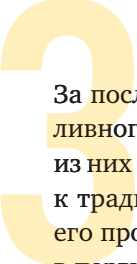


СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие А. Торшина	7
Предисловие И. Платонова	9
Предисловие А. Брындза	11
Введение	13
Глава 1	
О природном уране	15
<i>История урана</i>	17
<i>Природный уран в мировом ядерном топливном цикле (ЯТЦ).</i>	
<i>Военное и гражданское применение урана</i>	23
<i>Минерально-сырьевая база урана</i>	34
<i>Производство природного урана</i>	43
<i>Вторичные источники поставок</i>	56
Глава 2	
Урановый рынок	67
<i>История и особенности уранового рынка</i>	69
<i>Текущее состояние уранового рынка</i>	80
<i>Правовые аспекты и торговые ограничения</i>	94
<i>Ценообразование на урановом рынке</i>	105
Глава 3	
Природный уран как объект инвестиций	123
<i>Инвестирование в природный уран на современном этапе</i>	125
<i>Обзор инструментов инвестирования в природный уран</i>	134
Глава 4	
Инвестирование в акции уранодобывающих компаний	141
<i>Особенности мирового уранового фондового рынка</i>	143

<i>Обзор инструментов инвестирования в акции урановых компаний</i>	147
<i>Ведущие компании уранового рынка</i>	150
Глава 5	
Что должен знать инвестор?	171
<i>Текущие рыночные риски</i>	173
<i>Стратегии инвестирования в уран</i>	178
<i>Будущее урана как биржевого товара</i>	184
Приложение	
Профайлы ведущих публичных урановых компаний	187
<i>Cameco Corp</i>	189
<i>Uranium One Inc.</i>	193
<i>Paladin Energy Ltd.</i>	197
<i>Energy Resources of Australia Ltd.</i>	201
<i>Rio Tinto PLC</i>	205
<i>Denison Mines Corp.</i>	211
<i>Toro Energy Ltd.</i>	215
<i>Mega Uranium Ltd.</i>	219
<i>Berkeley Resources Ltd.</i>	223
<i>Laramide Resources Ltd.</i>	227
<i>Uranerz Energy Corp.</i>	229
<i>Uranium Energy Corp.</i>	231
<i>Fission Energy Corp.</i>	235
<i>Khan Resources Inc.</i>	237
<i>Bannerman Resources Ltd.</i>	241
Библиография	245

В НОВОЙ ФАЗЕ РАЗВИТИЯ



За последние несколько лет мировой рынок товаров и услуг ядерного топливного цикла претерпел ряд существенных изменений. Пожалуй, главное из них заключается в том, что специфический урановый рынок приблизился к традиционным рынкам сырьевых товаров, соответственно, повысились его прозрачность и предсказуемость. Этой трансформации способствовали в первую очередь глобальные изменения в атомной отрасли, которая стала более транспарентной, более восприимчивой к рыночным механизмам. Изменения в значительной степени коснулись и российской атомной энергетики и промышленности.

На современном этапе российская атомная отрасль, некогда носившая полувоенный, чрезвычайно закрытый характер, становится глобальным игроком, привлекая к себе все возрастающий интерес инвестиционного сообщества.

Можно предположить, что на очередном этапе эволюционного развития отечественной атомной отрасли изменится структура собственности на отдельные элементы ядерного топливного цикла. Уже сегодня мы видим, что Российское государство не является единственным собственником активов ядерного топливного цикла (ЯТЦ). В такой ситуации очень важно понимание инвесторами специфики уранового рынка.

С другой стороны, развитие «Росатома» неизбежно связано с привлечением частного капитала, более того — госкорпорации предстоит бороться за этот капитал с другими потенциальными областями приложения инвестиций. Следовательно, сама отрасль должна быть заинтересована в формировании понятного, подчиняющегося общеизвестным законам рынка, в том числе в сфере ЯТЦ.

Данная книга, я уверен, поможет тем, кто сегодня инвестирует в атомную отрасль, и тем, кто только планирует подобные инвестиции. Интересное издание с ярко выраженной прикладной направленностью. Уникальность книги состоит еще и в том, что в таком объеме исследования по данной тематике практически не проводились.

Это позволяет утверждать, что современное состояние атомной отрасли стимулирует появление новых направлений исследований. Приятно, что российские исследователи идут в ногу со временем, поддерживают традиции отечественной экономической школы применительно к новой фазе развития мировой атомной энергетики.

Александр Торшин,
первый заместитель Председателя Совета Федерации
Федерального Собрания Российской Федерации

УРАНОВАЯ ЭВОЛЮЦИЯ

Говоря о мировом урановом рынке, автор справедливо отмечает, что этот рынок — очень специфический, не похожий на другие сырьевые рынки. Специфика проявляется в ограничениях, связанных с режимом ядерного нераспространения, в лимитированном перемещении физических объемов материала, в относительно небольшом количестве участников рынка, в сильном влиянии государства на процессы, происходящее на рынке ЯТЦ, в собственных ценовых индикаторах.

Тем не менее функционирование рынка невозможно без следования определенным законам и правилам, которые должны работать даже в условиях вышеперечисленных особенностей, адаптируясь к ним.

За последнее десятилетие мировой рынок ядерного топлива сделал большой шаг вперед на пути к интеграции в сырьевые рынки.

Нужно отметить огромный вклад в эту работу компании «Ux Consulting Co.» (UxC), которая поступательно формирует и внедряет рыночные механизмы в рынок ЯТЦ. Эта деятельность возможна, прежде всего, благодаря высочайшему авторитету UxC среди участников рынка.

На сегодняшний день существует финансово регулируемый фьючерсный рынок урана, цены предложений о покупке и продаже урана публикуются на ежедневной основе (прежде — на еженедельной), появилась предложенная UxC кривая форвардной цены.

По мнению президента UxC Джеффа Комза, это можно рассматривать как «естественную эволюцию: от рынка, характеризующегося несколькими дискретными ценовыми “реперами” (спотовый, среднесрочный и долгосрочный), к форвардному рынку с более-менее непрерывным потоком фиксированных цен, основанных на желаемых параметрах поставки». Иными словами — как постепенное превращение урана в полноценный биржевой товар (commodity).

В целях расширения потенциального инвестиционного сообщества мирового рынка урана с сентября 2011 г. UxC совместно с порталом Nuclear.Ru публикует аналитическое издание UxNuclear Weekly. Новый продукт стал

первой публикацией на русском языке, представляющей полный спектр котировок уранового рынка и экспертные мнения ведущих специалистов в данной сфере.

При работе над этой книгой автор, являясь председателем Наблюдательного совета Nuclear. Ru, широко использовал опыт подготовки UxNuclear Weekly, а также, с разрешения Ux Consulting Co., оригинальную информацию UxC.

От имени автора данной работы Nuclear. Ru выражает признательность UxC за оказанное содействие и надеется, что книга будет интересна читателям.

Илья Платонов,
главный редактор Nuclear. Ru

РЫНОК ФОРМИРУЕТСЯ СЕГОДНЯ

Рынки ядерного топлива всегда характеризовались нестандартным развитием, связанным с историей возникновения атомной энергетики и ее происхождением из военных ядерных программ. На заре коммерческого рынка ЯТЦ, в конце 1960-х гг., существовал всего один ценовой индикатор, публиковавшийся раз в месяц. С тех пор в мире и на рынках ядерного топлива произошли колоссальные изменения. Последние два десятилетия стали наиболее продуктивными в этом смысле: окончание холодной войны привело к уменьшению государственного контроля в сфере ЯТЦ. Результатом этого стала бурная эволюция ядерных рынков, поскольку коммерческие факторы стимулировали большую ликвидность и транспарентность.

В 1987 году компания Uranium Exchange Company (Ux) впервые предложила еженедельный ценовой индикатор для урана. Сегодня ситуация во многом отлична от того, что было раньше. Помимо формирования финансово регулируемого рынка фьючерсов, сейчас предложения о покупке и продаже публикуются ежедневно и, что еще более важно, появилась кривая форвардной цены.

В целом рынок движется в направлении функционирования как обычный рынок сырьевых товаров. Ux Consulting Company, LLC (UxC) играет важную роль в этом процессе. В 2007 г. UxC совместно с Нью-Йоркской товарной биржей (NYMEX) создала фьючерсные контракты на уран. В 2009 г. UxC начала публиковать среднюю цену урановых брокеров (BAP) — первый ежедневный урановый ценовой индикатор, который был доступен всей отрасли.

В 2011 г. UxC совместно с Nuclear. Ru начала публикацию пионерного издания на русском языке UxNuclear Weekly с целью расширить региональную аудиторию рыночной информации, в том числе за счет представителей инвестиционного сообщества.

Книга Андрея Черкасенко, возможно, впервые предлагает инвесторам в печатном формате всеобъемлющую базу данных об урановом рынке на рус-

ском языке. В книге подробно описаны особенности уранового рынка, его текущее состояние рассматривается через призму исторического контекста. Уверена, что читатели оценят эту книгу как ценный источник информации и знаний об урановой отрасли.

Анна Брындза,
вице-президент Ux Consulting Company, LLC (UxC)

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее исследование является попыткой систематизировать информацию об исторически закрытом, ограниченном по уровню ликвидности и количеству участников, но при этом стратегически важном рынке урана. Особое внимание в работе уделяется потенциалу инвестирования в различные инструменты мирового уранового рынка, включая инструменты фондового рынка.

Атомная энергетика в последние годы пережила период активного и глобального роста, получившего название «ядерный ренессанс». Сегодня, сохраняя значительный потенциал дальнейшего роста, особенно в таких странах, как Китай, Индия и Россия, атомная энергетика столкнулась с целым рядом негативных для своего развития факторов. В первую очередь это мировой финансовый кризис, активное внедрение «субститутных» технологий, например добычи сланцевого газа и, конечно же, авария на АЭС «Фукусима-1» в Японии. Несмотря на очевидные преимущества ядерной генерации, такие как экологически чистое производство, стабильные поставки электроэнергии в базовом режиме, повышение энергобезопасности, вышеперечисленные факторы вносят неопределенность в отношении перспектив долгосрочного развития атомной энергетике и, соответственно, баланса спроса и предложения урана.

Между тем с начала 2000-х гг. мировой урановый рынок претерпел существенную трансформацию: стали активно развиваться механизмы взаимодействия между участниками рынка, появились новых игроки (финансовые институты и частные инвесторы), значительно вырос интерес к урану как к инструменту инвестирования, увеличились прозрачность и симметричность информации о рынке за счет появления новых показателей цен, рыночных индикаторов и консалтинговых компаний. Все это способствовало приобретению урановым рынком черт и характеристик рынка сырьевых товаров (commodities), что, естественно, сделало его более прогнозируемым, подчиняющимся общей рыночной логике.

Можно предположить, что с ослаблением влияния рисков для долгосрочного развития атомной энергетике мировой урановый рынок продолжит

поступательное развитие в направлении превращения урана в полноценный биржевой товар.

Данная книга ставит целью помочь разобраться заинтересованному читателю в специфике этого рынка.

ГЛАВА

1

О ПРИРОДНОМ УРАНЕ

ИСТОРИЯ УРАНА

Уран — радиоактивный химический элемент с атомной массой 238,02. В периодической системе Д. И. Менделеева ему присвоен 92-й атомный номер. Этот серебристо-белый металл относится к семейству актиноидов и является самым тяжелым металлом, встречающимся в природе. Уран отличается мягкостью (в чистом виде он несколько мягче стали), ковкостью и гибкостью, обладает небольшими парамагнитными свойствами. Следует отметить химическую активность этого элемента: на воздухе он быстро окисляется, покрываясь радужной пленкой. В порошкообразном виде уран легко воспламеняется при температуре 150–170 °С, в результате чего образуется оксид U_3O_8 .

Широкое распространение урана в земной коре — один из основополагающих факторов, играющих значительную роль в геофизических процессах. Тепло, выделяющееся при изотопном распаде этого элемента, занимает важное место в энергетическом балансе планеты.

Несмотря на то что уран встречается в природе чаще, чем многие другие металлы, такие как ртуть, серебро или кадмий (38-е место по распространенности), сложность его добычи заключается в том, что в недрах земли он находится в основном в рассеянном состоянии.

Отличительными признаками пород, характерных для урановых руд, являются кислая среда и высокое содержание кремния. Богаты ураном гранитные и осадочные породы, породы, содержащие органические отложения.

Уран составляет 0,0003% поверхностного слоя земли и встречается в природе в огромном (более 100) количестве минеральных руд. Однако для отработки используются только около 12 видов отложений, содержащих этот элемент.

Самым богатым по содержанию урана минералом являются жилы настурана (уранинита, урановой смолки). Он носит также название диоксида урана, однако с химической точки зрения содержание кислорода в этих рудах варьируется от UO_2 до U_3O_8 из-за процессов окисления и радиоактивного распада. Данный минерал является самым обогащенным по содержанию урана, но встречается крайне редко. Основное месторождение уранинита находится в Канаде в районе Большого Медвежьего озера. Богатые залежи настурана также выявлены в Заире, Чехии и Франции.

На втором месте по содержанию урана стоят конгломераты ториевой и урановой руд, смешанные с рудами других минералов. Чаще всего встречаются руды драгоценных металлов (серебро, золото), содержащие их в количествах, достаточных для разработки месторождений. Уран и торий становятся в таком случае продуктами — спутниками добычи драгоценных металлов. Такие разработки ведутся в Австралии, Канаде, России и ЮАР.

Уран выделяют также из карнотита (уранил-ванадат калия). Этот минерал, содержащий кроме урана также ванадий и другие элементы, чаще всего находят в осадочных породах и песчаниках. Разработка руд карнотита ведется на плато Колорадо, в США, а также в штатах Вайоминг, Аризона, Юта.

Еще одним источником урана являются железоурановые сланцы и фосфатные руды. Такие виды месторождений есть в Швеции, Марокко, США, Анголе и Центрально-Африканской Республике.

Небольшое количество урана содержится в лигнитах и некоторых углях. Так, отложения лигнитов с высоким содержанием урана разрабатываются в Северной и Южной Дакоте, в США; в Испании и Чехии обнаружены битумные угли, также богатые этим элементом.

Использование урана началось в глубокой древности. На раскопках в Помпее и Геркулануме археологами были найдены осколки керамики, покрытой желтой глазурью. Предметы датированы I в. до н. э. Для изготовления желтой глазури использовалась природная окись урана, в которой содержание минерала превышало 1%.

В современном понимании уран был открыт в 1789 г. Именно тогда немецкий химик и натурфилософ Мартин-Генрих Клапрот занялся изучением тяжелого минерала черного цвета, который горняки часто называли «смоляной обманкой». До этого момента считалось, что в его состав входят цинк и железо, но Клапрот опроверг это предположение. Незадолго до начала исследования химик разработал способ превращения силикатов и других нерастворимых веществ в растворы.

Для этого он сплавлял минералы с гидроксидом калия в серебряном тигле. Этому способу он подверг и «смоляную обманку». К удивлению ученого, полного растворения не произошло. В связи с этим Клапрот сделал вывод о присутствии в минерале неизвестного металла. Следующим шагом химика было растворение минерала в азотной кислоте и «царской водке», что привело к выпадению в осадок светлых зеленовато-желтых кристаллов, по форме напоминавших шестигранные пластинки.

После долгих химических изысканий Клапрот смог получить массу с вкраплениями крошечных зерен металла. Этот новый элемент был назван ученым ураном (uranium) в честь планеты, открытой незадолго до этого события английским астрономом Гершелем. Сам Клапрот так объяснил название элемента: «Ранее признавалось существование лишь семи планет, соответствовавших семи металлам, которые и обозначались знаками планет. В связи

с этим целесообразно, следуя традиции, назвать новый металл именем вновь открытой планеты. Слово уран происходит от греч. “ουρανός” (небо) и, таким образом, может означать “небесный металл”».

Название «урановая смолка» тоже было введено в обиход с легкой руки немецкого химика, который стал так называть «смоляную обманку».

Хотя Клапрот внес огромный вклад в процесс изучения свойств и характеристик урана, некоторые из его выводов были впоследствии опровергнуты.

Так, в 1840 г., спустя 50 лет после открытия урана, французский химик Эжен-Мельхиор Пелиго сумел доказать, что полученное Клапротом вещество является не чистым ураном, а лишь его окислом UO_2 . Именно Пелиго сумел первым получить уран в качестве самостоятельного металла.

Из-за весьма небольших объемов добычи урана ученые того времени не могли проводить более обстоятельные исследования. В связи с этим на протяжении почти 100 лет после открытия этого элемента никакой новой информации о нем не появлялось. В небольших количествах уран использовался для создания красок и при фотосъемке, другого практического применения он не находил.

Следующей вехой в истории изучения урана стали исследования русского ученого Дмитрия Ивановича Менделеева, который в 1874 г. поместил уран на 92-ю клетку своей периодической системы и предположил, что атомный вес данного элемента не 120, как считалось ранее, а в два раза больше, т. е. 240. В 1896 г. немецкий химик Иоганн Циммерман опытным путем подтвердил гипотезу русского ученого.

Менделеев позже признавался: «Для меня лично уран весьма знаменателен уже потому, что играл выдающуюся роль в утверждении периодического закона, так как перемена его атомного веса вызвана была признанием закона и оправдана действительностью, а для меня (вместе с атомными весами Ce и Be) служила пробным камнем общности периодического закона».

Дальнейшая история исследования урана тесно переплетается с открытием радиоактивности. В 1885 г. немецкий физик Вильгельм Рентген обнародовал свои исследования проникающего излучения, X-лучей. Долгие научные диспуты привели научное сообщество к вопросу опытного изучения процесса возникновения «рентгеновских» лучей в процессе флуоресценции вообще. В 1896 г. этой темой занялся французский физик Антуан-Анри Беккерель, в семье которого изучение флуоресценции уже стало традицией.

Свои эксперименты Беккерель начал с кристаллов уранилсульфата калия. Ученый обернул фотопластину черной бумагой и положил сверху тонкие кристаллы минерала. Предположив, что X-лучи могут быть задержаны металлом, физик поместил между кристаллами и бумагой металлическое кольцо, очертания которого действительно четко проявились на фотопластине по окончании опыта.





РУДНИК «ЛАНГЕР-ХАЙНРИХ»
Намибия

*главный вход, фото
Paladin Energy Ltd.*

После долгих исследований Беккерель сделал вывод о том, что между фосфоресценцией и проникающим излучением не существует никакой связи, а X-лучи являются следствием наличия в минерале урана. Так была открыта радиоактивность. Вскоре Беккерель сделал еще одно открытие, касавшееся интенсивности излучения: оно тем выше, чем больше атомов урана в веществе. Но из этого правила возникло одно исключение — урановая смоляная руда, излучение от которой превышало излучение от чистого урана (его удалось получить французскому химику Анри Муассану в это же время). На основе этого исключения Пьером и Марией Кюри были открыты продукты распада урана — полоний и радий.

Дальнейшее изучение урана шло все более быстрыми темпами. В 1899 г. английский физик Эрнест Резерфорд делает вывод о неоднородности излучения урановых фракций. Им были открыты альфа- и бета-лучи. А в мае 1900 г. французский физик Поль Вийар говорит об еще одном излучении — гамма-лучах.

В том же году английский ученый Уильям Крукс обнаруживает, что существуют разновидности урана, и получает первый изотоп — «уран-Х», а затем и другие — «уран-I» и «уран-II».

В начале XX в. ученые ищут практическое применение накопленным знаниям об уране. В 1907 г. Резерфорд исследует возможность определения возраста геологических пород, базируясь на теории радиоактивности урана и тория. В 1913 г. Фредерик Содди, английский радиохимик, обобщил данные об открытых ранее разновидностях урана и ввел понятие «изотоп».

В 1932 г. англичанин Джеймс Чедвик сделал открытие, которое потрясло научное сообщество и дало новый толчок к изучению свойств урана. Он обнаружил новую элементарную частицу, которая была названа нейтроном. В 1934 г. американский физик Энрико Ферми начинает опыты по бомбардировке различных химических элементов нейтронами, что привело к появлению в уране новых радиоактивных веществ.

За этими опытами последовали жаркие научные диспуты: были ли открыты новые трансурановые элементы или бомбардировка нейтронами привела к расщеплению ядра урана на изотопы известных уже элементов? Споры не прекращались в течение четырех лет, пока в 1938 г. немецкие ученые Отто Ганн и Фриц Штрассман не установили, что продуктами бомбардировки урана нейтронами являются элементы со свойствами бария и лантана.

Объяснение этому феномену было дано учеными Лизе Мейтнер и Отто Фришем в номере английского журнала *Nature* от 16 января 1939 г., где описывалось деление ядра и приводился расчет выделяемой при этом энергии.

Это событие стало первой ступенью в изучении цепных реакций, происходящих с использованием урана.

Гипотеза о расщеплении ядер урана была подтверждена в лабораториях многих стран. Было доказано, что ядерная реакция может поддерживаться

сама собой, поскольку расщепление урана происходит с высвобождением дополнительных нейтронов.

Одновременно с этим информация о проводимых опытах становится засекреченной и ученые разных стран перестают обмениваться своими работками.

Неоценимый вклад в изучение цепных реакций внесли советские ученые. В 1939–1940 гг. Ю. Б. Харитон, Я. Б. Зельдович, К. А. Петржак и Г. Н. Флеров обнаружили, что процесс деления ядер урана может стать непрерывным, если обогатить элементарный уран его изотопом ^{235}U . Практический смысл этого открытия был подтвержден физиками Чикагского университета, которые под руководством Э. Ферми сконструировали первый ядерный реактор CP-1.

Исследование и создание ядерных реакторов в СССР проводились под руководством академика И. В. Курчатова. 25 декабря 1946 г. был пущен первый советский реактор Ф-1. Он послужил основой для создания более мощных установок. 27 июня 1954 г. в городе Обнинске Калужской области была пущена первая в мире атомная электростанция мощностью 5 МВт.

В настоящее время изучение урана направлено на более эффективное мирное применение внутриатомной энергии, на оптимизацию методов извлечения урана и другие вопросы, носящие прикладной характер. Но кто знает, какие еще тайны хранит в себе этот элемент, перевернувший в XX в. законы физики и заставивший человека по-новому взглянуть на законы природы.

ПРИРОДНЫЙ УРАН В МИРОВОМ ЯДЕРНОМ ТОПЛИВНОМ ЦИКЛЕ (ЯТЦ). ВОЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ УРАНА

Основным потребителем природного урана является атомная энергетика, обеспечивающая в настоящее время около 14% мировых потребностей в электроэнергии. По состоянию на ноябрь 2012 г., по данным МАГАТЭ, в мире эксплуатировалось 437 энергетических реакторов в 30 странах общей установленной мощностью около 372 ГВт. На стадии строительства на тот период находилось 64 реактора.

В атомной энергетике добыча природного урана и производство уранового концентрата (U_3O_8) является первым этапом современного ядерного топливного цикла (см. рис. 1).

Топливный цикл атомной энергетике условно можно разделить на три стадии.

Начальная стадия ЯТЦ (Front-End) охватывает операции от добычи урановой руды до поставки изготовленных тепловыделяющих сборок на площадку АЭС.

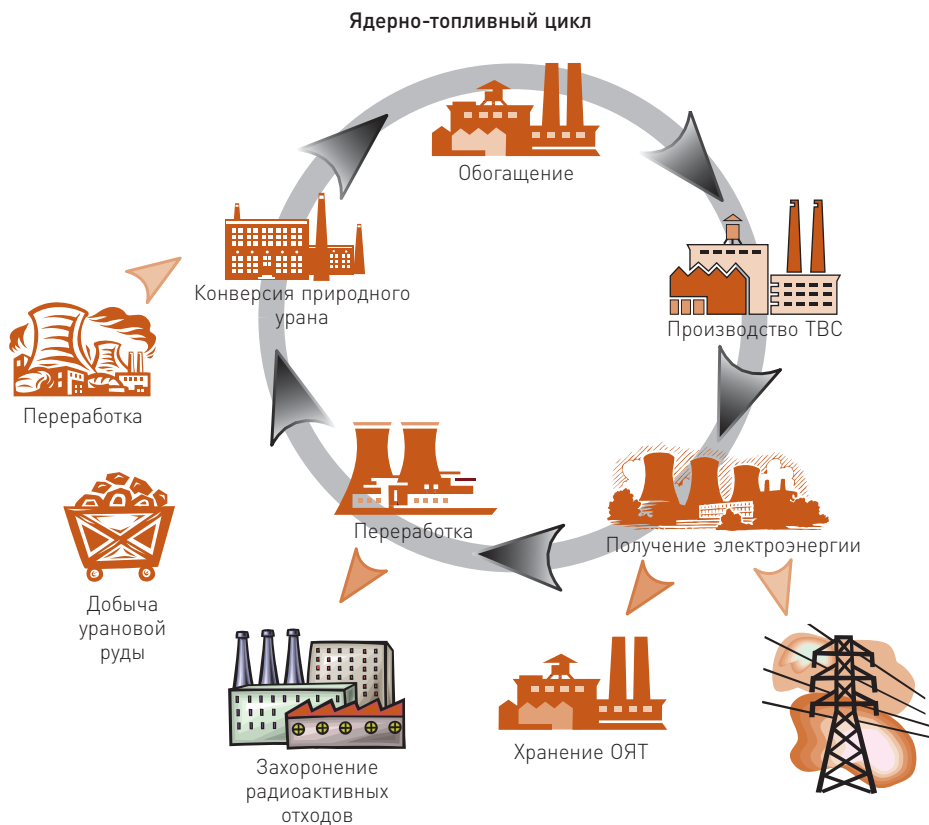


Рис. 1. Ядерно-топливный цикл

Источник: сайт инвестиционного фонда А. С. Nuclear Opportunities Fund, ноябрь 2012 г.

Добыча урановой руды осуществляется преимущественно открытым, подземным способами или методом подземного выщелачивания (более подробно см. разделы 1.3 и 1.4). Добытое минеральное сырье подвергают обогащению на гидрометаллургических заводах (ГМЗ). После переработки урановой руды на ГМЗ получается урановый концентрат в форме закиси-окиси природного урана (U_3O_8), который в дальнейшем поступает на конверсию и изотопное обогащение.

Концентрат природного урана переводится на конверсионном заводе в гексафторид урана (UF_6), который является наиболее подходящей формой для дальнейшего изотопного обогащения. UF_6 сублимируется (перехо-

дит из твердого состояния в газообразное, минуя жидкую фазу) при температуре 53 °С.

Обогащение урана — производственный процесс, в ходе которого в уране повышается концентрация делящегося изотопа ^{235}U . Природный уран содержит два вида изотопов — ^{238}U , концентрация которого в природном уране составляет свыше 99%, и ^{235}U с концентрацией около 0,711%. Большинство современных энергетических реакторов работает на урановом топливе, в котором концентрация изотопа ^{235}U составляет от 3 до 5%.

В процессе обогащения концентрация ^{235}U доводится до уровня, требующегося для определенного типа реакторов. Обогащение урана осуществляется путем разделения изотопов ^{235}U и ^{238}U .

Единицей измерения работы по обогащению урана является ЕРР — единица работы разделения. Она имеет физическую размерность массы, поэтому иногда употребляют обозначения кгЕРР или тЕРР.

В настоящее время в мире эксплуатируются в промышленном масштабе две технологии разделения изотопов урана: газодиффузионная и газодиффузионная. Центрифужный метод — разделение изотопов урана с помощью газовых центрифуг — является наиболее распространенной технологией, обеспечивающей значительные технические и экономические преимущества по сравнению с энергозатратной газовой диффузией. Согласно прогнозам Всемирной ядерной ассоциации (ВЯА), центрифужная технология в будущем займет доминирующее положение (см. табл. 1). В дальнейшем возможно опережающее развитие перспективной лазерной технологии изотопного обогащения урана, реализуемой в США консорциумом General Electric — Hitachi Global Laser Enrichment LLC.

Таблица 1. Предложение ЕРР по типам технологии обогащения

Тип технологии/источника	2000 г., %	2010 г.,%	Прогноз на 2017 г., %
Газодиффузионная	50	25	0
Центрифужная	40	65	93
Лазерное обогащение	0	0	3
Переработка урана оружейного качества (ВОУ)	10	10	4

Источник: ВЯА.

25 сентября 2012 г. Комиссия по ядерному регулированию США (NRC) выдала компании General Electric — Hitachi Global Laser Enrichment LLC (GLE) лицензию на строительство и эксплуатацию завода по изотопному обогащению урана в Уилмингтоне, штат Северная Каролина, на основе лазерной технологии. Лицензия дает разрешение на обогащение урана

до 8% по изотопу ^{235}U . Полученный низкообогащенный уран будет использоваться при изготовлении ядерного топлива для АЭС. GLE планирует создание нового промышленного производства на площадке действующего завода по фабрикации топлива компании Global Nuclear Fuel — America.

На заводе будет применена технология, разработанная австралийской Silex Systems Ltd., исключительные права на которую принадлежат GLE. Начало производства планируется на 2014 г. с выходом на проектную мощность к 2020 г. Отработка технико-экономических параметров промышленного производства на базе лазерной технологии обогащения началась на площадке в Уилмингтоне в июле 2009 г.

23 ноября 2012 г. Silex Systems Ltd. сообщила о том, что GLE обсуждает с Министерством энергетики США возможность строительства второго завода по обогащению урана на основе лазерной технологии. Предприятие предполагается разместить на площадке газодиффузионного завода в Падуке, штат Кентукки.

Обогащенный по изотопу ^{235}U гексафторид урана (UF_6) поступает на завод по производству ядерного топлива для изготовления порошка диоксида урана (UO_2), из которого, в свою очередь, изготавливаются топливные таблетки для начинки тепловыделяющих элементов. Тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) формируют тепловыделяющую сборку (ТВС), или кассету.

Тепловыделяющие сборки являются составной частью активной зоны ядерного реактора и предназначены для генерирования тепловой энергии. Конструкция ТВС отличается для различных типов реакторов, но в общем виде ТВС состоит из несущей структуры (каркаса), с одной стороны которой расположена головка, с другой — хвостовик, и включает в себя тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы), собранные в пучки. ТВЭЛы располагаются в пучках с равномерным шагом, который обеспечивают дистанционирующие решетки. ТВЭЛ представляет собой герметичную тонкостенную трубу из циркониевого сплава с приваренными на концах заглушками, снаряженную цилиндрическими спеченными топливными таблетками из обогащенного диоксида урана.

Вторая стадия ЯТЦ — использование ядерного топлива в реакторе для выработки электроэнергии, включая временное хранение отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) на площадке АЭС.

ТВС доставляются на электростанции в специальных контейнерах, предотвращающих возникновение цепной реакции. Далее они размещаются в активной зоне ядерного реактора. С помощью источника нейтронов реактор запускается. ТВЭЛы вырабатывают энергию, избыточные нейтроны поглощаются специальными графитовыми стержнями.

Одна треть или четверть ТВЭЛов ежегодно выгружается из реактора, на их место ставятся новые ТВЭЛы. ОЯТ перегружается в приреакторное



ЗАО «ДАЛУР»
Россия

главный корпус,
фото АРМЗ

хранилище — наполненный водой бассейн, где оно хранится в течение нескольких лет до снижения радиоактивности до определенного уровня. Вода охлаждает отработавшее топливо и служит надежной защитой от радиации. После нескольких лет охлаждения в приреакторном бассейне сборки транспортируются либо в специальное хранилище для длительного хранения, либо на перерабатывающий завод для переработки и регенерации.

Заключительная стадия ЯТЦ (Back-End) предполагает несколько операций: от отправки отработавшего топлива на захоронение (открытый ЯТЦ) или на завод по переработке ОЯТ (замкнутый ЯТЦ) до захоронения высокоактивных остеклованных отходов переработки.

Переработка ОЯТ и регенерация урана осуществляются на радиохимических заводах, где облученные и охлажденные твэлы освобождаются от оболочки и израсходованные топливные таблетки помещаются в ванну с азотной кислотой. Таблетки растворяются в кислоте, после чего получившийся раствор вводится в противоточную экстрактивную систему.

Обычно в первом цикле выделения около 99% продуктов распада деления удаляются. В дальнейшем идет обработка оставшегося вещества — очищение и разделение плутония и урана. Конечными продуктами второй стадии обычно являются UO_2 и PuO_2 , которые могут быть повторно использованы.

Оставшиеся после регенерации урана и плутония небольшие по объему высокоактивные отходы (менее 3% от массы урана в свежем ядерном топливе) подлежат кондиционированию — специальной обработке (цементирование, остекловывание, трансмутация) и захоронению в специализированных могильниках.

Кондиционированные высокоактивные отходы и отработавшее топливо, не подлежащее дальнейшей переработке, перевозятся в централизованное хранилище и захораниваются. Такие хранилища (могильники) являются специализированными высокотехнологичными предприятиями, на них принимаются все необходимые меры для максимально безопасного хранения в течение длительного времени (сотни и тысячи лет).

Сегодня в большинстве стран используется открытый ядерный топливный цикл (ОЯТЦ). В замкнутом цикле (ЗЯТЦ) годный для повторного использования уран, выделяемый в процессе переработки ОЯТ, составляет более 95% от его первоначальной массы.

Стоит отметить, что, несмотря на большое количество технологических переделов и наукоемкость производств, доля топливных затрат составляет обычно около 20% в общей структуре затрат атомной станции. Для сравнения: доля топливных затрат для угольной генерации, по данным ВЯА, составляет около 80%, для генерации на природном газе — около 90%.

Распределение расходов в пересчете на 1 кг типового ядерного топлива представлено в таблице 2. Как видно из таблицы, основные статьи затрат

Таблица 2. Структура стоимости 1 кгU в виде UO₂ ядерного топлива

Природный уран	8,9 кг U ₃ O ₈ (x) \$146	\$1300
Конверсия	7,5 кгU в UF ₆ (x) \$13	\$98
Обогащение	7,3 ЕРР (x) \$155	\$1132
Производство ЯТ	за кг	\$240
Всего		\$2770

Источник: ВЯА.

Примечание. Расчеты выполнены ВЯА на основе спотовых цен по состоянию на март 2011 г.

при производстве ТВС — природный уран и обогащение урана, на каждую из которых приходится от 40 до 50% всех затрат.

В процессе обогащения урана образуется значительное количество обедненного урана (так называемые хвосты изотопного обогащения). При этом выбранное содержание ²³⁵U в хвостах (содержание в хвостах) определяет количество исходного природного урана и единиц работы разделения, необходимых для производства обогащенного уранового продукта (ОУП). Например, в таблице 3 представлены объемы природного урана и ЕРР, необходимые для производства одной ты ОУП при различных уровнях содержания в хвостах.

Таблица 3. Расход природного урана и ЕРР при производстве 1 т ОУП при различных уровнях содержания в хвостах

Содержание в хвостах, %	Природный уран, тU	Обогащение, ЕРР
0,35	10,11	4825
0,30	9,00	5276
0,28	8,62	5484
0,25	8,13	5832
0,22	7,71	6260
0,20	7,44	6544
0,13	6,66	8006

Источник: ВЯА, *The Global Nuclear Fuel Market — Supply and Demand 2011–2030*.

Примечание. Содержание ²³⁵U в ОУП — 4%.

Как видно из таблицы, выбор уровня содержания урана в хвостах оказывает значительное влияние на спрос на рынках природного урана и услуг по обогащению. Определяющим фактором такого выбора является сто-

имость природного урана и ЕРР для той или иной энергокомпании-заказчика. Так, рост цены на уран может привести к выбору меньшего содержания урана в хвостах и, соответственно, большому спросу на ЕРР (в случае сохранения уровня цен на ЕРР). Более того, эксплуатирующая компания завода по обогащению урана за счет выбора содержания в хвостах может оптимизировать свою операционную деятельность, исходя из наличия свободных разделительных мощностей, цен на природный уран, технических возможностей и других факторов.

Таким образом, для любых ценовых уровней на природный уран и услуги по обогащению можно вычислить оптимальное содержание в хвостах, которое позволит минимизировать стоимость производства ОУП. При этом оптимальное содержание в хвостах может значительно различаться для конкретной энергокомпании вследствие разного набора краткосрочных и долгосрочных контрактов на поставку урана и ЕРР. С точки зрения влияния на среднее содержание в хвостах для энергокомпании помимо региона поставки и производителя существенными условиями контрактов на поставку ЕРР является установление коридора выбора содержания урана в хвостах.

В период 1980–1990 гг. цены на природный уран находились на низком уровне и оптимальное содержание в хвостах превышало 0,30%. С 2003 г., когда цены на уран стали расти, содержание в хвостах начало снижаться к коридору 0,20–0,25%, а в период пика цен летом 2007 г. оно составило около 0,13%. Оптимальные уровни содержания в хвостах последних лет, рассчитанные Ux Consulting (UxC) на основе спотовых цен, представлены в графике 1.



График 1. Оптимальные уровни хвостового содержания на основе спотовых цен, %

Источник: UxNuclear Weekly №48 (65) от 27.11.2012.

Как уже отмечалось, выбор определенного уровня содержания в хвостах большинством игроков рынка может оказывать значительное влияние на спрос на уран. Так, по данным «Красной книги-2011» мировые потребности в природном уране в 2008, 2009 и 2010 гг. составили, соответственно, 59 065, 63 520 и 6 3875 тU, в то время как в период 2008–2011 гг. установленная мощность АЭС в мире увеличилась менее чем на 1%.

Помимо производства электроэнергии на АЭС уран относительно интенсивно применяется в оборонной промышленности и производстве топлива для ядерных силовых установок военно-морского и ледокольного флотов, а также в исследовательских реакторах. Многие указанные сферы подразумевают использование высокообогащенного урана (ВОУ) с уровнем обогащения по ^{235}U от 20 до свыше 90%, накопленные запасы которого в силу исторических причин весьма значительны (см. разд. 2.1).

Например, исследовательские реакторы представляют собой широкий спектр реакторов коммерческого и некоммерческого назначения, основное использование которых не подразумевает производство электроэнергии. Среди направлений использования исследовательских реакторов можно выделить исследования и обучение, испытание материалов, производство радиоактивных изотопов для нужд медицины и промышленности. По данным ВЯА, в настоящее время в мире действует около 240 исследовательских реакторов в 52 странах. Однако их влияние на урановый рынок невелико: по данным МАГАТЭ, на топливо для исследовательских реакторов приходится менее 1% уранового рынка.

Существуют и другие сферы применения природного, обогащенного или обедненного урана. Очевидно, что доля использования урана в этих областях по отношению к атомной энергетике крайне мала. Тем не менее возрастающее применение ядерных технологий и материалов на современном этапе развития подчеркивает важность развития уранового рынка. Ядерные технологии используются:

- в медицине и здравоохранении (радиотерапия, визуализация, стерилизация хирургического инструментария и др.);
- в агропромышленном комплексе (культиваторы, обработка продуктов питания, борьба с вредными насекомыми);
- в промышленности (контроль параметров при производстве, промышленная визуализация, использование обедненного урана в качестве магнитострикционных материалов);
- в космосе (например, карбид ^{235}U в качестве топлива для ядерных реактивных двигателей).

Самое известное военное применение обедненного урана — в сердечниках бронебойных снарядов. При сплавлении с 2% Мо или 0,75% Ti и термиче-





АО «ВОЛКОВГЕОЛОГИЯ»
Казахстан

*буровые установки,
фото
НАК «Казатомпром»*

ской обработке (быстрая закалка разогретого до 850 °С металла в воде или масле, дальнейшее выдерживание при 450 °С в течение пяти часов) металлический уран становится тверже и прочнее стали (прочность на разрыв больше 1600 МПа, притом что у чистого урана она равна 450 МПа). В сочетании с большой плотностью это делает закаленную урановую болванку чрезвычайно эффективным средством для пробивания брони, аналогичным по эффективности более дорогому вольфраму. Процесс разрушения брони сопровождается измельчением в пыль урановой болванки и воспламенением ее на воздухе с другой стороны брони. Около 300 т обедненного урана остались на территории Ирака после операции «Буря в пустыне». По оценке ВЯА, потребление обедненного урана вне атомной отрасли составляет около 1000 т в год (данные по состоянию на конец 2010 г.).

Среди перспективных сфер применения ядерных технологий можно выделить:

- производство пресной воды (опреснение);
- производство тепла (для промышленности и жилого сектора);
- производство водорода (для нефтеперерабатывающих предприятий, нефтехимической промышленности, производства синтетического топлива и в качестве энергоносителя).

МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВАЯ БАЗА УРАНА

Анализ современного состояния минерально-сырьевой базы урана целесообразно провести на базе последних сборников «Уран: запасы, производство и спрос», публикующихся Агентством по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (АЯЭ ОЭСР) и Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) раз в два года, более известных как «Красная книга» (Red Book).

В «Красной книге-2011» дается исчерпывающая оценка текущих прогнозов спроса и предложения урана на период до 2035 г. Также в сборнике приведены последние данные по запасам, разведке, производству и складским запасам урана, а также исторические справки по разработке месторождений и добыче, планы будущего производства. Издание подготовлено на базе ответов на анкеты, которые рассылались АЯЭ странам — членам ОЭСР и МАГАТЭ — странам, не входящим в ОЭСР. «Красная книга-2011» — 24-е издание; ответы на вопросы анкет предоставили 34 страны, Секретариатом совместной группы по урану АЯЭ/МАГАТЭ было подготовлено восемь отчетов по отдельным странам.

Данные «Красной книги-2011» публикуются по состоянию на 1 января 2011 г., «Красной книги-2009» — по состоянию на 1 января 2009 г., «Красной книги-2007» — по состоянию на 1 января 2007 г.

В последних сборниках «Красной книги» разведанные запасы (Identified Resources) урана подразделялись на достоверно установленные (Reasonably Assured Resources) и предварительно оцененные (Inferred Resources). В «Красной книге» учитываются и публикуются извлекаемые запасы урана; запасы в недрах при этом умножаются на степень извлечения для применяемых способов добычи и переработки руд (см. табл. 4).

Таблица 4. Степень извлечения урана при различных способах добычи и переработки

Способ производства	Извлечение, %
Открытый способ с переработкой на ГМЗ	80
Шахтный способ с переработкой на ГМЗ	75
Подземное выщелачивание (<i>кислотное</i>)	75
Подземное выщелачивание (<i>щелочное</i>)	70
Кучное выщелачивание	70
Блочное выщелачивание	75
Совместная/побочная добыча	65
Способ не определен	75

Источник: АЯЭ ОЭСР «Уран-2011: запасы, производство и спрос»

Запасы подразделены на три ценовые группы: со стоимостью добычи <\$40/кгU, <\$80/кгU и <\$130/кгU. В издании «Красной книги» 2009 г. в связи с ростом рыночных цен на уран в тот период и увеличением стоимости добычи была введена дополнительная категория извлекаемых запасов со стоимостью добычи <\$260/кгU, что привело к значительной переоценке запасов. Так, общий объем извлекаемых запасов (т. е. запасы в категории <\$260/кгU) в 2009 г. увеличился на 15,3%, с 5,469 млн тU до 6,306 млн тU за счет добавления новой ценовой категории. В 2011 г. извлекаемые запасы выросли до 7,096 млн тU, что на 12,5% больше по отношению к аналогичному показателю 2009 г., также за счет наиболее высокой ценовой категории.

При изучении динамики запасов в категории до \$130/кгU можно отметить, что картина распределения извлекаемых запасов в различных странах мира в последние годы не претерпела значительных изменений, за исключением таких стран, как Австралия, Нигер, ЮАР и США (см. табл. 5). Первые два места стабильно занимают Австралия и Казахстан, причем Австралия существенно нарастила свою долю за счет разведки новых рудных залежей на месторождении «Олимпик-Дам». В 2011 г. на третье место вышла Россия, незначительно опередив Канаду. Стоит отметить, что Россия тем не менее