

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МАТЕРИАЛ

О ПРОИСХОЖДЕНИИ И ЗНАЧЕНИИ ЛИНИИ РАЗДЕЛЕНИЯ МЕЖДУ НИЗКООБОГАЩЕННЫМ И ВЫСОКООБОГАЩЕННЫМ УРАНОМ

Эндрю Браун и Александр Глезер

АННОТАЦИЯ

Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) определяет концентрацию урана-235 в 20 процентов как границу между низко обогащенным ураном (НОУ) и высокообогащенным ураном (ВОУ), представляющую собой важный промежуточный пункт на пути к урану оружейного качества (обычно с обогащением выше 90% по ^{235}U). Различие между НОУ и ВОУ широко использовалось при формировании политики нераспространения, и в особенности заметно оно проявилось в комментариях по ядерной программе Ирана и в серии совещаний высшего уровня по ядерной безопасности, на которых, начиная с 2010 года, прилагались усилия по уменьшению гражданских запасов и применения ВОУ. Однако, происхождение данной границы после прошедших шести десятилетий неясно. Эта исследовательская заметка прослеживает политическое происхождение и технические основания для этого разграничения.

Эндрю Браун работает в Департаменте радиационной онкологии Медицинского центра Университета Дьюк, Дерхэм, штат Северная Каролина, США.

Александр Глезер работает в Программе по науке и всеобщей безопасности, Принстонский университет, Принстон, штат Нью Джерси, США

Почтовый адрес для корреспонденций: Alexander Glaser, Program on Science and Global Security, Princeton University, 221 Nassau St., Princeton, NJ 08544, USA.

Адрес электронной почты: aglaser@princeton.edu

Статья получена 7 апреля 2016 года и принята к публикации 12 апреля 2016 года.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В 1954 году Лоуренс Р. Хафстед (1904–1993), директор разработки реакторов в Комиссии по атомной энергии Соединенных Штатов, стал автором меморандума, направленном на установление типа и максимального количества обогащенного урана, экспортируемого для поддержки эксплуатации поставленных Соединенными Штатами исследовательских реакторов, имея в виду количество и обогащение урана, требующееся для изготовления ядерного оружия (полный текст доступен по адресу ipfmlibrary.org/haf54.pdf). Этот меморандум был подготовлен в ответ на политическую директиву Совета Национальной Безопасности NSC 5431 в августе 1954 года, «Сотрудничество с другими странами в мирном использовании атомной энергии». Данная директива, подготовленная на базе материалов Комиссии по атомной энергии, Государственного департамента, Министерства обороны, и Центрального разведывательного управления, в связи с речью Президента Дуайта Д. Эйзенхауэра «Атомы для мира» на Генеральной ассамблее ООН 8 декабря 1953 года¹. Открытый анализ опасностей гонки ядерных вооружений в совокупности с предложением экспортировать ядерную технологию и расщепляющиеся материалы для мирных целей, в особенности обогащенный уран, отразило полную трансформацию американской точки зрения. Предыдущая администрация Трумэна была нацелена на сохранение американской монополии на атомное оружие так долго, как это возможно, и,

если это не получится, на обеспечение того, чтобы ядерный арсенал Соединенных Штатов многократно превышал все, чего может достичь Советский Союз.

«Атомы для мира» частично рассматривалась как пропагандистский маневр – дома для освобождения от панического ужаса, испытываемого обществом перед военным атомом, и за рубежом в представлении не воинственной стороны американской ядерной политики. В своей речи Эйзенхауэр предложил, чтобы «правительства, принципиально согласные, в пределах, разрешенных элементарной предусмотрительностью, должны начать сейчас и продолжать делать совместные вклады из своих запасов природного урана и расщепляющихся материалов в международное агентство по атомной энергии»². Он полагал, что вклады в «Атом для мира» не помешают оружейной программе США, в то время как эквивалентные вклады могут ограничить накопление запасов Советского Союза и других стран с меньшими запасами расщепляющихся материалов и меньшими возможностями их изготовления.

И, наконец, что может быть наиболее важно, производство реакторов для атомных электростанций представляло потенциальный коммерческий интерес для американской промышленности. Летом 1954 года во всем мире не было ни одного действующего энергетического реактора, но было понятно, что приобретение и эксплуатация исследовательских реакторов должно быть первым шагом страны, начинающую программу ядерной энергетики. Экспорт исследовательских реакторов мог подготовить американских производителей для будущих, более прибыльных, коммерческих проектов реакторов для атомных электростанций. Такой экспорт исследовательских реакторов под соответствующими двусторонними гарантиями стал возможным благодаря принятию Закона об атомной энергии 1954 года. Это сопровождалось выделением ограниченного количества расщепляющегося материала (обогащенного урана) для топлива таких реакторов и учреждением курсов по обучению работе на реакторах для иностранных граждан. Отношение Советского Союза было критичным для всего подхода. Советские официальные лица указывали, что широкое распространение ядерных энергетических реакторов фактически увеличит количество расщепляющихся материалов, доступных для оружия, и таким образом создаст будущую проблему распространения. Это возражение было непосредственно высказано Министром иностранных дел Вячеславом М. Молотовым Государственному секретарю Даллесу на конференции по разоружению в Женеве в мае 1954 года³ и повторялось, в частности, в течение обсуждений учреждения МАГАТЭ⁴.

Директива NSC 5431 рекомендовала поддержку строительства исследовательских реакторов за рубежом и предоставление топлива для них в необходимых количествах. Тем не менее, в ней указывалось, что расщепляющиеся материалы для топлива таких реакторов должны иметь «качество ниже оружейного». В меморандуме Хафстеда указывалось, что «не имеется официального определения диапазона, в котором обогащение урана достигает оружейного качества» и предлагает базу для определения того, какими должны быть критерии обогащения урана и количества материала для экспорта топлива исследовательских реакторов. Хафстед отмечает:

Минимальное обогащение, при котором ядерный взрыв может развиваться в бесконечном количестве материала, оценивается примерно в 5%. Информация из Лос-Аламоса показывает, что уран, обогащенный до 10 процентов, не пригоден для любого практического оружия, но определенного верхнего предела установить нельзя.

Для больших концентраций можно будет предотвратить сборку оружия, ограничивая общее количество материала, передаваемого для любого заданного обогащения. Например, приближенное выражение для количества материала при различной степени обогащения ураном-235, равного C , необходимое для изготовления оружия мощностью в 1 кТ, составляет $2/C^{1.7}$ кг урана. Применение этой формулы при обогащении в 20% дает 31 кг, а при обогащении в 100% – 2 кг. Для малой степени обогащения применимость этой формулы ограничена, и считается, что продукт со степенью обогащения в 10 процентов безопасен в любых количествах.

В меморандуме рекомендуются следующие критерии:

- a) Уран со степенью обогащения до 10 процентов U^{235} не будет считаться ураном оружейного качества в любом количестве.
- b) Уран со степенью обогащения от 10 до 20 процентов U^{235} не будет считаться ураном оружейного качества при условии, что полное количество урана, удерживаемое одной страной, не будет превышать значения, полученного из формулы $U = 2/C^{1.7}$ (в килограммах). Хотя теоретически макси-

мальное количество материала, допускаемое этой формулой, может позволить изготовление одного взрывного устройства мощностью 1 кт, это потребует высшей степени изобретательности.

Для оценки последующего развития американской политики в отношении экспорта обогащенного урана для исследовательских реакторов особенно важны три существенных пункта из данного меморандума.

1. Пригодность для оружия и степень обогащения урана для иностранных исследовательских реакторов

В 1954 году в Соединенных Штатах работало пятнадцать исследовательских реакторов, и строилось много других реакторов. Очевидно, что их высокообогащенный уран оружейного качества (93 процента ^{235}U) не будет предназначен для экспорта.

Меморандум Хафстеда ссылается на информацию из Лос-Аламоса для идентификации того, что уровень обогащения в 10 процентов ^{235}U «не пригоден для любого практического оружия» и «безопасен в любом количестве». В документе отмечается, что применение обогащенного до 20 процентов материала для оружия «потребуется высшей степени изобретательности» и отождествляет этот уровень в качестве компромисса между эксплуатационными качествами исследовательского реактора и пригодностью к изготовлению оружия. Предлагаемое использование обогащенного до 20 процентов топлива для исследовательских реакторов потребует увеличения загрузки урана-235 всего лишь на 20–25 процентов по сравнению с топливом, используемым в американских реакторах, и «не должно привести к серьезным потерям в стоимости или полезности». Похоже, что предел в 20 процентов был выбран для того, чтобы ограничить отрицательное воздействие на эксплуатационные характеристики и стоимость реактора, и риск распространения, созданный выбором обогащенного до 20% урана в качестве топлива, был сбалансирован дополнительным ограничением на количество такого материала, доступного иностранным государствам⁵.

Следует отметить, что этот анализ не полностью согласуется с определениями, впоследствии принятыми Международным агентством по атомной энергии, которое рассматривает уран, обогащенный менее, чем до 20 процентов ^{235}U , как «материал косвенного использования», который не может быть использован для «изготовления ядерных взрывных устройств без преобразования или дальнейшего обогащения».

2. Мощность взрыва и минимальное количество необходимого материала

В меморандуме рассматривается возможность достижения мощности взрыва в 1 кт, т.е. тротилового эквивалента в 1 килотонну, как порогового значения для обладания ядерным оружием, и предлагается простая формула для определения «минимальных количеств материала» для оружия, способного достичь такой мощности.

$$M(\varepsilon) = \left(\frac{2}{\varepsilon^{1.7}} \right)$$

В меморандуме отмечается также, что обогащение между 10 и 20 процентами «не представляет интереса для оружия, если полное количество, находящееся в любой одной стране, не превышает полученное из формулы значения». Из выражения Хафстеда $M(\varepsilon)$ количество материала (M) с обогащением ε , необходимое для взрывного устройства с мощностью 1 кт, для высокообогащенного урана оружейного качества (93% урана-235) равно всего лишь 2,3 кг. Примечательно, что формула предполагает, что около 31 кг урана, обогащенного до 20 процентов, будет достаточно для изготовления ядерного устройства с мощностью 1 кт (смотрите рисунок 1).

И снова эти контрольные значения можно сравнить с теми, которые были приняты Международным агентством по атомной энергии. Существенное количество определяется как «приблизительное количество ядерного материала [включая неустраняемые потери в процессах конверсии и изготовления], для которого не может быть исключена возможность изготовления ядерного взрывного устройства». Для урана существенное количество определяется как 25 кг урана-235 в высокообогащенном уране, т.е. примерно от 4 до 12 раз больше значений, указанных в этом разделе.

Что касается критерия мощности в 1 кт, принятого Хафстедом, то для сравнения отметим, что первые испытанные и использованные образцы ядерного оружия имели мощность в 15–20 кт. В 1952 году мощность устройств, использующих процесс деления, увеличилась до 500 кт, а термоядерные устройства позволяли

достигать мощности в мегатонном диапазоне. Мощность в 1 килотонну все еще намного больше мощности самых крупных обычных бомб, по порядку величины равной 10 тоннам тротила. Мощность взрыва бомбы в Оклахома Сити примерно соответствовала 2 тоннам тротилового эквивалента.

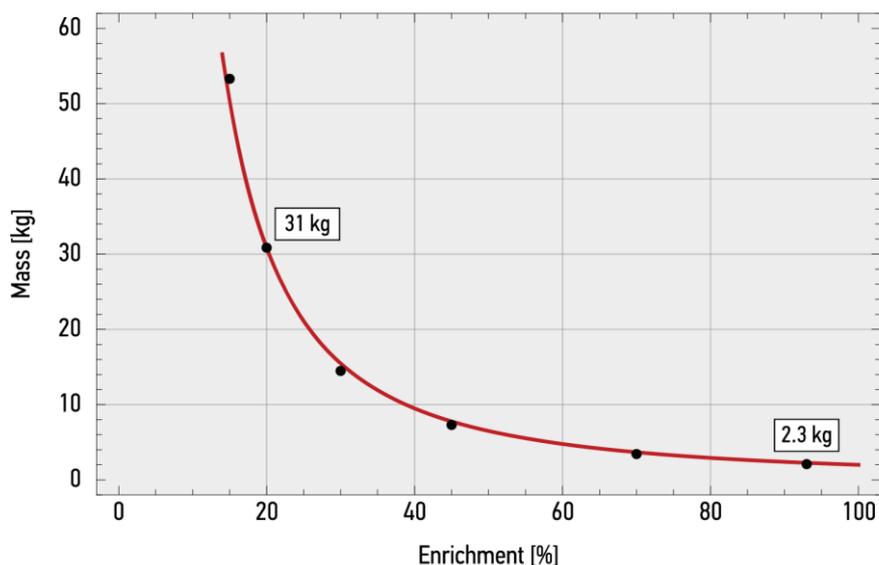


Рисунок 1. Минимальное количество урана, необходимое для достижения мощности взрыва в 1 кт тротилового эквивалента для ядерного оружия «типа, требующего минимального количества материала». Линия показывает количество, определенного выражением из меморандума Хафстеда 1954 года. Точками показаны нормированные («долевые») критические массы металлического урана без отражателя, рассчитанные по методу Монте Карло. Это минимальное количество эквивалентно примерно 4% от критической массы без отражателя при нормальной плотности. Отметим, что эффективность такого устройства будет очень мала; например, случае полностью обогащенного урана эффективность будет примерно равна 3% по сравнению с почти 20% для бомбы, сброшенной на Нагасаки (на базе плутония). По горизонтальной оси отложена степень обогащения в процентах, по вертикальной – масса урана в килограммах.

3. Доступное количество урана для иностранных исследовательских реакторов

В дополнение к уровню обогащения, в анализе Хафстеда подчеркивается важность ограничения максимального количества урана, которое может быть поставлено так, чтобы «полное количество, имеющееся в любой одной стране» не превышало порогового значения. В нем также рекомендуется первоначальное размещение 100 кг урана-235, обогащенного до 20 процентов, или менее, и предполагается, что его будет достаточно для поддержки «от трех до, возможно, пятидесяти» исследовательских реакторов за границей.

Однако, основополагающие положения для этой оценки оказались нереалистичными. Наиболее важно то, что в анализе Хафстеда предполагалось, что большинство клиентов будет заинтересовано в реакторах очень малой мощности, или других исследовательских установках, включая докритические эксперименты или критические сборки с нулевой мощностью, и что «большая часть материала, вероятно, может быть распределена с обогащением в 10 процентов, или, при необходимости, еще меньше». Вместо этого, максимальное обогащение в 20 процентов для многих потребителей быстро стало наиболее предпочтительным вариантом, частично из-за того, что американские поставщики продали за границу несколько так называемых реакторов «типа MTR». Эти реакторы базировались на оригинальном образце реактора для испытаний материалов (Material Testing Reactor), работающем на уровне мощности 30 МВт(тепл.) с топливом из высокообогащенного урана, расположенной на площадке, сейчас принадлежащей Национальной лаборатории Айдахо. Несколько из ранних поставленных из США реакторов типа MTR работали на мощности 5 МВт(тепл.) с типичным содержанием урана в активной зоне в 20–30 кг при степени обогащения в 20%⁶. Очевидно, что даже одиночный реактор такого типа быстро превзойдет указанный в меморандуме предел в 31 кг, в особенности, если требуется перезагрузка, а отработавшее топливо будет разгружаться и храниться на площадке. Иностранные государства с амбициозными ядерными программами и несколькими строящимися исследовательскими центрами, такие, как Германия и Япония, поэтому быстро превысили

предполагаемый предел по массе.

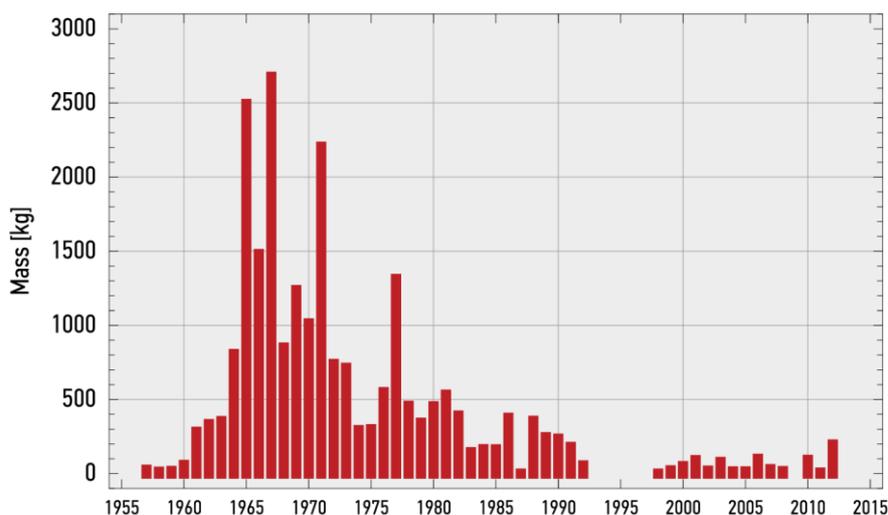


Рисунок 2. Экспорт американского ВОУ, используемого в мишенях для ядерных исследований или в испытательных реакторах. После разрешения ежегодные экспорт быстро возростал и в 1967 году достиг 2 700 кг. Источник: Report to Congress on the Current Disposition of Highly Enriched Uranium Exports Used as Fuel or Targets in Nuclear Research or Test Reactors, Nuclear Regulatory Commission, January 2014. По горизонтальной оси отложены годы, а по вертикальной – масса ежегодного экспорта в килограммах.

В 1958 году принцип ограничения обогащения урана для иностранных потребителей 20 процентами был полностью отменен, и Соединенные Штаты начали вместо этого экспортировать высокообогащенный уран оружейного качества. На этой стадии попытки применения формулы Хафстеда для определения максимального количества ВОУ в топливе исследовательского реактора для экспорта стали бессмысленными, поскольку она ограничивала такой экспорт примерно 2 кг урана оружейного качества на страну – недостаточно для эксплуатации любого исследовательского реактора в мегаваттном диапазоне. Без этих ограничений ВОУ быстро стал стандартным топливом для поставляемых из США исследовательских реакторов, а большинство существующих реакторов было переделано с низкообогащенного топлива на высокообогащенное. Количество экспортируемого из США ВОУ быстро подскочило и достигло почти 2,7 тонны в одном 1967 году (смотрите рисунок 2). К 1978 году количество экспортированного из США ВОУ для использования в качестве топлива для исследовательских реакторов достигло почти 18 тонн.

Рост опасений распространения в конце 1970-х годов в конце концов привел к учреждению в 1978 году в США Программы уменьшения обогащения для исследовательских и испытательных реакторов (Reduced Enrichment for Research and Test Reactors – RERTR)⁷. Цель программы заключалась в разработке новых низко обогащенных типов топлива, которые позволили бы прекратить использование ВОУ в гражданских исследовательских реакторах, в особенности в странах, не обладающих ядерным оружием. Тем не менее, не было никакого рассмотрения первоначального предложения Хафстеда по ограничению количества обогащенного менее чем до 20 процентов урана, доступного любой стране. Международные усилия по ограничению и прекращению гражданского использования ВОУ еще более усилились в 2000-х годах, в особенности в связи с учреждением в 2004 году «Глобальной инициативы по уменьшению угрозы» (Global Threat Reduction Initiative – GTRI)⁸. В настоящее время планируется полностью прекратить гражданское использование ВОУ во всем мире к 2035 году⁹. Страна будет рассматриваться как освободившаяся от ВОУ, если в ней будет находиться менее 1 кг ВОУ. В 2015 году Соединенные Штаты объявили о планах изучения возможности использования низко обогащенного урана в топливе для военно-морских реакторов¹⁰.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этом исследовательском материале отслеживаются происхождение и значение 20-процентного порога, отделяющего низко обогащенный уран (НОУ) от высокообогащенного урана (ВОУ). Первоначальный

анализ 1954 года, представленный директором разработки реакторов в Комиссии по атомной энергии Соединенных Штатов, развивался в течение нескольких этапов, но следовал простому принципу: ни одно иностранное государство не должно получить количество материала, достаточное для изготовления одного ядерного взрывного устройства с тротильным эквивалентом в одну килотонну. Согласно этому критерию, обогащение в 10 процентов рассматривалось как «безопасное в любом количестве». Напротив, изготовление ядерного оружия с использованием урана, обогащенного до 20 процентов, требовало «высшей степени изобретательности», но минимальное требуемое количество составляло примерно 30 кг (по сравнению с 2,3 кг для ВОУ оружейного качества). Меморандум рекомендовал экспортировать обогащенный уран со степенью обогащения до 20 процентов таким образом, чтобы общее количество такого урана в одном иностранном государстве не превышало 31 кг. Сегодня предел по обогащению остается ключевым элементом в политике распространения, но предел по массе был быстро отменен, а потом и забыт.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Address by Mr. Dwight D. Eisenhower, President of the United States of America, to the 470th Plenary Meeting of the United Nations General Assembly, New York, 8 December 1953, www.iaea.org/about/history/atoms-for-peace-speech.
2. Там же.
3. John Krige, "Atoms for Peace, Scientific Internationalism and Scientific Intelligence," *Osiris*, 21 (2006): 16-222.
4. Soviet Aide-Memoire on the International Atomic Energy Agency, October 1, 1955. RG326 (A1 Entry 76, Formation of the IAEA, 1954-1957, Box 2), National Archives at College Park.
5. С этим соображением согласуется то, что на конференции «Атомы для мира» 1955 года Элвин Вейнберг сообщил, что он «только что получил от своей страны информацию о том, что образец топливных элементов из двуоксида урана, обогащенного до 20 процентов, и алюминия, того типа, который будет доступен иностранным государствам, сейчас был испытан на реакторах LITR и MTR» (Session 9A, Vol. II, August 12, 1955, 430).
6. Первые примеры исследовательских реакторов типа MTR, поставленные США, включали IAE-R1 в Бразилии (5 МВт, первая критичность в 1957 году), FRM-I в Германии (4 МВт, 1957), DR-2 в Дании (5 МВт, 1958), и FRG-I в Германии (5 МВт, 1958). Для сравнения различных вариантов MTR, смотрите, например, "Benchmark Calculations for MTR type Reactors with High, Medium, and Low Enrichment," Appendix F-5 in *Research Reactor Core Conversion from the Use of Highly Enriched Uranium to the Use of Low Enriched Uranium Fuels Guidebook*, IAEA-TECDOC-233, International Atomic Energy Agency, Vienna, August 1980.
7. Параллельно, Международная оценка ядерного топливного цикла (International Nuclear Fuel Cycle Evaluation – INFCE) под руководством МАГАТЭ также признала эти риски распространения. В итоговом отчете отмечается: "Торговля и широкое использование высокообогащенного урана и производство расщепляющихся материалов представляют риски распространения, которыми обеспокоена INFCE". В отношении топлива исследовательских реакторов исследование рекомендует "уменьшение обогащения предпочтительно до 20%, или менее, что во всем мире признается как полностью адекватный изотопный барьер для полезности ²³⁵U для оружия" (*Advanced Fuel Cycle and Reactor Concepts*, Report of the INFCE Working Group 8, 1980, International Atomic Energy Agency, Vienna, 43).
8. Американская программа теперь называется «Управление и минимизация материалов» (Material Management and Minimization – M³).
9. Для последнего обзора и оценки этих усилий смотрите National Academies of Sciences, *Reducing the Use of Highly Enriched Uranium in Civilian Research Reactors* (Washington, DC: National Academies Press, 2016).
10. *Feasibility of Low Enriched Uranium Fuel in Naval Reactor Plants*, Fact Sheet, The White House, Office of the Press Secretary, March 31, 2016, www.whitehouse.gov/the-press-office/2016/03/31/fact-sheet-feasibility-low-enriched-uranium-fuel-naval-reactor-plants.