

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СЕБЕСТОИМОСТИ И ОБЪЕМА ДОБЫЧИ УРАНА ДЛЯ РАЗНЫХ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ МИРОВОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Мирхусанов У.Т., Семенова Д.Ю., Харитонов В.В.

НИЯУ МИФИ,

115409, г. Москва, Каширское шоссе, д.31



Представлена новая аналитическая методика прогнозирования объема и себестоимости добычи природного урана в зависимости от ресурсов урана и сценариев развития традиционной ядерной энергетике. Предлагаемая методика основана на ранее разработанной в МИФИ математической модели динамического процесса истощения ископаемых ресурсов и использует параметры разведанной массы ископаемого ресурса, годового объема добычи и заданного темпа роста добычи. Три параметра, известные в начале прогнозирования, позволяют описать изменение ресурсной базы со временем и решить ряд экономических задач, связанных с добычей ценных ископаемых. В работе приведены прогнозы потребности АЭС в природном уране в зависимости от сценариев развития мировой ядерной энергетике, разработанных Всемирной ядерной ассоциацией (WNA), ресурсах урана и объемах его добычи с разной себестоимостью на 2021 – 2022 г. Показано, что при низком темпе роста (1,8%/год) установленной мощности АЭС ресурсов урана хватит более, чем на столетие, но вклад ядерной энергетике в производство электроэнергии будет непрерывно сокращаться с нынешних 10%. При высоких сценариях развития ядерной энергетике (> 5%/год), возможного в условиях интенсификации «зеленого энергоперехода», пик добычи урана может наступить до середины текущего столетия. На основании этих данных приведены прогнозы динамики истощения урана и годовых объемов его добычи на месторождениях с разной себестоимостью до второй половины текущего века в зависимости от начальных темпов роста добычи, определяемых сценарием развития ядерной энергетике.

Ключевые слова: природный уран, себестоимость добычи, сценарии развития ядерной энергетике, темп роста добычи урана.

Для цитирования: Мирхусанов У.Т., Семенова Д.Ю., Харитонов В.В. Прогнозирование себестоимости и объема добычи урана для разных сценариев развития мировой ядерной энергетики. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 1. – С. 119 – 131. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.1.10>

ВВЕДЕНИЕ

Без преувеличения можно сказать (вслед за авторами [1, 2]), что история человеческой цивилизации – это история непрерывной борьбы за ресурсы всех видов. В настоящее время наблюдается наиболее острая борьба за углеводородные источники энергии и за технологические металлы, ресурсы которых оказались весьма ограниченными. Углеводородное топливо более чем на 90% удовлетворяет потребности человечества в первичных источниках энергии. Причем, как отмечено в [3], нефть – «самое массовое оружие поражения», поскольку без нефти все остальные виды оружия не работают. Многочисленные сценарии «без углеродной энергетики» на основе солнечных панелей, ветровых турбин и аккумуляторов энергии столкнулись с серьезной проблемой «критических материалов», таких как никель, кобальт, медь, литий и редкие земли, ресурсы которых ограничены и вокруг которых нарастают геополитические проблемы [4 – 6]. При министерстве энергетики США создан Институт по критическим материалам (The Critical Materials Institute), Еврокомиссия запустила проект «Критические сырьевые материалы» (Critical Raw Materials) [4]. О возможности катастрофического влияния ограниченности традиционных ископаемых ресурсов на развитие цивилизации говорилось в отчетах Римского клуба [7], острые дискуссии вокруг которых и привели в итоге к концепции устойчивого развития [8]. Из отчетов [7], в частности, следует, что устойчивое развитие стран «золотого миллиарда», практически израсходовавших свои минеральные ресурсы, будет сопровождаться жестокой борьбой за те ресурсы, которые еще остались в странах развивающегося мира. События последних лет как нельзя лучше иллюстрируют этот прогноз. Все чаще устойчивое энергетическое развитие связывают с ядерной энергетикой [9]. В новых отчетах Всемирной ядерной ассоциации (World Nuclear Association – WNA) [10 – 12] подчеркивается, что расширение ядерной энергетики необходимо для достижения глобальных целей в области климата с нулевым уровнем загрязнения, энергетической безопасности и устойчивого развития. Среди критериев долгосрочного устойчивого развития энергетики одним из основных справедливо называют обеспеченность энергоресурсами на длительную перспективу [13]. С этой точки зрения возобновляемые источники электроэнергии не имеют конкурентов. В то же время уникальные возможности ядерного бридинга на основе реакторов на быстрых нейтронах позволяют обеспечить развитие ядерной энергетики более чем на тысячелетие. Однако быстрого развития ядерной энергетики на быстрых нейтронах не произошло. По-видимому, заметный вклад быстрых реакторов в производство электроэнергии в мире может проявиться не ранее второй половины текущего века. А развитие ядерной энергетики на тепловых реакторах может столкнуться с ограниченностью традиционных ресурсов урана [3, 12 – 14]. Поэтому цель настоящей работы – оценить влияние сценариев развития традиционной ядерной энергетики на скорость исчерпания и себестоимость добычи природного урана на фоне исчерпания углеводородов.

СЦЕНАРИИ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Мировое производство электроэнергии будет расти по разным сценариям до 2050 г. с темпом не менее 2%/год. Если производство электроэнергии на АЭС будет расти с темпом менее 2%/год, как это наблюдается в последние десятилетия, то вклад ядерной энергетики в мировое производство электроэнергии будет сокращаться. По сценарию Международного энергетического агентства (International Energy Agency – IEA), опубликованному в октябре 2022 г. [15], производство электроэнергии на АЭС будет расти до 2040 г. с темпом около 1,8%/год, в то время как на ветровых и солнечных электростанциях – с темпом 9 – 12%/год (рис. 1). При этом доля ядерного электричества будет снижаться с 10% в 2020 г. до 9% в 2040 г.

В обзорах Всемирной ядерной ассоциации (WNA) выделяются три глобальных сценария: низкий, базовый и высокий [12]. Ожидается, что установленная мощность АЭС будет расти до 2040 г. с темпами 1,6%/год (низкий сценарий), 3,6%/год (базовый) и 5,4%/год (высокий) за счет, в основном, стран Восточной Азии. Соответственно, будет расти потребность реакторов в топливе и природном уране. С учетом тенденций роста коэффициента установленной мощности (КИУМ) и длительности кампании реакторов, обогащения и выгорания топлива (при неизменной глубине отвала 0,22%) ожидается рост потребности АЭС в природном уране с темпами 1,8%/год (низкий сценарий), 4,1%/год (базовый) и 6,0%/год (высокий). Так для базового сценария потребность в природном уране к 2040 г. практически удвоится и достигнет 130 тысяч тонн в год (кт/год), а при высоком сценарии – утроится, достигнув 183 кт/год.

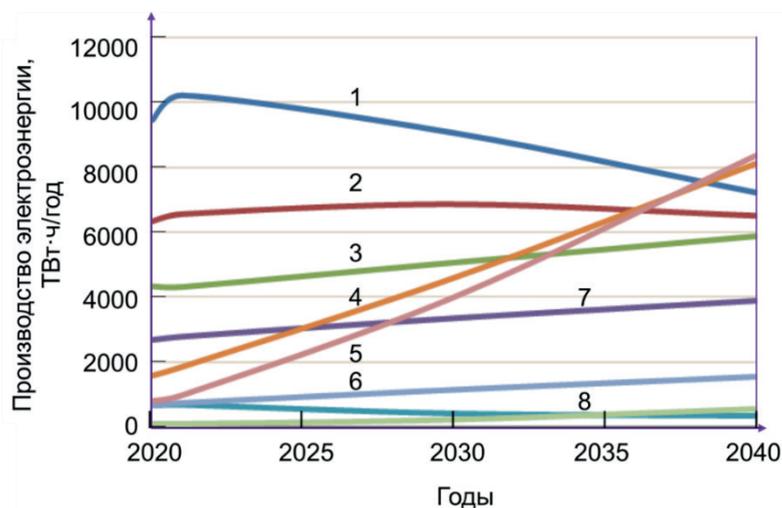


Рис. 1. Прогнозы производства электроэнергии разными источниками до 2040 г. [15]: 1 – уголь; 2 – газ; 3 – гидроэнергия; 4 – ветер; 5 – солнечные PV; 6 – биоэнергия; 7 – ядерная; 8 – другие ВИЭ и нефть

РЕСУРСЫ И СЕБЕСТОИМОСТЬ ПРИРОДНОГО УРАНА

По классификации ресурсов (resources) урана, используемой в МАГАТЭ, стержневым критерием является вероятная себестоимость добычи урана [12, 14, 16]. С 2009 г. используются четыре ценовые категории себестоимости добычи урана: < 40 \$/кгU, < 80 \$/кгU,

< 130 \$/кгU и < 260 \$/кгU. Как следует из табл. 1, извлекаемые традиционными методами ресурсы урана по себестоимости до 260 долл/кгU составляют менее 8 Мт. За весь период промышленной добычи урана до 2022 г. уже извлечено около 3,2 Мт (табл. 2), что составляет 40% от оставшегося в недрах ресурса.

Из таблицы 2 следует также, что в настоящее время производственные мощности уранодобывающих предприятий используются всего на 65% (добывается 49,36 кт/год при производственной мощности 76,2 кт/год). Наибольшие производственные мощности развернуты в Казахстане (38% мировых), Канаде (22%) и Намибии (12%). Важно отметить, что основными поставщиками природного урана на мировой рынок являются страны, не имеющие

Таблица 1

Мировые ресурсы урана (кт) с разной себестоимостью добычи на 2021 г. [12]

Себестоимость добычи	Достоверно оцененные ресурсы (RAR)	Предполагаемые ресурсы (IR)	Извлекаемые ресурсы (RAR+IR)
< \$ 40/kgU	457	319	776
< \$ 80/kgU	1211	780	1991
< \$ 130/kgU	3815	2264	6079
< \$ 260/kgU	4688	3229	7917

Таблица 2

Ресурсы и добыча урана по себестоимости до 260 долл/кгU в странах мира на 2022 г. [12]

Страна	Ресурсы урана в 2021 г. R, кт	Добыча урана в 2022 г. P, кт/год	Производственная мощность в 2022 г., кт/год	Кумулятивная добыча урана за 1945 – 2022 гг. Q, кт	Потребность в уране, кт/год
Австралия	1960	4,55	6,81	241	–
Казахстан	875	21,23	29,06	350	–
Канада	865	7,35	16,54	554	1,48
Россия	657	2,51	3,10	378*+91	6,28
Намибия	510	5,61	8,90	159	–
Нигер	468	2,02	2,02	157	–
Южная Африка	445	0,20	0,77	166	0,28
Бразилия	277	–	–	–	0,34
Китай	245	1,70	1,92	54	11,3
Индия	221	0,60	0,61	–	1,41
Украина	185	0,10	1,65	25	1,57
Узбекистан	131	3,30	3,50	77	–
США	112	0,075	–	378	18,05
Другие	967	0,11	0,34	557**	24,94***
Всего	7918	49,36	76,20	3185	65,65

* До 1991 г. сумма: Россия, Казахстан, Узбекистан, Украина. С 1992 г. все страны отдельно.
 ** Включая Германию – 220 кт, Чехословакию – 112 кт, Францию – 76 кт.
 *** В том числе потребность стран ЕС=15,58 кт/год

щие АЭС на своей территории, а основные потребители урана принадлежат к странам «золотого миллиарда», на территории которых урана практически нет (рис. 2). Лишь Канада полностью удовлетворяет потребности собственной ядерной энергетики производством урана на своей территории. В соответствии с уровнем развития ядерной энергетики наибольшими потребностями в уране обладают США (около 18 кт/год), Китай (11,3), Франция (8,8), Россия (6,3) и Южная Корея (4,1).

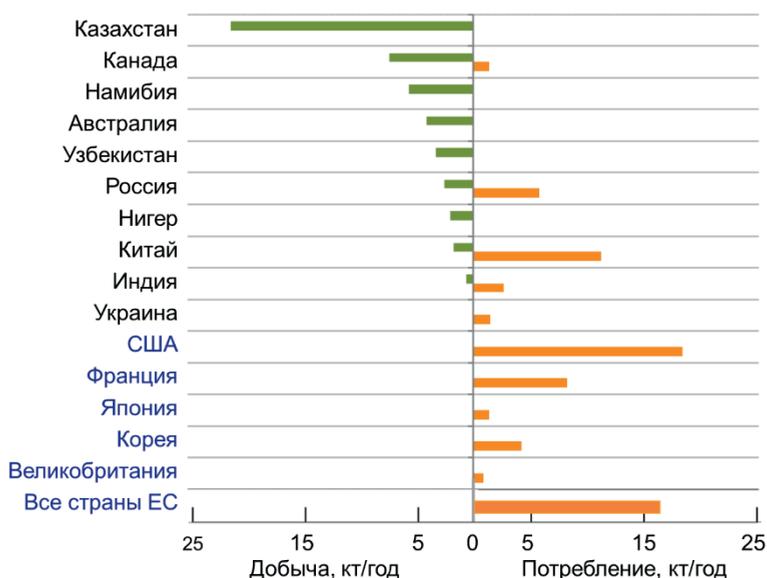


Рис. 2. Добыча и потребление природного урана (кт/год) в странах мира в 2022 г. [12]

МОДЕЛЬ ИСЧЕРПАНИЯ ИСКОПАЕМЫХ РЕСУРСОВ

В работе МИФИ [14] предложена новая математическая модель динамического процесса исчерпания ископаемых ресурсов как существенная модификация предложенной в 1956 г. модели К. Хабберта, предсказавшего пик добычи нефти в США в 1972 г. Новая модель базируется на балансе масс извлекаемого и остающегося в недрах ресурса и использует три начальных параметра (на начальный момент прогнозирования): разведанную массу ископаемого ресурса (извлекаемого традиционными методами) M_0 (тонн), годовой объем добычи G_0 (т/год) и заданный темп роста добычи k_0 (1/год). Например, начальный темп роста добычи урана k_0 задается стратегией развития ядерной энергетики и отражает существующие тенденции изменения потребности в рассматриваемом ископаемом и сделанные ранее инвестиции в добычу.

Согласно модели МИФИ, динамика годовой добычи $G(t)$ в году $t > 0$ (от начала прогноза) описывается аналитическим выражением

$$G(t) = G_0 \frac{(2 + \theta)^2 \exp(T)}{(\exp(T) + 1 + \theta)^2}. \quad (1)$$

Здесь $\theta = k_0 T_0 = k_0 M_0 / G_0$ – безразмерный параметр, характеризующий темп исчерпания сырья; $T_0 = M_0 / G_0$ – период исчерпания сырьевого ресурса M_0 при постоянной годовой добыче G_0 (именуемый в зарубежной литературе «Reserves-to-Production» или «R/P-ratio»);

$T = (k_0 + 2/T_0)t$ – безразмерный параметр, характеризующий время прогноза. Согласно (1), при $k_0 > 0$ график $G(t)$ имеет колоколообразную форму – сначала добыча растет с темпом k_0 , затем темп добычи $k = (dG/dt)/G$ замедляется и в некоторый момент времени t_M становится равным нулю ($k = 0$), а добыча ископаемого достигает пика G_M :

$$G_M = G_0 \frac{(2 + \theta)^2}{4(1 + \theta)}; \quad t_M = \frac{\theta}{k_0(2 + \theta)} \ln(1 + \theta). \quad (2)$$

После этого годовая добыча снижается в силу дальнейшего истощения ресурса. В модели предполагается, что в будущем новых месторождений не появится. Если же это случится, то с этого момента необходимо поменять величину ресурса на новое значение, т.е. модель учитывает долгосрочные тренды, а не кратковременные спады и подъемы добычи по разным текущим обстоятельствам. Например, для Казахстана согласно табл. 2, имеем $M_0 = 875$ ктU, $G_0 = 21,23$ ктU/год, тогда период истощения $T_0 = 41$ год. При темпе роста добычи $k_0 = 2\%/год$ получаем $\theta = k_0 T_0 = 0,82$ и пик добычи $G_M = 23,2$ кт/год, который наступит через $t_M \approx 9$ лет. Для Канады при том же темпе начальной добычи получим $T_0 = 118$ лет, $\theta = 2,35$, $G_M = 10,4$ кт/год и $t_M \approx 33$ года.

В качестве примера использования модели истощения ресурсов на рис. 3 приведены результаты расчета глобальной динамики добычи нефти, газа и урана при исходных данных из табл. 1–3. Согласно различным прогнозам, мировая потребность в углеводородном топливе будет расти с темпом не более 1%/год. Поэтому в качестве начального темпа добычи нефти и газа принято $k_0 = 1\%/год$. В прогнозе добычи урана в качестве начальных темпов роста использованы три сценария WNA [12] и «стагнационный сценарий» $k_0 = 0$, а в качестве начального уровня добычи – потребность АЭС мира в природном уране в 2022 г. ($G_0 = 62$ кт/год). Как следует из рис. 3а, имеющихся традиционных ископаемых энергоресурсов (газа и нефти) недостаточно для развития энергетики на длительную перспективу не только при известных ресурсах, но и при удвоенных ресурсах и по весьма умеренному сценарию с начальным темпом ежегодного прироста всего 1%/год.

Удвоение ресурсов нефти и газа (штриховые линии на рис. 3а) принципиально тенденцию не меняет, лишь отодвигая пик добычи на два десятилетия в будущее. Это означает, что «зеленый энергопереход» от углеводородов к ВИЭ обусловлен не столько проблемой CO_2 и климата, сколько проблемой истощения традиционных месторождений.

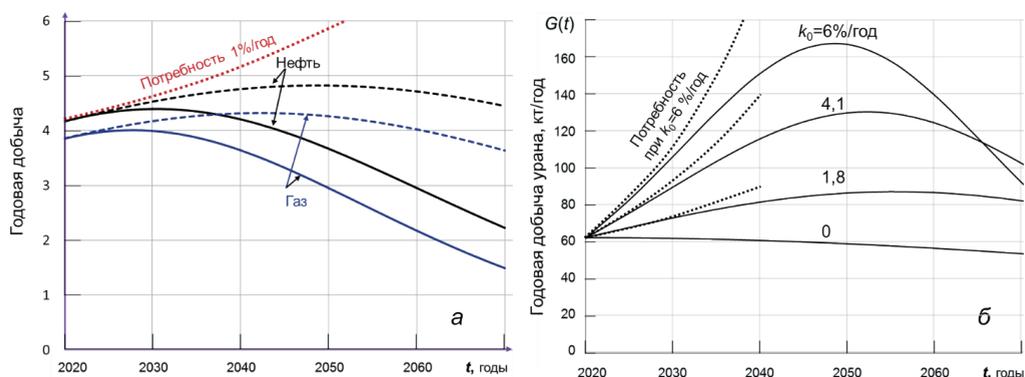


Рис. 3. Динамика годовой добычи нефти (10^9 т/год) и природного газа (10^{12} м³/год) в мире при начальном темпе роста добычи $k_0 = 1\%/год$ с исходными данными из табл. 3 (а) и годовой добычи урана при разных сценариях развития ядерной энергетики на тепловых реакторах (б). Штриховые линии на (а) – для удвоенных ресурсов нефти и газа; пунктирные линии – потребность в нефти с темпом 1%/год (а) и потребности в уране по трем сценариям WNA-23 [12] (б)

Доказанные ресурсы и годовая добыча нефти и газа в ряде стран мира в 2020 г.* (BP–2021) [17]

Страны	Нефть			Газ		
	Ресурс M , 10^9 т	Добыча G , 10^9 т/год	Период истощения $T_0 = M/G$, лет	Ресурс M , 10^{12} м ³	Добыча G , 10^{12} м ³ /год	Период истощения $T_0 = M/G$, лет
США+Канада	8,2 + 27,1 = 35,3	0,965	36,6	12,6 + 2,4 = 15,0	1,080	13,9
Европа Западная	1,8	0,167	10,8	3,2	0,219	14,6
Россия	14,8	0,524	28,2	37,4	0,638	58,6
Ближний Восток	113,2	1,297	87,3	75,8	0,687	110,4
Мир в целом	244,4	4,165	58,7	188,1	3,854	48,8

* Компания BP после 70-летнего периода издания статистических обзоров перестала с 2022 г. публиковать данные о ресурсах углеводородов

Из рисунка 3б следует, что при низких сценариях развития ядерной энергетики ($k_0 \leq 2\%/год$) ресурсов урана хватит более чем на столетие, но ее вклад в производство электроэнергии будет непрерывно сокращаться с нынешних 10%. При высоких сценариях развития ядерной энергетики пик добычи урана может наступить до середины текущего века. Непрерывно нарастающий дефицит урана (разность между потребностью и предложением=добычей) некоторое время можно покрывать вторичными ресурсами (например, РЕМИКС- и МОКС-топливом), требующими переработки отработавшего топлива (ОЯТ). Однако развивать промышленную переработку ОЯТ целесообразнее для быстрых, а не для тепловых реакторов. Возможно появление нетрадиционных источников урана, например, из морской воды. Но называемая в литературе себестоимость извлечения урана из воды на уровне 400–500 долл./кгU если и достижима, то, по-видимому, только при комплексном извлечении разных химических элементов в силу чрезвычайно низкой концентрации урана в морской воде.

ДИНАМИКА СЕБЕСТОИМОСТИ ДОБЫЧИ УРАНА

Себестоимость добычи в отличие от рыночной цены урана – более стабильная величина, тогда как рыночные цены на уран отличаются сильной волатильностью, изменяясь в разы под влиянием либо ожиданий роста спроса, либо следуя волатильности цен на нефть, газ и другие источники энергии. Так в канун мирового экономического кризиса 2008–2009 гг. цены на уран достигли в 2007 г. исторического пика в 345 \$/кгU (133 \$/фунтU₃O₈). Очередной пик цен (148 \$/кгU) наблюдался в 2011 г. накануне аварии японской АЭС «Фукусима», после чего рыночные цены падали, достигнув минимума 57 \$/кгU (22 \$/фунт U₃O₈) в 2017 г. При этом ни технология добычи урана, ни объем добычи, ни себестоимость добычи существенно не изменялись. Тем не менее, в перспективе вследствие истощения дешевых месторождений и освоения более труднодоступных (дорогих) месторождений с применением более совершенных (и дорогих) технологий себестоимость добычи урана будет возрастать, что неизбежно отразится на рыночных ценах.

Следовательно, прогнозирование себестоимости добычи урана является фундаментальной задачей, решение которой будет определять тренды изменения рыночных цен на природный уран и тем самым на топливную составляющую стоимости электроэнергии АЭС.

Себестоимость разных месторождений изменяется в пределах $C_0 \leq C \leq C_m$, где минимальная себестоимость $C_0 \approx 16$ долл./кгU (Каратау, Казахстан [16, 19]), максимальная – $C_m = 260$ долл./кгU (по классификации МАГАТЭ). В настоящее время наиболее дорогой уран (по себестоимости до 215 долл./кгU) добывается в Индии, Китае и Пакистане для решения национальных задач [16, 19]. Однако для целей моделирования необходимо иметь весь диапазон себестоимости добычи. Включение ценовой категории $C_m = 260$ долл./кгU в исходные данные вносит незначительный вклад в реальный баланс добычи урана.

Динамику себестоимости добычи урана будем выражать в виде наиболее часто используемой функции $g(C, t)$, которая описывает объем годовой добычи урана (кг/год) на всех месторождениях с себестоимостью добычи не выше C (долл./кгU) в году t от начала прогноза. Величина $g(C, t)$ представляет кумулятивную годовую добычу на всех месторождениях с себестоимостью от минимальной до C , причем величина C изменяется от минимальной до максимальной, определенных выше. Начальный вид этой функции (при $t = 0$) известен $g(C, t = 0) \equiv g_0(C)$ и показан на рис. 4б жирной линией, построенной по данным [19] с суммарной добычей $g_0(C_m) = 49,4$ кг/год (см. табл. 2). Для прогнозирования динамики себестоимости добычи урана в соответствии с изложенной выше моделью исчерпания невозобновляемого ресурса необходимо знать еще две функциональные взаимосвязи: ресурсов $m(C, t)$ и начальных темпов годовой добычи $k_0(C)$ с себестоимостью добычи урана. Функция $m(C, t)$ описывает ресурс урана (кг) по себестоимости не выше C (от минимальной до C) в году t . Величина $m(C, t)$ представляет собой суммарный (кумулятивный) ресурс урана, оставшийся к моменту времени t от начала прогноза, на всех месторождениях с себестоимостью добычи от минимальной до C . В начале прогноза ($t = 0$) эта функция известна $m(C, t = 0) \equiv m_0(C)$ и показана на рис. 4а. Точки на кривой $m_0(C)$ соответствуют данным табл. 1. Представленные на рис. 3б результаты расчета добычи урана по формуле (1) учитывают все месторождения, т.е. $G(t) = g(C_m, t)$ и $M_0 = m_0(C_m)$.

Располагая исходными данными $m_0(C)$, $g_0(C)$ и $k_0(C)$ и используя выражение (1), находим искомое решение для динамики добычи урана с разной себестоимостью в виде

$$g(C, t) = g_0(C) \frac{(2 + \theta)^2 \exp(T)}{[\exp(T) + 1 + \theta]^2}. \quad (3)$$

Здесь безразмерные комплексы $\theta(C)$ и $T(C)$, зависящие от себестоимости добычи урана, определяются выражениями

$$\theta(C) = \frac{k_0(C)m_0(C)}{g_0(C)}; \quad T(C) = \left(1 + \frac{2}{\theta(C)}\right) k_0(C) \cdot t. \quad (4)$$

Изменение с течением времени остатка ресурса в недрах $m(C, t)$ с себестоимостью добычи от минимальной до C определяется выражением

$$m(C, t) = m_0(C) - \int_{t=0}^t g(C, t) dt = m_0(C) \frac{2 + \theta}{\exp(T) + 1 + \theta}. \quad (5)$$

Таким образом, поскольку исходные функции ресурса $m_0(C)$ и объема добычи $g_0(C)$ известны (см. рис. 4 и табл. 1, 2), то известны и функции $\theta(C)$ и $T(C)$, определяемые по формулам (4), следовательно, известна и искомая зависимость $g(C, t)$ объема добычи урана

от ее себестоимости (рис. 4б) и остаток ресурса в недрах в разные моменты времени (рис. 4а). Как видно, в области низких себестоимостей добычи ($C < 120$ долл./кгU) ресурсы урана сокращаются с течением времени наиболее быстро, поскольку в первую очередь разрабатываются дешевые месторождения. Объем добычи урана, как следует из рис. 4б и 5, будет сначала возрастать в соответствии с начальным темпом, затем, после достижения пика, сокращаться с течением времени в результате исчерпания в первую очередь дешевых ресурсов урана. Так пик добычи урана на дешевых месторождениях (до 40 долл./кгU) ожидается через 10 лет, а к середине века добыча сократится практически вдвое по сравнению с 2022 г. при начальном темпе около 4%/год. Добыча на дорогих месторождениях будет нарастать до середины текущего века, после чего ожидается столь же быстрый спад добычи.

Приведенные на рис. 4, 5 результаты получены при одинаковом начальном темпе добычи 4,1%/год. Можно предположить, что чем выше цена спроса (рыночная цена) над текущей себестоимостью добычи (т.е. чем выше ожидаемая прибыль), тем интенсивнее идет разработка месторождения, а при цене спроса, близкой к себестоимости, темп добычи меньше. На рисунке 5 пунктирными линиями показано, насколько изменяется добыча на месторождениях с низкой себестоимостью.

Результаты, обосновывающие надежность предлагаемой методики, т.е. оценки динамики исчерпания различных ископаемых ресурсов в ретроспекции, подробно представлены в монографии [20].

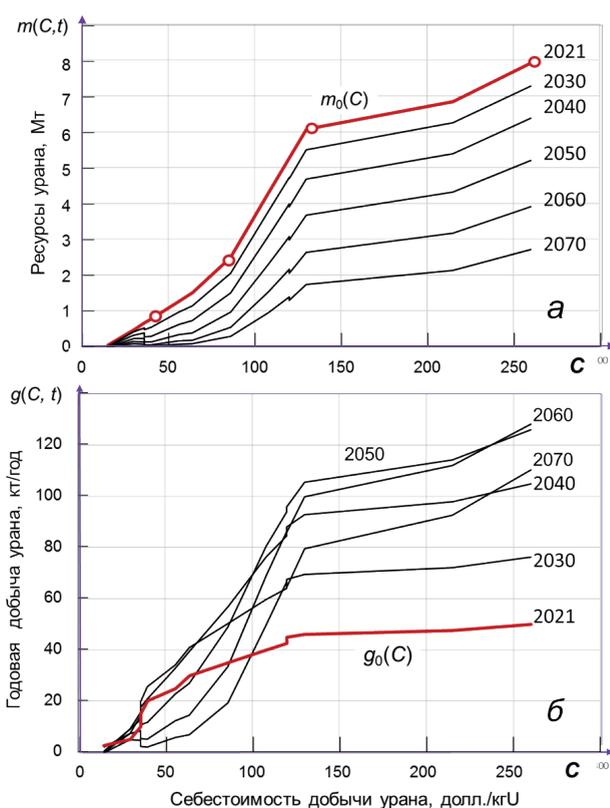


Рис. 4. Влияние себестоимости добычи урана C (долл./кгU) на изменение с течением времени (2021 – 2070 гг.) ресурсов урана $m(C, t)$, Мт U (а) и годовой добычи урана $g(C, t)$, кгU/год (б) при начальном темпе роста добычи $k_0 = 4,1\%$ /год, соответствующем базовому сценарию WNA-23 [12]. Исходные данные о взаимосвязи себестоимости добычи урана с его ресурсами $m_0(C)$ и объемами годовой добычи $g_0(C)$ на месторождениях мира в 2021 г. [12, 19] обозначены жирными линиями на рис а и б. Точками на рис. а обозначены данные WNA [12] на 2021 г. для ресурсов четырех ценовых категорий месторождений урана из табл. 1

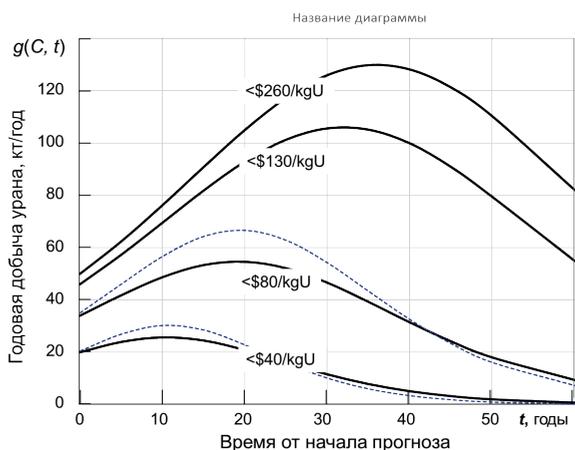


Рис. 5. Динамика добычи урана с разной себестоимостью при начальном темпе $k_0 = 4,1\%$ /год, соответствующем базовому сценарию WNA-23 [12]. Расчет по формулам (3) и (4) при исходных данных на 2021 г. из рис. 4. Пунктирные линии – динамика добычи на месторождениях с низкой себестоимостью с более высоким начальным темпом $k_0 = 6,5\%$ /год

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прогнозирование себестоимости добычи урана является фундаментальной задачей, решение которой будет определять тренды изменения рыночных цен на природный уран и тем самым на топливную составляющую стоимости электроэнергии АЭС.

В работе на основании ранее разработанной в МИФИ модели исчерпания ископаемых ресурсов впервые показано, как изменяется с течением времени глобальная годовая добыча урана в зависимости от себестоимости добычи при заданных ресурсах урана и сценариях развития мировой ядерной энергетики (и начальных темпах роста добычи урана). Пик добычи урана на дешевых месторождениях (до 40 долл./кгU) ожидается через 10 лет, а к середине века добыча сократится вдвое по сравнению с 2022 г. при начальном темпе роста добычи около 4%/год, соответствующем базовому сценарию Всемирной ядерной ассоциации. Добыча на дорогих месторождениях будет нарастать до середины текущего века, после чего ожидается столь же быстрый спад добычи. При низких сценариях развития ядерной энергетики (менее 2%/год) традиционных ресурсов урана по себестоимости добычи до 260 долл./кгU хватит более чем на столетие, но ее вклад в производство электроэнергии будет непрерывно сокращаться с нынешних 10%. При высоких сценариях развития ядерной энергетики пик добычи урана может наступить до середины текущего века.

Поскольку основными поставщиками природного урана на мировой рынок являются страны, не имеющие АЭС на своей территории, а основные потребители урана принадлежат к экономически развитым странам (странам «золотого миллиарда»), на территории которых урана практически нет, то можно ожидать усиление конкуренции на мировом рынке урана, которая может усиливаться при сооружении АЭС в уранодобывающих странах.

Литература

1. Велихов Е.П., Гагаринский А.Ю., Субботин С.А., Цибульский В.Ф. Энергетика в экономике XXI века. – М.: ИздАт, 2010. – 176 с. ISBN 978-5-86656-246-6.

2. Симонов К.В. Глобальная энергетическая война. Серия: тайны современной политики. – М.: Изд-во «Алгоритм», 2007. – 272 с. ISBN 978-5-9265-0496-2.
3. Иванов Г.А., Волошин Н.П., Ганеев А.С., Крупин Ф.П., Кузьминых С.Ю., Литвинов Б.В., Свалухин А.И., Шибаршов Л.И. Взрывная дейтериевая энергетика – Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2004. – 288 с. ISBN 5-85165-443-0:300.
4. World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway. – IRENA, Abu Dhabi. – 2022. – 352 p.
5. Кондратьев В.Б. Роль критически важных сырьевых материалов в условиях экономической неопределенности: опыт ЕС. // Горная промышленность. – 2022. – № 4. – С. 94–102. DOI: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-4-94-102>
6. Мансуров О.А., Птицын П.Б. Критически важные минералы и материалы для индустрии 4.0: особенности получения и перспективы применения на глобальных рынках. Аналитический отчет. – М.: ЦАИР, Частное Учреждение «Наука и инновации», 2022. – 142 с. ISBN 978-5-498-00898-1.
7. Медоуз Д.Х., Рандерс Й., Медоуз Д.Л. Пределы роста. 30 лет спустя. – М.: Академкнига, 2007. – 342 с. – ISBN 978-5-94628-218-5.
8. United Nations: Official Website. 17 Goals to Transform Our World. 17 Goals to Transform Our World. Электронный ресурс: <https://www.un.org/sustainabledevelopment> (дата доступа 01.12.2023).
9. Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»: официальный сайт. Устойчивое развитие. Электронный ресурс: <https://rosatom.ru/sustainability/> (дата доступа: 01.12.2023).
10. The World Nuclear Supply Chain 2023. World Nuclear Association, August 2023. Report No. 2023/002. – 165 p. ISBN: 978-0-9931019-8-4.
11. World Nuclear Performance Report 2023. World Nuclear Association, July 2023. Report No. 2023/001. – 62 p.
12. The Nuclear Fuel Report. Global Scenarios for Demand and Supply Availability 2023-2040. World Nuclear Association, September 2023. Report No. 2023/003. – 258 p. ISBN: 978-0-9931019-9-1.
13. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами. /Под общ. ред. проф. Е.О. Адамова. – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2020. – 502 с. ISBN: 978-5-98706-129-9
14. Харитонов В.В., Ульянов Ю.А., Слива Д.Е. Аналитическое моделирование динамики исчерпания невозобновляемых традиционных энергетических ресурсов. // Вестник НИЯУ МИФИ. – 2019. – Т. 8. – № 4. – С. 370–379. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2304487X19030076>
15. World Energy Outlook 2022. International Energy Agency, October 2022. – 523 p.
16. Uranium 2022: Resources, Production and Demand. A Joint Report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. – OECD 2023, NEA, No. 7634. – 568 p.
17. Живов В.Л., Бойцов А.В., Шумилин М.В. Уран: геология, добыча, экономика. – М.: Атомредмет-золото. РИС ВИМС, 2012. – 304 с. ISBN 978-5-901837-80-1.
18. Statistical Review of World Energy 2021. 70th edition. BP, 2021. – 72 p.
19. Uranium production cost study. UxC Special Report, August 2021. – 124 p.
20. Харитонов В.В., Кабашев К.В., Маликов Р.Р. Долгосрочные тренды исчерпания традиционных энергетических ресурсов и перспективы ядерной энергетики. – М.: НИЯУ МИФИ, 2016. – 96 с.

Поступила в редакцию 10.12.2023

Авторы

Мирхусанов Улугбек Табибуллаевич, магистрант,
E-mail: ulugbekmir@gmail.com

Семенова Дарья Юрьевна, старший преподаватель,
E-mail: dysemenova@bk.ru
Харитонов Владимир Витальевич, профессор,
E-mail: VVKharitonov@mephi.ru

UDK 621.039, 553.495 (063, 470)

Forecasting the Cost and Volume of Uranium Mining for different World Nuclear Energy Development Scenario

Mirkhusanov U.T., Semenova D.Yu., Kharitonov V.V.

*MEPhI,
31 Kashirskoe Sh., 115409 Moscow, Russia*

Abstract

The paper presents a new analytical methodology for predicting the volume and cost of natural uranium production depending on uranium resources and scenarios for the development of traditional nuclear energy. The proposed methodology is based on a mathematical model of the dynamic process of exhaustion of fossil resources previously developed at MEPhI and uses the parameters of the explored mass of the fossil resource, the annual volume of production and the set rate of production growth. The three parameters known at the beginning of forecasting make it possible to describe the change in the resource base over time and solve a number of economic problems related to the extraction of valuable minerals. The paper provides forecasts of the NPP's demand for natural uranium, depending on the scenarios for the development of global nuclear energy developed by the World Nuclear Association (WNA), uranium resources and volumes of its production with different costs for 2021–2022. It is shown that at a low rate (1.8%/year) of the installed capacity of nuclear power plants, uranium resources will last for more than a century, but the contribution of nuclear energy to electricity production will continuously decrease from the current 10%. Under high scenarios for the development of nuclear energy (>5%/year), which is possible under the conditions of intensification of the «green energy transition», the peak of uranium production may occur before the middle of this century. Based on these data, forecasts of the dynamics of uranium exhaustion and annual production volumes at fields with different costs are presented until the second half of this century, depending on the initial production growth rates determined by the scenario of nuclear energy development.

Keywords: natural uranium, cost of uranium mining, nuclear energy development scenario, uranium production

For citation: Mirkhusanov U.T., Semenova D.Yu., Kharitonov V.V. Forecasting the Cost and Volume of Uranium Mining for different World Nuclear Energy Development Scenario. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 1, pp. 119 – 131; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.1.10> (in Russian).

References

1. Velihov E.P., Gagarinskij A.Yu., Subbotin S.A., Tsibulskij V.F. *Energy in the economy of the XXI century*. Moscow, Izdat Publ., 2010, 176 p. ISBN 978-5-86656-246-6 (in Russian).
2. Simonov K.V. *The global energy war. Series: Secrets of modern politics*. Moscow, Algoritm Publ., 2007, 272 p. ISBN 978-5-9265-0496-2 (in Russian).

3. Ivanov G.A., Voloshin N.P., Ganeev A.S., Krupin F.P., Kuzminyh S.Yu., Litvinov B.V., Svaluhin A.I., Shibarshov L.I. *Explosive deuterium energy*. Snezhinsk, VNIITF Publ., 2004, 288 p. ISBN 5-85165-443-0:300 (in Russian).
4. *World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway*. IRENA, Abu Dhabi, 2022, 352 p.
5. Kondratiev V.B. The role of critical raw materials in conditions of economic uncertainty: the EU experience. *Mining Industry*, 2022, no. 4, pp. 94–102. DOI: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-4-94-102>.
6. Mansurov O.A., Ptitsyn P.B. *Critically important minerals and materials for industry 4.0: production features and application prospects in global markets. Analytical report*. Moscow, CARD of Private Enterprise for Nuclear Industry Scientific Development «Science and Innovations» Publ., 2022, 142 p. ISBN 978-5-498-00898-1 (in Russian).
7. Meadows D.H., Randers J., Meadows D.L. *Limits of growth. 30 years later*. Moscow, Akademkniga Publ., 2007, 342 p. ISBN 978-5-94628-218-5 (in Russian).
8. *17 Goals to Transform Our World*. United Nations: Official Website. Available at: <https://www.un.org/sustainabledevelopment> (accessed Dec. 1, 2023).
9. *Sustainable development*. Rosatom State Atomic Energy Corporation: Official Website. Available at: <https://rosatom.ru/sustainability/> (accessed Dec. 1, 2023) (in Russian).
10. *The World Nuclear Supply Chain 2023*. World Nuclear Association. Report No. 2023/002. August 2023, 165 p. ISBN: 978-0-9931019-8-4.
11. *World Nuclear Performance Report 2023*. World Nuclear Association. Report No. 2023/001. July 2023, 62 p.
12. *The Nuclear Fuel Report. Global Scenarios for Demand and Supply Availability 2023–2040*. World Nuclear Association. Report No. 2023/003. September 2023, 258 p. ISBN: 978-0-9931019-9-1.
13. *The White Paper on Nuclear Energy. Closed-loop NFC with fast reactors* (gen. edit. Adamov E.O.). Moscow, NIKIET Publ., 2020, 502 p. ISBN: 978-5-98706-129-9 (in Russian).
14. Kharitonov V.V., UljaninYu.A., Sliva D.E. Analytical Modeling of Exhaustion Dynamics of Non-Renewable Traditional Energy Resources. *Vestnik MEFPh*. 2019, vol. 8, no. 4, pp. 370–379 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.1134/S2304487X19030076>
15. *World Energy Outlook 2022*. International Energy Agency, October 2022, 523 p.
16. *Uranium 2022: Resources, Production and Demand. A Joint Report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency*. OECD NEA No. 7634, 2023, 568 p.
17. Zhivov V.L., Boitsov A.V., Shumilin M.V. *Uranium: geology, mining, economics*. Moscow, Atomredmetzoloto. RIC VIMS Publ., 2012, 304 p. ISBN 978-5-901837-80-1 (in Russian).
18. *Statistical Review of World Energy 2021*. 70th edition. BP, 2021, 72 p.
19. *Uranium production cost study*. UxC Special Report, August 2021, 124 p.
20. Kharitonov V.V., Kabashev K.V., Malikov R.R. *Long-term exhaustion trends of traditional energy resources and prospects for nuclear energy*. Moscow, MEFPh Publ., 2016, 96 p. (in Russian).

Authors

Ulugbek T. Mirkhusanov, master's student,

E-mail: ulugbekmir@gmail.com

Dariya Yu. Semenova, Senior Lecturer,

E-mail: dysemenova@bk.ru

Vladimir V. Kharitonov, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: VVKharitonov@mephi.ru