

## ФОСФАТНЫЕ ПОРОДЫ И ЯДЕРНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ

Нильс Ханеклаус, Анастасия Байок, и Виталий Федченко

### АННОТАЦИЯ

Фосфатные породы в основном добываются для производства удобрений. Тем не менее, в них также содержатся существенные количества сопровождающего природного урана, которые могут превышать концентрации, наблюдаемые в коммерческих урановых рудниках. Извлечение урана из фосфатных пород при производстве удобрений является технически развитым процессом; он использовался в промышленных масштабах в Соединенных Штатах и других странах до того, как падение цен на уран в 1990-х годах сделало этот процесс невыгодным. Однако, вскоре технические усовершенствования, потенциально растущие цены на уран, и ожидаемые нормативные документы по защите окружающей среды снова смогут сделать выгодным извлечение урана из фосфатов, как в Соединенных Штатах, так и в развивающихся центрах добычи фосфатных пород в Северной Африке и на Ближнем Востоке. Извлечение урана при производстве фосфатных удобрений желательно в плане сохранения ресурсов, которые могут быть потеряны, и понижения содержания радиотоксичных тяжелых металлов в удобрениях. Фосфатные породы могут также быть связаны с тайным производством урана. В данной работе представлен обзор значимости нетрадиционных урановых ресурсов из фосфатных пород. Приведены краткие сведения о процессе экстракции, перечень требующихся материалов, и очень простая оценка количества урана, которое можно было бы извлечь, используя опытную установку размером с транспортный контейнер, которая могла бы быть встроена в существующие заводы по производству удобрений. И, наконец, обсуждаются последние известные необъявленные действия по экстракции урана из фосфатных пород.

Нильс Ханеклаус работает в институте безопасности реакторов и реакторной технологии Рейнско-Вестфальского технического университета Ахена, Ахен, Германия.

Почтовый адрес для корреспонденции: Nils Haneklaus, Institute of Reactor Safety and Reactor Technology, RWTH Aachen University, Templergraben 55, 52072 Aachen, Germany.

Адрес электронной почты: nils.haneklaus@rwth-aachen.de

Анастасия Байок работает в магистратуре исследований Восточной Азии Свободного Берлинского университета, Берлин, Германия.

Виталий Федченко работает в Стокгольмском институте исследования проблем мира, Сольна, Швеция.

Статья получена 9 мая 2017 года и принята к публикации 4 октября 2017 года.

### ВВЕДЕНИЕ

Получение плутония или высокообогащенного урана (ВОУ) традиционно воспринималось как наиболее трудная часть процесса производства ядерного взрывного устройства<sup>1</sup>. Технологический маршрут плутония не будет обсуждаться далее в этой работе. ВОУ производится в процессе обогащения природного урана. Этот трудный процесс традиционно ассоциировался с относительно крупными разведывательными сигнатурами (например, большими требованиями по энергии и пространству для газовой диффузии и газовых центрифуг), и, вполне возможно, он все еще остается основным барьером на пути к способности производства ядерного оружия. Эти большие промышленные установки являются важным наблюдаемым индикатором того, что субъект преследует цель разработки ядерного оружия<sup>2</sup>.

По сравнению с этим, получение урана привлекало относительно мало внимания, в частности, урановый рудный концентрат не отслеживается Группой поставщиков ядерного оборудования (NSG) и не находится под гарантиями Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ)<sup>3</sup>. Это не вызывает замет-

ного беспокойства, поскольку большая часть поставок уранового рудного концентрата направляется членам Группы поставщиков ядерного оборудования (хотя и не обязательно от государств-членов данной группы, например, Намибия и Нигер являются важными поставщиками урана)<sup>4</sup>. Тем не менее, необъявленное или тайное накопление запасов урана может существенно способствовать распространению ядерного оружия. Поэтому соответствующий уровень открытости в производстве урана в любом горнодобывающем процессе существенно важен для усилий по нераспространению.

Все данные по обычному производству урана (будь то в горных разработках или путем экстракции) должны сообщаться в МАГАТЭ согласно его всеобъемлющему соглашению по гарантиям (INFCIRC/153) и дополнительному протоколу (INFCIRC/540). Все возрастающее число субъектов рассматривают экстракцию урана из необычных источников. Принуждение государств к представлению отчетов по извлечению урана из необычных источников создаст проблемы для МАГАТЭ. Некоторые страны, например, не сообщают данные по сопровождающему урану, поскольку они боятся навредить ценности основной руды, или они им просто неизвестно о происходящих операциях по экстракции сопровождающего урана, поскольку они, из-за их относительно малого экономического значения, иногда (непосредственно) не декларируются горнодобывающими компаниями.

Фосфатные породы имеют первостепенное значение среди этих нестандартных ресурсов из-за относительно высокой концентрации сопутствующего урана и технической развитости процесса извлечения урана. Ожидается, что производство фосфатных пород увеличится с 223 миллионов тонн в 2015 году до 255 миллионов тонн в 2019 году, а мощность заводов по переработке фосфатных пород в 2018 году утроится<sup>5</sup>. Установки для извлечения урана могут быть относительно просто интегрированы в существующие заводы по переработке фосфатных пород и могут извлечь пользу от доступной инфраструктуры. Из-за глобальной распространенности и больших объемов глобальной торговли фосфатными породами маловероятно, что МАГАТЭ или любая другая организация будут иметь возможность контролировать торговлю фосфатными породами и их переработку.

Указывалось, что хотя количество стран, имеющих опыт в обогащении урана или других технологиях, критических с точки зрения нераспространения, увеличилось с течением времени, могут оказаться необходимыми и дополнительные меры, такие, как введение предписаний по нераспространению на рынке уранового рудного концентрата и, в частности, извлечения урана из нестандартных ресурсов<sup>6</sup>.

В данной работе представлен обзор значимости нетрадиционных урановых ресурсов из фосфатных пород. Приведены краткие сведения о процессе экстракции, перечень требующихся материалов, и очень простая оценка количества урана, которое можно было бы извлечь, используя опытную установку размером с транспортный контейнер, которая могла бы быть встроена в существующие заводы по производству удобрений в разных местах. И, наконец, обсуждаются последние известные необъявленные действия по экстракции урана из фосфатных пород.

## **ФОСФАТНЫЕ ПОРОДЫ – СУЩЕСТВЕННЫЙ НЕСТАНДАРТНЫЙ ИСТОЧНИК УРАНА**

Департамент ядерной энергии МАГАТЭ разделяет источники урана на стандартные и нестандартные<sup>7</sup>. Среди различных упомянутых нестандартных источников (фосфатные породы, руды цветных металлов, карбонатит, черный сланец и лигнит) самым важным является уран из фосфатных пород. Другие нестандартные источники (например, черный сланец и морская вода) могут стать важными когда-нибудь в будущем<sup>8</sup>. Преимущественное положение урана из фосфатных пород среди нестандартных ресурсов может быть объяснено следующими факторами:

- Относительно высокими средней и локальной концентрациями урана, обнаруженного в фосфатных породах.
- Большим количеством урана, глобально обнаруженного в фосфатных породах.
- Техническим совершенством извлечения урана из фосфатных пород в процессе производства удобрений.

Извлечение урана из фосфатных пород дешево по сравнению с другими нестандартными источниками, в особенности, с извлечением урана из морской воды. Кроме того, ресурсы урана, которые могли бы быть потеряны, могут быть сохранены, а содержание радиотоксичных элементов в конечном продукте удобрений может быть значительно сокращено при удалении более 90% сопутствующего урана<sup>9</sup>. Помимо урана, фосфатные породы содержат несколько следовых элементов, таких, как редкоземельные элемен-

ты, которые также могут быть извлечены и проданы<sup>10</sup>.

## КОНЦЕНТРАЦИЯ УРАНА В ФОСФАТНЫХ ПОРОДАХ

Фосфатные породы – это природные месторождения полезных ископаемых с относительно высокой концентрацией фосфатных минералов<sup>11</sup>. Уран в фосфатных породах – это сопровождающий элемент. Имеются два основных источника фосфатных пород: осадочные и изверженные (магматические) отложения<sup>12</sup>. Обычно отложения принадлежат к одному типу и, как правило, концентрация урана в осадочных отложениях существенно выше. Согласно оценкам<sup>13</sup>, за последние десять лет около 80–90% мирового производства фосфатов приходилось на осадочные источники. На изверженные отложения за последние десять лет приходилось 10–20% мирового производства фосфатных пород; небольшие дополнительные количества были получены из добытых биогенных ресурсов, в основном из аккумуляций гуано птиц и летучих мышей<sup>14</sup>. Общемировые средние концентрации урана в фосфатных породах лежат в пределах от 25 до 50 частей на миллион, а концентрации в локальных отложениях могут достигать 600 частей на миллион<sup>15</sup>. Для сравнения, средняя концентрация урана в морской воде очень низка и достигает 0,003 частей на миллион<sup>16</sup>. Существенные концентрации урана из морской воды могут быть получены только после концентрирования в загруженных сорбентах<sup>17</sup>. Департамент ядерной энергии МАГАТЭ признает в качестве ресурсов урана только руды с минимальной концентрацией в 300 частей на миллион<sup>18</sup>. Всемирная ядерная ассоциация (WNA) использует следующую классификацию<sup>19</sup>: (1) урановые руды очень высокого качества (более 200 000 частей на миллион), (2) урановые руды высокого качества (более 20 000 частей на миллион), (3) урановые руды низкого качества (более 1 000 частей на миллион), и (4) урановые руды очень низкого качества (более 100 частей на миллион), как это указано в таблице 1.

**Таблица 1.** Спецификация характеристик урановых руд (Всемирная ядерная ассоциация).

	<b>Концентрация (частей урана на миллион)</b>
Урановая руда очень высокого качества	> 200 000
Урановая руда высокого качества	> 20 000
Урановая руда низкого качества	> 1 000
Урановая руда очень низкого качества	> 100

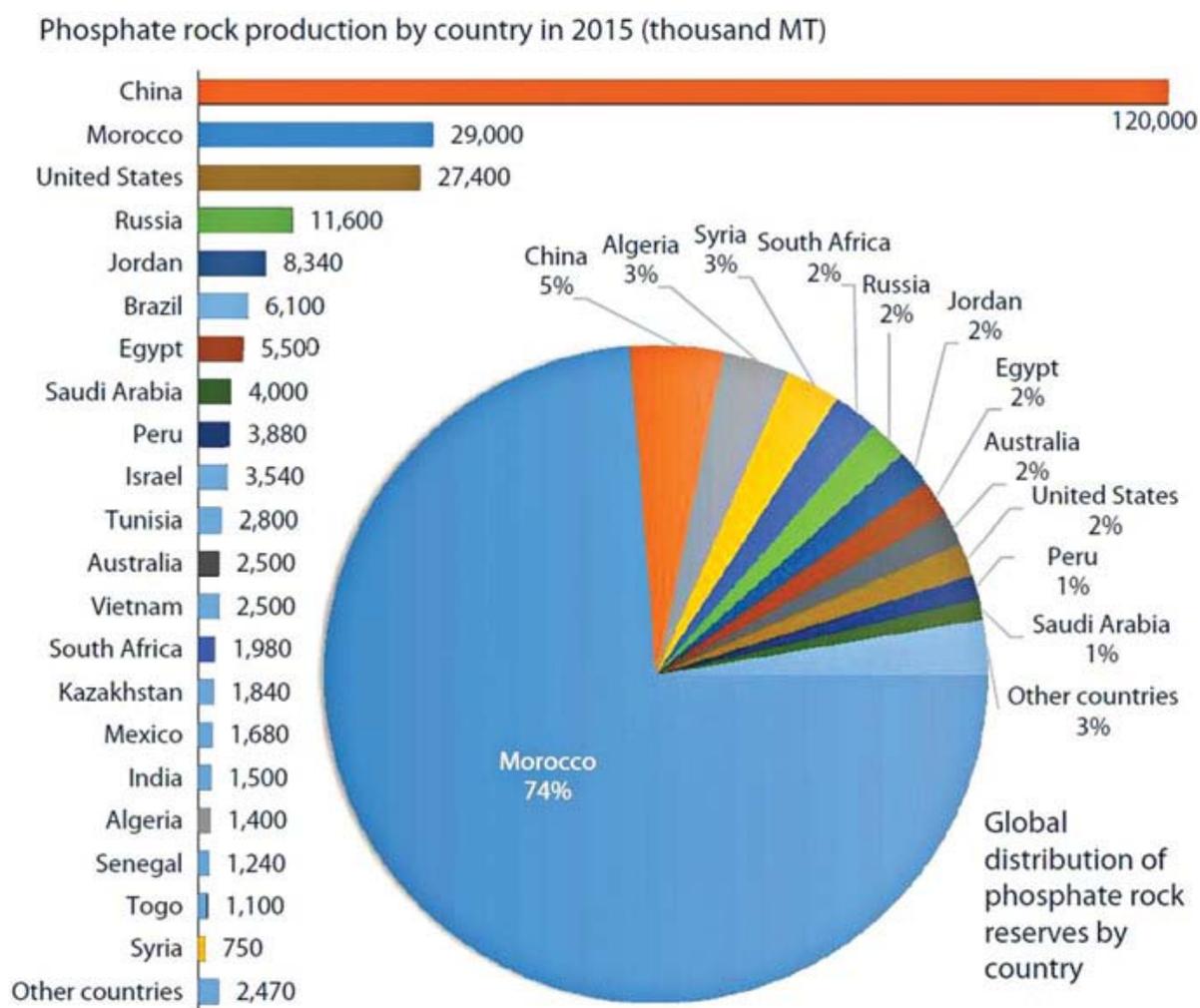
Средняя концентрация урана в отложениях фосфатных пород в Алжире (Джебель-Куиф, 100 частей на миллион), Ангола (Кабинда, 260 частей на миллион), Бразилия (Аракса, 182 части на миллион, и Ката-лао, 220 частей на миллион), Буркина Фасо (Коджари, 125 частей на миллион), Египет (Хамравен, 110 частей на миллион, Сафага, 120 частей на миллион, и Западный Махамид, 100 частей на миллион), Израиль (Арад, 150 частей на миллион), Мали (Тилемси, 123 части на миллион), Марокко (недифференцированно, 130 частей на миллион), Танзания (Миджингу, 390 частей на миллион), Соединенные Штаты (Центральная Флорида, 141 часть на миллион, и Айдахо, 107 частей на миллион), по сообщениям Каувенберга<sup>20</sup>, достаточно высока для того, чтобы классифицироваться как "урановые руды очень низкого качества", и превышает концентрацию для многих коммерческих урановых рудников очень низкого качества, например, работающих в Намибии<sup>21</sup>.

## КОЛИЧЕСТВО УРАНА В ФОСФАТНЫХ ПОРОДАХ

Общие резервы фосфатных пород сконцентрированы в нескольких странах; на месторождения в Марокко (включая Западную Сахару) приходится почти три четверти запасов<sup>22</sup>. Ресурсы фосфатных пород активно обсуждаются в научных кругах из-за важности фосфатов для мировой продовольственной безопасности<sup>23</sup>. На рисунке 1 представлены сводные данные о глобальном производстве фосфатных пород и резервах фосфатных пород по странам в 2015 году по данным Геологической службы США<sup>24</sup>.

Количество урана в фосфатных породах значительно. Всемирная ядерная ассоциация сообщает, что, в дополнение к 5,9 миллионам тонн известных извлекаемых ресурсов урана, в фосфатных породах во всем мире может быть найдено от 9 до 22 миллионов тонн урана<sup>25</sup>. В работе Ульриха и др. предполагаются схожие количества (5,7 миллиона тонн)<sup>26</sup>. Габриэль и др.<sup>27</sup> оценили, что несколько более 15% урана, требующегося для мирных целей во всем мире, могут поступать в виде очищенного побочного продукта производства фосфатных удобрений, а Ким и др.<sup>28</sup> оценили также, что в 2017 году около 10% урана, тре-

бующегося для мирных целей в США могут быть предоставлены из производственной цепочки фосфатных удобрений в стране. Уран из фосфатных пород отличается от других нестандартных урановых ресурсов (таких, как черные сланцы) тем, что при одинаковых концентрациях урана (20–500 частей на миллион) общие объемы производства намного больше<sup>29</sup>.



**Рисунок 1.** Глобальное производство фосфатных пород (столбиковая диаграмма; текст сверху вниз: Китай, Марокко, США, Россия, Иордания, Бразилия, Египет, Саудовская Аравия, Перу, Израиль, Тунис, Австралия, Вьетнам, Южная Африка, Казахстан, Мексика, Индия, Алжир, Сенегал, Того, Сирия, прочие страны) и запасы фосфатных пород (секторная диаграмма; текст по часовой стрелке: Марокко, Китай, Алжир, Сирия, Южная Африка, Россия, Иордания, Египет, Австралия, США, Перу, Саудовская Аравия, прочие страны) в 2015 году (Геологическая служба США).

### КОММЕРЧЕСКОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ УРАНА ИЗ ФОСФАТНЫХ ПОРОД В ПРОШЛЫЕ ГОДЫ

Первые промышленные попытки извлечения урана из фосфатных пород начались во Флориде<sup>30</sup> и до середины 1990-х годов около 20% урана в Соединенных Штатах добывалось как побочный продукт при обработке фосфатных пород<sup>31</sup>. Прошлые попытки извлечения урана из влажной фосфорной кислоты (ВФК), промежуточного продукта производства фосфатных удобрений, можно подразделить на три волны, продолжавшиеся с начала 1950-х годов до начала 1960-х годов (первая волна), с конца 1970-х годов до середины 1990-х годов (вторая волна; последний коммерческий завод прекратил работу в 1999 году), и третья волна, которая может появиться в результате улучшенных технологических методов экстракции, подъема цен на уран, и ожидаемых предписаний по охране окружающей среды.

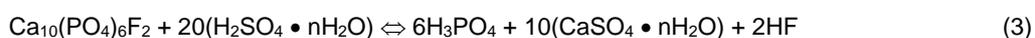
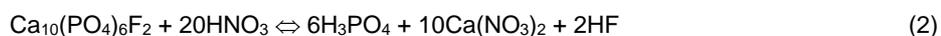
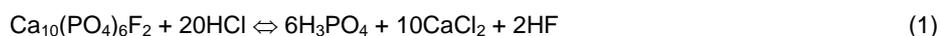
Во время первой волны (1951–1962) в Соединенных Штатах из фосфатных пород было извлечено 17

150 тонн урана, в основном для оборонных целей<sup>32</sup>. Рост спроса на уран для коммерческой атомной энергетики и увеличение цен в 1970-х годах привели ко второй большой волне, когда были построены и введены в эксплуатацию заводы в Бельгии, Канаде, Ираке, на Тайване и в Соединенных Штатах<sup>33</sup>. Было оценено, что в течение этого периода было извлечено около 20 000 тонн урана. Другие существенные извлечения урана из фосфатных пород имели место в бывшем Советском Союзе. Например, в Казахстане в период с 1970-х по 1990-е годы из морских органических отложений (по сути, древних рыбьих костей с высоким содержанием урана) было извлечено 40 000 тонн урана<sup>34</sup>. В таблице 2 представлена краткая сводка данных по промышленным предприятиям, на которых для коммерческих целей из влажной фосфорной кислоты извлекался уран<sup>35,36</sup>.

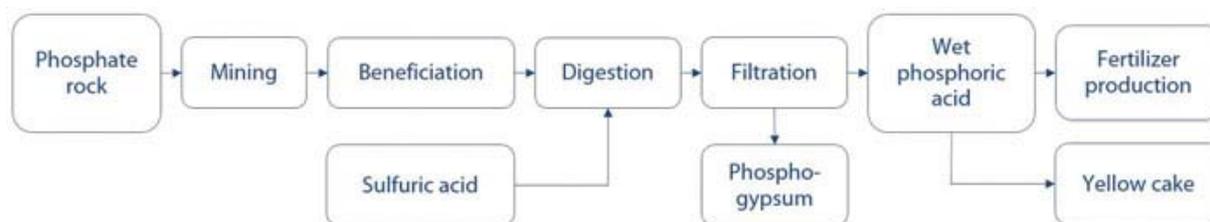
Ким и др.<sup>37</sup> оценили, что при цене урана выше 50 долларов за фунт закиси-оксида урана  $U_3O_8$  извлечение урана снова станет прибыльным в Соединенных Штатах. Эта тенденция может еще более усилиться при улучшении технологии извлечения, например, ионно-обменного извлечения, и потенциальной возможностью появления ограничений на содержание урана в удобрениях.

## ПРОИЗВОДСТВО ВЛАЖНОЙ ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ И ИЗВЛЕЧЕНИЕ УРАНА

Следует различать два основных метода обработки фосфатных пород: процесс влажной фосфорной кислоты и тепловой кислотный процесс. В настоящее время процесс влажной фосфорной кислоты более экономичен из-за высоких затрат энергии при тепловой обработке. Перед выщелачиванием фосфатные породы обычно обогащаются. В зависимости от природы материала пустой породы<sup>38</sup>, смешанной с фосфатными породами, для экстракции могут оказаться достаточными простые методы, такие, как измельчение, перемалывание, и (или) просеивание. В большинстве случаев требуются более сложные методы, такие, как флотационное обогащение, или прокаливание<sup>39</sup>. В процессе производства влажной фосфорной кислоты концентрированная руда выщелачивается соляной кислотой (уравнение 1), азотной кислотой (уравнение 2), или серной кислотой (уравнение 3)<sup>40</sup>.



В настоящее время около трех четвертей влажной фосфорной кислоты производится с использованием серной кислоты<sup>41</sup>. Уран традиционно извлекается из еще не концентрированной влажной фосфорной кислоты в течение процесса очистки влажной фосфорной кислоты. На рисунке 2 представлено краткое описание процесса с указанием точки, на которой может быть извлечен уран, и, при желании далее переработан в желтый кек. Преимуществом для извлекающих уран коммерческих предприятий и потенциальных распространителей является то, что блоки экстракции урана могут быть добавлены к существующей инфраструктуре. Поскольку фосфорная кислота – жидкость, добавляются только трубопроводы.



**Рисунок 2.** Краткое описание процесса влажной фосфорной кислоты и экстракции урана. Название этапов и продуктов в верхней строке (слева направо): 1 – фосфатные породы; 2 – разработка месторождения; 3 – обогащение руды; 4 – кислотный гидролиз; 5 – фильтрация; 6 – влажная фосфорная кислота; 7 – производство удобрений. Название этапов и продуктов в нижней строке (слева направо): 1 – серная кислота; 2 – фосфогипс; 3 – желтый кек.

**Таблица 2.** Коммерческие предприятия, извлекавшие уран из влажной фосфорной кислоты (волны 1 и 2).

№	Волна	Страна	Завод	Производительность (т U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> /год)	Производство (т U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> /год)
1	Первая <sup>35</sup>	США	Joliet, IL	36	–
2	1951-1962	США	Texas City, TX	23	–
3		США	Nichols, FL	–	–
4		США	IMCC Plant, Bonnie, FL	36	–
5		США	Tampa, FL	73-163	–
6	Вторая <sup>36</sup>	США	W.R. Grace Plant, Bartow, FL	129-150	120-127
7	1976-1999	США	Farmland, Pierce, FL	181-204	137-163
8		США	Uncle Sam, Convent, LA	313	265-345
9		США	Riverview Plant, East Tampa, FL	163-193	163
10		США	CF Industries, Bartow, FL	272-286	218-254
11		США	CF Industries, Plant City, FL	272-286	231
12		США	IMC, New Wales, FL	313-340	289-317
13		Бельгия	Engis, Liege	59	50
14		Канада	WCFL, Calgary, AB	45	42
15		Тайвань	China Phosphate, Lung Tan	12	10-12
16		США	Sunshine Bridge, Donaldsville, LA	191	162-196
17		Ирак	Al Qaim	103	54

**Таблица 2.** Продолжение

№	Владелец / Оператор	Период работы	Метод
1	Blockson Chemical Co.	1951-1962	Осаждение
2	Texas City Chemicals, Inc./AEC	1952-1956	OPPA
3	Virginia-Carolina Chemical Corp./AEC	1954-1959	–
4	IMCC Intl. Minerals & Chemicals Corp.	1955-1961	OPPA
5	U.S. Phosphoric Products	1957-1961	OPPA
6	W.R. Grace/URC Uranium Recovery	1976-1980	OPAP
7	Farmland Industries/Wyoming Minerals Corporation	1978-1981	DEPA-TOPO
8	Freeport Minerals	1978-1999	DEPA-TOPO
9	Gardiner-Pechiney	1979-1982	OPPA
10	CFI/IMC	1980-1985	DEPA-TOPO
11	CFI/IMC	1980-1992	DEPA-TOPO
12	IMC	1980-1992	DEPA-TOPO
13	Prayon / Union Miniere and Umipray S.A.	1980-1998	DEPA-TOPO
14	Earth Sciences Extraction Co. & Urangesellschaft Canada Ltd.	1980-1981; 1983-1987	OPAP; DEPA-TOPO
15	Institute of Nuclear Research (NERI)	1981-1985	DEPA-TOPO
16	Agrico Chemical/Freeport Minerals	1981-1998	DEPA-TOPO
17	SOM (Preyon/Mechim)	1984-1991	DEPA-TOPO

Следует отметить, что экстракция урана из влажной фосфорной кислоты сегодня является наиболее экономичным способом извлечения побочного урана. К менее экономичным способам относятся экстракция непосредственно из фосфатной породы<sup>42</sup>, влажная фосфорная кислота торгового сорта, или даже конечные продукты удобрений.

Добытые фосфатные породы концентрируются на стадии обогащения руды для того, чтобы увеличить содержание фосфора. Концентрированные фосфатные породы растворяются в кислоте (чаще всего используется серная кислота H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) для получения фосфорной кислоты. Кроме фосфорной кислоты в процессе накапливаются относительно большие количества фосфогипса (около 5 тонн фосфогипса на одну тонну фосфорной кислоты). Фосфогипс показывает низкие уровни радиоактивности, что препятствует его использованию в качестве строительного материала<sup>43</sup>. В настоящее время в большинстве случаев фосфогипс складывается рядом с обрабатываемыми предприятиями. Большая часть урана (80–90%) остается в потоке фосфорной кислоты. Доли урана, передаваемого в фосфорную кислоту и в фосфогипс в конечном счете зависят от параметров процесса и загружаемого материала<sup>44</sup>.

Преобладающими методами извлечения урана в течение очистки фосфорной кислоты являются методы экстракции растворителем. Экстракция растворителем осуществляется с помощью некоторой комбинации ди-(2-этилгексил) фосфорной кислоты (DEPA, DEHPA или D2EHPA) и оксида три-*n*-этилфосфина

(ТОРО), фосфата октилфениловой кислоты (ОРАР), октилпирофосфорной кислоты (ОРПА) или трибутилфосфата (ТВР). В работах Бельтрами и др.<sup>45</sup>, Бьюнаса<sup>46</sup>, и Сингха и др.<sup>47</sup> представлены подробные обзоры различных используемых процессов экстракции. Среди этих вариантов чаще всего использовался процесс DEPA-ТОРО или ORNL-процесс, разработанный в Ок-Риджской национальной лаборатории<sup>48</sup>. Преимущественное использование этого процесса в промышленных целях обусловлено его стабильностью, эффективностью и селективностью<sup>49</sup>.

### МАТЕРИАЛЫ, ТРЕБУЮЩИЕСЯ В ПРОЦЕССЕ DEPA-ТОРО

В основном процессе DEPA-ТОРО расходуется небольшое количество исходных материалов. В работе Херста и др.<sup>50</sup> представлен для экономической оценки перечень материалов, необходимых для процесса DEPA-ТОРО. В таблице 3 представлены количества материалов, необходимых для экстракции одного грамма закиси-оксида урана  $U_3O_8$ , вместе с количествами, необходимыми для экстракции "существенного количества" (10 тонн) природного урана. Ни один из перечисленных материалов не рассматривается как позиция двойного использования ни в Вассенаарском соглашении<sup>51</sup>, ни в перечне Австралийской группы экспортного контроля<sup>52</sup>.

**Таблица 3.** Количество материала, требующегося для экстракции существенного количества урана (МАГАТЭ).

Материал	Применение	Количество (г на 1 г $U_3O_8$ )	Количество (тонн на 10 т U)
Хлорат натрия ( $NaClO_3$ )	Окисление раствора	1,80	21,22
Аммиак ( $NH_3$ )	Десорбирование	0,90	10,61
Двуокись углерода ( $CO_2$ )	Десорбирование	0,80	9,43
Металлическое железо (Fe)	Десорбирование	0,50	5,90
Ди-(2-этилгексил) фосфорная кислота (DEPA)	Органическая экстракция	< 0,01	< 0,12
Оксид три-н-октилфосфина (ТОРО)	Органическая экстракция	< 0,01	< 0,12

### ВОЗМОЖНОСТИ МЕЛКОМАСШТАБНОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ УРАНА

В дополнение к эксплуатации коммерческих предприятий, перечисленных в таблице 2, в различных частях света эксплуатировались опытные установки, в которых использовались различные технологии экстракции. Например, компания Urtek LLC разработала технологию, основанную на ионном обмене, альтернативную к обычно используемым процессам экстракции растворителем, таким, как процесс DEPA-ТОРО, которая подавала надежды уменьшения расходов и увеличения темпа извлечения, а также интеграции в существующие установки для получения фосфорной кислоты. На рисунке 3 показана опытная установка, размещающаяся в двух 40-футовых транспортировочных контейнерах, которая успешно доказала работоспособность данной технологии<sup>53</sup>. Опытная установка разрабатывалась в соответствии с предписаниями US-NRC 10 CFR Part 40 и эксплуатировалась таким образом, чтобы в течение каждого года экстрагировалось не более 70 кг материала.

Учитывая относительно малую площадь, покрываемую такой установкой, целесообразно оценить ее производительность по извлечению урана. Уравнение (4) предоставляет простой подход, зависящий от величины потока фосфорной кислоты (0,41 литр в секунду, или 0,66 г урана в минуту).

$$m_U = V_{WPA} \times \varphi_U \times D_U \times t \quad (4)$$

где  $m_U$  – масса извлеченного урана (г),  $V_{WPA}$  – поток фосфорной кислоты (л/сек),  $\varphi_U$  – содержание урана в фосфорной кислоте (г/л),  $D_U$  – доля извлекаемого урана, и  $t$  – длительность экстракции (сек).

В предположении почти непрерывной эксплуатации (с фактором доступности 0,90) количество урана, которое может быть извлечено из фосфорной кислоты с относительно высоким содержанием урана (0,165 г/л), как во Флориде<sup>54</sup>, и долей извлечения 0,95, составит приблизительно 1 825 кг/год. Глезер<sup>55</sup> оценил, что для производства 1 кг ВОУ оружейного качества (90% урана-235) потребуется 280 кг природного урана. Анализ программы ядерного оружия Ирака показал, что для конструкции оружия потребовалось бы

около 16 кг урана, обогащенного до 90%. Согласно расчетам Глезера, для этого потребовалось бы 4 480 кг исходного природного урана.



**Рисунок 3.** Опытная установка экстракции урана компании Urtek LLC.

МАГАТЭ определяет существенное количество ВОУ как 25 кг или 10 т природного урана<sup>56</sup>. В таблице 4 представлена краткая сводка требований к годовому потоку фосфорной кислоты, который был бы достаточен для извлечения существенного количества природного урана из фосфорной кислоты в различных местах земного шара (снова при вероятности извлечения 0,95 и доступности предприятия в 0,90). Места выбирались на основании данных из открытых источников и они представляют сводные данные о различных концентрациях урана в различных месторождениях<sup>57</sup>.

Коммерческие предприятия, на которых извлекался уран в процессе влажной фосфорной кислоты, характеризовались гораздо большей пропускной способностью по сравнению с теми, которые приведены в таблице 4. Например, завод IMC в New Wales, Florida, работал с потоком 51–83 л/сек, и производил 245–269 тонн урана в год (или 24–26 существенных количеств за год)<sup>58</sup>.

**Таблица 4.** Потоки влажной фосфорной кислоты, требующиеся в различных местоположениях для извлечения существенного количества урана за год.

Местоположение	Содержание урана (г/л)	Поток фосфорной кислоты (л/с)
США, Флорида	0,165	2,25
Израиль	0,140	2,65
Марокко	0,119	3,12
Иран	0,083	4,47
Иордания	0,071	5,22
Тайвань	0,067	5,53
Сирия	0,060	6,18
Египет	0,040	9,27
Тунис	0,037	10,02

#### ИЗВЕСТНЫЕ, НО НЕ ЗАЯВЛЕННЫЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ УРАНА ИЗ МЕСТНЫХ ФОСФАТНЫХ ПОРОД

Разработка месторождений урана производит больше урана, чем предприятия по переработке фосфатов; поэтому отвлечение материала во время традиционных разработок урановых месторождений и операций подземного выщелачивания без привлечения внимания гарантий МАГАТЭ будет проще. Тем не менее, поскольку фосфорная кислота может быть перенаправлена в боковой поток, освобожденный от урана, и возвращена в поток удобрений, индикаторов извлечения урана может стать меньше. Маршрут извлечения поэтому может оказаться привлекательным для тайного накопления урана, когда фосфатные породы будут доступными, а первичные урановые руды – не будут. Кроме того, даже заявленные операции по извлечению побочного урана часто не считаются операциями по добыче урана по местному законодательству. Извлечение урана из нестандартных источников, согласно всеобъемлющему соглашению по гарантиям (INFCIRC/153) и дополнительному протоколу (INFCIRC/540), должно докладываться в МАГАТЭ, но на практике это часто либо игнорируется, либо не выявляется.

Уран из местных источников фосфатных пород использовался в ядерных программах Израиля<sup>59</sup> и Соединенных Штатов<sup>60</sup>. В 1949 году Научный корпус С, специальное подразделение Сил обороны Израиля, начал двухлетние геологические изыскания с целью поиска урана в пустыне Негев. В фосфатных породах был обнаружен уран и в 1953 году Научный корпус С в конце концов произвел экстракцию урана<sup>61</sup>. Полагают, что Израиль все еще продолжает извлекать около 10 тонн урана (1 существенное количество) в год<sup>62</sup>, или более, в ходе местной переработки фосфатных пород<sup>63</sup>.

Другим примером служит завод Аль-Куаим в Ираке, на котором было извлечено примерно 109 тонн урана (около 11 существенных величин) без оповещения МАГАТЭ<sup>64</sup> перед тем, как предприятие было разрушено в ходе первой войны в Персидском заливе. Залежи фосфатных пород в Западном Ираке содержат от 40 до 80 частей на миллион урана<sup>65</sup>. Фосфатные породы добывались в Акашате и поездом перевозились на 150 км на перерабатывающий завод в Аль-Куаиме. Завод Аль-Куаим начал работу в 1984 году и играл важную роль в снабжении страны удобрениями<sup>66</sup>. Установка для извлечения урана из влажной фосфорной кислоты была построена за два года, с 1982 по 1984 год. Она проектировалась для извлечения 103 тонн урана в год при условии работы 317 дней в году, обработке 42 л/сек влажной фосфорной кислоты с содержанием урана 0,075 г/л при степени извлечения 0,93. В ходе последующих инспекций Ирак заявил, что в течение шести лет работы (1984–1990 годы) была достигнута производительность всего в 20% от проектной. Плохие показатели завода были связаны с меньшей, чем ожидалось, концентрацией урана (примерно 60% от проектного значения), существенно меньшей скоростью потока (примерно 50% от проектного значения), меньшей степенью извлечения (примерно 0,78) и меньшей доступностью завода в целом (в среднем 214 дней за год). Хотя завод не удовлетворял проектным характеристикам, его деятельность поначалу не докладывалась гарантиям МАГАТЭ<sup>67</sup>.

#### ИЗВЕСТНЫЕ, НО НЕ ЗАЯВЛЕННЫЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ УРАНА ИЗ ИМПОРТНЫХ ФОСФАТНЫХ ПОРОД

В дополнение к извлечению урана из местных фосфатных пород, некоторые страны импортировали фосфатные породы для производства фосфатных удобрений и извлечения попутного урана из этих импортируемых ресурсов. Например, Бельгия сообщала о производстве примерно 40 тонн урана в год на заводе Прайон в Энгисе (около Льежа) из марокканских фосфатных пород из месторождения Хурибга с

1980 по 1998 год. Интерес к урану из богатых фосфатными породами регионов остается, как это подтверждается контрактами между компаниями Арева (Франция) и ОСП (Марокко)<sup>68</sup>.

Для стран без существенных запасов фосфатных пород и ресурсов урана, таких, как Индия или Пакистан<sup>69</sup>, для которых покупка урана на международных рынках – это борьба<sup>70</sup>; уран из фосфатных пород может представлять особенный интерес. Еще одним свидетельством может быть то, что, как сообщают, Иран пытался обойти санкции на прямой импорт урановой руды приобретением руд, включая фосфатные породы, с относительно высоким содержанием сопровождающего урана<sup>71</sup>.

Фосфатные породы могут импортироваться из нескольких источников и смешиваться на одном предприятии. Потоки материала, например, доступны на заводе на Филиппинах, который импортирует фосфатные породы из нескольких источников и смешивает их перед переработкой (без извлечения урана)<sup>72</sup>. Смешивание затрудняет определение того, были ли извлечены малые или средние количества урана, по заданным концентрациям урана в фосфатных породах и конечной продукции удобрений.

Республика Корея рассматривала разработку ядерного оружия в конце 1960-х годов из-за неуверенности в том, что союз с США гарантирует защиту от угроз со стороны КНДР. Республика Корея сначала решила осуществить производство плутония на перерабатывающем предприятии, исследовательском реакторе и тяжеловодном реакторе. Из-за контроля над технологиями двойного применения после индийского испытания 1974 года усилия Республики Корея по производству плутония оружейного качества были раскрыты. Активность Республики Корея в ядерной области продолжалась в начале 1980-х годов выборочным импортом фосфатных пород с высоким содержанием урана, хотя она и не имела значения для программы оружия, но уран мог быть извлечен для тайных экспериментов по обогащению<sup>73</sup>.

## ВЫВОДЫ

Приобретение природного урана служит первым шагом на пути производства ядерных взрывных устройств. В дополнение к обычным источникам, фосфатные породы являются многообещающим источником нестандартного урана. Из-за глобальной распространенности фосфатных пород, а также из-за больших объемов торговли продукцией удобрений, важнейших для глобальной продовольственной безопасности, маловероятно, что МАГАТЭ или любая другая организация будет иметь возможность отслеживать извлечение урана из местных или импортных фосфатных пород. Кроме того, это можно будет рассматривать как плохое применение ресурсов МАГАТЭ. Хотя знание того, что значительные количества урана могут попасть к государствам, у которых мало ресурсов урана, но, возможно, имеют программы ядерного оружия, все-таки полезно. Руководящие принципы для декларации добытого урана, который включает нестандартный уран от деятельности по извлечению, существуют. Мы советуем МАГАТЭ и ее членам использовать их, закрыть потенциальные лазейки и таким образом обеспечивать сохранение ресурсов и производство более чистых удобрений в глобальном масштабе.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят экспертов из МАГАТЭ, Франкфуртского института исследования мира, Рабочей группы по ядерной политике в Калифорнийском университете в Беркли, и Рейнско-Вестфальского технического университета Ахена за полезные обсуждения предмета, компанию Urtek LLC за предоставление изображений ее опытной установки и участников встречи по устойчивости фосфора 2014 года за постановку обсуждаемого здесь предмета. За любые оставшиеся пропуски или несоответствия отвечают только авторы.

## ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. R. Scott Kemp, "Environmental Detection of Clandestine Nuclear Weapon Programs," *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 44(2016): annurev-earth-060115-012526, doi:[10.1146/annurev-earth-060115-012526](https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060115-012526).
2. R. Scott Kemp, "Environmental Detection of Clandestine Nuclear Weapon Programs." (ссылка 1)
3. NSG, "Nuclear Suppliers Group Guidelines," 2016.
4. ASNO, "Nuclear Trade Outside the Nuclear Suppliers Group" 2009,1-7.
5. Stephen M. Jasinski, "Phosphate Rock," *USGS Mineral Commodities Summaries* 703(2016): 120-21.
6. Ian Anthony and Lina Grip, "The Global Market in Natural Uranium – from Proliferation Risk to Non-

- Proliferation Opportunity," 2013.
7. IAEA and NEA, "Uranium 2011: Resources, Production and Demand," 2012.
  8. IAEA and NEA, "Uranium 2011." (ссылка 7)
  9. Nils Haneklaus et al., "To Extract, or Not to Extract Uranium from Phosphate Rock, That Is the Question," *Environmental Science* (2016). doi:10.1021/acs.est.6b05506.
  10. Minpeng Chen and Thomas E. Graedel, "The Potential for Mining Trace Elements from Phosphate Rock," *Journal of Cleaner Production* 91(2015): 337-46, doi:10.1016/j.jclepro.2014.12.042; Patrick Zhang, "Comprehensive Recovery and Sustainable Development of Phosphate Resources," *Procedia Engineering* 83(2014): 37-51, doi:10.1016/j.proeng.2014.09.010; Poul Emsbo et al., "Rare Earth Elements in Sedimentary Phosphate Deposits: Solution to the Global REE Crisis?," *Gondwana Research* 27(2015): 776-85, doi:10.1016/j.gr.2014.10.008.
  11. FAO, *Use of Phosphate Rocks for Sustainable Agriculture, FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin*, vol. 13, 2004.
  12. Steven J. Van Kauwenbergh, "World Phosphate Rock Reserves and Resources" (Muscle Shoals, AL: IFDC). FAO, *Use of Phosphate Rocks for Sustainable Agriculture*. (ссылка 11)
  13. FAO, *Use of Phosphate Rocks for Sustainable Agriculture*. (ссылка 11)
  14. Kauwenbergh, "World Phosphate Rock Reserves and Resources." (ссылка 12)
  15. IAEA, "World Distribution of Uranium Deposits (UDEPO) with Uranium Deposit Classification 2009," 2009.
  16. Yi Lu, "Uranium Extraction: Coordination Chemistry in the Ocean," *Nature Chemistry* 6(2014): 175-77, doi:10.1038/nchem.1880; WNA, "Supply of Uranium," 2014; Joel Guidez and Sophie Gabriel, "Extraction of Uranium from Seawater: A Few Facts," *EPJ Nuclear Sciences & Technologies* 2(2016): 10, doi:10.1051/epjn/e2016-50059-2.
  17. Suree Brown et al., "Uranium Adsorbent Fibers Prepared by Atom-Transfer Radical Polymerization (ATRP) from Poly (vinyl Chloride)-Co-Chlorinated Poly (vinyl Chloride) (PVC-Co-CPVC) Fiber," *Industrial and Engineering Chemistry Research* 55(2016): 4139-48, doi:10.1021/acs.iecr.5b03355; Jungseung Kim et al., "Recovery of Uranium from Seawater: A Review of Current Status and Future Research Needs," *Separation Science and Technology* 48(2013): 367-87, doi:10.1080/01496395.2012.712599.
  18. IAEA, "World Distribution of Uranium Deposits." (ссылка 15)
  19. WNA, "Supply of Uranium," 2014. (ссылка 16)
  20. S.J. Van Kauwenbergh, "Cadmium and Other Minor Elements in World Resources of Phosphate Rock," in *The Fertilizer Society Proceedings No. 400*, 1997.
  21. WNA 2017: "Uranium in Namibia," <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/namibia.aspx>.
  22. James Cooper et al., "The Future Distribution and Production of Global Phosphate Rock Reserves," *Resources, Conservation and Recycling* 57(2011): 78-86, doi:10.1016/j.resconrec.2011.09.009.
  23. Andrea E. Ulrich and Emmanuel Frossard, "On the History of a Reoccurring Concept: Phosphorus Scarcity," *Science of the Total Environment* 490(2014): 694-707, doi:10.1016/j.scitotenv.2014.04.050; Dana Cordell and Stuart White, "Peak Phosphorus: Clarifying the Key Issues of a Vigorous Debate about Long-Term Phosphorus Security," *Sustainability* 3(2011): 2027-49, doi:10.3390/su3102027; Vaclav Smil, "Phosphorus in the Environment: Natural Flows and Human Interferences," *Annu. Rev. Energy Environ.*, 2000, 53-88, doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.53; Dana Cordell, Jan Olof Drangert, and Stuart White, "The Story of Phosphorus: Global Food Security and Food for Thought," *Global Environmental Change* 19(2009): 292-305, doi:10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009; D. P. Van Vuuren, A. F. Bouwman, and A. H W Beusen, "Phosphorus Demand for the 1970-2100 Period: A Scenario Analysis of Resource Depletion," *Global Environmental Change* 20(2010): 428-39, doi:10.1016/j.gloenvcha.2010.04.004; J. D. Edixhoven, J. Gupta, and H. H G Savenije, "Recent Revisions of Phosphate Rock Reserves and Resources: A Critique," *Earth System Dynamics* 5(2014): 491-507, doi:10.5194/esd-5-491-2014.
  24. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, "Mineral Commodities Summary," U.S. Govt Printing Office, 124-125.
  25. WNA, "Uranium from Phosphates," 2015.
  26. Andrea E Ulrich et al., "Uranium Endowments in Phosphate Rock.," *The Science of the Total Environment* 478(2014): 226-34, doi:10.1016/j.scitotenv.2014.01.069.
  27. Sophie Gabriel et al., "Building Future Nuclear Power Fleets: The Available Uranium Resources Constraint," *Resources Policy* 38(2013): 458-69, doi:10.1016/j.resourpol.2013.06.008.
  28. Haeyeon Kim et al., "Potential Uranium Supply from Phosphoric Acid: A U.S. Analysis Comparing Solvent

- Extraction and Ion Exchange Recovery,” *Resources Policy* 49(2016): 222-31, doi:[10.1016/j.resourpol.2016.06.004](https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.06.004).
29. Patrice Bruneton, “Unconventional Uranium Resources Challenges and Opportunities” (Santiago, Chile: UNFC Workshop, 2013).
  30. Vaughn Astley and Regis Stana, “There and Back Again 2.5 Again Who Did What in Solvent Extraction? A Demonstrated & Proven Technology for Uranium Recovery from Phosphoric Acid,” *Procedia Engineering* 83(2014): 270-78, doi:[10.1016/j.proeng.2014.09.003](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.003).
  31. WNA, “Uranium from Phosphates.” (ссылка 25)
  32. IAEA and NEA, “Uranium 2011: Resources, Production and Demand.” (ссылка 7)
  33. IAEA, “The Recovery of Uranium from Phosphoric Acid,” 1989.
  34. S. Gabriel, A. Baschwitz, G. Mathonniere, T. Eleouet, F. Fizaine, “A critical assessment of global uranium resources, including uranium in phosphate rocks, and the possible impact of uranium shortages on nuclear power fleets,” *Annals of Nuclear Energy* 58, 213-220(2013), doi:[10.1016/j.anucene.2013.03.010](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.03.010).
  35. R H De Voto and D N Stevens, *Uraniferous Phosphate Resources and Technology and Economics of Uranium Recovery from Phosphate Resources* (United States and free world. Golden, CO: Earth Sciences, Inc., 1979); B F Greek, O W Wallen, and Tynan D E, “Uranium Recovery from Wet Process Phosphoric Acid,” *Industrial & Engineering Chemistry & Research* 49(1957); F Habashi, “Recovery of Uranium from Phosphate Rock: Progress and Problems,” *Proceedings—International Congress on Phosphorus Compounds* (1980), 629-66; A. D. Owen, “Byproduct Uranium,” *Resource Policy* 18(1992): 137-47.
  36. M J Reaves, “The Importance of by-Product Uranium to Phosphate Rock Producers,” in *Industrial Minerals Conference on Phosphates: What Prospects for Growth* (Orlando, Florida, 1983), 11-14; P Becker, *Phosphates and Phosphoric Acid: Raw Materials, Technology and Economics of the Wet Process* (New York: Marcel Dekker Inc, 1988); De Voto and Stevens, *Uraniferous Phosphate Resources and Technology and Economics of Uranium Recovery from Phosphate Resources* (ссылка 35); IAEA, “The Recovery of Uranium from Phosphoric Acid.” (ссылка 33)
  37. Kim et al., “Potential Uranium Supply from Phosphoric Acid: A U.S. Analysis Comparing Solvent Extraction and Ion Exchange Recovery.” (ссылка 28)
  38. Пустая порода – это скальная порода или минеральное вещество, не имеющее ценности, появляющаяся вместе с металлорудной жилой или месторождением.
  39. Abdel Zaher M Abouzeid, “Physical and Thermal Treatment of Phosphate Ores – An Overview,” *International Journal of Mineral Processing* 85(2008): 59-84, doi:[10.1016/j.minpro.2007.09.001](https://doi.org/10.1016/j.minpro.2007.09.001).
  40. D Beltrami et al., “Recovery of Uranium from Wet Process Phosphoric Acid by Solvent Extraction,” *Chemistry Review* 114(2014): 12002-23, doi:[dx.doi.org/10.1021/cr5001546](https://doi.org/10.1021/cr5001546).
  41. D Beltrami et al., “Recovery of Uranium from Wet Process Phosphoric Acid by Solvent Extraction.
  42. Gabriel et al., “Building Future Nuclear Power Fleets: The Available Uranium Resources Constraint.” (ссылка 27)
  43. Hanan Tayibi et al., “Environmental Impact and Management of Phosphogypsum,” *Journal of Environmental Management* 90(2009): 2377-86, doi:[10.1016/j.jenvman.2009.03.007](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.03.007); IAEA, “Radiation Protection and Management of NORM Residues in the Phosphate Industry,” *Safety Reports Series No. 78* (Elsevier, 2013), doi:[10.1016/j.resourpol.2012.04.002](https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2012.04.002).
  44. P M Rutherford, M J Dudas, and R A Samek, “Environmental Impacts of Phosphogypsum,” *The Science of the Total Environment* 149 (1994): 1-38.
  45. Beltrami et al., “Recovery of Uranium from Wet Process Phosphoric Acid by Solvent Extraction.” (ссылка 40)
  46. Florin T Bunus, “Uranium and Rare Earth Recovery from Phosphate Fertilizer Industry by Solvent Extraction,” *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 21(2000): 381478, doi:[10.1080/08827500008914174](https://doi.org/10.1080/08827500008914174).
  47. D K Singh, S Mondal, and J K Chakravartty, “Recovery of Uranium from Phosphoric Acid: A Review,” *Chemical Engineering Progress* 34(2016): 201-25, doi:[10.1080/07366299.2016.1169142](https://doi.org/10.1080/07366299.2016.1169142).
  48. F. J. Hurst, D. J. Crouse, and K. B. Brown, “Recovery of Uranium from Phosphoric Acid,” *Industrial Engineering & Chemistry Process. Design & Development* 11 (1972):122-28.
  49. Bunus, “Uranium and Rare Earth Recovery from Phosphate Fertilizer Industry by Solvent Extraction.”
  50. Hurst, Crouse, and Brown, “Recovery of Uranium from Phosphoric Acid.” (ссылка 48)
  51. Wassenaar Arrangement, “The Wassenaar Arrangement on Export Controls for Conventional Arms and Dual-Use Goods and Technologies,” 2016.
  52. The Australia Group, “Export Control List: Chemical Weapons Precursors,” 2015.
  53. Ian Hore-Lacy, 9 – *Production of Byproduct Uranium and Uranium from Unconventional Resources BT –*

- Uranium for Nuclear Power, Uranium for Nuclear Power* (Elsevier Ltd, 2016), doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100307-7.00009-0>; Urtek, "Urtek Presentation to NRC," 2013, doi:<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1323/ML13232A003.pdf>.
54. Hurst, Crouse, and Brown, "Recovery of Uranium from Phosphoric Acid." (ссылка 48)
  55. Alexander Glaser, "Characteristics of the Gas Centrifuge for Uranium Enrichment and Their Relevance for Nuclear Weapon Proliferation," *Science & Global Security* 16(2008): 1-25, doi:[10.1080/08929880802335998](https://doi.org/10.1080/08929880802335998).
  56. IAEA, "IAEA Safeguards Glossary."
  57. Hurst, F. J.; Crouse, D. J, Brown, K. B, "Recovery of Uranium from Phosphoric Acid," *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development* 11 (1972): 122- 128; Zhang, P, "Uranium from Phosphates: Rethinking Beneficiation, Leadership Academy in Sustainable Uranium and Critical Materials Production from Phosphates and Other Sources," August 2015, Nanchang, China; Nazari, K.; Maragheh, M. G.; Jabbari Rad, A, "Studies on extraction of uranium from phosphoric acid using PN-1200 extractant," *Hydrometallurgy* 71 (2004): 371-377; Rawajfeh, K. M.; Al-Matar, A. K, "Uranium extraction from purified wet process Jordanian phosphoric acid: A development study," *Hydrometallurgy* 56 (2000): 309-322; Chen, H. M et al., "Development of an Improved Two-cycle Process for Recovering Uranium from Wet-Process Phosphoric Acid," *Industrial Engineering and Chemistry Research* 26 (1987): 621-627; Kherfan, S.; Shadood, G.; Koudsi, Y, "Effect of anions in commercial phosphoric acid on the extraction of uranium by DEHPA/TOPO," *Periodica Polytechnica Chemical Engineering* 55 (2011): 27-30; El-Reefy, S. A.; Awwad, N. S.; Aly, H. F, "Liquid-liquid extraction of uranium from phosphoric acid by HDEHP-CYANEX-921 mixture," "[https://www.worldcat.org/title/journal-of-chemical-technology-and-biotechnology/oclc/781512786&referer=brief\\_results](https://www.worldcat.org/title/journal-of-chemical-technology-and-biotechnology/oclc/781512786&referer=brief_results)" *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 69 (1997): 271-275; Khleifia, N.; Hannachi, A.; Abbes, N, "Studies of Uranium Recovery from Tunisian Wet Process Phosphoric Acid," *International Journal of Innovation and Applied Studies* 3 (2013): 1066-1071.
  58. C. Gupta and H. Singh, *Uranium Resource Processing – Secondary Resources* (Springer, Berlin, 2003).
  59. Avner Cohen, "Before the Beginning: The Early History of the Israeli Nuclear Project (1949-1954)," *Israel Studies* 3(1998): 112-39.
  60. Astley and Stana, "There and Back Again 2.5 Again Who Did What in Solvent Extraction? A Demonstrated & Proven Technology for Uranium Recovery from Phosphoric Acid." (ссылка 30)
  61. E Kahaha, *Historical Dictionary of Israeli Intelligence* (Scarecrow Press, Inc, 2006).
  62. NTI, "Rotem Amfert Negev Ltd," 2011.
  63. Ewald Schnug, "Where Has All the Uranium Gone? Or What Feeds Dimona – Circumstantial Evidence for an Illicit Fate of Uranium from Rock Phosphate Processing," in *Uranium – Past and Future Challenges*, ed. B.J. Merckel and A. Arab (Springer International Publishing Switzerland 2015, 2015), 731-38, doi:[10.1007/978-3-319-11059-2\\_84](https://doi.org/10.1007/978-3-319-11059-2_84).
  64. U.N., "Report of the Director General of the IAEA," vol. 9724836E, 1997, doi:[S/2010/579](https://doi.org/S/2010/579).
  65. Ahmed F. Saleh, Mazin M. Elias, and Nada F. Tawfiq, "Determination of Uranium Concentration in Urine of Workers in an Iraqi Phosphate Mine and Fertilizer Plants," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 298(2013): 187-93, doi:[10.1007/s10967-013-2420-3](https://doi.org/10.1007/s10967-013-2420-3); UN, "Report of the Director General of the IAEA."
  66. Lucy Dean, *Regional Surveys of the World – The Middle East and North Africa 2004*, 50th Edition (London: Europa Publications, 2004).
  67. UN, "Report of the Director General of the IAEA." (ссылка 64)
  68. Areva, "Morocco: Areva and OCP Sign Mining Cooperation Agreement," 2007.
  69. Shamim Akhtar, Yang Xiaoyong, and Wang Fang Yue, "Uranium Deposits and Resources Potential in Pakistan: A Review" 27 (2015): 1293-96; F. J. Dahlkamp, *Uranium Deposits of the World – Asia* (Springer, Berlin, 2009).
  70. Edmond Roy, "Australian Uranium and India: Ideology versus Pragmatism," *South Asia: Journal of South Asian Studies* 34(2011): 113-40, doi:[10.1080/00856401.2011.549087](https://doi.org/10.1080/00856401.2011.549087); Michael Clarke, "Australia, India and the Uranium Question," *Australian Journal of Political Science* 46(2011): 489-502, doi:[10.1080/10361146.2011.595389](https://doi.org/10.1080/10361146.2011.595389).
  71. Mark Hibbs, "Iran and Secondary Uranium Resources," *Carnegie Endowment for International Peace*, 2013.
  72. Nils Haneklaus et al., "Energy Neutral Phosphate Fertilizer Production Using High Temperature Reactors: A Philippine Case Study" 144, no. June (2015): 69-79.
  73. Anthony H Cordesman and Ashley Hess, *The Evolving Military Balance Korean Peninsula and Northeast Asia*, vol. I, 2013; Jungmin Kang et al., "South Korea's Nuclear Surprise," *Bulletin of the Atomic Scientists* 61(2005): 40-49, doi:[10.1080/00963402.2005.11460853](https://doi.org/10.1080/00963402.2005.11460853).