



Глава 13.

История вероятности.

[...Максим] как-то неприятно засмеялся. — Что вы мне можете предложить, принц-герцог?

Старый принц-герцог кряхтя поднялся и, растирая затёкшие бока, прошёлся по комнате.

— Во-первых, я не советую вам углубляться в пустыню, — сказал он. — Есть там варвары или нет, ничего подходящего для себя вы там не найдёте... Вероятно, надо идти к морю и начинать оттуда... Если островитяне тоже не миф и если они захотят с вами разговаривать...

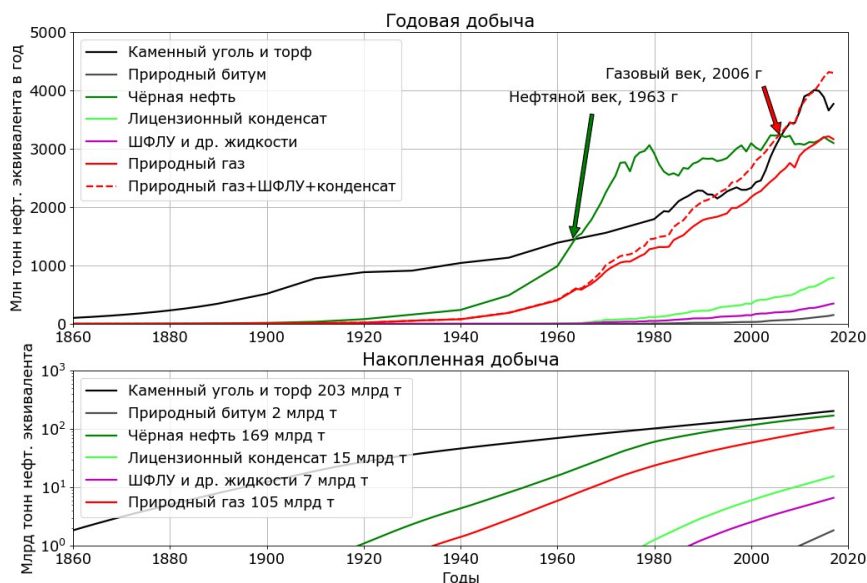
— А. и Б. Стругацкие «Обитаемый остров»

Разобравшись с перспективами «сланцевой революции» и «ста процентов возобновляемых», продолжим наши игры с пивным стаканом. Оптимисты утверждают, что стакан наполовину полный, пессимисты считают, что наполовину пустой, реалисты – считают патроны.

В главе 9 мы выяснили, что знаем накопленную добычу угля, нефти и газа с точностью примерно $\pm 5\%$, однако остаточные извлекаемые запасы (в пределах конкретных месторождений) известны лишь добывающим компаниям и правительствам. Можно ли, по имеющимся в открытом доступе данным, прикинуть общие запасы планеты Земля, пусть с точностью гораздо худшей, чем 5% ?

Сначала подсчитаем, сколько всего добыто. Программа **Chapter 13\Graph_01_Total_Production.py**

Оценка добытых запасов 1860-2017 гг



На графике годовой добычи есть две интересные точки. В 1963 году наступил нефтяной век: добыча из нефтяных скважин превысила добычу из угольных разработок (шахт, карьеров, торфяных выработок). В 2006 нефтяной век кончился, продлившись всего 43 года. Начался век угольно-газовый. Добыча из нефтяных скважин стала меньше суммарной добычи газовых по сумме «газ-конденсат-NGPL». Стараниями шахтёров КНР уголь тоже обогнал нефть и вплоть до 2013 года шёл нос-к-носу с газом. Теперь уголёк выдохся, и с 2014 мы с вами живём полностью в газовом веке, с чем и поздравляю.

Всего с 1830 года из планеты Земля добыто 501 ± 50 млрд тонн нефтяного эквивалента (toe). Половину этого количества добыли с 1830 по 1989 годы, то есть за 160 лет. Из оставшихся 250 млрд т, половину добыли и сожгли в пределах жизни подавляющего большинства из тех, кто читает эту книгу: с 1990 по 2005 годы, то есть за 16 лет. Те, кому в 2017 стукнуло двенадцать, стопроцентно поучаствовали в сжигании оставшейся четвертушки.

Накопленная добыча нефти и лицензионного газового конденсата с 1860 по 2017 годы – 184 ± 9 млрд т. Накопленная добыча всех «жидкостей», включая конденсат, битум и широкие фракции лёгких углеводородов – 198 ± 10 млрд т.

Начнём наши оценки с самого сложного ресурса: каменного угля и торфа. Подсчёты запасов осложняются фактом, что уголь бывает очень разный. Нас интересуют три параметра:

1. Теплотворная способность: сколько энергии выделяет тонна угля при «высокотемпературном сгорании», то есть в топке современной эффективной ТЭЦ.
2. Вредные примеси. Наиболее опасная – сера. При сгорании выделяется сернистый газ, а он приводит к «кислотному дождю» – штука крайне мерзкая. На некоторых месторождениях уголь содержит уран (весь уголь Монголии, к примеру), почти везде есть также ртуть, тяжёлые металлы и прочие ~~радостн~~ гадости.
3. Зольность: количество безопасных, но несгораемых примесей, главным образом глин. Чем больше зольность, тем чаще надо чистить топку, тем больше требуется установленная мощность на единицу выработки энергии.

Геологи делят уголь по рангам (сортам). Закон Хилта гласит: чем выше давление и температура образования угля, тем выше ранг. Из-за геотермального градиента за углём более высокого ранга надо, при прочих равных условиях, копать более глубокие шахты. И наоборот: самый нижний ранг – торф – лежит прямо на поверхности. Приводимая ниже упрощённая международная классификация отличается как от российских «марок угля» так и от американских «рангов USGS», но мы будем пользоваться ею, так как в каждой стране мира – своя сортность, без упрощения не понять.

Ранг	Использование	% углерода	Теплота сгорания, МДж/кг	Тонн нефтяного эквивалента на тонну
1. Антрацит, мета-антрацит, паровозный уголь (кардиф)	Обогрев жилья, паровой транспорт	86-100	28.0-35.3	0.83
2. Битуминозный уголь	Энергетика, кокс	85 и менее	28.0-35.3	0.65
3. Суббитуминозный уголь	Энергетика, химия	85 и менее	19.3-28.0	0.54
4. Лигнит (бурый уголь)	Энергетика	65 и менее	19.3 и менее	0.36 (сухой)
5. Торф	Энергетика, удобрения и т.п.	60 и менее	15 и менее	0.19 (сухой)

Кстати, о торфе: торфяники отлично изучены. Они покрывают более 2% территории суши, а всего на планете около $4 \cdot 10^{12}$ тонн сухого торфа, то есть 780 млрд т нефтяного эквивалента. Проблема лишь в низкой плотности этой энергии: порядка 500 тонн нефтяного эквивалента на квадратный километр «богатого» торфяника, или 50 тое на квадратике «бедного». Для масштаба величин, гипотетическое месторождение «дядя Джо» (из тех, что выгодно добывать в Юте, но не выгодно на Аляске) из главы 8 имело на квадратном километре 16'000 тонн, а реальный Самотлор из девятой главы – 1'850'000 тонн/км².

Соответственно и трудозатраты на подготовку, вырезку и сушку торфа – громадные. Вот как добывали торф в начале XIX века и как добывают сейчас.



Подпись под фотографией из Ирландии 1910 года: «На торфе хрен зарабатываешь». Надеюсь, ни у кого из читателей не возникла идея, что торфом можно плавить сталь или выделять сверхчистый кремний для роботов. Производить тепло и электроэнергию из торфа можно, но выглядеть будет примерно так: большой начальник и его шестёрки катаются на «Теслах» (торф в изготовлении этих авто участия не принимал), полторы тыщи работяг довольны, что есть на чём баланду приготовить.

В 1920-х разработку пытались механизировать с использованием работающих на торфе локомотивов. Ничего хорошего не получилось: на добычу тонны сухого торфа мобильный паровик кушает полтонны и более. Промышленная механизированная разработка торфа с использованием машин с ДВС (на нефтепродуктах, Карл) сейчас есть в Великобритании, Финляндии, Ирландии, России, Канаде и Швеции. В первой торф используется исключительно для перегонки виски! От торфа напиток получает неповторимый аромат. В двух последних торф используют в качестве удобрений и подстилки для скота. Финляндия, Россия и Ирландия, помимо удобрений, используют торф в энергетике. В России использование энергетического торфа достигало 1,5 млн т в год¹⁵⁶. В 2010 году вокруг Москвы горели осушенные ещё в 1980-х торфяники. Пришлось залить водою взад...

Ещё одна непреодолимая в долгосрочной перспективе проблема: торфяники не образуются в тропическом климате, а перевозка торфа на большие расстояния убыточна. Оттого торф могут продуктивно использовать лишь жители зоны рискованного земледелия.

Из-за трудностей разработки и экологического ущерба современная добыча торфа в мире составляет менее 1 кг на человека в год. Несмотря на огромные запасы, добыча торфа следующие несколько веков вряд ли будет сильно отличаться от современной: как абсолютный и невероятный максимум, не более сотни килограмм на человека в год, то есть 20 кг нефтяного эквивалента, то есть 16 ватт мгновенной тепловой мощности. Пусть население планеты стабилизировалось на уровне 10 млрд человек. Тогда ресурса торфа хватит на 3400 лет и более. Так как торф естественным образом восстанавливается за пару тысяч лет, при такой скорости добычи его можно считать вечным (возобновляемым) ресурсом. Правда, и основой технологической цивилизации торф служить не может.

Часто утверждают, что все месторождения каменного угля были в основном открыты до 1930 года. Утверждение не совсем верное. Лучше сказать, что числа запасов к 1930 году были непомерно раздуты, а потом пошло массовое списание. М.К.Хабберт в статье 1956 года использовал официальные данные американской геологической службы USGS, но выдал такой комментарий:

...В случае с углём оценки мировых запасов подвергаются ревизии с 1913 года. Последние 10 лет [то есть с 1945 по 1955 – М.Я.] Геологической службой США проводилось уточнение запасов угля в нашей стране и в мире. Результаты исследований USGS (Зверитт, Беррихилл и Тэйлор, 1953) об извлекаемых запасах угля представлены на рис. 14. Общемировые извлекаемые запасы каменного угля и лигнита по новым оценкам не превышают 2'500 млрд метрических тонн, из которых в США находится примерно треть, в СССР – примерно четверть, и в КНР – одна пятая.

Особенно поражает снижение мировых запасов угля с ранее общепринятого значения 6'000 млрд т. Отчего же уменьшились запасы? Дело в том, что предыдущие оценки включали все запасы, в том числе, на предельных глубинах. Новые оценки ограничены практической возможностью шахтной добычи, что немедленно уменьшило остаточные геологические запасы до 5'000 млрд т. Но главное, из указанных 5'000 млрд т технически можно извлечь около 50%. Учёт коэффициента извлечения и энергозатрат на добычу позволяет адекватно сравнивать извлекаемые запасы каменного угля с извлекаемыми запасами нефти. В самом деле: для сравнения продуктивности двух нефтяных

156 То есть менее 0,3 млн т нефтяного эквивалента; сравните с добычей российских нефти и газа: 554 и 546 млн тое соответственно.

месторождений, мы же не сравниваем геологические запасы одного с извлекаемыми запасами другого...¹⁵⁷

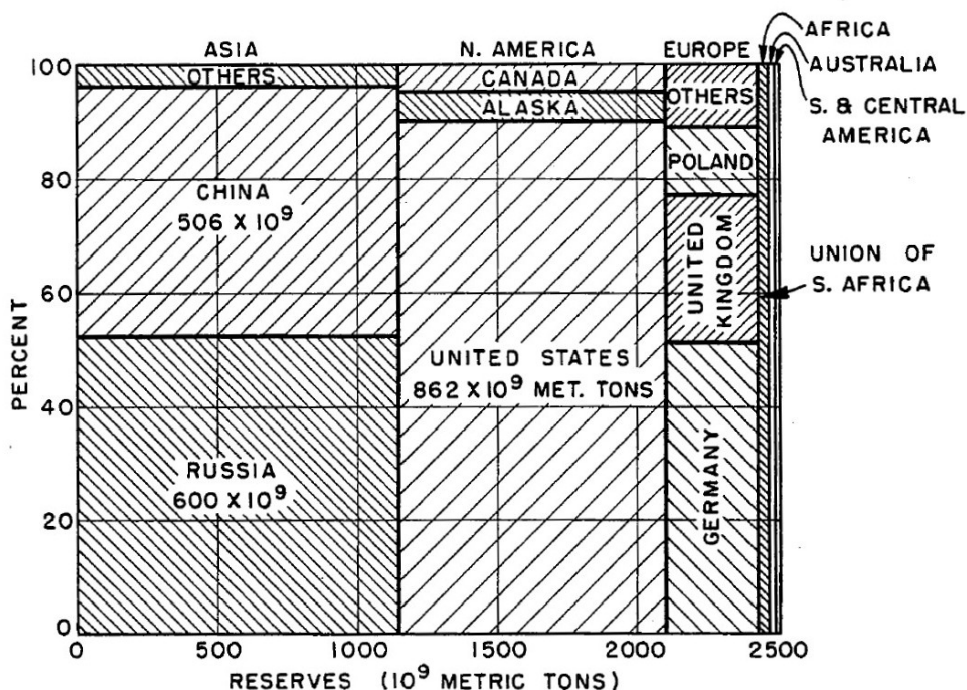


Figure 14 – World recoverable coal reserves assuming 50-percent loss in mining (U.S. Geol. Surv.).

Снижение запасов почти в два с половиной раза – а чего удивляться? Вспомним, как будущий президент Ирландского Геологического Общества Э.Халл насчитал на островах 80 млрд тонн угля, но Британия добыла с 1830 года 26 млрд тонн – и сдулась в полный ноль в 2016. Если же говорить о планете всей, на списаниях 1945-55 годов дело не остановилось.

За шестьдесят лет из балансовых отчётов угольных компаний бесследно исчезло более триллиона тонн угля, или около 770 млрд т нефтяного эквивалента¹⁵⁸! Против течения какое-то время грёб лишь Китай, за 10 лет добавивший к начальным запасам около 130 млрд т. Недавний катастрофический обвал добычи угля в КНР намекает, что большая часть последних находок располагается на глубинах свыше 3 км и может быть добыта разве что подземной газификацией угля, а скорее всего – вообще никак.

В статье Хабберта данные по ресурсной базе Австралии и остальной Азии были непропорционально занижены. С 1956 года там был рост не бумажный, а реальный – порядка 280 млрд тонн. Однако даже такой рост не смог справиться со списанием 611 млрд т угля в США. В Африке и Южной

¹⁵⁷ См [19] стр. 13-14.

¹⁵⁸ Во времена Хабберта лигнит и торф считались «субэкономическими сортами». Переводной коэффициент до 1960 года, в связи с преобладанием битуминозного угля в структуре добычи – 0.63 тое на тонну угля.

Америке геологическая изученность пока не позволяет делать окончательные выводы. Если новые месторождения угля (на небольших и доступных глубинах залегания) и будут открыты, то только там.

Страна	Остаточные по данным USGS 1953 г млрд т	Остаточные по данным «BP» 2008 г млрд т	Остаточные по данным «BP» 2017 г млрд т	Добыто с 1954 по 2017 по данным EIA	Пересчёт запасов с 1953 г млрд т
США	912	243	252	50	-611
Канада	44	7	7	4	-33
Россия ¹⁵⁹	600	157	160	18	-422
Германия	167	7	36	16	-115
Великобритания	85	0.16	0.07	3	-82
Польша	39	8	24	10	-5
Прочая Европа	35	100	102	34	+101
КНР	506	115	244	103	-159
Прочая Азия	48	66	141	32	+125
Африка	40	51	14	12	-14
Австралия	14	77	145	16	+147
Южная и Центральная Америка	10	16	14	3	+7
ВСЕГО¹⁶⁰:	2'500	850	1'140	300	-1'060
ВСЕГО в млрд тонн нефтяного эквивалента	1'560	430¹⁶¹	650¹⁶²	140	-770
ВСЕГО начальные извлекаемые, млрд toe	1'600	590	850		

Исходя из значения 2'500 млрд тонн, Хабберт – вслед за USGS – предсказывал, что пик добычи угля на уровне около 6 млрд тонн в год придётся на середину XXII века, а в качестве химического сырья уголь будут добывать и в 2700 году. Вероятно, отсюда берёт начало легенда, будто кто-то рассчитал, что после

¹⁵⁹ USGS в 1956 г под «Россией» подразумевала «СССР». Часть запасов была позже переквалифицирована в отделившиеся союзные республики под категориями «прочая Европа» и «прочая Азия».

¹⁶⁰ Сумма округлена до 10 млрд тонн.

¹⁶¹ Пересчёт в нефтяной эквивалент по отчёту 2008 г: 431 млрд т антрацита и битуминозного угля, 417 млрд т суббитуминозного и лигнита.

¹⁶² Пересчёт в нефтяной эквивалент по отчёту 2017 г: 816 млрд т антрацита и битуминозного угля, 323 млрд т суббитуминозного и лигнита. Игры в статистику продолжаются. Так, США переквалифицировали 100 млрд т суббитуминозного угля в битуминозный (уголь «созрел» за 10 лет, так-то).

исчерпания запасов нефти можно ввести транспорт на синтетическом бензине, например, по технологии Фишера-Тропша из битуминозного угля либо по процессу Бергиуса из низкокачественного угля¹⁶³.

Вплоть до 2000 года человечество двигалась с небольшим обгоном предсказания Хабберта, однако недостаток энергоресурсов в КНР вынудил резко увеличить добычу. В 2013 году поставлен рекорд! В мире добыто 8'275 млн тонн, почти на 40% выше предсказанного в знаменитой статье пика. Обвал добычи тоже получился феерический: 10% за 3 года. Оптимисты указывают на период между 1989 и 1992 годами, когда мировая добыча угля за три года просела на 3.0%, однако три – не десять.

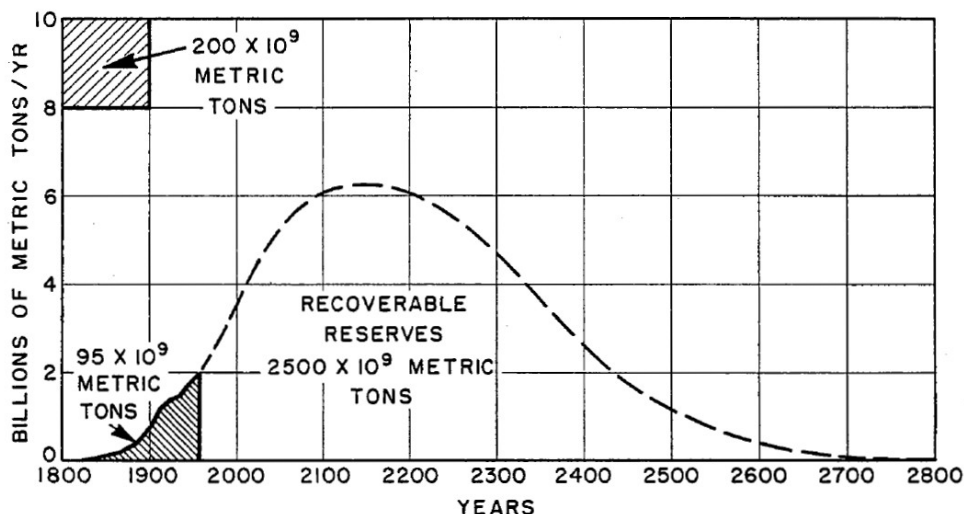


Figure 18 – Ultimate world coal production. The shape of the curve is variable but subject to the condition that the area under the curve cannot exceed thirteen squares.

В крупнейшем добытчике угля – Китае – по данным 2011 года 53% подтверждённых запасов находились на глубинах «свыше 1000 м от дневной поверхности», а глубина выработок, начатых после 2005 г, «превышала 600 м»¹⁶⁴. Те же авторы указывали, что добыча угля в КНР может упасть до 3'400-3'500 млн т. Так и вышло. Месторождения с глубиной залегания менее 200-300 м в Индии, Пакистане, КНР уже выработаны в «технологический ноль».

¹⁶³ В нацистской Германии использовался как процесс Фишера-Тропша, так и процесс Бергиуса. Всего было построено 9 заводов по первой технологии и 12 заводов по второй, первые выпускали в год до 3 миллионов тонн дизтоплива и смазочных масел, вторые – до 18 млн тонн синтетического (в том числе авиационного) бензина. Относительно низкая доля процесса Фишера-Тропша в производстве объясняется отсутствием подходящего сырья – уголь высоких рангов требовался для паровозов. Процесс Фишера-Тропша получил незаслуженную популярность в прессе, так как после падения Германии на территории ГДР продолжало функционировать три завода, в то время как все заводы по технологии Бергиуса были разбомблены, и их восстановление признали экономически нецелесообразным. Более подробно см. Anthony N. Stranges, **Germany's Synthetic Fuel Industry 1927-1945**, Energia, Vol 12, No 5, 2001.

¹⁶⁴ Ксе Хипинг, Ли Хонг и Ву Ганг. Скачано с <http://cornerstonemag.net/chinas-coal-industry-must-follow-the-path-of-sustainable-production-capacity/> 4 сентября 2017 г.

В апреле 2017 года вышла статья З.-Л. Ванга и других о наличии природного ископаемого топлива в КНР¹⁶⁵, где запасы угля в стране навангавали в 225 млрд тонн, а пик добычи прогнозировался в 2020 году на уровне 4.4 млрд тонн в год. Что характерно, среди авторов статьи нет ни одного геолога, а сплошь экономисты и пиарщики, и даже это не уберегло от довольно пессимистического прогноза по углю. В том же году отчёт «BP» показывал для КНР запасы 244 млрд тонн, то есть «при существующем уровне добычи» (3.97 млрд тонн в 2013 году) угля достаточно на 61 год. Отчёт «BP» 2018 года внезапно оценивает запасы угля в Китае в 139 млрд тонн, а «при уровне добычи 2013 года» этого угля хватит всего на 35 лет.

Механизированная добыча во многих странах становится нерентабельной, оттого наблюдается массовый переход на ручную разработку, в том числе с транспортировкой гужевым и мускульным транспортом. Обратите внимание на цвет угля на снимках ниже. Явно не антрацит! По виду, зольность достигает 400 кг на тонну. О содержании серы, ртути и других полезных веществ можно только догадываться.



Ручная добыча каменного угля в Индии



И кустарная добыча в КНР

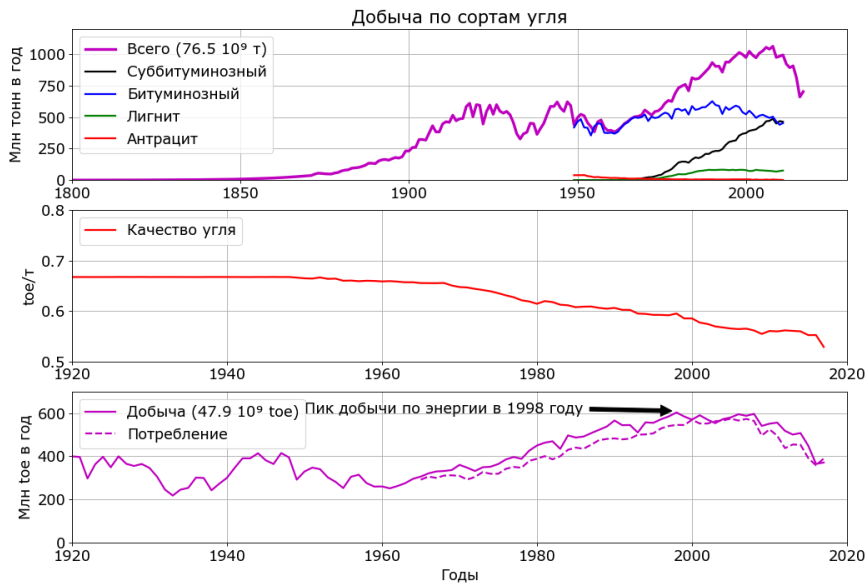
В США до ручной разработки угольных месторождений дело пока не дошло, но в добыче – точно как в Китае – нарастает доля низкосортного суббитуминозного угля, в то время как добыча антрацита уже ушла практически «в ноль», а добыча битуминозного угля непрерывно падает. Нарисуем графики программой **Chapter 13\Graph_02_USA_Coal.py**

Качество добываемого угля в США непрерывно снижалось: с 0.67 toe за тонну в 1950 году до обвального 0.53 toe/t – ниже, чем стандартный суббитуминозный – в 2017. Пик добычи битуминозного угля наступил в 1990 году – 627 млн тонн. В 2009 году добыча суббитуминозного угля в США по массе превысила битуминозные сорта. В 2011 – суммарную массу добытого битуминозного угля и антрацита. Если считать в абсолютных тоннах, пик добычи угля в США пришёлся на кризисный 2008 год – 1'063 млн тонн. По абсолютной энергии, однако, это был 1998 году – 603 млн toe. С 2012 года

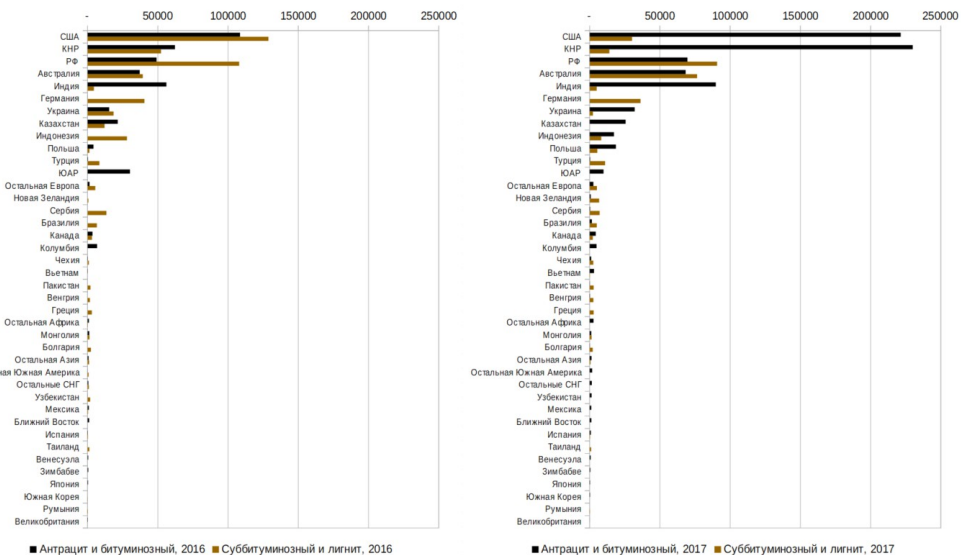
165 Jian-Liang Wang, Jiang-Xuan Feng, Yongmei Bentley, Lian-Yong Feng, Hui Qu, A review of physical supply and EROI of fossil fuels in China, Pet. Sci. (2017) 14:806–821

начались срочные переквалификации низкосортных месторождений в «как-бы битуминозные», а статистику по сортам публиковать перестали. *Sapienti sat*, а лохи могут инвестировать дальше.

Добыча каменного угля в США



Кстати, о рангах. В отчёте 2017 года «ВР» потрясла геологов заявлением: оказывается все эти годы мы ~~говорили прозой~~ не знали своих сортов угля! Мы-то, дураки, думали, что для превращения лигнита в антрацит требуются десятки миллионов лет, а оно эвоно как!



Америка изящным росчерком пера переквалифицировала 98.6 млрд тонн суббитуминозного угля в 112.9 млрд тонн битуминозного и антрацита

(интересно, а отчего тогда добыча высоких рангов так весело падает?) Китай отличился ещё сильнее: из 38.3 млрд тонн суббитуминозного сделали 167.8 млрд тонн антрацита. Правда, китайцы в 2018 году посовестились и 105 млрд бумажных тонн просто списали. Россия сыграла «мизер», переквалифицировав 17.2 млрд тонн лигнита в 20.5 млрд тонн ценных битуминозных сортов.

Активно добавляли бумажные запасы в Австралии и Индии. В Казахстане суббитуминозных, по отчёту «ВР», вообще более не числится. Уголь Экибастуза, при всех его несомненных достоинствах, битуминозным не является. Зольность от 32 до 47%, теплота сгорания в среднем – 16.8 МДж/кг. Смотрим табличку выше.

На фоне таких статистических выкрутасов достойно смотрится ЮАР, честно списавшая в 2017 году $\frac{2}{3}$ своих когда-то «подтверждённых» запасов, или 21 млрд тонн. При текущем уровне добычи в 0.25 млрд тонн в год, оставшихся 9.8 млрд хватит ЮАР на сорок лет, а вовсе не на сто двадцать, как тамошнее начальство полагало ранее. ЮАР – единственная страна в мире, производящая коммерческие количества моторного топлива из угля, в основном по процессу Фишера-Тропша, – до 9 млн тонн в год, то есть около 30% от общего потребления страны.

Упрямо стоит на своём Германия, продолжая называть лигнит Braunkohle (бурым углем), а не «антрацитом». При существующем уровне добычи 175 млн тонн в год этого угля в самом деле хватит надолго – более 200 лет. Однако если поднять добычу до пикового 1985 года (521.6 млн тонн), этого угля хватит «всего» лет на семьдесят. Если же задаться целью полностью обеспечить страну собственным моторным топливом по рецепту Бергиуса¹⁶⁶, то об экспорте энергетического угля в соседние страны Европы можно просто забыть.

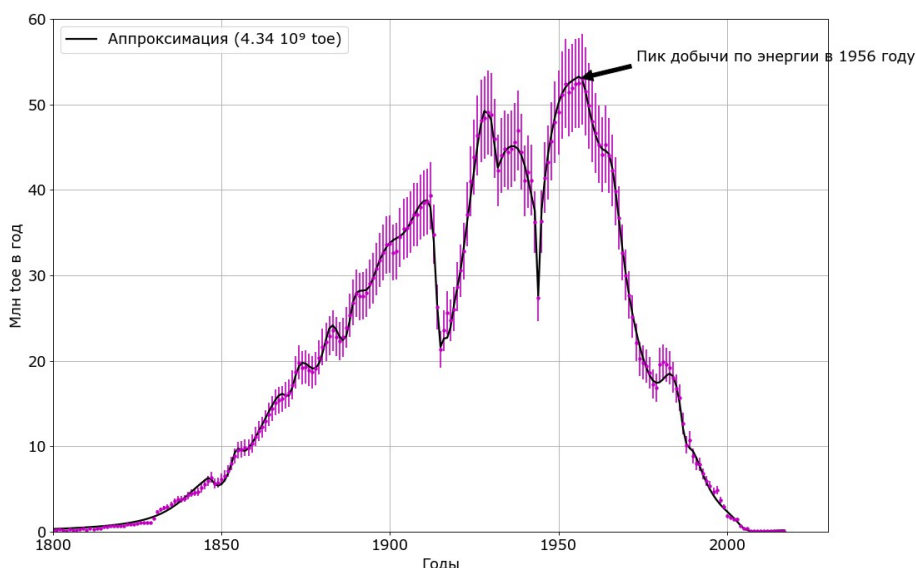
Добычу угля в Великобритании мы обсуждали в главе 8. Начальная плотность ископаемого топлива в Великобритании – $95'000 \pm 15'000$ тонн нефтяного эквивалента на квадратный километр, из них каменного угля – 70%, или $67'000 \pm 7'000$ toe/км². Число по углю меняться уже не будет, так как добыча угля на островах закончилась.

А вот соседи британцев на противоположной стороне пролива: Франция и Бельгия, которые совместно эксплуатировали месторождения каменного угля как показано на графике из программы **Chapter 13\Graph_03_France_Belgium_Coal.py** Число тоже меняться уже не будет – весь уголь выработан. Суммарная территория Франции и Бельгии – 671'207 км² (в 2.75 раза больше, чем у Британских островов), а общая накопленная добыча – всего $6'500 \pm 700$ toe/км², то есть в десять раз меньше, чем у

¹⁶⁶ Именно Бергиуса, а не Фишера-Тропша. Во время Второй Мировой Германия добывала (в границах 1937 года) 182-191 млн тонн каменного угля и ещё 260-280 млн тонн лигнита. На момент написания этой книги каменный уголь выработан «в ноль» и добывается исключительно лигнит – по 175 млн тонн в год. С 2007 года добыча сокращалась в среднем по 1.4% за год.

британцев. Британии сильно повезло с углём, оттого она и стала в XIX веке «кузницей планеты».

Добыча каменного угля во Франции и Бельгии



В среднем по богатой углём Британии и относительно бедных Франции и Бельгии плотность начальных извлекаемых запасов угля $(65'000 \cdot 242.5 + 6'500 \cdot 671.2) / (242.5 + 671.2) = 22'000 \text{ toe/км}^2$. Все три страны находятся в одной климатической зоне и имеют общую историю по крайней мере со времён Великой Римской империи. Промышленное развитие тоже началось практически одновременно. Все три страны входят в число «развитых» и «цивилизованных», оттого добыча полезных ископаемых не осложнялась географической недоступностью или удалённостью от промышленных центров. Все три страны выработали месторождения «в ноль», значит, запасы окончательные и «обжалованию не подлежат». Число $22'000 \text{ toe/км}^2$ даёт нам очень грубую оценку общих начальных технически извлекаемых запасов угля на планете Земля. Отбросив покрытые ледниками Гренландию¹⁶⁷ и Антарктиду, площадь суши (с прилегающим шельфом) 134.2 млн км^2 . Если плотность угля как во Франции и Бельгии, получается 870 млрд toe , если как в Англии – то $8'700 \text{ млрд toe}$. «Среднее», тем не менее, лежит не посередине: $134.2 \cdot 22 = 3'000 \text{ млрд toe}$ ¹⁶⁸. Это число практически идеально

167 На островах и побережье Гренландии с 1924 г. добывали уголь! Например, шахта Квиллисат была выработана «в ноль» и закрыта в 1972. Под ледником никто копать отчего-то не захотел. В выработанной шахте Свалбард теперь размещено самое крупное в мире хранилище семян культурных растений. С точки зрения мировой статистики, однако Гренландия не представительна. Ледник не растает до наступления следующего ледникового периода.

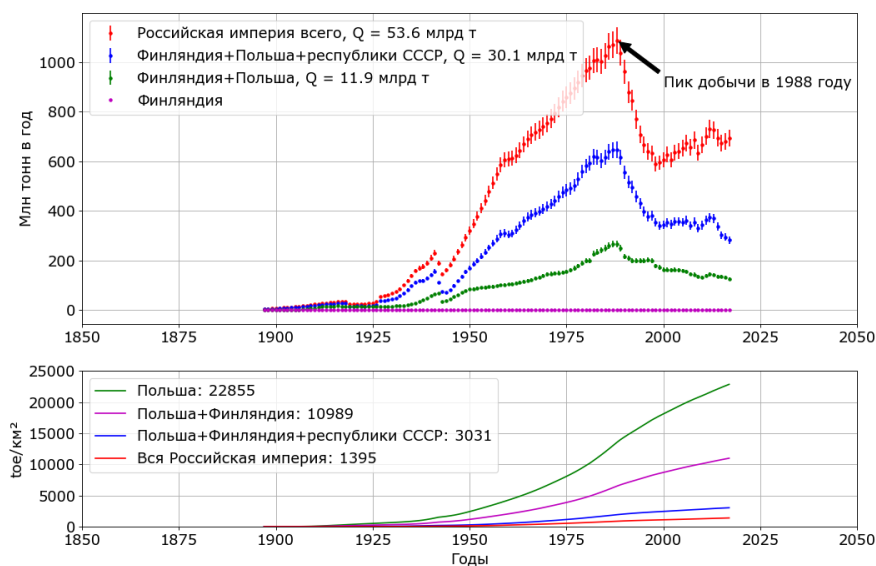
168 В блоге написали: «...насчёт пластов мощностью в 10 сантиметров, то я думаю что они такая же редкость, как и пласты мощностью в 100 метров (если распределение нормальное)». Если бы распределение было нормальным, то да. В геологии, тем не менее, распределение сдвинутое, чаще близкое к лог-нормальному, оттого «дерьмище» – не смейтесь, это сленг – по 10 см встречается гораздо чаще, чем стометровые пласты (а как хотелось бы наоборот!) О том, что тонкие пропластки угля можно увидеть чуть ли не в любой нефтяной скважине примерно на тех же глубинах, что и нефть, вам может

соответствует глобальной оценке USGS из далёкого 1945 года: если принять пересчётный коэффициент в 0.6 toe/т (грубо между суббитуминозным и битуминозным рангами) получится ровно 5'000 млрд метрических тонн угля.

Оценка 22'000 toe/км² – вероятно оптимистическая. Есть масса стран, где уголь интенсивно искали, но вообще не нашли годных к разработке месторождений. Если крупная территория (размером с Россию, Китай или Индию) имеет начальные запасы на квадратном километре существенно выше, чем 22'000 toe/км², вряд ли стоит такой геологии доверять.

В Российской империи уголь искали и добывали, как показано в программе **Chapter 13\Graph_04_Russian_Empire_Coal.py**

Добыча каменного угля в Российской империи



В Польше накопленная добыча угля с 1897 по 2017 годы – 11.9 млрд тонн, то есть на одном квадратном километре площади – 22'900±2'300 toe. Запасы по данным «BP» 2018 года – 25.8 млрд т. Если прогноз «BP» сбудется, то плотность начальных запасов угля в Польше – 72'500±20'000 toe/км², то есть (в пределах погрешности) столько же, сколько было в Великобритании. Существенно больше не получится. Польша изучена вдоль и поперёк, новых месторождений открыто уже не будет.

Соседка Польши по Российской империи – Финляндия – имеет сравнимую площадь (338 тыс км² против 313 тыс км² у Польши). Страна стоит на гранитах и гнейсах, а эпизодический осадочный чехол формировался ледниками, по геологическим меркам – практически вчера. Зато по

поклаться любой буровой мастер. Конечно, «месторождениями» такие пласты не считаются, а вот опасной зоной при бурении – несомненно.

интрузивам упорно бегали геологи, отыскав кучу полезных руд, так что геологическая изученность – «детальная». Существенных запасов угля в Финляндии не было. Суммарная плотность извлекаемых запасов угля в Польше и Финляндии – $35'000 \pm 10'000$ toe/км², на 50% больше, чем наше условное «англо-французское среднее» $22'000$ toe/км².

Теперь добавим к имперской картине 14 союзных республик бывшего СССР. Вряд ли кто-то поверит, будто добывать уголь в Узбекистане и Украине сложнее, чем на просторах Восточной Сибири. Сложность добычи угля в Казахстане сравнима с российским Кузбассом. Три упомянутые республики имеют суммарные запасы в 61.5 млрд тонн, остальные одиннадцать – всего 1.5 млрд тонн. Накопленная добыча вместе с Польшей и Финляндией к 2017 году – 30 млрд тонн, плотность начальных запасов – $3'000 \pm 300$ toe/км². Если будут извлечены все запасы, как в таблицах «BP», на территории 16 стран получится суммарно 120 млрд тонн с территории размером с половинку КНР – 5.96 млн км², а плотность начальных запасов – $120'000 / 5.96 \cdot 0.6 = 12'000 \pm 2'400$ toe/км². Геологическая изученность союзных республик бывшего СССР варьирует от «высокой» в Казахстане и Туркменистане до «детальной» в остальных. Поверим геологам на слово, что Одесса и Рига – не Донбасс. Как видим, добавление всё больших территорий с удовлетворительной геологической изученностью всё так же неизбежно толкает нас к числу порядка $12'000$ toe/км², то есть оценке USGS 1955 года.

Наконец, если добавить в расклад Россию, по кумулятивной добыче получается пока очень низкая плотность: всего $1'400$ toe/км². С огромной территории бывшей Российской империи – 23.1 млн км² (17% площади суши, исключая Антарктику и Гренландию) добыто всего 53.6 млрд тонн угля, в то время как с 9.5 млн км² в США – 76.5 млрд тонн. Из общего количества угля, добытого на территории Российской империи, крохотная Польша добыла более 22%, а республики без России – 34%. Конечно, это из-за того, что многие месторождения угля в России плохо доступны географически и находились (или всё ещё находятся) в необжитых краях. Подтверждённые запасы России по состоянию на 2015 год (отчёт «BP» 2015 года) – 107.9 млрд т лигнита и суббитуминозного угля и 49,1 млрд т битуминозного угля и антрацита¹⁶⁹. В том же 2015 году доклад Е.А.Киселёва давал значения по категориям A+B+C₁ 195.4 млрд тонн и C₂ – 78.6 млрд тонн, из которых суммарно 53.3% – лигнит, 25.2% – суббитуминозных, 18.2% – битуминозных, 3.3% – антрацит¹⁷⁰. Если добавить к добыче России эти запасы, то всего с территории Российской империи будет добыто между 300 и 420 млрд тонн, а начальная плотность запасов – между $8'000$ и $11'000$ toe/км², что вдвое-втрое меньше $22'000$, насчитанных для Великобритании, Франции и Бельгии и несколько ниже среднемировой оценки USGS 1955 года.

169 Или 90.7 млрд т + 69.6 млрд т по отчёту «BP» 2018 года.

170 «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2014 г.» Государственный доклад / гл. ред. Е. А. Киселёв ; Минприроды России. — М. : Минерал-Инфо, 2015. В свободном доступе нет, цитируется по источнику: «Добыча и обогащение угля», Москва, Бюро НДТ, ИТС 37-2017.

По состоянию на декабрь 2014 года USGS и EIA¹⁷¹ совместно оценивали извлекаемые запасы угля в США 254 млрд «коротких угольных тонн», то есть 230 млрд метрических. Запасы угля в мире оценивались в том же году 1'122 млрд тонн с распределением по странам мира как в таблице ниже. Для сравнения приведены данные из таблиц «BP» за 2015, 2017 и 2018 годы:

Страна / Территория					Накопленная добыча к 2017 году, млрд тонн	Оценка начальных извлекаемых запасов, млрд тонн		Площадь, млн км ²	Оценка плотности запасов угля, тысяч toe/км ² при 0.6 toe/т	
						Мин.	Макс.		Мин.	Макс.
КНР	258	115	244	139	66	181	324	6.443	16.9	30.2
США	230	237	252	251	77	307	329	9.525	19.3	20.7
Россия	157	157	160	160	23	180	420	17.098	6.3	14.7
Австралия	101	76	145	145	30	106	175	7.692	8.6	13.7
Индия	90	61	95	98	28	89	126	3.287	16.2	23.0
Индонезия		28	28	23	5	28	33	1.910	8.8	10.4
Всего 6 стран	864	674	924	815	229	891	1407	45.995	11.6	18.4
ВСЕГО в мире	1122	892	1139	1035	350	1242	1489	134.165	5.6	6.7

Суммарная добыча каменного угля в США с 1800 года – 48 млрд toe. При площади территории в 9.525 млн км², получается по фактической кумулятивной добыче 5'000 toe угля с квадратного километра. Это в 13 раз меньше, чем добыто по факту в Великобритании и на 25% меньше, чем добыто по факту во Франции и Бельгии. Геологи USGS заявляют, что по абсолютным тоннам извлекаемые запасы угля в США выработаны на 23-25% – смотрим таблицу выше. Если же считать по чистой энергии, то выработано около 40%. Основную массу остаточных запасов угля (230-250 млрд тонн, то есть 115-130 млрд toe) составляют в основном малоценные суббитуминозный уголь и лигнит. В России, кстати, ситуация ничуть не лучше: низкие ранги угля – ¾ подтверждённых запасов (см. статистику выше). Если верить USGS, конечная плотность извлекаемых запасов каменного угля и лигнита на территории США составит порядка 20'000 toe/км². Оценка, скорее, оптимистическая, но в честных пределах 22'000 toe/км², что мы насчитали выше.

Общая оценка начальных извлекаемых запасов в мире, по данным USGS/EIA 2014 года – 1470 млрд тонн, или 800 toe, что вдвое ниже значения, принятого Хаббертом в 1956 году (на основании данных той же геологической службы USGS). Согласно последней оценке USGS, средняя плотность экономических запасов угля на суше, исключая Антарктиду и Гренландию, – 6'000±600 toe/км².

171 Скачано с https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=coal_reserves в июне 2018 г.

Низкие значения запасов в основном за счёт Южной Америки и Африки. Их суммарные запасы, согласно отчёту «BP» 2018 года, 28 млрд тонн при общей территории континентов 48.2 млн км², то есть плотность начальных извлекаемых порядка 400 toe/км². Аналогично состояние дел в географически доступной и хорошо изученной Мексике: 1.2 млрд тонн подтверждённых запасов и 0.4 млрд т накопленной добычи с территории 2.0 млн км² (в семь раз больше Польши). Плотность начальных запасов – 500±100 toe/км². Добыча угля в Мексике прошла пик в 2011 году и с тех пор снижается по 10% в год.

Читатели блога любезно указали на статью на веб-странице Pronedra.ru¹⁷², где вроде бы говорится, что запасы угля в России превышают 5'700 млрд тонн, да ещё есть 141 млрд т в «Донбасснаше». Приведём цитату с этой страницы:

Ленский бассейн, Россия (1,647 трлн тонн)

В Якутии и частично в Красноярском крае расположился второй из самых крупных в мире угольных бассейнов – Ленский – с запасами в 1,647 трлн тонн бурого и каменного угля. Основная часть блока находится в бассейне реки Лены, в районе Центральноякутской низменности. Площадь угольного бассейна достигает 750 тыс. квадратных километров. Как и Тунгусский бассейн, Ленский блок изучен в недостаточной степени из-за труднодоступности района. Добыча осуществляется на шахтах и разрезах. На Сангарской шахте, закрытой в 1998 году, спустя два года начался пожар, который не потушен до сих пор.

Ну конечно, автор статьи врёт! Запасы Ленского составляют вовсе не 1,647 трлн тонн, а целых 1,658! Во скока! Но если без шуток, если увидите где-то, что «перспективные» запасы даны с четырьмя значащими цифрами, как, например «1,647 трлн т» для Ленского бассейна, бегите от таких «экспертов» как от чумы. Перед вами автоматически туфта. Мы и подтверждённые-то запасы знаем, в лучшем случае, до двух значащих, чего уж там говорить о перспективных.

Поверим на секунду числам из статьи и воспользуемся калькулятором. Площадь Ленского бассейна несколько больше суммарной площади Польши и Финляндии – 0.75 млн км². Плотность запасов при этом – $1'650'000 / 0.75 \cdot 0.6 = 1'300'000$ toe/км². Под каждым квадратным километром Ленского бассейна должно лежать 2.2 млн тонн угля, а под каждым квадратным метром, соответственно, – 2.2 тонны. При плотности угля порядка 1.5 г/см³, везде должен находиться пласт мощностью полтора метра. Если реальные месторождения занимают около 6% территории бассейна, как в Великобритании или Польше, то мощность пластов угля в месторождениях должна достигать $1.5/0.06 = 25$ метров. Это вполне возможно геологически, но лишь в уникальных условиях. Обнаружить такое богатство равномерно и щедро рассыпанным на территории размером почти в четыре Великобритании – довольно маловероятно.

Но ладно бы автор сказал, что вот есть такой уникальный Ленский бассейн, где угля возможно больше, чем на всём остальном земном шаре, и на этом поставил точку. Нет! У нас есть ещё Тунгусский бассейн, Таймырский

172 Скачано с <https://pronedra.ru/coal/2017/03/15/krupneyshie-ugolnye-mestorozhdeniya-mira/> в июне 2018 г.

бассейн, и так далее. США автор статьи отводит «скромные» 650 млрд тонн или 33'000 toe/км². В огромной стране – как в одном Кузбассе. Но, конечно, Сергей Зеников знает лучше геологов USGS, насчитавших 230 млрд тонн. Германии автор «подарил» перспективные в 287 млрд тонн, в 8 раз больше немецких подтверждённых запасов.

На всякий случай дадим карту перспективных запасов¹⁷³ по категории P₁ (тут речь о российских категориях запасов, а не о международном обозначении «1P»). В Ленском бассейне много. Очень много. 31 млрд тонн. При существующем уровне добычи порядка 400-500 млн тонн в год этого хватит стране на 60 лет с хвостиком. Даже если Кузнецкий, Канско-Ачинский, Иркутский, Тунгусский, Таймырский, и так далее по списку добывать совсем не будут.

Геологи вероятно обратят внимание на о. Сахалин, где никакого угольного бассейна не нарисовано. Между тем, он там точно был. Именно сахалинский «кардифф» добывали каторжники, о которых писал Чехов. Уголь на Сахалине уже выработан, осталось несколько разрезов «на местные нужды»¹⁷⁴.



Могут сказать, что помимо P₁ существуют ещё P₂ и P₃, и даже приводят числа: 735'374 и 2'545'175 млн тонн. Именно так, с точностью 6-7 знаков, что само по

¹⁷³ «Добыча и обогащение угля», Москва, Бюро НДТ, ИТС 37-2017

¹⁷⁴ Ещё одна жертва раздутых запасов – Подмосковный буроголистый бассейн. Добыча в 1959 году составляла 46,7 млн тонн. Последняя шахта была затоплена в 2010 году. Сейчас в бассейне работает один драглайн и одна самоходная лопата в с. Петрушино, уголь в количестве менее 1 млн тонн в год поставляется только на Рязанскую ГРЭС. Общая добыча в бассейне с 1772 года – 1,6 млрд тонн с площади 0,120 млн км². Плотность добытых по факту ресурсов не превышает 5'000 toe/км². Остаточные балансовые запасы в количестве 3,8 млрд тонн вероятно никогда не будут добыты.

себе говорит, что это фантазии поверхностно знакомых с геостатистикой бюрократов от геологии. Если на всей территории Российской империи, вместе с Польшей и Финляндией, извлекаемых запасов было бы как в Великобритании, то получилось бы меньше суммы $P_2 + P_3$: $70'000 \cdot 23 \cdot 10^6 / 0.6 \approx 2'700'000$ млн т. В Польше, скорее всего, плотность запасов – как в Британии, однако в Финляндии – точно нету, в Карелии – бесполезный шунгит есть, а угля нету, на Сахалине было немножко, да всё уже выработано... список «где точно уже нету» можно продолжать до бесконечности. Ясно, что 2.7 триллионов случиться никак не может, а вы говорите: 4 триллиона тонн?

Для пояснения, отчего не стоит тупо складывать перспективные запасы, решим не-школьную задачку:

Дано:

1. *Месторождение Большая Пупыра в гор. Мухолётов Запупыринской области. Доказанные начальные геологические запасы 100 млн тонн угля (оценка 3Р). Месторождение не разрабатывалось.*
2. *Месторождение Данахервам в 100 км от гор. Триполи. Доказанные начальные геологические запасы 200 млн тонн угля (оценка 3Р). На месторождении есть шахта, кумулятивная добыча на 2015 год 22 млн тонн.*

Найти:

Суммарные геологические запасы угля Большой Пупыры и Данахервама (оценка 3Р) в 2015 году.

Решаем на калькуляторе! В бассейн втекает, из бассейна вытекает... $100 + 200 - 22 = 278$ млн тонн. Ответ готов!

«Внимание, правильный ответ», – как говорят в одном интеллектуальном клубе. Оценки 1Р, 2Р и 3Р подробно разбирались в главе 8. «3Р» означает: «С вероятностью 10% в месторождении есть *больше* X запасов». Вероятность, что в Большой Пупыре больше 100 млн т, – 10%, вероятность, что в Данахерваме (изначально) больше 200 млн т, – тоже 10%, а вероятность, что в обоих больше 300, – примерно¹⁷⁵ $0.1^2 = 1\%$. Месторождения специально выбраны далеко друг от друга и в заведомо разных геологических условиях, оттого вероятности независимы. Приблизительный ответ звучит так: «Суммарные остаточные запасы Большой Пупыры и Данахервама – 280 млн тонн (оценка Р-01)». Проблема в том, что оценка Р-01 никому не нужна! Вы сядете в такси, если водитель говорит, что вероятность доехать до цели, – около 1%? И в задаче вас спрашивали конкретно про оценку 3Р, а не про абстрактную сферическую Р-01.

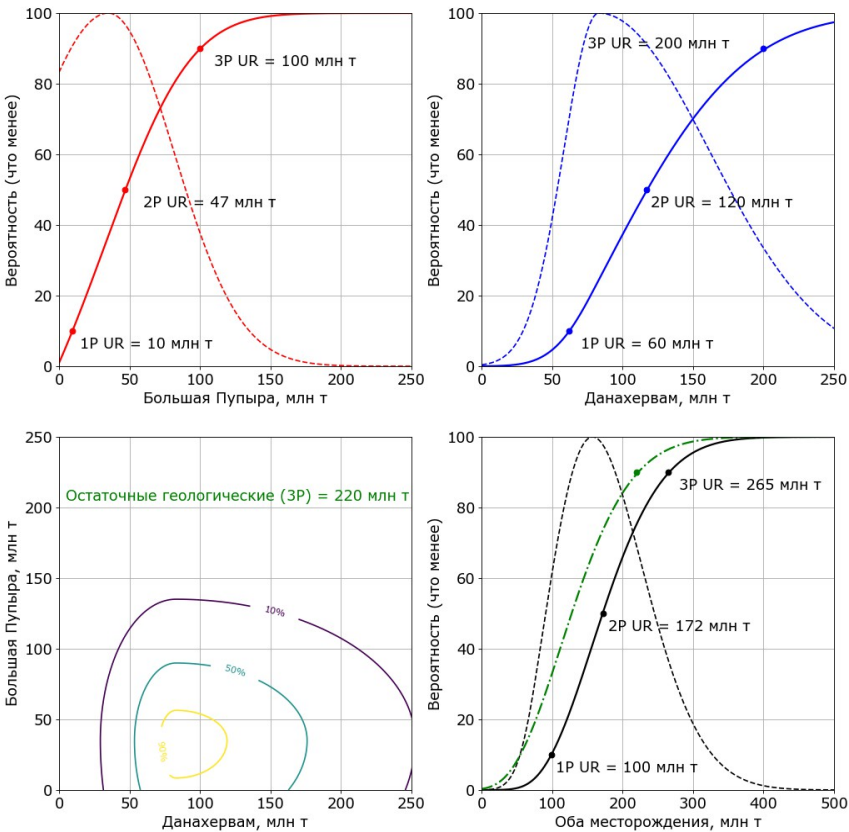
Если попробовать решить задачку правильно, нам сильно не хватает данных. Надо учитывать площадь месторождений и геологическую изученность. Допустим, мы эти данные как-то получили – послали Бонда, Джеймса Бонда, и выкрали из соответствующих сейфов. Распределение вероятностей как

¹⁷⁵ Точное значение вероятности надо считать численно.

показано в программе **Chapter 13\Graph_05_Probability.py** , а КИ_т в Данахерваме – от 40 до 50% (КИ на Пупыре нам не понадобится, там не добывали пока). Красный график – Большая Пупыра, синий – Данахервам. Сплошной линией представлено распределение вероятности, а пунктирной – нормированная плотность вероятности, то есть производная. Представим данные в табличке:

Категория запасов	Большая Пупыра, млн т	Данахервам, млн т	Арифметическая сумма, млн т	Вероятностная сумма, млн т
Начальные 1Р	10	60	70	≈ 100
Начальные 2Р	47	120	167	≈ 172
Начальные 3Р	100	200	300	≈ 265
Добытые	0	22	22	22/0.5 = 44
Остаточные 3Р			278	≈ 220

Распределение вероятностей двух месторождений, 2015 год



Исходя из наших допущений, суммарные остаточные геологические запасы

(3P) по двум месторождениям вовсе не 280 млн тонн, как мы посчитали на калькуляторе а, неожиданно, 220. Заметим, что величину накопленной добычи 22 млн тонн нам также пришлось поделить на КИ, и оттого получилось 44 млн тонн «использованных» геологических запасов, как показано зелёной штрих-пунктирной линией на графике.

Если бы распределение запасов было строго нормальное, то оценки 2P можно было бы просто складывать. В геологии, однако, нормальное распределение – редкость. Например, оттого что на Данахерваме мы уже добыли по факту 22 млн тонн, восходящая ветвь графика плотности вероятности крутая. Действительно, начальные геологические запасы менее 22/КИ быть никак не могут. Поэтому даже для оценки 2P честное численное интегрирование плотности вероятности и сложение на калькуляторе дают немного разные величины: 172 и 165 млн тонн соответственно. Есть и позитивный момент: арифметическое сложение консервативных оценок 1P – слишком пессимистично. Действительно, вероятность того, что на Пупыре будет менее 10 млн тонн, – 10%, и вероятность, что на Данахерваме будет менее 60 млн т, – тоже 10%. Вероятность обнаружить на независимых месторождениях в сумме менее 70 млн тонн – примерно $0.1^2 = 1\%$.

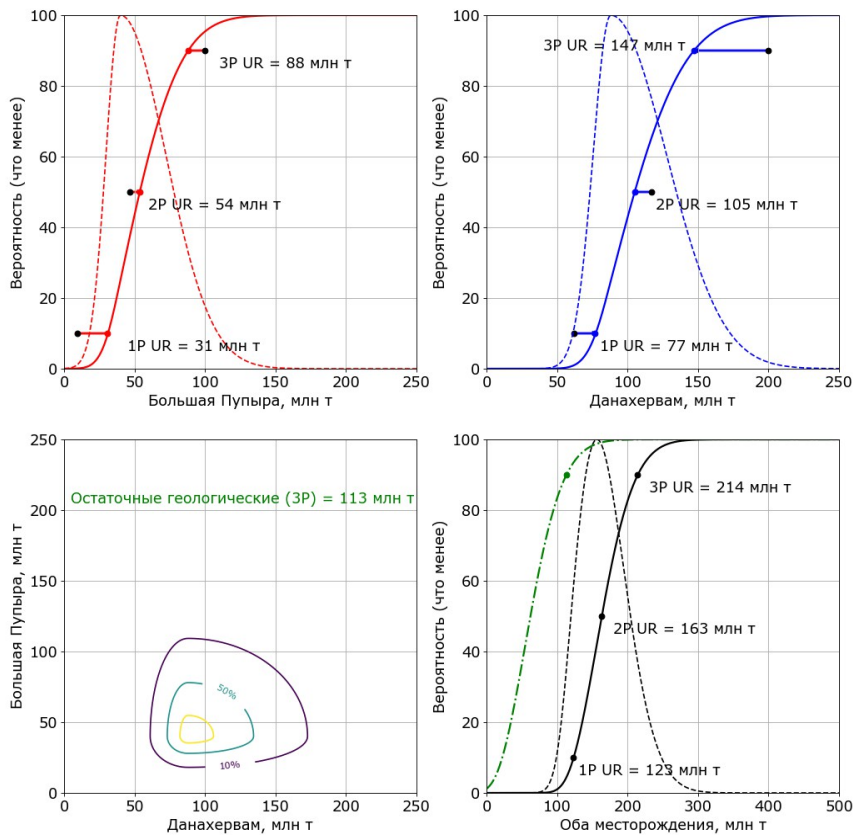
Теперь предположим, что прошло 25 лет. Шахта Данахервама продолжила геройски рубить уголёк, кумулятивная добыча теперь – 40 млн тонн. На Большой Пупыре открылся угольный разрез, суммарная добыча 16 млн тонн, КИ = 75% (при добыче экскаватором и самосвалами). Пошуршав в сейфах угольных компаний, командор Бонд принёс нам новые секретные циферки:

Категория запасов	Большая Пупыра, млн т	Данахервам, млн т	Арифметическая сумма, млн т	Вероятностная сумма, млн т
Начальные 1P	31	77	108	≈ 123
Начальные 2P	54	105	159	≈ 163
Начальные 3P	88	147	235	≈ 214
Добытые	16	40	56	$40/0.5+16/0.75 = 101$
Остаточные 3P			179	≈ 113

В том, что оценка 2P (она же P-50) за 25 лет на Пупыре сдвинулась вправо, а на Данахерваме – влево, никто не виноват. Вы дважды подбросили монетку. Кто виноват, что выпал один орёл и одна решка? В том, что оценки 3P синхронно сдвинулись влево, а оценки 1P – вправо, виноваты угольщики. Если бы проклятые не рыли землю своими машинами, то оценка так бы и осталась, как была в далёком 2015 году. Но поскольку вместе с добычей росла геологическая изученность, оценки пришлось пересчитать по факту. В том, что оценка 1P потихоньку растёт, а оценка 3P потихоньку снижается, а вместе они сходятся к 2P – нет ничего нелогичного, просто математика. В качестве лирического отступления, во многих странах государственные органы любят,

когда все геологические оценки растут, но очень не любят, когда снижаются. Поэтому компании часто не меняют в отчётах старые оценки ЗР, несмотря на получение новейших данных. «Верхние» оценки как бы «замирают». Положим, однако, что в нашем примере заведомой подтасовки нет. Нарисуем результат программой **Chapter 13\Graph_06_Probability.py**

Распределение вероятностей двух месторождений, 2040 год



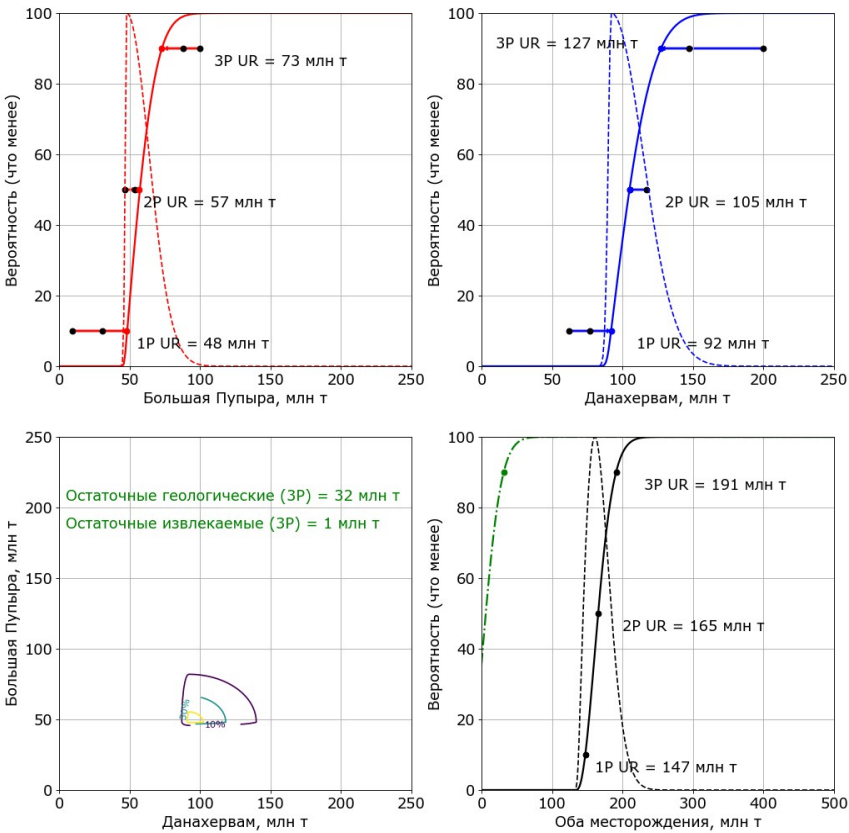
Прошло ещё двадцать лет, на дворе 2060 год. Суммарная добыча Большой Пушеры достигла 45 млн тонн. Экскаватором там делать больше нечего, оттого шесть лет назад я пошёл в Мухолётовскую среднюю школу и освободил местных Корчагиных от учебников. Теперь парни и девчата с лопатами и корзинками собирают необходимый городу уголёк, но отвозим по-прежнему самосвалами. Коэффициент извлечения с использованием ручного труда достиг 83%, и мой бухгалтер уверяет, что это не предел. Если подключим к добыче ещё и Мухолётовскую начальную школу и перейдём к перевозке на велосипедах, можно и 86% собрать. Этого угля нашим буржуйкам (но не сталеплавильному заводу) хватит на много сотен лет.

Шахта «Данахервамская» в 2055 году закрылась, добыв по сумме 60 млн тонн угля. Фактический КИ = 57% (горные инженеры в 2015 году были

пессимистами). Везти уголь за 100 км вполне рентабельно, но местные законы отчего-то запрещают рабский труд, да если бы и можно было послать в шахту рабов (за еду), на глубине 800 метров без расходов на крепь, инструмент, оборудование, электричество – много не нарубишь. Престарелый генерал Бонд приносит нам новые циферки, как показано программой **Chapter 13\Graph_07_Probability.py** :

Категория запасов	Большая Пупыра, млн т	Данахервам, млн т	Арифметическая сумма, млн т	Вероятностная сумма, млн т
Начальные 1Р	48	77	125	≈ 147
Начальные 2Р	57	105	162	≈ 165
Начальные 3Р	73	147	220	≈ 191
Добытые	45	60	105	$60/0.57+45/0.83 = 159$
Остаточные 3Р			115	≈ 32
Остаточные извлекаемые				≈ 1

Распределение вероятностей двух месторождений, 2060 год



Теперь самое время сравнить результаты нашей бурной деятельности с оценками 2015 года. Оценка 2Р была 167 млн тонн тупо на калькуляторе и 172 млн тонн численно. По факту добыто 105 млн тонн, то есть $KI = 62\%$. На Большой Пупыре $KI = 45/47 = 95\%$. Заметим, никаких новых технологий мы не вводили, просто нам немного повезло с запасами, и мы перешли к ручной добыче. На Данахерваме $KI = 60 / 120 = 50\%$, как в аптеке. Заметим, что геологическая вероятность там сыграла немного не в нашу пользу.

Если же сравнивать полученный уголь с арифметической оценкой 3Р, то получится, что мы добыли лишь 35% от подсчитанного угля. Оказывается, в 2015 году остаточных извлекаемых запасов было не 278 млн тонн, и даже не половина этой величины – 139 млн тонн, – а всего 83 млн тонн.

В численном примере мы использовали оценки 3Р (Р-10). Российские категории запасов Р₁ – это не Р-10, а грубо Р-03. Категория Р₃ – это грубо Р-003. Вероятность того, что на территории России есть 5.7 триллионов тонн геологических запасов угля, составляет приблизительно 0.03¹⁷ – около двух миллиардных процента. С тем же успехом вместо чисел Р₂ = 735'374 млн т, Р₃ = 2'545'175 млн т можно писать: Р₂ = 1'234'567 млн т, Р₃ = 3'456'789 млн т. Тоже высосано из пальца, зато красивее.

Но если журналисты внезапно начали свистеть народу в уши про потенциальные триллионы тонн угля, которых хватит России на десять тысячелетий, может быть стоит задуматься: не являются ли «подтверждённые запасы» угля в менее удалённых от цивилизации районах туфтой?

В середине 2010 года геологи Тадеуш Пазек (из Университета Техаса в Остине) и Грегори Крофт (из Университета Калифорнии в Беркли) совместно выпустили странную, и, не побоимся этого слова, вредную статью¹⁷⁶. Программа **Chapter 13\Graph_08_Patzek_Croft_Coal.py**

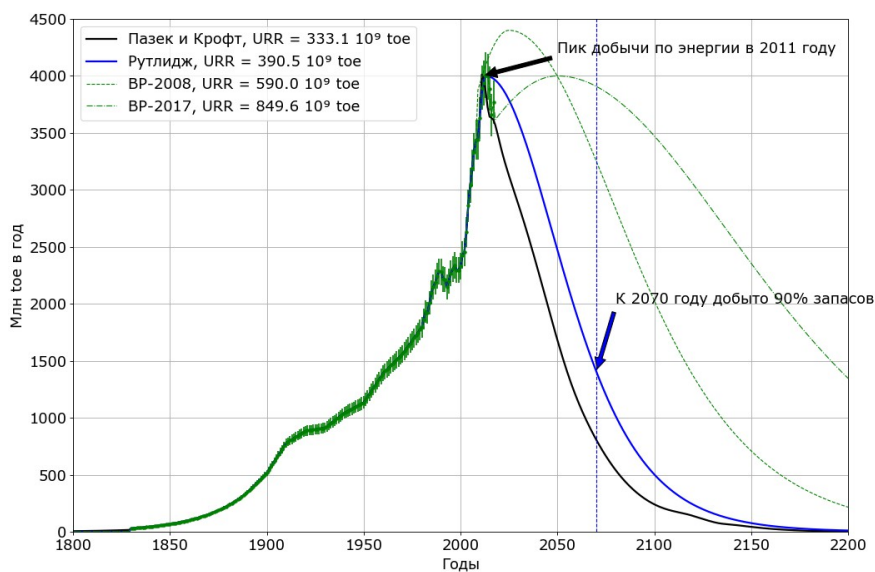
Учёные доказывали, подумать только, что начальные экономически извлекаемые запасы энергетического угля на планете Земля исчисляются не 1'600 млрд toe, как считал Хабберт, не 850 млрд toe, как считала «BP» в 2017 году, и даже не 590 млрд toe из отчёта «BP» 2008 года, а «всего» лишь 330-340 млрд toe. Основание для такой подмены простое – учитывается только уголь, который можно добывать механизированным способом в карьерах или шахтах. То, что можно нарубить из десятисантиметровых пропластков кайлом (возможно с использованием детского труда, как на картинках выше) – «экономическим ресурсом» не считается.

Пазек и Крофт предсказывали пик добычи угля в 2011 году на уровне 4'000 млн toe. По факту получилось 3'980±200 в 2012, и спад не такой жуткий, как у американских геологов. Очевидно, оценки реальной производительности ~~индийских девочек~~ китайских шахтёров слегка занижены.

¹⁷⁶ Tadeusz W.Patzek, Gregory D.Croft, A global coal production forecast with multi-Hubbert cycle analysis, Energy, vol 35, issue 8, pp 3109-3122.

За год до мирового пика угля статьёй отметился и горный инженер Дэйв Рутлидж из знаменитого «Калтеха»¹⁷⁷. По данным добычи в 14 регионах мира он подсчитал вероятные начальные запасы угля между 650 и 750 млрд тонн, с наиболее вероятным значением 680 млрд тонн, что соответствует 390 млрд toe. По мнению автора, 90% экономически извлекаемого угля будет добыто к 2070 году.

Добыча каменного угля - предсказание Т.Пазека и Г.Крофта, 2010



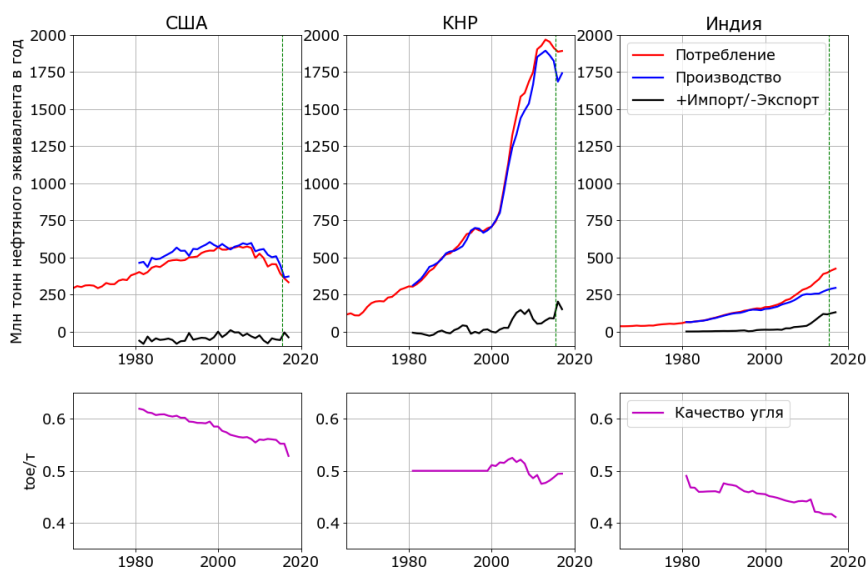
Для сравнения на том же графике приведены оценки «BP» из отчётов 2008 и 2017 годов. Последний отчёт полагает, что добыча угля будет оставаться на «полочке» между 3'800 или 4'000 млн toe в год вплоть до конца XXI века.

В самом конце 2015 года, на 21-й Конференции по Климату в Париже представители 196 стран разработали рамочное соглашение о снижении выбросов парниковых газов. Высокие стороны договорились не жечь лишний уголь... ну или хотят, чтобы мы в это верили. Посмотрим, как обстоят дела с добычей и сжиганием угля в реальности (данные «BP»). Программа **Chapter 13\Graph_09_Paris_Accord_Coal.py**

На момент подписания соглашения в апреле 2016 (пунктирная линия), добыча в США и КНР уже падала как кирпич. Добыча в Индии росла за счёт низкокачественного угля: 0.41 toe на тонну — это ближе к лигниту, чем к суббитуминозным сортам (торфяников в Индии нет — климат не располагает). Индийские «подтверждённые запасы антрацита и битуминозного угля» в 92 млрд тонн из отчётов «BP» 2017 и 2018 годов — из области негодной фантастики. Очень странно и грустно, что уважаемая компания эту откровенную ложь публикует.

¹⁷⁷ David Rutledge, *Estimating long-term world coal production with logit and probit transforms*, International Journal of Coal Geology 85 (2011) 23–33

Эффект Парижских соглашений: каменный уголь



В июне 2017 новый президент США Дональд Трамп объявил о выходе своей страны из Парижского соглашения такими словами (перевод мой):

Например, по этому соглашению, Китай сможет увеличивать свои выбросы в течение невероятно долгого времени: целых 13 лет. Они будут делать что хотят целых тринадцать лет. Мы – нет! Индия согласилась участвовать в соглашении на условии получения многих миллиардов долларов помощи от развитых стран. Есть и другие примеры. В сухом итоге, Парижское соглашение чрезвычайно несправедливо для США.

Далее, это соглашение блокировало развитие «чистого угля» в Америке. Мы покончили с этим, и угольные разрезы в США начинают открываться снова. Через две недели у нас у нас будет открытие нового разреза – неслыханное дело уже многие годы! [М.Я.: президент не соврал, новый разрез в Пенсильвании ввели в строй. Глубиной 40 м, с запасами 5 млн тонн коксующегося угля¹⁷⁸. Америке этого угля хватит на целых 4 дня! И к Парижскому соглашению ввод разреза отношения не имеет; нормальный план разработки, утверждённый ещё при Рейгане.] Пенсильвания, Огайо, Западная Вирджиния, много других мест. Горняки просили меня возродить американскую угольную промышленность – я обязан попробовать.

[В соответствии с соглашением,] Китаю можно строить сотни новых угольных ТЭС. Им можно, а нам – нельзя? Индия к 2020 году собирается нарастить добычу угля вдвое [М.Я.: Если считать по массе – нарастят непременно. По энергии – в лучшем случае увеличат на 30%, далее добыча рухнет]. Подумайте над этим: Индия может удвоить добычу угля, а Америка должна от собственного угля отказаться?...]¹⁷⁹

Ну а пока Трамп обсуждает, Китай и Индия удерживают потребление угля за счёт импорта. Крупнейшим донором высококачественного угля, как энергетического, так и металлургического, является Австралия. При добыче в 2017 году 297.4 млн toe (на третьем месте после Китая и США), страна экспортировала 255.1 млн, главным образом в Индию и Китай. Австралии крепко помогает Индонезия: 214.4 млн тонн «условной нефти» в год. Для сравнения, Россия в том же году вывезла «всего» 114 млн toe.

¹⁷⁸ <http://pittsburgh.cbslocal.com/2017/06/01/somerset-county-acosta-coal-mine/>

¹⁷⁹ <https://www.whitehouse.gov/briefings-statements/statement-president-trump-paris-climate-agreement/>

Конечно, помимо угля, что добывают в карьерах и шахтах, в наличии запасы угля, которые можно добыть с подподвывертом. Метод существует с 1868 года (это не описка) и называется подземной газификацией угля – ПГУ (underground coal gasification – UCG). В разработке поучаствовали такие светила как сэр Уильям Сименс, Дмитрий Менделеев и ещё один сэр – лауреат Нобелевской премии химик Уильям Рамзай. В 1912 году В.И. Ленин тиснул статью в подпольной «Правде» насчёт того, как новейшая технология освободит, наконец, шахтёров от ужасающих условий труда. «Новейшей технологии» в том году стукнул ровно полтинник!

Идея проста как грабли. В угольный пласт бурится несколько скважин, в центральную закачивается воздух, пласт поджигают, и в остальные скважины начинает поступать «светильный газ» – аццкая смесь водорода, окиси углерода, метана, сернистого газа, сероводорода и паров скипидара. Далее смесь быстренько используют: окись углерода (CO) и сероводород (H_2S) – отравляющие газы! Полученный газ нужен для химии или производства электричества.



На деле «гладко было на бумаге». Ну или в «Детской энциклопедии», как на картинке выше. В реальности прокачивать достаточное количество воздуха через скважины не представлялось возможным, оттого в 1935 году в Головке попробовали другой метод: в пласт пробивается шахта со штреком для подачи воздуха, а из нескольких скважин выходит газ. Мечта Ленина об устранении опасностей для шахтёров, как видим, не сбылась, но появилась хоть какая-то надежда на рабочую технологию.

На деле всё равно получилось плохо. Подземная выработка – не химический реактор. Подал побольше воздуха – уголь горит, но на поверхность выходит не

светильный газ, а углекислый. Он нам бесполезен. Подал чуть меньше – горение прекращается, а поджигать снова тяжело. Выход полезной энергии в светильном газе – не более 15% от энергии угля в пласте. Но самая главная проблема: по мере выгорания угля пласт начинает обваливаться, возникают трещины до самой поверхности – и ядовитый светильный газ вылетает в атмосферу, а более тяжёлые фракции загрязняют источники воды.

В 1936 году контора «Подземгаз» отчиталась об успехе эксперимента, хотя прорыва в стоимости газа не произошло. По данным той же конторы, себестоимость светильного газа от подземной газификации составляла 46-51 копейку за 100 м³, а светильный газ гарантированного качества с промышленных реакторов «Демаг» стоил 70 копеек, плюс дармовое тепло для бани-прачечной. На 1937 год было запланирована постройка системы подземной газификации в посёлке Белово Кемеровской области для нужд Беловского цинкового комбината. После провала (буквально – провала грунта в Горловке) строительство в Белово законсервировали и более не возобновляли¹⁸⁰. Как видим, не Великая Отечественная остановила подземную газификацию, как любят утверждать сторонники ПГУ, а кондовая геология совместно с бдительным НКВД.

После Второй Мировой технологией занимались все, кому надо было распилить-освоить. Единственная модификация по сравнению с Горловкой – заменили центральную шахту и «огневой штрек» на направленное бурение с гидроразрывом. В США эксперименты проводились с 1947 по 1988 годы, во Франции, Испании и Бельгии – тоже до 1988, в Новой Зеландии попробовали в 1994. Китай пробует до сих пор (вроде бы целых 16 проектов), но без большого успеха. В 2015 году прошла информация, что удалые украинские парни собираются всего за \$3.6 млрд американских долларов заниматься «газификацией угля»¹⁸¹. Потом, правда, сообщили, что речь всё-таки идёт о газификации уже добытого на поверхность угля в китайских химических реакторах. КНР выделила 16 млн баксов, дальше произошёл скандал с поставками в Китай украинского зерна, и «газовый проект», похоже, прекратили.

Самая последняя афера по ПГУ развернулась в Австралии. Основанная в 1996 году компания «Linc Energy» собиралась осчастливить всех «зелёным газом». Первые работы начались в 1999 году в городке Чинчилла (штат Квинсленд). Далее компания действовала как типичная финансовая пирамида, покупая по дешёвке всякий энергетический хлам и громко заявляя в прессе о «технологических прорывах». В 2005 купили лицензию на установку эрзац-бензина в компании «Синтролеум» (последняя обанкротилась и продалась в 2014)¹⁸². В 2006 заключили договор с ФГУПТ «Институт горного дела имени А. А. Скочинского» в Люберцах. В 2007 построили биореактор на ~~гове~~-и

180 «Советская Сибирь», №136(5300), 1937 год.

181 <http://sdtec.lg.ua/?p=2599>

182 Журналисты с republic.ru спутали этот завод с установкой UCG. Впрочем, инвесторы тоже накололись.
https://republic.ru/world/gaz_iz_uglya_prorochestvo_lenina_i_vysokie_tekhnologii-1021528.xhtml

напках навозе и отходах сахарного производства.



Вместо работы в угольных забоях под землей – работа на поверхности. Правда, и людей надо меньше.
Завод ПГУ компании Linc Energy в Chinchilla, Австралия

В том же 2007 объявили об инвестициях в ПГУ в Узбекистане (поди проверь, что там за инвестиции). Уважаемые Хурсанов, Якубов и Раимжанов¹⁸³ заявляют, что экспериментальная газификация угля на Ангренском бурогольном¹⁸⁴ месторождении достигла апогея в далёком 1965 году, когда было выработано за год 1.4 млрд м³ газа. В 2010-х годах там же на Ангренском добывали в год 330-350 млн м³ светильного газа в год, притом газ состоял в основном из азота (50.1%) и углекислоты (22.1%). Ну да, мы же туда воздух закачиваем! Из горючих газов выделялись СО (4.6%), Н₂ (19.2%), СН₄ (3.0%) и Н₂S (0.5%). Энергетическая ценность 3.6 МДж/м³, то есть 340 млн м³ светильного газа эквивалентны 36 млн м³ «среднего» природного газа или примерно 30'000 toe. Ангренское месторождение обеспечивает 0.08% потребности Узбекистана в природном газе! Ни о каких иностранных инвестициях авторы не упоминают. Вероятно, далее подписания соглашения о намерениях «инвестиции» австралийских лохотронщиков не заходили.

Но вернёмся к нашим баранам, то есть «Linc». В 2009 компания купила

¹⁸³ Х.П.Хурсанов, С.И. Якубов, Б.Р.Раимжанов, «Состояние и перспективы подземной газификации угля в Узбекистане», «Горная книга», УДК 622.74:622.33, 2012 г, сс 173-176.

¹⁸⁴ В отчёте «ВР» 2016 года запасы угля в Узбекистане оценивались как 47 млн т антрацита и битуминозного угля и 1853 млн т суббитуминозного и лигнита. В отчёте 2017 года: 1375 млн т антрацита и битуминозного и полный ноль суббитуминозного и лигнита. Теперь всем очевидно, что Ангренское бурогольное месторождение никогда не существовало.

выработанные залежи угля в Монтане, Вайоминге и Северной Дакоте, затем внезапно в 2010 приобрела неподтверждённые запасы природного газа на Аляске и... 12% акций производителя щелочных батареек «*AFC Energy*», с которой вместе принялись строить установку для прямого преобразования светильного газа в электричество в той же Чинчилле. В 2011 приобретены три выработанных месторождения нефти от «*Ранчер Энерджи*» (она стала банкротом в 2009), 14 мелких месторождений от «*ERG*» (тоже банкрот – 2015 года), и месторождение Юмиат на Аляске от компании «*Ренессанс*». Последнее месторождение оказалось на последнем издыхании и было перепродано за бесценок компании «*Маламут*». В 2013 «*Linc*» внезапно объявило об открытии месторождения нефти на 200 млрд баррелей в Кубер-Педи (такая деревенька подземных хоббитов в штате Южная Австралия – кроме шуток; из-за жары дома строят как землянки).

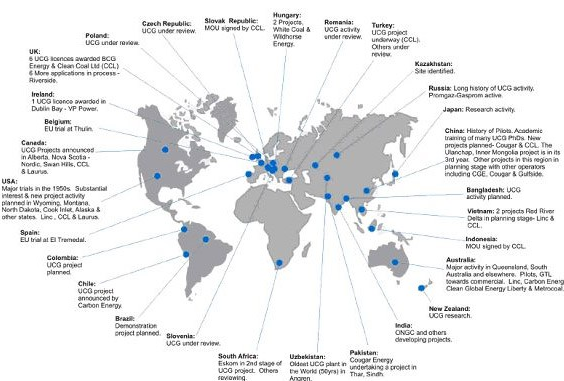
Когда после «открытия нефти» компания объявила, что уходит с австралийской биржи ASX на Сингапурскую. Конкретным пацанам всё стало ясно, и пузырь лопнул, оставив менеджеров пенсионных фондов с концом. А как же подземная газификация угля? Была! Чесна слово, была! В 2014 году правительство штата Квинсленд вынуждено было отселить более 80 фермерских семей, объявив 320 км² «временно непригодными для ведения сельского хозяйства» из-за загрязнения сероводородом и угарным газом. Подземные воды вероятно испорчены бензолом, как это получилось в 1980-х в экспериментировавшей с UCG американской Монтане. Министр охраны окружающей среды Стивен Майлс назвал всё это «крупнейшим загрязнением окружающей среды в истории штата Квинсленд»¹⁸⁵. Бонд, Питер Бонд – бывший глава бывшей «*Linc*» – куда-то подевался, унеся в клювике около ста миллионов капусты.

Рядом с «*Linc*» в Австралии трудилась не покладая рук компания Александра Ясона Элкса «*Моретон Ресорсес*», она же «*Пинакл Майнинг*», она же «*Кугар Энерджи*». Подземной газификацией угля занимались с размахом: были проекты и в Индии, и в Китае, и в Монголии, и в Пакистане, но ни один из них не осуществлён. А вот в австралийской деревеньке Кингарой (в том же многострадальном Квинсленде) успешно зажгли! Горело с марта по июль 2010 года. Потом в питьевой воде обнаружили бензол и толуол, местные власти проявили бдительность и скомандовали прекратить работы. «*Кугар Энерджи*» подала на местные власти в суд, суд продолжался до сентября 2013 и в заключение истца (не описка, у каторжников всё по понятиям – зря предъявы не кидай!) признали виновным в загрязнении окружающей среды. Элкс заплатил штраф 75'000 австралийских долларов да 40'000 судебных издержек, закрыл «*Кугар*» и удалился в свой нормальный бизнес «*MRI*», где занимается классической добычей угля и металлов. Александр Элкс известен как честный бизнесмен. Вероятно, «*Моретон Ресорсес*» просто пала жертвой ПР-компании «*Linc*», торопливо проинвестировав в туфту. Поставщик «проверенной годами технологии» – зарегистрированная в Монреале компания «*Ergo Exergy Technology*» – существует до сих пор, хотя Элкс пока безуспешно

¹⁸⁵ <https://www.theaustralian.com.au/life/weekend-australian-magazine/linc-energy-s-ucg-plant-at-chinchilla-a-smart-state-disaster/news-story/89096454ced60874c5d8e2e967fb9c1c>

с ней судится.

На картинке ниже представлены другие места с ~~высокой концентрацией~~ лохов проектов подземной газификации угля.



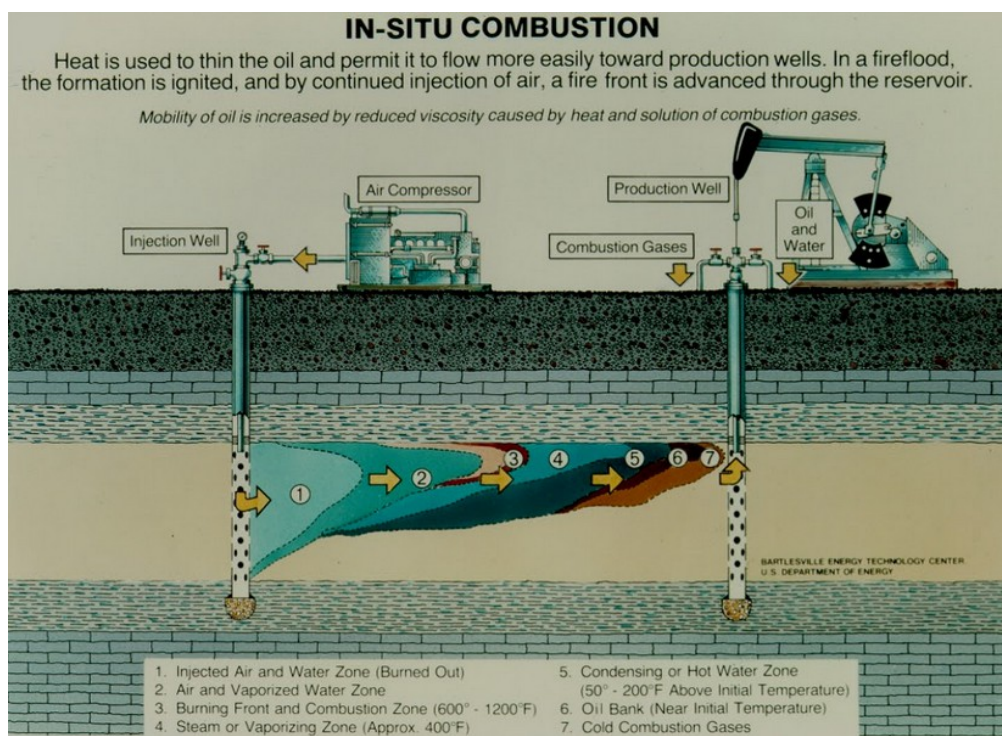
Кроме каменного угля на планете Земля есть ещё природный битум, он же «битуминозные угли», он же «нефтяные пески». По традиции компания «BP» добавляет битум к «жидкостям», хотя на поверхности это точно не жидкость. В естественной среде обитания природный битум представляет собой смесь очень тяжёлых и вязких углеводородов (5-25% по объёму) с песком. Запасы битума довольно значительны: до 100 млрд баррелей (технически извлекаемых) в Канаде и не менее 200 млрд баррелей в Венесуэле. Наверняка есть в России, немножко в КНР, ну и ещё по мелочи. Геологические запасы вообще огромны! В одной Канаде вероятно не менее 1.5 триллиона баррелей, то есть 200-220 млрд тонн. Проблема лишь в том, что очень трудно извлечь.

Технологий извлечения предложено масса, но кое-как работают пока лишь три.

Начнём, правда, с одной, которая точно не работает. Называлась она ТНАИ (Toe-to-Heel Air Injection, буквально «Закачка воздуха от пальцев к пятке», то есть от забоя горизонтальной скважины к точке отхода от вертикали). Разжижение битума подземным сжиганием – запатентованный компанией «Петробанк» метод для извлечения тяжёлой нефти или битума. Сначала породу разогревают паром. Затем вместо пара подаётся сжатый воздух, а нефть воспламеняют. Тепло от сгорающей нефти продолжает разогревать окружающие породы до 400-500°С, и ещё не сгоревшая нефть стекает к добывающим скважинам. Предполагалось, что газы от сгорания помогут выталкивать нефть, и метод позволит извлечь 80-90% геологических запасов (ещё 10% – потери от сгорания). Экспериментальные работы показали, что эффект от газов незначителен, а дренаж происходит в основном под действием силы тяжести. В целом метод оказался малоэффективен и значительно дороже альтернативного метода SAGD, о котором ниже. Производя менее 160 баррелей (около 25 тонн) синкруда в день, но с многомиллионным кредитом, «Петробанк» к 2014 году стояла на грани банкротства и была куплена компанией «Тачстоун». В 2016 специалисты «Тачстоун» плюнули на

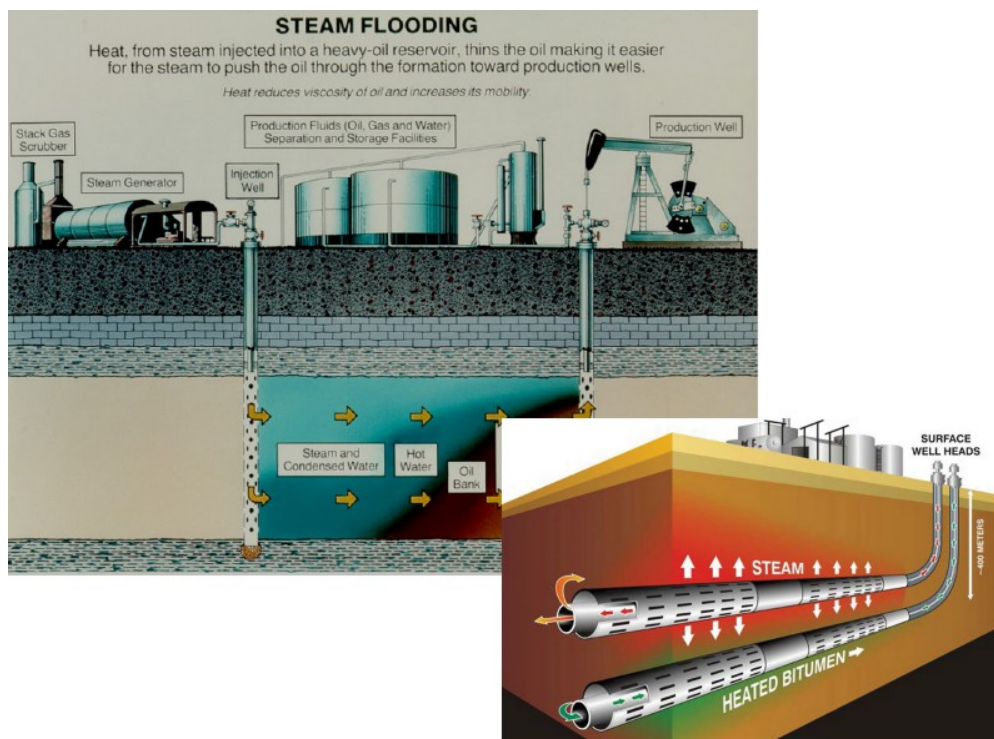
канадский битум и переключились на тайский(!) природный газ. Аббревиатура ТНАИ помогла, наверное. Заметим, что банкротство «Петробанк» произошло ещё до обрушения спотовой цены нефти в 2015 году.

Вообще метод разжижения нефти сжиганием почти столь же древний, как ПГУ. Вот старинная картинка – тут скважины ещё вертикальные:



Кое-как работающий метод называется SAGD – Steam-Assisted Gravity Drainage. Это дренаж битума или тяжёлой нефти после разжижения паром. Примерно как в методе ТНАИ бурятся две параллельные горизонтальные скважины, в нагнетательную подаётся перегретый пар. Расплавленный битум или парафинистая нефть стекают в добывающую скважину. В отличие от ТНАИ, воздух не закачивают и нефть не поджигают, а тупо продолжают качать пар. На картинке ниже – технология с вертикальными скважинам из старинного учебника и современная конфигурация скважин. Метод работает и в Канаде, и в Венесуэле, но невероятно дорогой. Полустационарные парогенераторы обычно потребляют попутный газ – если греть воду электричеством – вылетит в трубу. К сожалению, в битуминозных песках углеводороды, как выражаются геологи, «почти мёртвые», то есть попутного газа мало или совсем нет. Значит, к каждому парогенератору надо тащить местный газопровод и где-то искать «лишний» природный газ. В Канаде SAGD экономически эффективен, потому что лишний газ есть: и в самой Канаде, и в соседней Аляске, и в соседней Северной Дакоте. В Венесуэле пытались использовать для нагрева сам полученный битум, но выходило

плохо: парогенераторы на битуме массивные и, в отличие от газовых, требуют частого обслуживания.



Геологические параметры пласта вдоль скважины – чуть разные. Вместо того, чтобы равномерно греть породу, пар быстро находит «слабую точку» и проедает «свищ» между скважинами. Ваш парогенератор начинает тупо снабжать добычную скважину кипячёной водой вместо нефти (у воды вязкость намного ниже, чем у битума). КПД системы резко падает, а добыча битума прекращается. Существует много трюков, как «свищей» избежать, но взамен приходится ещё больше ограничивать суточный дебит¹⁸⁶.

Второй работающий метод извлечения природного битума – классика жанра. Технология битуминозных песков на реке Атабаске в Канаде мало отличается от добычи низкосортного угля. Сначала смелые лесорубы утилизируют растительность. Затем драглайном снимается несколько десятков метров почвы и пород, в том числе торфяники. В карьер спускают самоходные лопаты. Один черпак – 60 тонн. Породу везут самосвалом на обогащение. На вынутую экскаватором тонну породы приходится от 100 до 250 кг битума, при этом затрачивается 5-15 литров дизтоплива в двигателях машин и до 50 м³ природного газа на обогатительной фабрике; на выходе, кроме битума, – около тонны жидкого шлама и около 200 кг отработанного каустического раствора.

¹⁸⁶ Например, Jian-Yang Yuan, **Subcool, Fluid Productivity, and Liquid Level Above a SAGD Producer**, Journal of Canadian Petroleum Technology, Sep 2013

По окончании разработки тайга превращается в ядовитый лунный ландшафт, где лет пятьсот расти вообще ничего не будет. По доходности добыча битума открытым способом менее выгодна, чем разработка лигнита, однако существенно выгоднее, чем торф. На картинках – битуминозный карьер «Шелл» в Альберте и угольный разрез «Пибоди» в Австралии. Кто где – догадайтесь сами.



Наконец, третий работающий метод добычи природного битума: шахта! Мы уже упоминали уникальную нефтяную шахту в Яреге, где с глубины 220 метров сверхтяжёлую нефть (с консистенцией при 50°Ц – как у сметаны) добывают примерно теми же методами, что и каменный уголь. Коэффициент извлечения, натурально, близок к единице, но шахта – дело дорогое и медленное, да и не везде геологические условия благоприятствуют. Вероятность постройки двухкилометровых шахт для добычи остаточной нефти на Самотлоре мы обсуждали ранее, возвращаться не будем.

Сведём начальные экономически извлекаемые запасы «твёрдых» и «условно твёрдых» в таблицу:

Категория	Оценка 1Р, млрд toe	Оценка 2Р, млрд toe	Оценка 3Р, млрд toe
Каменный уголь (включая лигнит)	350 (Пазек, Крофт и Рутлидж)	720 («BP», 2018)	1'320 (включая уголь по технологии ПГУ)
Природный битум и сверхтяжёлая нефть	50 («BP», 2018)	100 (вероятностная оценка)	500 (оценка USGS)
Торф	несущественные	80 (только богатые торфяники)	780 (оценка USGS)
ВСЕГО	400	900	2'600

А пока предварительные итоги по твёрдым и «условно твёрдым» энергетическим полезным ископаемым:

- В 2012 мировая добыча угля неожиданно пошла к югу. Основной обвал случился в КНР, и сейчас к обвалу уже прикрутили политически-корректное объяснение про чистоту китайского воздуха. С Парижским соглашением 2016 года падение добычи в Китае и США точно не

связано, тем более что США уже и выйти успели. Скорее, падение добычи произошло в связи с выработкой месторождений с мелким залеганием угля. Шахтная (и в особенности шахтная слабо механизированная) добыча с больших глубин и бедных пластов, вероятно, не позволит наращивать производительность.

- Внезапно возродился интерес к древним и очень грязным технологиям добычи угля из низкопродуктивных пластов. Параллельно похожие грязные технологии стали применять на месторождениях сверхтяжёлой нефти и природного битума.
- В 2017 году «ВР» поменяла в отчёте сортность каменного угля. Низкокачественные сорта повсеместно были переписаны в высокосортные, однако при этом показатели энергетического качества угля непрерывно снижаются. В основных угледобывающих странах до $\frac{3}{4}$ подтверждённых запасов угля (по массе) – это суббитуминозный уголь и лигнит. В некоторых странах высокие ранги угля выработаны полностью.
- Со времён Хабберта оценка мировых извлекаемых запасов угля уменьшилась с 1'600 млрд toe до 600-800 млрд toe. Появились публикации с пессимистическими оценками извлекаемых запасов угля в 330-400 млрд toe. Эти оценки включают лишь месторождения, где возможна механизированная добыча. Кое-кто из западных геологов и даже некоторые китайские экономисты намекают, что на 200 лет угля никак не хватит, а хватит (при существующих аппетитах) лет на 30-70.
- Часто встречающиеся оценки «перспективных» запасов угля с порядком величин в несколько триллионов тонн и точностью 6-7 значащих цифр – не имеют под собой никаких научных оснований. Они основаны на простом арифметическом суммировании запасов с низкой вероятностью существования.
- Начальные технически извлекаемые запасы угля на Земле могут быть грубо оценены между 6'000 и 22'000 toe/км² (среднее значение 12'000 toe/км²). Объективно установленная максимальная плотность начальных экономически извлекаемых запасов – вероятнее всего в Великобритании: 67'000±7'000 toe/км². Новых открытий угольных месторождений следует ждать лишь в труднодоступных районах Сибири, Канады, Южной Америки и Африки. Удалённость этих месторождений от цивилизации не позволит наращивать добычу тем же темпом, с какой истощаются месторождения в «обжитых» регионах планеты.
- 70 лет – долгий срок. Паниковать ни к чему, но решать про реакторы-бридеры явно пора. Странно, что кроме России никто серьёзно этим не занимается.