиохимической технологии получения плутония (<http://www.khlopin.ru/proceedings/13-3.pdf>) (pdf). Радиевый институт им. В. Г. Хлопина. Дата обращения 2 января 2011. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618b66FwV?url=http://www.khlopin.ru/proceedings/13-3.pdf>) 22 августа 2011 года.
66. *Ковалева, С.* Плутоний в девичьих руках: создательницы «ядерного щита» Родины работали без страховки и отпусков (<http://www.libozersk.ru/pbd/Mayak60/link/234.htm>) (рус.) // Независимая газета : статья. — 14 октября 1997. — С. 6.
67. *Ефимова, Мария* М15 обнаружила советского шпиона среди Нобелевских лауреатов (<http://gigamir.net/news/advent/pub75142/>). *gzi.ru* (26 августа 2010). Дата обращения 22 октября 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/6BvSmHr51?url=http://gigamir.net/news/advent/pub75142/>) 4 ноября 2012 года.
68. *Pa, this requires action!* (http://www.mphpa.org/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=173) (pdf). The Atomic Heritage Foundation. Дата обращения 24 декабря 2010. Архивировано (https://www.webcitation.org/618b7znP5?url=http://www.mphpa.org/index2.php?option=com_content) 22 августа 2011 года.
69. *Vincent C. Jones*. Manhattan, the Army and the Atomic Bomb (<https://books.google.ru/books?id=eXUjIb-HxxEC>) / В соавт. с Center of Military History (U.S. Army). — Вашингтон: Government Printing Office, 1985. — 680 с. — ISBN 0160019397, 9780160019395.
70. *LANL contributors*. Site Selection (<http://www.lanl.gov/history/road/siteselection.shtm>) (англ.). *LANL History*. Los Alamos, New Mexico: Los Alamos National Laboratory. Дата обращения 11 сентября 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618b8STC?url=http://www.lanl.gov/history/road/siteselection.shtm>) 22 августа 2011 года.
71. *Site of the First Self-Sustaining Nuclear Reaction* (<http://tps.cr.nps.gov/nhl/detail.cfm?ResourceId=204&ResourceType=Site>) (англ.). *National Historic Landmark summary listing*. National Park Service. Дата обращения 24 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618b99XnS?url=http://tps.cr.nps.gov/nhl/detail.cfm?ResourceId=204>) 22 августа 2011 года.
72. *Hans A. Bethe*. The German Uranium Project (<http://scitation.aip.org/getpdf/servlet/GetPDFServlet?filetype=pdf&id=PHTOAD000053000007000034000001&idtype=cvi&prog=normal&bypassSSO=1>) (англ.) // *Physics Today* : статья (<http://scitation.aip.org/getabs/servlet/GetabsServlet?prog=normal&id=PHTOAD000053000007000034000001&idtype=cvi&prog=normal&bypassSSO=1>). — *Physics Today Online*, июль 2000. — Iss. 53. — No. 7. — DOI:10.1063/1.1292473 (<https://dx.doi.org/10.1063/1.1292473>).
73. *Гринвуд Н. Н., Эрншо А.* Химия элементов (https://books.google.com/books?id=OezvAAAAAA&q=Earnshaw+chemistry&dq=Earnshaw+chemistry&hl=ru&ei=OxwUWLYnMfYmswb9pLVk&sax=X&oeq=book_result&ct=result&resnum=1&ved=0CCcQ6AEwAA) = Chemistry of the elements / Пер. с англ. ред. кол. — Учебное пособие. — М.: Бином. Лаборатория знаний, 2008. — Т. 2. — 607 с. — (Лучший зарубежный учебник. В 2-х томах). — 2000 экз. — ISBN 978-5-94774-373-9.
74. *CP-1 Goes Critical* (http://www.cfo.doe.gov/me70/manhattan/cp-1_critical.htm) (англ.) (недоступная ссылка). *The Manhattan Project. An Interactive History*. US DOE. Office of History and Heritage Resources. Дата обращения 24 декабря 2010. Архивировано (https://web.archive.org/web/20060929115606/http://www.cfo.doe.gov/me70/manhattan/cp-1_critical.htm) 29 сентября 2006 года.
75. *Final Reactor Design and X-10* (http://www.cfo.doe.gov/me70/manhattan/final_react_or_x-10.htm) (англ.). *The Manhattan Project. An Interactive History*. US DOE. Office of History and Heritage Resources. Дата обращения 1 января 2011. Архивировано (https://web.archive.org/web/20060929115742/http://www.cfo.doe.gov/me70/manhattan/final_react_or_x-10.htm) 29 сентября 2006 года.
76. ORNL Metals and Ceramics Division, History 1946—1996 (<http://www.ms.ornl.gov/pdf/mchistory.pdf>) (англ.) (pdf) (недоступная ссылка). Oak Ridge National Laboratory (8 March 1999). — 154 стр. Дата обращения 23 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618b9cDr8?url=http://www.ms.ornl.gov/pdf/mchistory.pdf>) 22 августа 2011 года.
77. X-10 (<http://tennesseencyclopedia.net/imagegallery.php?EntryID=X001>) (англ.). The Tennessee Encyclopedia of History and Science (2002). Дата обращения 23 декабря 2010. Архивировано (<https://web.archive.org/web/20070930152520/http://tennesseencyclopedia.net/imagegallery.php?EntryID=X001>) 30 сентября 2007 года.
78. Oak Ridge National Laboratory (<http://tennesseencyclopedia.net/imagegallery.php?EntryID=O003>) (англ.). The Tennessee Encyclopedia of History and Science (2002). Дата обращения 24 декабря 2010. Архивировано (<https://web.archive.org/web/20070930165540/http://tennesseencyclopedia.net/imagegallery.php?EntryID=O003>) 30 сентября 2007 года.
79. *Carey Sublette*. Atomic History Timeline 1942—1944 (http://www.atomicheritage.org/index.php?option=com_content&task=view&id=288&Itemid=202) (англ.). Washington (DC): Atomic Heritage Foundation. Дата обращения 11 сентября 2010.
80. *F. G. Gosling*. Elimination of Thin Man // The Manhattan Project: making the atomic bomb (<https://books.google.com/books?id=SKaSCzKs8ZsC>). — DIANE Publishing, 1999. — С. 40. — 66 с. — ISBN 0788178806, 9780788178801.
81. B Reactor (<http://www.energy.gov/about/breactor.htm>) (англ.) (недоступная ссылка). U.S. Department of Energy. Дата обращения 1 января 2011. Архивировано (<https://web.archive.org/web/20080916040414/http://www.energy.gov/about/breactor.htm>) 16 сентября 2008 года.
82. *Michele S. Gerber, Brian Casserly, Frederick L. Brown*. B Reactor (<http://www.nps.gov/history/nhl/Fall07Nominations/B%20Reactor.pdf>) (англ.) (pdf) 4. National Historic Landmark Nomination (February 2007). Дата обращения 1 января 2011. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618bBY55a?url=http://www.nps.gov/history/nhl/Fall07Nominations/B%20Reactor.pdf>) 22 августа 2011 года.
83. Американцы проложили туристический маршрут через старый ядерный реактор (<http://lenta.ru/news/2007/09/24/spot/>). *Lenta.Ru* (24 сентября 2007). Дата обращения 18 ноября 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618bCAXb6?url=http://lenta.ru/news/2007/09/24/spot/>) 22 августа 2011 года.
84. Hanford Site Cleanup Completion Framework (http://www.hanford.gov/files.cfm/DOE-RL-2009-10_Rev_0-Jul-16.pdf) (англ.) (pdf). Department of Energy. Hanford (July 2010). — Более подробное описание районов можно найти в главе 2.3.1. Дата обращения 7 ноября 2010. Архивировано (https://www.webcitation.org/618bDAJq6?url=http://www.hanford.gov/files.cfm/DOE-RL-2009-10_Rev_0-Jul-16.pdf) 22 августа 2011 года.
85. *Long-Range Deep Vadose Zone Program Plan* (http://www.hanford.gov/files.cfm/DOE-RL-2010-89_Rev.0.pdf) (англ.) (pdf). Department of Energy. Hanford (October 2010). Дата обращения 7 ноября 2010. Архивировано (https://www.webcitation.org/618bGOG3?url=http://www.hanford.gov/files.cfm/DOE-RL-2010-89_Rev.0.pdf) 22 августа 2011 года.
86. *Historic Sample Of Bomb-Grade Plutonium Discovered* (<http://www.sciencedaily.com/releases/2009/03/090302130224.htm>) (англ.). ScienceDaily Online (5 March 2009). Дата обращения 25 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618bK58z1?url=http://www.sciencedaily.com/releases/2009/03/090302130224.htm>) 22 августа 2011 года.
87. *Rincon, Paul*. BBC NEWS — Science & Environment — US nuclear relic found in bottle (<http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/7918618.stm>), *BBC News* (2 марта 2009). Дата обращения 11 сентября 2010.
88. *Erika Gebel*. Old plutonium, new tricks. — *Журнал Analytical Chemistry*, 2009. — Вып. 81. — № 5. — С. 1724. — DOI:10.1021/ac90093b (<https://dx.doi.org/10.1021/ac90093b>).
89. *Jon M. Schwantes*. Nuclear archeology in a bottle: Evidence of pre-Trinity U.S. weapons activities from a waste burial site. — *Журнал Analytical Chemistry*, 2009. — Вып. 81. — № 4. — С. 1297—1306. — DOI:10.1021/ac802286a (<https://dx.doi.org/10.1021/ac802286a>). — PMID 19152306.
90. *Весту ФМ*. Работа по созданию атомной бомбы была сделана удивительно быстро и качественно. История с Андреем Светенко (<http://www.vesti.ru/doc.htm?id=377669>) (рус.), *Вести.Ру* (16 июля 2010). Дата обращения 29 октября 2010.
91. *A. J. Fahey, C. J. Zeissler, D. E. Newbury, J. Davis, and R. M. Lindstrom*. Postdetonation nuclear debris for attribution (англ.). — Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010. — DOI:10.1073/pnas.1010631107 (<https://dx.doi.org/10.1073/pnas.1010631107>).
92. Испытание первого в мире атомного устройства. Справка (<http://www.rian.ru/spravka/20100716/255028086.html>). РИА Новости (16 июля 2010). — Материал подготовлен на основе информации открытых источников. Дата обращения 4 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618bKcJdV?url=http://ria.ru/spravka/20100716/255028086.html>) 22 августа 2011 года.
93. *Polonium* (<http://www.ead.anl.gov/pub/doc/polonium.pdf>) (англ.) (pdf) (недоступная ссылка). *Human Health Fact Sheet*. Argonne National Laboratory (August 2005). Дата обращения 22 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618bOVGeU?url=http://www.ead.anl.gov/pub/doc/polonium.pdf>) 22 августа 2011 года.
94. *Sublette, Carey* 8.1.1 The Design of Gadget, Fat Man, and «Joe 1» (RDS-1) (<http://nuclearweaponarchive.org/Nwfaq/Nfaq8.html#faq8.1.1>) (англ.). *Nuclear Weapons Frequently Asked Questions, edition 2.18*. The Nuclear Weapon Archive (3 July 2007). Дата обращения 17 сентября 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618bPhzW?url=http://nuclearweaponarchive.org/Nwfaq/Nfaq8.html#faq8.1.1>) 22 августа 2011 года.
95. *Лесли Гровс*. Выбор цели // Теперь об этом можно рассказать. История Манхэттенского проекта (<http://www.lib.ru/MEMUARY/MANHATTEN/grove.txt>) = Now it can be told. The story of Manhattan project (<https://books.google.ru/books?id=4I0ypFOURbIC>). — М.: Атомиздат, 1964.
96. *John Malik*. The Yields of the Hiroshima and Nagasaki Explosions (<http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/docs/1/00313791.pdf>) . — Los Alamos, 1985. — Таблица VI.
97. *Валерий Чумаков*. Мирный фатум (<http://www.vokrugsveta.ru/vs/article/6816/>) (рус.) // Журнал «Вокруг Света» : статья. — «Вокруг Света», 2009. — Вып. 2831. — № 12.
98. *DOE contributors*. Historic American Engineering Record: B Reactor (105-B Building) (<http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/pu50yb.html#Z13>). — Richland (WA): U.S. Department of Energy. — С. 110.

99. Cochran, Thomas B. "Safeguarding nuclear weapons-usable materials in Russia (http://docs.nrdc.org/nuclear/nuc_06129701a_185.pdf)" in *International Forum on Illegal Nuclear Traffic*, Washington (DC): Natural Resources Defense Council, Inc. Проверено 17 сентября 2010. Архивная копия (http://web.archive.org/web/20130705053828/http://docs.nrdc.org/nuclear/nuc_06129701a_185.pdf) от 5 июля 2013 на Wayback Machine
100. CRC contributors. *Handbook of Chemistry and Physics* / Ред.: David R. Lide. — 87-е изд. — Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006. — ISBN 0849304873.
101. Stockholm International Peace Research Institute. SIPRI Yearbook 2007: Armaments, Disarmament, and International Security (https://books.google.com/?id=2M0C6SERFG0C&pg=PA567). — Oxford University Press, 2007. — С. 567. — ISBN 0199230218, 9780199230211.
102. Department of Energy Files Motion to Withdraw Yucca Mountain License Application (http://www.energy.gov/news/8721.htm) (англ.). Department of Energy (DOE) (3 March 2010). Дата обращения 20 декабря 2010. Архивировано (https://web.archive.org/web/20110514081840/http://www.energy.gov/news/8721.htm) 14 мая 2011 года.
103. Moss, William. The Human Plutonium Injection Experiments (http://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?00326640.pdf) (англ.) // Eckhardt, Roger Журнал Los Alamos Science. — Los Alamos National Laboratory, 1995. — Iss. 23. — P. 188, 205, 208, 214.
104. George L. Voelz. Plutonium and Health: How great is the risk? (англ.) // Журнал Los Alamos Science. — Los Alamos (NM): Los Alamos National Laboratory, 2000. — No. 26. — P. 78—79.
105. Плутоний = Plutonium Handbook. A Guide to the Technology / Перев. с англ. Под ред. В. Б. Шевченко и В. К. Маркова. — Справочник. — М.: Атомиздат, 1971. — Т. 1. — С. 12. — 428 с. — 2260 экз.
106. NIH contributors. Plutonium, Radioactive (http://webwiser.nlm.nih.gov/getSubstanceData.do;jsessionid=89B673C34252C77B4C276F2B2D0E4260?substanceID=419&displaySubstanceName=Plutonium,%20Радиоактивное&UNNAID=&STCCID=&selecte dDataMenuItemID=44) (англ.). Bethesda (MD): U.S. National Library of Medicine, National Institutes of Health. — Wireless Information System for Emergency Responders (WISER). Дата обращения 4 сентября 2010. Архивировано (https://www.webcitation.org/618bQeH1E?url=http://webwiser.nlm.nih.gov/getSubstanceData.do;jsessionid=89B673C34252C77B4C276F2B2D0E4260?substanceID=419) 22 августа 2011 года.
107. ARQ staff. Nitric acid processing (http://arq.lanl.gov/source/orgs/nmt/nmtdo/AQarchi ve/3rdQuarter08/page3.shtm) (англ.) // Actinide Research Quarterly. — Los Alamos (NM): Los Alamos National Laboratory, 2008. Проверено 4 сентября 2010.
108. Пер. с англ. языка под ред. Б. А. Надькто и Л. Ф. Тимофеевой. Плутоний. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. — Т. 2. — 203 с. — (Фундаментальные проблемы). — 500 экз. — ISBN 5-9515-00-24-9.
109. Taking Stock: A Look At The Opportunities And Challenges Posed By Inventories From The Cold War Era (https://books.google.ru/books?id=ZoEtU1n5yZAC). — 1-е изд. — DIANE Publishing Company, 2004. — 190 с. — ISBN 0788138081, 9780788138089.
110. Kolman, D. G. and Colletti, L. P. ECS transactions (https://books.google.com/?id=0o4DnYptWdgc&pg=PA71) (англ.) // 16-е изд. — Electrochemical Society, 2009. — Iss. 52. — P. 71. — ISSN 1938-5862 (https://www.worldcat.org/search?q=x0:jrnl&q =n2:1938-5862).
111. NNDC contributors; Alejandro A. Sonzogni (Database Manager). Chart of Nuclides (http://www.nndc.bnl.gov/chart) (англ.). Upton (NY): National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory (2008). Дата обращения 4 сентября 2010. Архивировано (https://www.webcitation.org/618bSplP?url=http://www.nndc.bnl.gov/chart) 22 августа 2011 года.
112. Richard Rhodes. The Making of the Atomic Bomb. — New York: Simon & Schuster, 1986. — С. 659—660. — ISBN 0-671-65719-4.
113. Siegfried S. Hecker. Plutonium and its alloys: from atoms to microstructure (http://www.fas.org/spp/othergov/doe/lanl/pubs/00818035.pdf) // 26-е изд. — Los Alamos Science, 2000. — С. 290—335.
114. Wick, O. J. (ed.). Plutonium handbook, A Guide to the Technology / Am. Nucl. Soc. — Reprint. — New York: Gordon & Breach, 1980.
115. Oetting, F. L., Rand, M. H., Ackerman, R. J. The Chemical Thermodynamics of Actinide Elements and their Compounds. — Ч. 1. — Vienna: IAEA, 1976. — С. 24.
116. Oswald J. Wick. Плутоний (https://books.google.com/books?id=HJ5TAAAMA AJ) = Plutonium Handbook: A Guide to the Technology / Под ред. О. Вика. — Справ. изд. — М.: Атомиздат, 1973. — Т. 2. — 456 с. — 2100 экз.
117. Александр Прищепенко. Дамоклов меч: Атомная бомба (http://www.porpmech.ru/article/4604-damoklov-mech/) (рус.) // Популярная механика : статья. — январь 2009.
118. Plutonium Crystal Phase Transitions (http://www.globalsecurity.org/wmd/intro/pu-ph ase.htm) (англ.), GlobalSecurity.org. Дата обращения 5 сентября 2010.
119. Актиноиды (http://femto.com.ua/articles/part_1/0070.html) — статья из Физической энциклопедии
120. Нептуний (http://n-t.ru/ni/ps/pb093.htm). Нептуний и плутоний – семивалентные. Популярная библиотека химических элементов (27 сентября 2003). Дата обращения 11 декабря 2010. Архивировано (https://www.webcitation.org/618bTnGwX?url=http://n-t.ru/ni/ps/pb093.htm) 22 августа 2011 года.
121. George, Matlack. A Plutonium Primer: An Introduction to Plutonium Chemistry and its Radioactivity. — Los Alamos National Laboratory, 2002.
122. Rita Cornelis, Joe Caruso, Helen Crews, Klaus Heumann. Handbook of elemental speciation II: species in the environment, food, medicine & occupational health (http://books.google.com/books?id=1PmjurlE6KkC). — Перепечатанное и иллюстрированное. — John Wiley and Sons, 2005. — 768 с. — ISBN 0470855983, 9780470855980.
123. Dumé, Belle. Plutonium is also a superconductor (http://physicsworld.com/cws/article/news/16443) (англ.), PhysicsWeb.org (20 November 2002). Дата обращения 5 сентября 2010.
124. Mary, Eagleson. Concise Encyclopedia Chemistry. — Walter de Gruyter, 1994. — С. 840. — ISBN 9783110114515.
125. Cleveland, J. M. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. (англ.). — 1965. — No. 4. — P. 230.
126. Cleveland, J. M. J. Inorg. Nucl. Chem. (англ.). — 1964. — No. 26. — P. 461—467.
127. Jenkis, W. J. J. Inorg. Nucl. Chem. (англ.). — 1963. — No. 25. — P. 463—464.
128. Плутоний (http://bse.sci-lib.com/article089986.html). БСЭ. Дата обращения 21 октября 2010. Архивировано (https://www.webcitation.org/6BvSqb6ss?url=http://bse.sci-lib.com/article089986.html) 4 ноября 2012 года.
129. Crooks, W. J. U др. Low Temperature Reaction of Reillex™ HPQ and Nitric Acid (http://sti.srs.gov/fulltext/ms2000068/ms2000068.html). — 20-е изд. — Solvent Extraction and Ion Exchange, 2002. — С. 543.
130. DOE contributors. Oklo: Natural Nuclear Reactors (http://nepa.energy.gov/nepa_documents/EIS/EIS0250/VOL_3/V3P3T3_7-3.pdf) (недоступная ссылка). U.S. Department of Energy, Office of Civilian Radioactive Waste Management (2004). Дата обращения 7 сентября 2010. Архивировано (https://web.archive.org/web/20100602022007/http://nepa.energy.gov/nepa_documents/EIS/EIS0250/VOL_3/V3P3T3_7-3.pdf) 2 июня 2010 года.
131. David Curtis. Nature's uncommon elements: plutonium and technetium / Fabryka-Martin, June; Paul, Dixon; Cramer, Jan. — 63. — Журнал «Geochemica et Cosmochimica Acta», 1999. — С. 275—285.
132. Hoffman, D. C.; Lawrence, F. O.; Mewherter, J. L.; Rourke, F. M. Detection of Plutonium-244 in Nature (http://www.nature.com/nature/journal/v234/n5325/abs/234132a0.html) (англ.) // Nature : статья. — 1971. — Iss. 234. — P. 132—134. — DOI:10.1038/234132a0 (https://dx.doi.org/10.1038%2F234132a0).
133. Peterson, Ivars. Uranium displays rare type of radioactivity (http://findarticles.com/p/articles/mi_m1200/is_n23_v140/ai_11701241) (англ.). Science News (7 December 1991). Дата обращения 7 сентября 2010.
134. Anthony L. Turkevich, Thanasis E. Economou, and George A. Cowan. Double-beta decay of ²³⁸U (англ.) // Phys. Rev. Lett. : journal. — 1991. — Vol. 67. — P. 3211. — DOI:10.1103/PhysRevLett.67.3211 (https://dx.doi.org/10.1103%2FPhysRevLett.67.3211).
135. Волков В. А. и др. Выдающиеся химики мира / Под ред. проф. Кузнецова В. И. — Биографический справочник. — М.: Высшая школа, 1991. — С. 407. — 656 с. — 100 000 экз. — ISBN 5-06-001568-8.
136. EPA contributors. Fissile Material (http://www.epa.gov/rpdweb00/glossary/termdef.html#f). Radiation Glossary. United States Environmental Protection Agency (2008). Дата обращения 5 сентября 2010. Архивировано (https://www.webcitation.org/618bXyPdX?url=http://www.epa.gov/rpdweb00/glossary/termdef.html#f) 22 августа 2011 года.
137. G. Audi, O. Bersillon, J. Blachot, A. H. Wapstra. The Nubase evaluation of nuclear and decay properties (http://amdc.in2p3.fr/nubase/Nubase2003.pdf) (англ.) (pdf) (недоступная ссылка). Nuclear Physics (2003). — Таблица с описанием ядерных свойств изотопов и периодами их полураспада. Дата обращения 9 ноября 2010. Архивировано (https://www.webcitation.org/618bYQw4e?url=http://amdc.in2p3.fr/nubase/Nubase2003.pdf) 22 августа 2011 года.
138. 94-plutonium (http://yooyo.cc.monash.edu.au/cgi-bin/cgiwrap/simcam/nucclide?nuc=P u) (англ.). Korea Atomic Energy Research Institute (2002). Дата обращения 28 декабря 2010. Архивировано (https://www.webcitation.org/618bYx6hv?url=http://yooyo.cc.monash.edu.au/cgi-bin/cgiwrap/simcam/nucclide?nuc=Pu) 22 августа 2011 года.
139. G. Audi, O. Bersillon, J. Blachot, A. H. Wapstra. The Nubase evaluation of nuclear and decay properties (http://amdc.in2p3.fr/nubase/Nubase2003.pdf) (англ.) // Журнал Nuclear Physics : статья. — 2003. — Iss. 128. — P. 3—128. Архивировано (https://www.archive.org/web/20110720233206/http://amdc.in2p3.fr/nubase/Nubase2003.pdf) 20 июля 2011 года.
140. Таблица нуклидов МАГАТЭ (http://www.nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html) (англ.). International Atomic Energy Agency. Дата обращения 28 октября 2010. Архивировано (https://www.webcitation.org/5wHwQs1Yp?url=http://www.nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html) 6 февраля 2011 года.
141. David Albright, Frans Berkhout, William Walker, Stockholm International Peace Research Institute. World inventory of plutonium and highly enriched uranium (http://books.google.com/books?id=F1QQRckGdMC). — Oxford University Press, 1993. — 246 с. — ISBN 0198291531, 9780198291534.
142. У плутония-237 основным каналом распада является электронный захват, однако обнаружен также менее вероятный канал альфа-распада. У плутония-241 основным каналом распада является бета-минус-распад, однако обнаружены также менее вероятные каналы альфа-распада и спонтанного деления.
143. Тимошенко, Алексей. Обама открыл «частникам» дорогу в космос (http://www.gzt.ru/topnews/science/obama-otkryl-chastnikam-dorogu-v-kosmos-329255.html) (рус.), gzt.ru (12 октября 2010). Архивировано (https://web.archive.org/web/2010101015033615/http://www.gzt.ru/topnews/science/obama-otkryl-chastnikam-dorogu-v-kosmos-329255.html) 15 октября 2010 года. Дата обращения 22 октября 2010.
144. J. W. Kennedy. Properties of Element 94 / Соавт.: Seaborg, G. T.; Segrè, E.; Wahl, A. C. — 70-е изд. — Physical Review, 1946. — С. 555—556.
145. N. N. Greenwood. Chemistry of the Elements / Соавт.: Earnshaw, A. — 2-е изд. — Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997. — ISBN 0-7506-3365-4.
146. Roger Case u др. Environmental monitoring for nuclear safeguards (https://books.google.ru/books?id=9Ytor17ffXkC). — DIANE Publishing, 1995. — 45 с. — ISBN 1428920137, 9781428920132.
147. Can Reactor Grade Plutonium Produce Nuclear Fission Weapons? (http://www.cnf.c.or.jp/e/proposal/reports/index.html) (англ.). Council for Nuclear Fuel Cycle Institute for Energy Economics, Japan (2001). Дата обращения 5 сентября 2010. Архивировано (https://www.webcitation.org/618bZQoSA?url=http://www.cnf.c.or.jp/e/proposal/reports/index.html) 22 августа 2011 года.
148. John Holdren; Matthew Bunn. Types of Nuclear Bombs, and the Difficulty of Making Them (http://www.nti.org/e_research/cnwm/overview/technical2.asp) (англ.) (недоступная ссылка). Nuclear Threat Initiative (25 November 2002). Дата обращения 23 ноября 2010. Архивировано (https://www.webcitation.org/65Arockp6?url=http://www.nti.org/) 3 февраля 2012 года.
149. Final Report, Evaluation of nuclear criticality safety data and limits for actinides in transport (http://ec.europa.eu/energy/nuclear/transport/doc/irsn Sect03_146.pdf) (англ.) (pdf). Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire. Дата обращения 23 ноября 2010. Архивировано (https://www.webcitation.org/618baD0Up?url=http://ec.europa.eu/energy/nuclear/transport/doc/irsn_Sect03_146.pdf) 22 августа 2011 года.

150. Troubles tomorrow? Separated Neptunium 237 and Americium (<http://www.isis-online.org/publications/fmct/book/New%20chapter%205.pdf>) (англ.). Часть V. ISIS (1999). Дата обращения 23 ноября 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618ba1VfW?url=http://www.isis-online.org/publications/fmct/book/New%20chapter%205.pdf>) 22 августа 2011 года.
151. A. Blanchard; K. R. Yates; J. F. Zino; D. Biswas; D. E. Carlson; H. Hoang; D. Heemstra. Updated Critical Mass Estimates for Plutonium-238 (<http://sti.srs.gov/fulltext/ms9900313/ms9900313.html>) (англ.). U.S. Department of Energy: Office of Scientific & Technical Information. Дата обращения 23 ноября 2010. Архивировано (<http://www.webcitation.org/618bbCyKu?url=http://sti.srs.gov/fulltext/ms9900313/ms9900313.html>) 22 августа 2011 года.
152. Amory B. Lovins. Nuclear weapons and power-reactor plutonium (<http://www.nature.com/nature/journal/v283/n5750/abs/283817a0.html>) (англ.) // Журнал Nature : статья. — 1980. — Iss. 283. — No. 5750. — P. 817—823. — DOI:10.1038/283817a0 (<https://dx.doi.org/10.1038%2F283817a0>).
153. Плутоний (<http://nuclear-weapons.nm.ru/theory/plutonium.htm>). nuclear-weapons.nm.ru (2002). Дата обращения 13 ноября 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618bbdfgB?url=http://nuclear-weapons.nm.ru/theory/plutonium.htm>) 22 августа 2011 года.
154. NMT Division Recycles, Purifies Plutonium-238 Oxide Fuel for Future Space Missions (http://lanl.gov/source/orgs/nmt/nmtdo/AQarchive/97summer/Pu_238.htm) (англ.). Los Alamos National Laboratory (LANL) (26 June 1996). Дата обращения 22 декабря 2010. Архивировано (https://www.webcitation.org/618bdPVXg?url=http://lanl.gov/source/orgs/nmt/nmtdo/AQarchive/97summer/Pu_238.htm) 22 августа 2011 года.
155. Allen, R. P., Dahlgren, S. D., and Way, R. ref. 321 (англ.). — 1976. — P. 61.
156. Bush, R. A. ref. 320 (англ.). — 1970. — P. 1037, 1045.
157. Elliot, R. O., Geissen, B. C. ref. 321 (англ.). — 1976. — P. 47.
158. Moody, Kenton James; Hutcheon, Ian D.; Grant, Patrick M. "plutonium+alloys"&cd=22#v=onepage&q=%22plutonium%20alloys%22 Nuclear forensic analysis (<https://books.google.com/?id=W3FneOg8tS4C&pg=PA169&dq=>). — CRC Press, 2005. — С. 169. — ISBN 0849315131.
159. Hurst, D. G. and Ward, A. G. Canadian Research Reactors (http://www.csirc.net/do_cs/reports/ref_066.pdf). — Los Alamos National Laboratory. (недоступная ссылка)
160. Curro, N. J. Unconventional superconductivity in PuCoGa₈ (<http://www.lanl.gov/org/smpa/files/mrhighlights/LALP-06-072.pdf>). — Los Alamos National Laboratory, 2006.
161. McCuaig, Franklin D. Pu-Zr alloy for high-temperature foil-type fuel (<http://www.google.com/patents?vid=4059439>). — 1977.
162. Jha, D.K. Nuclear Energy (<https://books.google.com/?id=L79odes2iHEC&pg=PA73>). — Discovery Publishing House, 2004. — С. 73. — ISBN 8171418848.
163. Plutonium (<https://books.google.com/?id=8rNAAAAQAAJ&pg=PA456>) / Авт. колл. — Taylor & Francis, 1967. — 1114 с.
164. А. М. Голуб. Общая и неорганическая химия = Загальна та неорганічна хімія. — Киев: Вища школа, 1971. — Т. 2. — 416 с. — 6700 экз.
165. Пер. с англ. языка под ред. Б. А. Надькто и Л. Ф. Тимофеевой. Плутоний. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2003. — Т. 1. — 292 с. — (Фундаментальные проблемы). — 500 экз. — ISBN 5-9515-00-24-9.
166. Dmitry S. Pesnya, Anton V. Romanovsky. Comparison of cytotoxic and genotoxic effects of plutonium-239 alpha particles and mobile phone GSM 900 radiation in the Allium cepa test (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383571812002914>) (англ.) (pdf). Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis (8 October 2012). Дата обращения 8 октября 2012.
167. H. Nagasawa, J.B. Little, W.C. Inkretz, S. Carpenter, K. Thompson, M.R. Rajuc, D. J. Chenc, G.F. Strmistec. Cytogenetic effects of extremely low doses of plutonium-238 alpha-particle irradiation in CHO K-1 cells (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383571812002914>) (англ.). Mutation Research Letters (3 July 1990).
168. Weapons of Mass Destruction (<https://books.google.ru/books?id=7X-dAAAAQBAJ&pg=PA6>) // Britannica Educational Publishing, 2011, ISBN 1-61530-751-6, page 6
169. DOE contributors. Plutonium (<http://www.hss.energy.gov/nuclearsafety/ns/techstds/standard/hdbk1081/hbk1081d.html#Z2281>). Nuclear Safety and the Environment. Department of Energy, Office of Health Safety and Security. Дата обращения 9 октября 2010. Архивировано (<https://web.archive.org/web/20090122022256/http://www.hss.energy.gov/nuclearsafety/ns/techstds/standard/hdbk1081/hbk1081d.html#Z2281>) 22 января 2009 года.
170. Лента.Ру. Впервые после холодной войны США возобновляют производство плутония (<http://lenta.ru/news/2005/06/27/plutonium/>). Лента.Ру (27 июня 2005). Дата обращения 12 октября 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618beHQp?url=http://lenta.ru/news/2005/06/27/plutonium/>) 22 августа 2011 года.
171. Иван Панин. Американцы подтвердили существование 114-го элемента (http://ifnfox.ru/science/lab/2009/09/25/Amerikancy_podtvye.phtml) (рус.), Infox.ru (25 сентября 2009).
172. Американские физики подтвердили открытие россиянами 114-го элемента (<http://lenta.ru/news/2009/09/25/e114/>). Lenta.Ru (25 сентября 2009). Дата обращения 18 ноября 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618bfdT8z?url=http://lenta.ru/news/2009/09/25/e114/>) 22 августа 2011 года.
173. Физики получили шесть новых изотопов сверхтяжелых элементов (<http://lenta.ru/news/2010/10/27/six/>). Lenta.ru (27 октября 2010). Дата обращения 8 ноября 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618bgkuzZ?url=http://lenta.ru/news/2010/10/27/six/>) 22 августа 2011 года.
174. Chemical Element 114: One of Heaviest Elements Created (<http://www.sciencedaily.com/releases/2010/06/100622102347.htm>) (англ.). ScienceDaily Online (26 October 2010). Дата обращения 25 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618bhSykw?url=http://www.sciencedaily.com/releases/2010/06/100622102347.htm>) 22 августа 2011 года.
175. 3-я группа периодической системы — редкоземельные элементы, актиний и актиноиды // Неорганическая химия. Химия элементов / Третьяков Ю. Д., Мартыненко Л. И., Григорьев А. Н., Цивадзе А. Ю. и др. — Уч. изд. — М.: "Химия", 2001. — Т. 1. — 472 с. — 1000 экз. — ISBN 5-7245-1213-0.
176. Barber, R. C.; Greenwood, N. N.; Hrynkiewicz, A. Z.; Jeannin, Y. P.; Lefort, M.; Sakai, M.; Uehla, I.; Wapstra, A. P.; Wilkinson, D. H. Discovery of the Transfermium Elements (<http://iupac.org/publications/pac/pdf/1993/pdf/6508x1757.pdf>) (англ.) // IUPAC : статья. — Великобритания, 1993. — Iss. 65. — No. 8. — P. 1757—1814. — DOI:10.1351/pac199365081757 (<https://dx.doi.org/10.1351%2Fpac199365081757>).
177. DOE contributors. Plutonium: The First 50 Years (<http://www.doeal.gov/SWEIS/DOEDocuments/004%20DOE-DP-0137%20Plutonium%2050%20Years.pdf>). — U.S. Department of Energy, 1996. Архивная копия (<http://web.archive.org/web/20130218162928/http://www.doeal.gov/SWEIS/DOEDocuments/004%20DOE-DP-0137%20Plutonium%2050%20Years.pdf>) от 18 февраля 2013 на Wayback Machine
178. The atomic bombing of Nagasaki (<http://www.cfo.doe.gov/me70/manhattan/nagasaki.htm>) (англ.) (недоступная ссылка). The Manhattan Project (An Interactive History). US Department of Energy. Office of History and Heritage Resources. Дата обращения 6 ноября 2010. Архивировано (<https://web.archive.org/web/2010060929120212/http://www.cfo.doe.gov/me70/manhattan/nagasaki.htm>) 29 сентября 2006 года.
179. "How many people died as a result of the atomic bombings?" (http://www.ref.or.jp/general/ga_eqa1.html) (неопр.) (недоступная ссылка). Frequently Asked Questions. Radiation Effects Research Foundation (2007). Дата обращения 6 ноября 2010. Архивировано (https://www.webcitation.org/618bi2Hau?url=http://www.ref.or.jp/general/ga_eqa1.html) 22 августа 2011 года.
180. Weapons research crosses the Channel (<http://www.nature.com/news/2010/101104/full/news.2010.583.html>) (англ.) // Журнал Nature : статья. — Nature, 4 ноября 2010. — ISSN 0028-0836 (<https://www.worldcat.org/search?fq=x0:jml&q=n2:0028-0836>). — DOI:10.1038/news.2010.583 (<https://dx.doi.org/10.1038%2Fnews.2010.583>).
181. Isaac Asimov. Nuclear Reactors // Understanding Physics. — Barnes & Noble Publishing, 1988. — С. 905. — ISBN 0880292512.
182. Александр Емельяненко. Из плутония вылетают пар (<http://www.rg.ru/2007/11/26/plutonij.html>) (рус.) // "Российская газета" — Государство : статья. — Российская газета, 22 ноября 2007. — Вып. 4524.
183. Взрыв (<http://bse.sci-lib.com/article004689.html>). Большая советская энциклопедия. Дата обращения 18 декабря 2012. Архивировано (<https://www.webcitation.org/61D1ymYF6h?url=http://bse.sci-lib.com/article004689.html>) 19 декабря 2012 года.
184. Samuel Glasstone, Leslie M. Redman. An Introduction to Nuclear Weapons (<http://www.doeal.gov/opa/docs/RR00171.pdf>). — Atomic Energy Commission Division of Military Applications Report WASH-1038, 1972. — С. 12. Архивная копия (<http://web.archive.org/web/20090827082245/http://www.doeal.gov/opa/docs/RR00171.pdf>) от 27 августа 2009 на Wayback Machine
185. Крючков, Игорь Этот сближающийся атом (<http://www.gzt.ru/Gazeta/etot-sblizhayu-schii-atom-268562.html>) (недоступная ссылка — история (<https://web.archive.org/web/20091027082245/http://www.gzt.ru/Gazeta/etot-sblizhayu-schii-atom-268562.html>)). gzt.ru (27 октября 2009). Дата обращения 23 октября 2010.
186. Пузырев, Денис Южная Корея составила список целей для первоочередного удара на территории КНДР (<http://www.gzt.ru/topnews/politics/yuzhnaya-koreya-sostavila-spisok-tselei-dlya-262118.html>) (недоступная ссылка — история (<https://web.archive.org/web/20091027082245/http://www.gzt.ru/topnews/politics/yuzhnaya-koreya-sostavila-spisok-tselei-dlya-262118.html>))). gzt.ru (24 сентября 2009). Дата обращения 23 октября 2010.
187. Сергей Строкань. Обогащающие обстоятельства (<http://www.kommersant.ru/doc.aspx?DocId=760499>) (рус.) // Газета Коммерсантъ : статья. — Коммерсантъ, 2007. — Вып. 3643. — № 67.
188. Агентство Reuters. Пакистан наращивает ядерный потенциал (<http://www.kommersant.ru/news.aspx?DocId=993248>) (рус.) // Коммерсантъ Новости : статья. — 2006. Архивировано (<https://archive.today/20120802221411/http://www.kommersant.ru/News/993248>) 2 августа 2012 года.
189. GZT.RU. США и РФ подписали план утилизации российского плутония (<http://www.gzt.ru/topnews/politics/ssha-irf-podpisali-plan-utilizatsii-rossiiskogo-148244.html>) (рус.), gzt.ru (26 сентября 2009). Дата обращения 23 октября 2010.
190. Россия и США достигли успеха в перезагрузке (<http://www.vesti.ru/doc.html?id=371544>) (рус.), Vesti.Ru (25 июня 2010). Дата обращения 23 октября 2010.
191. США и Казахстан объявили о закрытии ядерного реактора в Актау (<http://www.itar-tass.com/level2.html?NewsID=15687783>) (недоступная ссылка — история (<https://web.archive.org/web/20101119/298233513.html>))). ИТАР-ТАСС (17 ноября 2010). Дата обращения 17 ноября 2010.
192. США приветствуют закрытие ядерного реактора в Казахстане (<http://www.rian.ru/world/20101119/298233513.html>). РИА Новости (19 ноября 2010). Дата обращения 4 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618bjO3G?url=http://ria.ru/world/20101119/298233513.html>) 22 августа 2011 года.
193. Подписан закон о ратификации Соглашения между правительствами России и США об утилизации плутония, не являющегося более необходимым для целей обороны (<http://kremlin.ru/events/president/news/11487>) / kremlin.ru, 7 июня 2011
194. kremlin.ru. Федеральный закон от 03.06.2011 г. № 108-ФЗ (<http://kremlin.ru/acts/bank/33239>) «О ратификации Соглашения между Правительством Российской Федерации и Правительством Соединенных Штатов Америки об утилизации плутония, заявленного как плутоний, не являющийся более необходимым для целей обороны, обращении с ним и сотрудничестве в этой области»
195. 68 тонн плутония. От чего отказался президент Путин (<https://lenta.ru/articles/2016/10/03/plutonium/>) / Lenta.ru, 4 октября 2016
196. Указ Президента Российской Федерации от 03.10.2016 № 511 (<http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201610030004>) «О приостановлении Российской Федерацией действия Соглашения между Правительством Российской Федерации и Правительством Соединенных Штатов Америки об утилизации плутония, заявленного как плутоний, не являющийся более необходимым для целей обороны, обращении с ним и сотрудничестве в этой области и протоколов к этому Соглашению»
197. P. Povinec, J. A. Sanchez-Cabeza. Radionuclides in the environment: International Conference on Isotopes in Environmental Studies: Aquatic Forum 2004, 25-29 October, Monaco (<https://books.google.com/books?id=kHclmkm2eccC>). — Elsevier, 2006. — 646 с. — ISBN 0080449093, 9780080449098.

198. Marshall Islands Research Could Lead to Resettlement After Nuclear Tests (<http://www.sciencedaily.com/releases/2010/02/100211151651.htm>) (англ.). ScienceDaily Online (12 February 2010). Дата обращения 25 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618bXGJc?url=http://www.sciencedaily.com/releases/2010/02/100211151651.htm>) 22 августа 2011 года.
199. Pierre Guéguéniat, Pierre Germain, Henri Métivier. Radionuclides in the oceans: Inputs and inventories (https://books.google.com/books?id=IR_EBUYPyysK). — L'Éditeur: EDP Sciences, 1996. — 231 с. — ISBN 2868832857, 9782868832856.
200. Гордон Карера. 40 лет назад ВВС США потеряли атомную бомбу (http://news.bbc.co.uk/1/hi/russian/international/newsid_7721000/7721534.stm). bccrussian.com (11 ноября 2008). Дата обращения 3 декабря 2010. Архивировано (https://www.webcitation.org/618bXGJc?url=http://news.bbc.co.uk/1/hi/russian/international/newsid_7721000/7721534.stm) 22 августа 2011 года.
201. Christensen, 2009, pp. 123—125.
202. Тимошенко, Алексей. Роскосмос готовится к полетам на ядерном реакторе (<http://www.gzt.ru/topnews/science/roskosmos-gotovitsya-k-poletam-na-yadernom-769030.html>) (рус.), gzt.ru (28 октября 2009). Дата обращения 23 октября 2010.
203. Caldicott, Helen. The New Nuclear Danger: George W. Bush's Military-Industrial Complex. — New York: The New Press, 2002.
204. Thomas P. McLaughlin; Shean P. Monahan; Norman N. Pruvost; Vladimir V. Frolov; Boris G. Ryazanov; Victor I. Sviridov. A review of Critically Accidents (<http://www.csiarc.net/docs/reports/la-13638.pdf>) (англ.) (pdf) (недоступная ссылка) 72, 82. Los Alamos National Laboratory (May 2000). — Обзор аварий, связанных с ядерными материалами. Дата обращения 23 ноября 2010. Архивировано (<https://web.archive.org/web/20070705081823/http://www.csiarc.net/docs/reports/la-13638.pdf>) 5 июля 2007 года.
205. Антон Ефремов. Зона денежного отчуждения (<http://ura-inform.com/ru/economic/2010/11/25/zona>). УРА-Информ (25 ноября 2010). Дата обращения 28 ноября 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618bzQycY?url=http://ura-inform.com/ru/economic/2010/11/25/zona>) 22 августа 2011 года.
206. Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts (<http://www.iaea.org/Publications/Booklets/Chernobyl/Chernobyl.pdf>) (англ.) (pdf). *The Chernobyl Forum: 2003—2005 (second revised version)*. International Atomic Energy Agency (IAEA). Дата обращения 28 ноября 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618c8oScc?url=http://www.iaea.org/Publications/Booklets/Chernobyl/Chernobyl.pdf>) 22 августа 2011 года.
207. МАГАТЭ. Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050 (http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/IAEA-RDS-1-30_web.pdf) (англ.) // 30-е издание : отчёт, pdf. — Австрия, 2010. — P. 14, 18. — ISBN 978-92-0-108010-3. — ISSN 1011-2642 (<https://www.worldcat.org/search?fq=x0:jrnl&q=2:1011-2642>).
208. Ed Gerstner. Nuclear energy: The hybrid returns (<http://www.nature.com/news/2009/090701/pdf/460025a.pdf>) (англ.) // Журнал Nature : статья (<http://www.nature.com/news/2009/090701/full/460025a.html>). — 1 июля 2009. — Iss. 460. — DOI:10.1038/460025a (<https://dx.doi.org/10.1038/460025a>).
209. Plutonium (<http://periodic.lanl.gov/elements/94.html>) (англ.). *Uses*. Los Alamos National Laboratory's Chemistry Division (15 December 2003). Дата обращения 30 декабря 2010. Архивировано (<https://web.archive.org/web/20041017015408/http://periodic.lanl.gov/elements/94.html>) 17 октября 2004 года.
210. Ping Zhang, Bao-Tian Wang, Xian-Geng Zhao. Ground state properties and high pressure behaviour of plutonium dioxide: Systematic density functional calculations (<http://arxiv.org/pdf/1005.0277>) (англ.) (pdf). arxiv.org (3 May 2010). Дата обращения 16 ноября 2010.
211. Venkateswara Sarma Mallela, V Ilankumaran, N.Srinivasa Rao. Trends in Cardiac Pacemaker Batteries (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1502062/>) (англ.) // *Indian Pacing Electrophysiol J* : статья. — 1 октября 2004. — Iss. 4. — No. 4.
212. Plutonium Powered Pacemaker (1974) (<http://www.ora.uoregon.edu/ptp/collection/Miscellaneous/pacemaker.htm>) (англ.). Oak Ridge Associated Universities (23 March 2009). Дата обращения 15 января 2011. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618eWso?url=http://www.ora.uoregon.edu/ptp/collection/Miscellaneous/pacemaker.htm>) 22 августа 2011 года.
213. Bayles, John J.; Taylor, Douglas. SEALAB III — Diver's Isotopic Swimsuit-Heater System (<http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=AD0708680>) (англ.). Department of Defense (1970). Дата обращения 15 января 2011. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618eDULQb?url=http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord>) 22 августа 2011 года.
214. Franklin H. Cocks. Energy demand and climate change: issues and resolutions (http://books.google.com/books?id=0wWVD_ToiZiYC). — Wiley-VCH, 2009. — 251 с. — ISBN 3527324461, 9783527324460.
215. Andrew Wilson. Solar system log (<https://books.google.com/books?id=y41TAAAMAAJ>). — Лондон: Jane's Publishing Company Ltd, 1987. — С. 64. — 128 с. — ISBN 0710604440, 9780710604446.
216. Константин Лантратов. Плутон стал ближе (<http://www.kommersant.ru/doc.aspx?docid=642558>) (рус.) // Газета Коммерсантъ : статья. — Коммерсантъ, 2006. — Вып. 3341. — № 10.
217. Александр Сергеев. Зонд к Плутону: безупречный старт большого путешествия (<http://elementy.ru/news/430065>) (рус.). — Элементы.Ру, 2006.
218. Тимошенко, Алексей. Космическая эра — человек оказался не нужен (<http://www.gzt.ru/topnews/science/kosmicheskaya-era-chelovek-okazalsya-ne-nuzhen-301203.html>). gzt.ru (16 сентября 2010). Дата обращения 22 октября 2010. Архивировано (<https://web.archive.org/web/20100419160326/http://www.gzt.ru/topnews/science/kosmicheskaya-era-chelovek-okazalsya-ne-nuzhen-301203.html>) 19 апреля 2010 года.
219. Melissa McNamara. Space Probe Heads To Pluto - Finally (<http://www.cbsnews.com/stories/2006/01/19/tech/main1219891.shtml>) (англ.). CBS News.com (19 January 2006). Дата обращения 7 ноября 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/615UM9u96?url=http://www.cbsnews.com/stories/2006/01/19/tech/main1219891.shtml>) 20 августа 2011 года.
220. Зонд New Horizons "оглянулся" на Юпитер (<http://www.rian.ru/science/20100728/259247729.html>). РИА Новости (28 июля 2010). Дата обращения 4 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618cBx2KO?url=http://ria.ru/science/20100728/259247729.html>) 22 августа 2011 года.
221. После сближения с Плутоном зонд New Horizons полетит в Пояс Койпера (<http://www.popmech.ru/science/49161-posle-sblizheniya-s-plutonom-zond-new-horizons-poljetit-v-poyas-kojpera/>) (рус.). Популярная Механика (16 октября 2014). Дата обращения 15 мая 2015.
222. Энергия чистой науки: Ток из коллайдера (<http://www.popmech.ru/article/7543-en-ergiya-chistoy-nauki/>) (рус.) // *physics arXiv blog* Популярная механика : статья. — 12.08.10.
223. В NASA провели первый тест-драйв нового марсохода (<http://lenta.ru/news/2010/07/26/testdrive/>). Lenta.ru (26 июля 2010). Дата обращения 8 ноября 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/65AppEZOX?url=http://lenta.ru/news/2010/07/26/testdrive/>) 3 февраля 2012 года.
224. Ajay K. Misra. Overview of NASA Program on Development of Radioisotope Power Systems with High Specific Power (http://pdf.iaea.org/preview/CDReadyMIECEC061309/PV2006_4187.pdf) (англ.) // NASA/JPL : обзор. — San Diego, California, июнь 2006.
225. Traci Watson. Troubles parallel ambitions in NASA Mars project (https://www.usatoday.com/tech/science/space/2008-04-13-mars_N.htm) (англ.). USA Today/NASA (14 April 2008). Дата обращения 17 декабря 2010. Архивировано (https://www.webcitation.org/65Apttd9?url=http://www.usatoday.com/tech/science/space/2008-04-13-mars_N.htm) 3 февраля 2012 года.
226. Brian Dodson. NASA's cancellation of Advanced Sterling Radioisotope Generator casts doubt on future deep-space missions (<http://www.gizmag.com/nasa-cancels-a-dvanced-sterling-radioisotope-generator/29880/>) (англ.). Gizmag.com (24 November 2013). Дата обращения 15 мая 2015.
227. NASA отказалось от эффективного ядерного источника энергии (<http://www.popmech.ru/technologies/15098-nasa-otkazalos-ot-effektivnogo-yadernogo-istochnika-energii/>) (рус.). Популярная Механика (25 ноября 2013). Дата обращения 15 мая 2015.
228. Appolo 15. News. Press kit (http://history.nasa.gov/alsj/a15/A15_PressKit.pdf) (англ.) (pdf) Стр. 57—58. NASA (National Aeronautics and Space Administration) (15 July 1971). Дата обращения 10 декабря 2010. Архивировано (https://www.webcitation.org/618e7dauW?url=http://history.nasa.gov/alsj/a15/A15_PressKit.pdf) 22 августа 2011 года.
229. *Division of Engineering. A Report of the NMAB* (<https://books.google.ru/books?id=I6MrAAAYAAJ>). — 1-е изд. — National Academies, 1970. — 655 с.
230. Lloyd I. Shure; Harvey J. Schwartz. Survey of Electric Power Plants for Space Applications (http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19660005486_1966005486.pdf) (англ.) (pdf). NASA (December 1965). Дата обращения 25 декабря 2010.
231. SNAP Power Generators, Except Satellites (<http://www.davistownmuseum.org/cbm/Rad8f.html>) (англ.). RADNET. Дата обращения 25 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/65ApuzTU4?url=http://www.davistownmuseum.org/cbm/Rad8f.html>) 3 февраля 2012 года.
232. *Planning & Human Systems, Inc.* Atomic Power in Space. A History (<http://www.osti.gov/accomplishments/documents/fullText/ACC0006.pdf>) (англ.) (pdf) (March 1987). Дата обращения 25 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/65AovQ1T3?url=http://www.osti.gov/accomplishments/documents/fullText/ACC0006.pdf>) 3 февраля 2012 года.
233. SNAP-21 Program, Phase II (<http://www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/4816023-3WV1w8/4816023.pdf>) (англ.) // Energy Citations Database : technical report. — США, 1 января 1968. — P. 149 с. — DOI:10.2172/4816023 (<https://dx.doi.org/10.2172/4816023>).
234. The Pioneer Jupiter Spacecraft (<http://history.nasa.gov/SP-349/ch3.htm>) (англ.). *Electrical Power*. NASA History Office (August 2004). Дата обращения 25 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618dvoFa?url=http://history.nasa.gov/SP-349/ch3.htm>) 22 августа 2011 года.
235. Appolo 17. News. Press kit (<https://mira.hq.nasa.gov/history/ws/hdmshrc/all/main/DD17980.PDF>) (англ.) (pdf) (недоступная ссылка) Стр. 38—39. NASA (National Aeronautics and Space Administration) (26 November 1972). Дата обращения 25 декабря 2010. Архивировано (<https://web.archive.org/web/20110721080816/https://mira.hq.nasa.gov/history/ws/hdmshrc/all/main/DD17980.PDF>) 21 июля 2011 года.
236. ALSEP Off-load (<http://history.nasa.gov/alsj/a12/a12.alsepoff.html>) (англ.). Appolo 12. Lunar Surface Journal (30 October 2010). Дата обращения 25 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618e8eEMS?url=http://history.nasa.gov/alsj/a12/a12.alsepoff.html>) 22 августа 2011 года.
237. Space FAQ 10/13 - Controversial Questions (<http://www.faqs.org/faqs/space/controversy/>) (англ.). faqs.org (29 June 2010). Дата обращения 25 декабря 2010.
238. Тепло Сарова для китайского «Зайца» (<http://rareearth.ru/pub/20140416/00589.html>) (рус.). Редкие земли (16 апреля 2014). Дата обращения 19 апреля 2015.
239. Российские лунные станции будут работать на плутонии (<http://tass.ru/kosmos/1606410>) (рус.). ТАСС (27 ноября 2014). Дата обращения 19 апреля 2015.
240. Российские станции на Луне подпитаются от оружейного плутония (<http://lenta.ru/news/2014/11/27/plutonium/>) (рус.). Lenta.ru (27 ноября 2014). Дата обращения 19 апреля 2015.
241. Озвучены детали российской лунной программы (<http://www.popmech.ru/science/49153-ozvucheny-detali-rossijskoj-lunnoj-programmy/>) (рус.). Популярная механика (15 октября 2014). Дата обращения 15 мая 2015.
242. Кесслер Г. Ядерная энергетика (<https://books.google.com/books?id=hdN4AAAAIAAJ>) = Nuclear fussion reactors. Potential role and risks of converters and breeders / Пер. с англ. под ред. Митяев Ю. И. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 264 с. — 3700 экз.
243. Марина Чадеева. Мирный атом: Ядерная энергетика (<http://www.popmech.ru/article/1924-mirnuy-atom/>). Популярная Механика (апрель 2005). Дата обращения 3 января 2011. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618eF1gp?url=http://www.popmech.ru/article/1924-mirnuy-atom/>) 22 августа 2011 года.
244. Ф. И. Шаровар. Устройства и системы пожарной сигнализации. — М.: Стройиздат, 1979. — 271 с. — 20 000 экз.
245. Дымоизвещатель РИД-1 (<https://youtube.com/watch?v=xWS4b6q2uvc>) на YouTube
246. Извещатель дыма радиоизотопный РИД-6М. Паспорт еУ2.845.003 ПС.

247. Plutonium Element Facts (<http://www.chemicool.com/elements/plutonium.html>) (англ.). *Abundance & Isotopes*. chemicool.com. Дата обращения 29 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618awL50o?url=http://www.chemicool.com/elements/plutonium.html>) 22 августа 2011 года.

Ссылки

- На Викискладе есть медиафайлы по теме Плутоний

На русском языке:

- Плутоний (<http://n-t.ru/ri/ps/pb094.htm>). Популярная библиотека химических элементов (14 октября 2003). Дата обращения 11 октября 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618eQvngg?url=http://n-t.ru/ri/ps/pb094.htm>) 22 августа 2011 года.
- И. Я. Василенко, О. И. Василенко*. Плутоний (<http://nuclphys.sinp.msu.ru/ecology/isotopes/Plutonium.pdf>) (pdf) — 8 стр. — Воздействие плутония на организм. Дата обращения 30 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618FR8QER?url=http://nuclphys.sinp.msu.ru/ecology/isotopes/Plutonium.pdf>) 22 августа 2011 года.

На английском языке:

- The Criticality Safety Information Resource Center. A Review of Criticality Accidents: 2000 Revision (http://www.csirc.net/library/la_13638.shtml) (англ.) (недоступная ссылка). CSIRC. — Обзоры ядерных происшествий, в том числе связанных и с плутонием. Дата обращения 23 ноября 2010. Архивировано (https://web.archive.org/web/20070929071256/http://www.csirc.net/library/la_13638.shtml) 29 сентября 2007 года.
- W. G. Sutcliffe, R. H. Condit, W. G. Mansfield, D. S. Myers, D. W. Layton, P. W. Murphy*. A Perspective on the Dangers of Plutonium (<https://web.archive.org/web/20060929015050/http://www.llnl.gov/csts/publications/sutcliffe/>) (англ.). Lawrence Livermore National Laboratory (14 April 1995). Дата обращения 29 декабря 2010.
- Johnson, C. M.; Davis, Z. S.* Nuclear Weapons: Disposal Options for Surplus Weapons-Usable Plutonium (<http://www.globalsecurity.org/wmd/library/report/crs/97-564.htm>) (англ.). CRS Report for Congress # 97-564 ENR (22 May 1997). Дата обращения 29 декабря 2010.
- Physical, Nuclear, and Chemical Properties of Plutonium (<http://www.ieer.org/ftsheets/pu-props.html>) (англ.). IEER (July 2005). Дата обращения 29 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618eSUeM?url=http://www.ieer.org/ftsheets/pu-props.html>) 22 августа 2011 года.
- Bhadeshia, H.* Plutonium (<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2006/Plutonium/Plutonium.html>) (англ.). University of Cambridge. — Кристаллография плутония. Дата обращения 29 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618eUg2ln?url=http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2006/Plutonium/Plutonium.html>) 22 августа 2011 года.
- David Samuels*. End of the Plutonium Age (<http://discovermagazine.com/2005/nov/end-of-plutonium>) (англ.). Discover Magazine (22 November 2005). Дата обращения 29 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618eWdlv?url=http://discovermagazine.com/2005/nov/end-of-plutonium>) 22 августа 2011 года.
- Pike, J.; Sherman, R.* Plutonium Production (<http://www.fas.org/nuke/intro/nuke/plutonium.htm>) (англ.) (недоступная ссылка). Federation of American Scientists (20 June 2000). Дата обращения 29 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618ea5oGL?url=http://www.fas.org/nuke/intro/nuke/plutonium.htm>) 22 августа 2011 года.
- Plutonium Manufacture and Fabrication (<http://nuclearweaponarchive.org/Library/Plutonium/>) (англ.). Nuclearweaponarchive.org. Дата обращения 29 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618eafxa?url=http://nuclearweaponarchive.org/Library/Plutonium/>) 22 августа 2011 года.
- Ong, C.* World Plutonium Inventories (<http://www.nuclearfiles.org/menu/key-issues/nuclear-energy/issues/world-plutonium-inventories-ong.htm>) (англ.). nuclearfiles.org (1999). Дата обращения 29 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618ebj0Xh?url=http://www.nuclearfiles.org/menu/key-issues/nuclear-energy/issues/world-plutonium-inventories-ong.htm>) 22 августа 2011 года.
- Plutonium, Radioactive (<http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/r?dbs+hsdb:@term+@na+@rel+plutonium,+radioactive>) (англ.). NLM Hazardous Substances Databank. Дата обращения 29 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618edbrcs?url=http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/r?dbs+hsdb:@term+@na+@rel+plutonium,+radioactive>) 22 августа 2011 года.
- Annotated Bibliography on plutonium (<http://alsos.wlu.edu/qsearch.aspx?browse=science/Plutonium>) (англ.) (недоступная ссылка). Alsos Digital Library for Nuclear Issues. Дата обращения 29 декабря 2010. Архивировано (<https://web.archive.org/web/20090203184521/http://alsos.wlu.edu/qsearch.aspx?browse=science%2FPlutonium>) 3 февраля 2009 года.
- Chemistry in its element (<http://www.rsc.org/chemistryworld/podcast/element.asp>) (англ.) (mp3). *Plutonium* (http://www.rsc.org/images/CIIE_plutonium_48kbps_tcm18-12112_0.MP3). Royal Society of Chemistry's Chemistry World. Дата обращения 29 декабря 2010. Архивировано (<https://www.webcitation.org/618efZDg1?url=http://www.rsc.org/chemistryworld/podcast/element.asp>) 22 августа 2011 года.

Источник — <https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Плутоний&oldid=100765551>

Эта страница в последний раз была отредактирована 2 июля 2019 в 08:26.

Текст доступен по лицензии Creative Commons Attribution-ShareAlike; в отдельных случаях могут действовать дополнительные условия.
Wikipedia® — зарегистрированный товарный знак некоммерческой организации [Wikimedia Foundation, Inc.](https://www.wikimedia.org/)