



Глава 9. Прогнозы и ПИВО.

Теория простая. Каждый, кто пил пиво, знает: стакан сначала полный, а потом – пустой. Чем быстрее пьёшь – тем быстрее кончается.

– Колин Дж. Кемпбелл, нефтегеолог
«Конец дешёвой нефти»

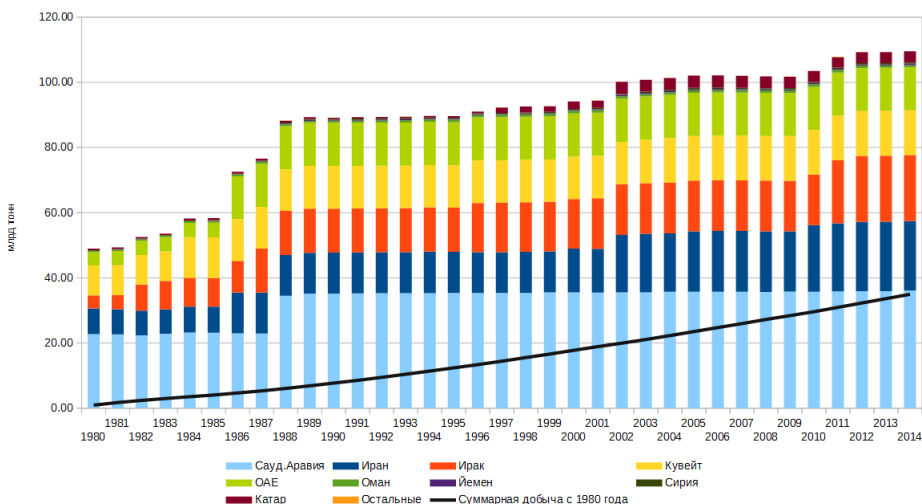
В предыдущей главе мы разобрались, как рассчитывается добыча и запасы одного месторождения. Теперь расширим те же

расчёты на ресурсную базу всей планеты.

Аналогия из эпитафия проста как грабли: надо знать, сколько у вас есть природных ресурсов, и с какой скоростью вы их используете. К сожалению, объёмы месторождений на планете Земля куда больше пивного стакана, а стенки – категорически непрозрачные.

В Интернете часто пишут, что статистика в отчётах «BP» и таблицах американской EIA – поддельная. Вряд ли речь идёт о международном заговоре злых нефтяников. Информацию о добыче, потреблении, запасах «British Petroleum» получает от правительств и частных компаний. Команды Джеймс-Бондов, чтобы вламываться в секретные сейфы китайской «CNOC», у отдела Экономических Исследований «BP» просто нет. Вот как выглядит исторический график подтверждённых запасов стран ОПЕК из отчёта 2015 года:

Подтверждённые запасы нефти и суммарная добыча
по данным BP 2015 г



Скачок запасов 1986-89 годов – это вообще не открытия новых

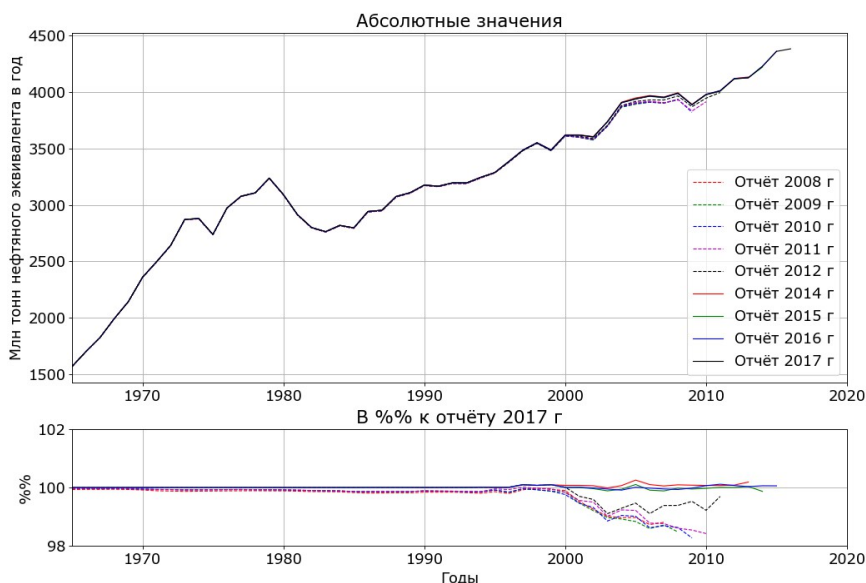
месторождений, а так называемая «гонка за квотами». На собрании ОПЕК решили, что квоты на добычу станут выдавать пропорционально подтверждённым запасам. Соответственно, подтверждённые стали немедленно расти (главным образом, за счёт оптимистичного увеличения КИН). В отличие от американской SEC, в ОПЕК нет аудиторов, и заявления правительств или национальных нефтяных компаний никто не проверяет.

«Сауди Арамко» рисует константу по подтверждённым запасам последние 27 лет, однако вроде как собирается продаваться. Компании продаются, когда месторождения либо ещё не бурились, либо уже почти выработаны. Продавать разбуренные месторождения с запасами – как жарить курицу, которая несёт золотые яйца Вексельберга.

Ясно, что цифрам подтверждённых запасов в отчётах «BP» верить надо очень осторожно⁹⁷. Но стоит ли доверять числам добычи? С какой точностью статистикам «BP» известна фактическая добыча нефти, газа, угля?

Сравним отчёты «BP». Автор накопил публикации компании, начиная с 2008 года. В моём распоряжении нет лишь числовой части отчёта за 2013 год: таблица с данными была резво удалена с сайта компании, а чуть ниже я выдвину предположение, почему. Отрисую сначала данные по добыче нефти (программа \Chapter 09\Test_01_BP_Oil_Data.py):

Мировая добыча нефти и жидкостей по отчётам "BP" 2008-2017 гг

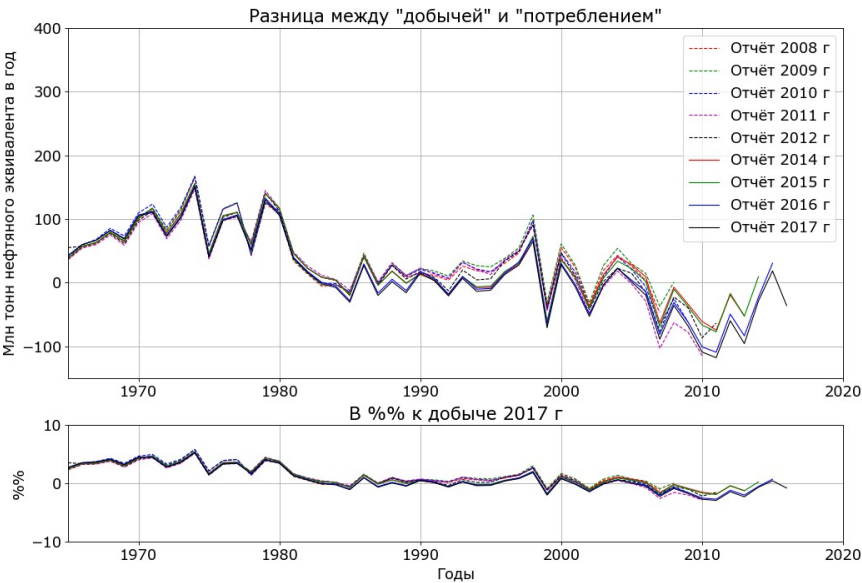


Отчёты 2008-2012 годов шли нос-к-носу, но с 2013 «BP» принялась

⁹⁷ Во время пресс-конференции по «Энергетическому отчёту BP» 13 июля 2017 г. главный экономист «BP» Спенсер Дэйл на вопрос инвестора о надёжности данных по запасам нефти и газа на Ближнем Востоке заявил, что числовым данным по запасам государственных компаний «доверять лучше с оглядкой».

корректировать исторические данные по добыче. Общая коррекция данных за 2010 год превысила 1.5%, или 60-70 млн тонн. После 2015 ситуация «выправилась», и коррекции исторических данных снова не превышают долей процента. Кроме добычи, «BP» выдаёт также данные по потреблению нефти. Не будем повторять график уважаемой компании, а отрисуем программой \Chapter 09\Test_02_BP_Oil_Data.py разницу между «добычей» и «потреблением»:

Мировое потребление нефти и жидкостей по отчётам "BP" 2008-2017 гг



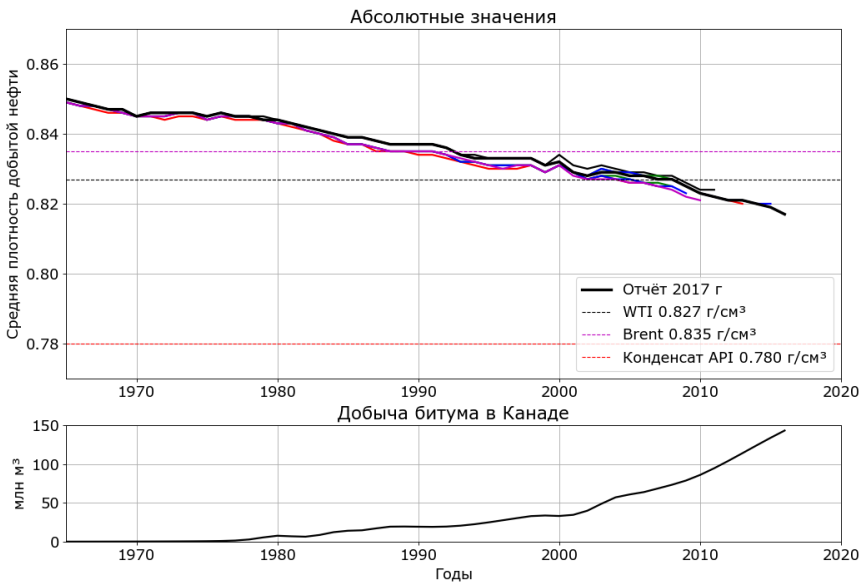
Наблюдаем интересную картину. До 1985 года производство по данным «BP» систематически превышало потребление на примерно 100 млн тонн в год, то есть 5% нефти с месторождений не доходило до потребителя. После 2000 годовое потребление в среднем превышает добычу на 50-70 млн тонн ежегодно. Если считать, что разница компенсировалась стратегическими хранилищами, к 2000 году в хранилищах имелся бы резерв около 1'400 млн тонн, к 2015 сократившийся до 780 млн. Семьсот восемьдесят миллионов тонн – очень много. США этого количества хватило бы на 11 месяцев. Из открытых источников, весь стратегический резерв США – самый крупный в мире – составляет «всего» 727 млн баррелей, то есть около 100 млн тонн. «Википедия» указывает, что совокупные стратегические резервы во всех странах мира – около 550 млн тонн, из которых 190 млн контролируются правительствами, а остальные – частными компаниями. Естественно, 1'400 млн тонн никто не накапливал, а большую часть разницы между производством и потреблением следует считать статистической погрешностью в данных отчёта.

Нефть в отчёте «BP» приводится как по массе – в миллионах тонн в год, так и по объёму – в тысячах баррелей в сутки. Это очень удачно: позволяет

прикинуть среднюю плотность добываемой нефти и жидкостей, что мы и сделаем программой \Chapter 09\Test_03_BP_Oil_Data.py Плотность считаем формулой:

$$\rho = \frac{1000 \cdot M [\text{млн т в год}]}{0.159 \cdot V [\text{тыс баррелей в день}] \cdot N [\text{дней в году}]}$$

Средняя плотность нефти и жидкостей по отчётам "BP" 2008-2017 гг



«Среднемировой баррель» нефти легчает; не помогают даже «нефтяные пески» Канады с их тяжёлым битумом⁹⁸. В 1965 году усреднённый баррель весил 135 кг, а в 2016 – всего 130. Теплотворная способность горючего измеряется не от объёма, а от массы – спросите любого химика. Значит, баррель образца 2016 года при сгорании выделит на 4% меньше энергии, чем баррель из 1965.

Отчего легчает наша нефть? Креативная статистика для тупых инвесторов! К «классической» сырой нефти ещё в шестидесятые начали добавлять «лицензионный» газовый конденсат, то есть жидкости, выпавшие из природного газа в сепараторах на месторождении (в Техасе говорят: «на лицензии», откуда и название). Ничего крамольного в этом не было. Конденсат – ценное нефтехимическое сырьё, хотя баррель конденсата и даёт несколько меньше горючего, чем баррель «Средней Западной» WTI. Плохо то, что вслед за конденсатом «нефтью» стали называть вещества, вообще непригодные для производства жидкого моторного топлива, например, пентан, отделяемый от природного газа не на месторождении, а на нефтехимическом

⁹⁸ Кроме Канады, природный битум добывают в небольших количествах в России (шахта Ярега в Коми добывает по 6 млн т сверхтяжёлой нефти в год), в Китае и в Венесуэле; эти объёмы добычи пока на два порядка ниже канадских, поэтому в расчётах ими можно пренебречь.

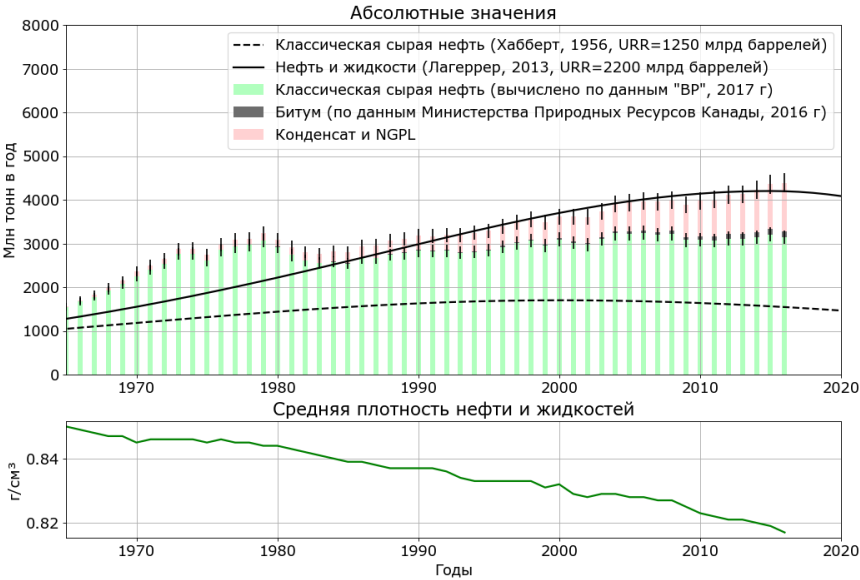
заводе. Сейчас уже в годовых отчётах некоторых компаний и бутан считают дважды: сначала как «кубические футы газа», а затем как «баррели нефти», простите, «жидкостей». Самое интересное, для налоговой инспекции двойной счёт отчего-то не применяют, считая «широкие фракции природного газа» (Natural Gas Production Liquids, NGPL) и автомобильный пропан-бутан (Other liquids) всё-таки «газом».

Знаменитая «сланцевая нефть» США на 90% состоит из газового конденсата и NGPL, а «нефтью» её называли, чтобы получать разрешения на факельное сжигание газа там, куда газовую трубу прокладывать нерентабельно.

По данным «BP» можно грубо прикинуть количество конденсата и NGPL в мировой добыче (программа \Chapter 09\Test_04_BP_Oil_Data.py):

$$\begin{aligned}
 V &= V_{crude} + V_{gc} + V_{tar} \\
 M &= M_{crude} + \rho_{gc} V_{gc} + \rho_{tar} V_{tar} \\
 M_{crude} &= \frac{\left(1 - \frac{\rho_{gc}}{\rho}\right) M - (\rho_{tar} - \rho_{gc}) V_{tar}}{\left(1 - \frac{\rho_{gc}}{\rho_{crude}}\right)} \tag{9.1}
 \end{aligned}$$

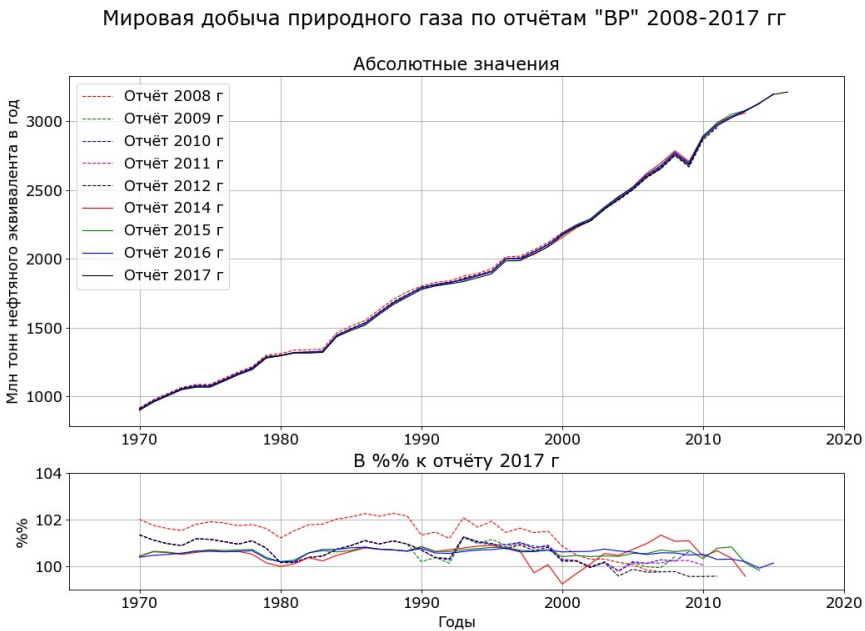
Оценка добычи сырой нефти по отчётам "BP" 2008-2017 гг



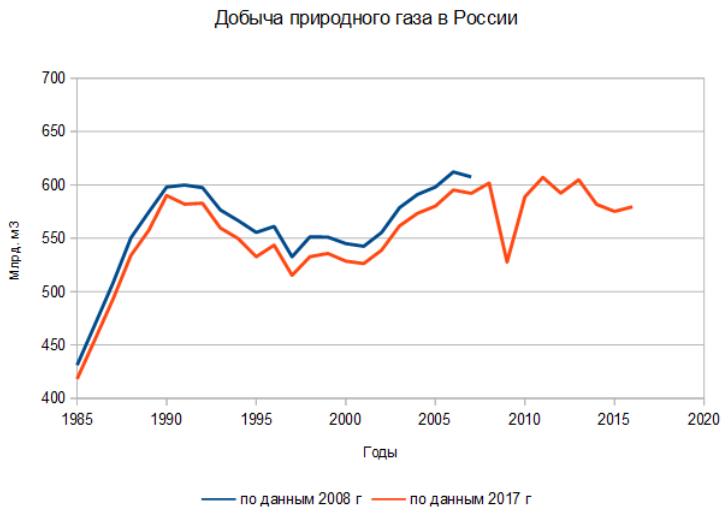
С 2005 года прироста «классической нефти» нет, а всё увеличение добычи происходит за счёт газового конденсата, в том числе «сланцевой нефти» США, да битума канадской Атабаски.

В далёком 1956 году М.К.Хабберт оценивал исключительно запасы «сырой нефти» – конденсат тогда в статистике вообще не учитывался. Хабберт получил оценку мировых запасов 1'250 млрд баррелей, или 170 ± 40 млрд тонн, в том числе 120 ± 35 млрд тонн в ещё не найденных (на то время) месторождениях. Знаменитый график «Пика нефти» был рассчитан как один из вероятных сценариев, при условии абсолютной величины пика в 1% от общих извлекаемых запасов, или 1.7 млрд тонн в год в 2000 году. По факту мировой пик добычи «классической» сырой нефти наступил между 2000 и 2010 годами (скорее всего, в конце 2005), на дебите 3.2 млрд тонн, а к 2016 году общая накопленная добыча составила 166 ± 8 млрд тонн. Те, кто заявляет: «Хабберт наверняка ошибся», явно имеют машину времени. А если без шуток, точность «оценки Хабберта» достоверно определится лишь к 2030-2035 году. Пока мы можем лишь с некоторой надеждой заявлять, что нижняя оценка Хабберта, к счастью, не реализовалась, а извлекаемые запасы «классической чёрной нефти» вероятно ближе к верхней оценке в 210 млрд тонн (из которых 80% уже исчерпано).

Перейдём к данным «BP» по природному газу (программа \Chapter 09\Test_05_BP_Gas_Data.py):

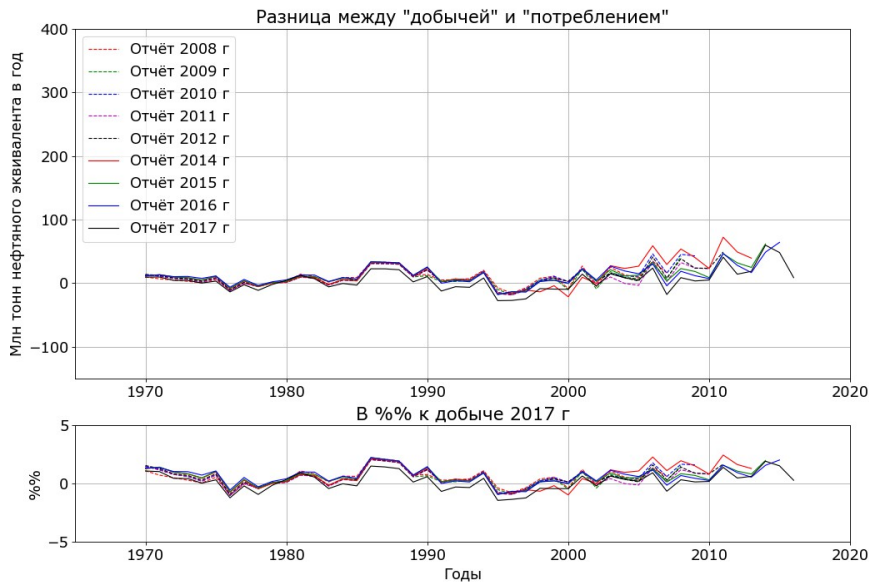


Как и с нефтью, данные по газу в отчётах последних трёх лет были подвергнуты жестокой корректировке. Особенно досталось отчёту 2008 г, где почти все значения были уменьшены на 2%. Крупнейший производитель газа, российский «Газпром», внезапно изменил исторические значения добычи, уменьшив все числа на 2-4%! Общественность так и не поняла, что было: то ли желание замаскировать катастрофическое падение добычи в 2009 г, то ли



Аналогично нефти, сравним данные по добыче и потреблению природного газа программой `\Chapter 09\Test_06_BP_Gas_Data.py`

Мировое потребление природного газа по отчётам "BP" 2008-2017 гг

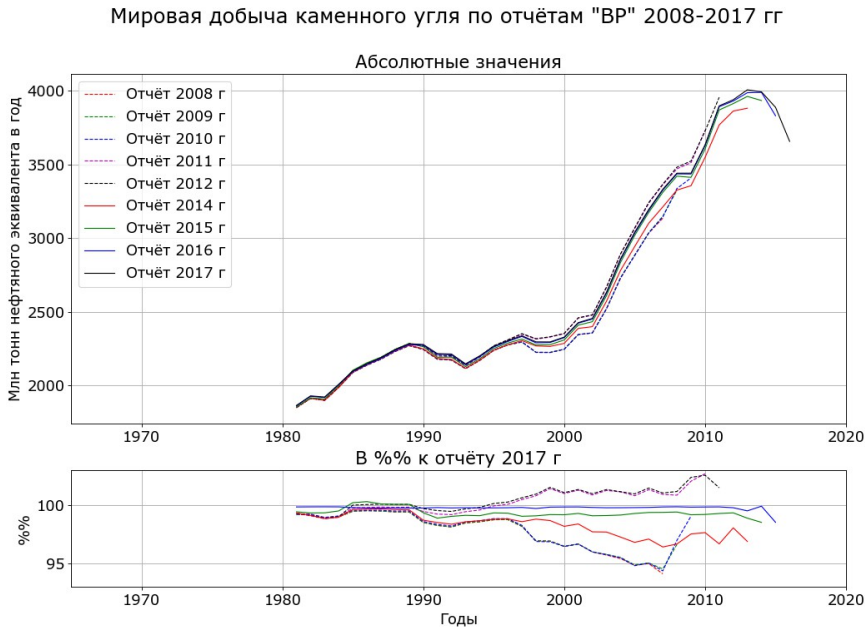


Систематическая погрешность между добычей и потреблением – около 2%. Некоторые страны имеют хранилища природного газа, но в отличие от нефти

⁹⁹ В блоге проскочило предположение, что изменение данных «Газпром» связано с переводом российских «стандартных условий» (1 атмосфера, 20°C) в «международные» (1 атмосфера, 15°C). Но при таком переводе изменение составило бы около $5/(273+20) = 1.7\%$. К тому же, «BP» работает в России с конца девяностых и была партнёром российской «ТНК». В «BP» знают разницу между российским ГОСТ и международными «стандартными условиями»!

эти запасы не стратегические, а сезонные (например летом закачиваем, зимой сжигаем). Ясно, что 2% следует считать статистической погрешностью отчёта.

Наихудшее положение с точностью данных в отчёте «BP» – по каменному углю. В понятие «каменный уголь» компания включает энергетический бурый уголь и торф. Программа \Chapter 09\Test_07_BP_Coal_Data.py

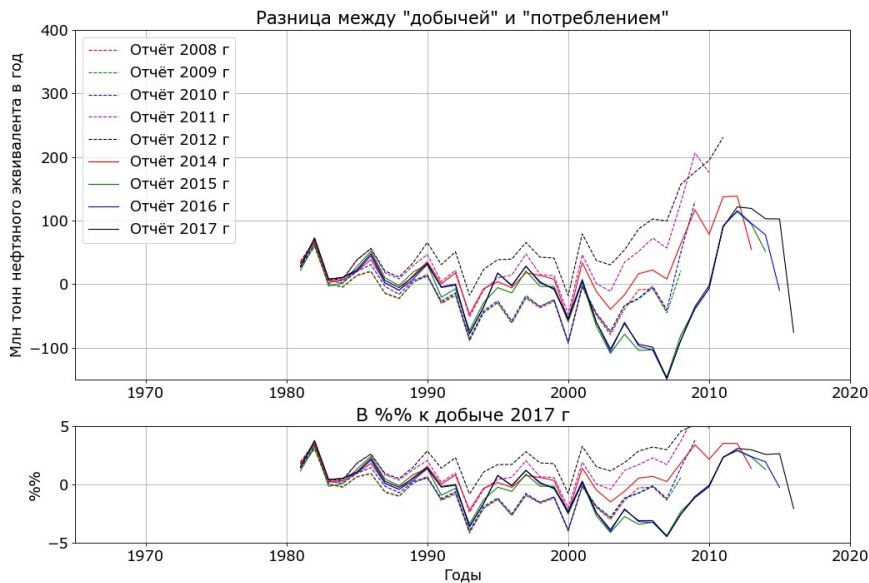


Возможно, перед нами пик мировой добычи угля! Если снижение в США с 1'063 млн тонн (597 млн toe) в 2008 г до 661 млн т в 2016 году обусловлено в основном сокращением реального сектора американской экономики и переводом генерирующих мощностей на подешевевший природный газ, то в Китае обвальное падение добычи с 3'974 млн тонн (1'895 млн toe) в 2013 до 3'411 млн т в 2016 году – в среднем по 5% снижения в год – вряд ли можно считать намеренным. В США добыча снижалась на фоне одновременного снижения потребления и импорта энергоресурсов. В КНР снижение добычи собственной нефти на 7% сопровождалось увеличением потребления на 3%, увеличение добычи газа на 1.5% – увеличением потребления на 8%, снижение добычи угля на 9% – снижением потребления всего на 1%. В 2016 году КНР импортировала 65% потреблённой нефти, 35% природного газа, 11% каменного угля.

КНР не публикует официальных данных по запасам полезных ископаемых. Можно высказать осторожное предположение, что Китай в 2013 году прошёл пик добычи угля на своей территории, и далее добыча будет снижаться подобно Великобритании: в среднем по 3-5% за год, вплоть до полного прекращения промышленной разработки угля в пятидесятых или шестидесятых годах этого столетия.

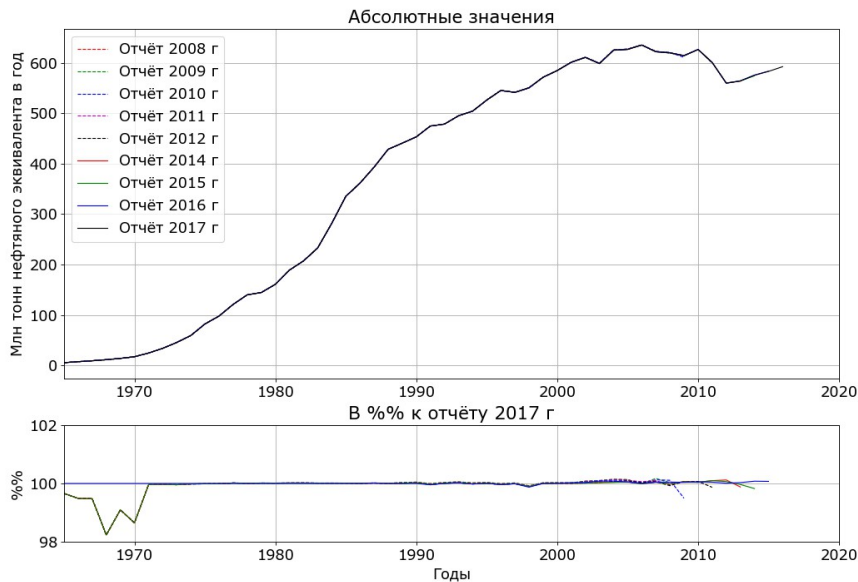
Программа \Chapter 09\Test_08_BP_Coal_Data.py сравнивает таблицы «BP» по добыче и потреблению угля.

Мировое потребление каменного угля по отчётам "BP" 2008-2017 гг



Наблюдаем разброс данных $\pm 4\%$, что и следует считать статистической надёжностью данных по углю.

Мировое производство ядерной энергии по отчётам "BP" 2008-2017 гг

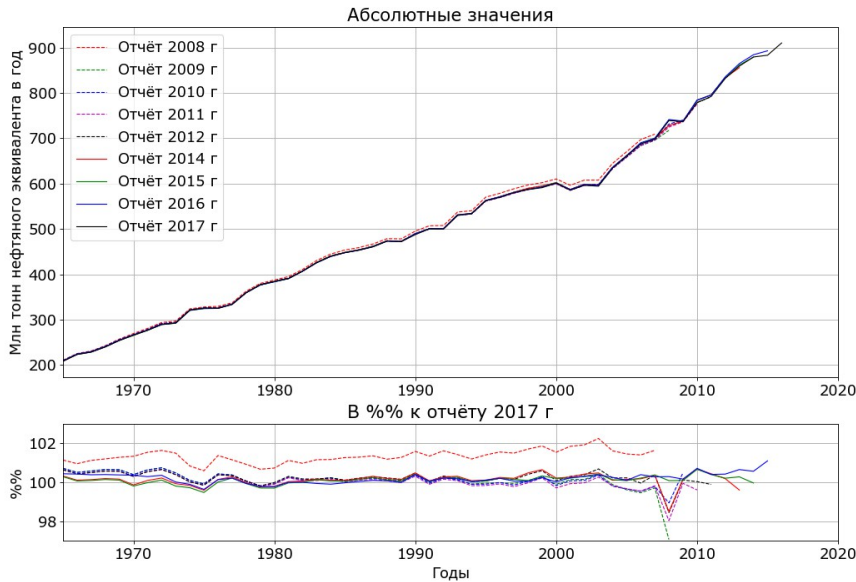


Для полноты картины приведём данные «BP» по ядерной энергии, гидроэнергии и «прочим возобновляемым». В последние «BP» включает солнечную энергию, ветрогенераторы, приливную и геотермальную энергию,

сжигание биомассы¹⁰⁰.

С точностью данных (программа \Chapter 09\Test_09_BP_Nuclear_Data.py) по ядерной энергии в отчёте «BP» дело обстоит великолепно. Кроме «BP», за ядерными станциями глядят в оба представители МАГАТЭ, да и количество ядерных держав в мире не так уж велико. Несколько хуже с гидроэнергетикой (программа \Chapter 09\Test_10_BP_Hydro_Data.py): разброс в данных около $\pm 2\%$.

Мировое производство гидроэнергии по отчётам "BP" 2008-2017 гг



Наконец, данные по «прочим возобновляемым» (программа \Chapter 09\Test_11_BP_Renewables_Data.py) публикуются лишь с 2011 года (частично) и с 2014 года полностью. Статистический разброс составляет около $\pm 5\%$, при этом прошлые отчёты систематически корректируют в сторону уменьшения!

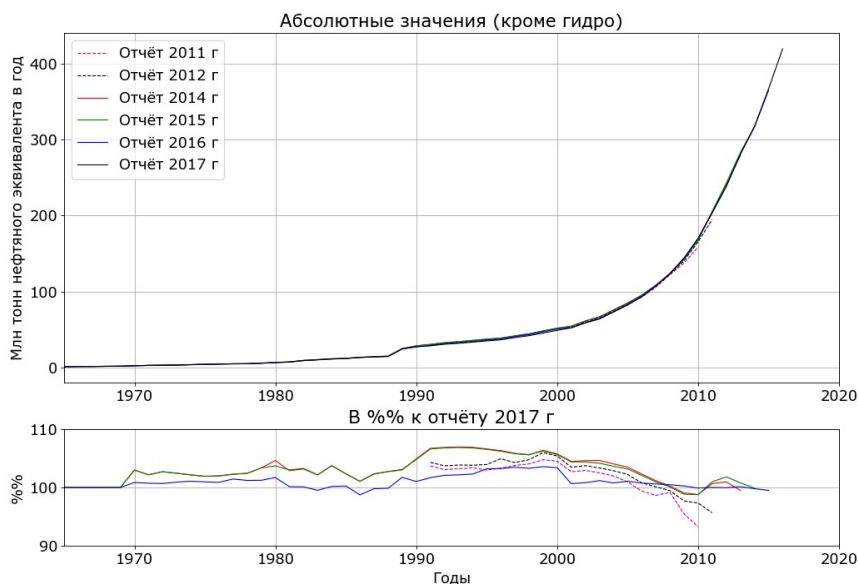
Глядя на график производства «прочих возобновляемых», оптимисты видят стремительно растущую экспоненту, а пессимисты смотрят на вертикальный масштаб. Действительно, на графиках добычи нефти, угля, газа – по вертикали порядка 4'000 млн тое. У гидроэнергии – четвертушка: 1'000 млн, у ядерной – пятая часть: 700 млн. А весь график «прочих возобновляемых» уместается в диапазон 0-450 млн тое, то есть 10% от нефтяного, газового или угольного.

Как видим, общее производство «прочих возобновляемых» в 2016 году не превышает 1/3 от статистической погрешности данных по добыче нефти, газа и каменного угля. Общее потребление «энергии низкой энтропии» на душу населения за последние 5 лет – чуть больше 2.3 кВт мгновенной мощности, из

100 При пересчёте выработанной электроэнергии в тое «BP» вводит КПД тепловых станций 30%. Если же переводить по тепловой, значения ВИЭ в отчёте следует делить на 3.

которых наше теперешнее Солнце, в виде гидроэнергии, ветра и солнечного излучения, поставляет не более 10%, а около 2.0 кВт – это энергия того же Солнца, накопленная за миллионы лет в виде энергетических полезных ископаемых: нефти, угля и газа. Глобальный пик добычи энергии из ископаемого топлива (торфа, угля, нефти и природного газа) прошёл в 2012 году: 1'996 Вт на душу населения. В том же 2012 был и пик по сумме ископаемого и ядерного топлива: 2'098 Вт. По сумме ископаемого, ядерного топлива и всех ВИЭ – пик в 2015 году, 2'306 Вт. В 2016 году производство энергии на душу населения по данным «BP» снизилось на 0.3%, от пика, правда это значение находится в пределах статистической погрешности.

Мировое производство возобновляемой энергии по отчётам "BP" 2008-2017 гг



Чтобы не возникало лишних иллюзий, нарисует сравнение всех видов доступной человечеству низкоэнтропийной энергии по данным «BP» с указанием вычисленной нами статистической погрешности программой \Chapter 09\Test_12_BP_Energy_Uncertainty_Data.py

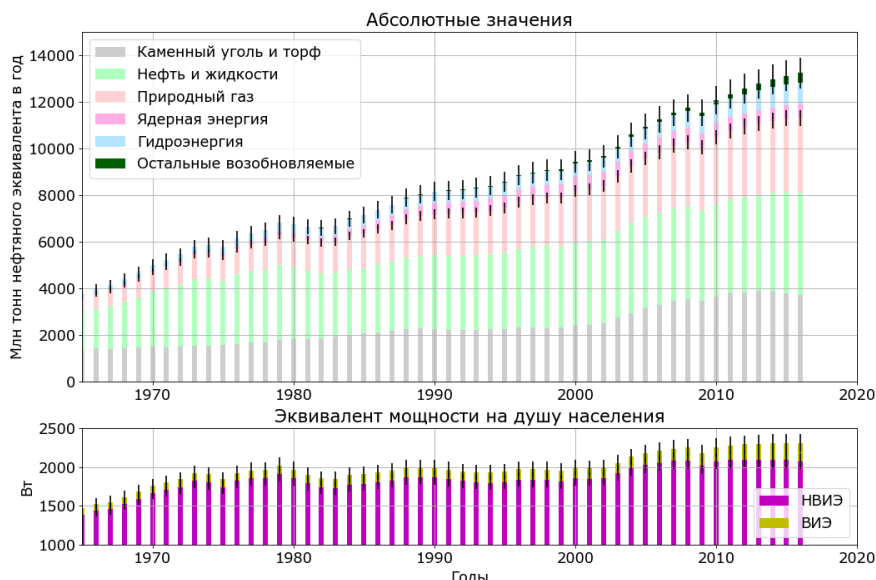
Часто встречается аналогия, что нефть, уголь, газ – «рабы современного человека». Мол, раб может поставлять мгновенную мощность, скажем, 75 Вт, значит на каждого жителя Земли приходится по 25-30 «рабов». По моему мнению, аналогия неверная и даже вредная. Чтобы разобраться досконально, задайте себе три вопроса:

1. Сколько рабов должно «крутить ручку» (без угля и прочих ископаемых источников энергии), чтобы выплавлять 1 тонну стали в сутки? Дневная выплавка на планете Земля – около 4.4 млн т.
2. Сколько нужно солнечных батарей (на любителя: ветряков), чтобы выделять 1 тонну алюминия в сутки? Дневная переработка планеты

(включая вторсырьё) – около 0.16 млн т.

3. Какова мощность гидростанции, чтобы из атмосферного воздуха и речной воды (на любителя: из свежего сена) делать ежедневно 1 тонну полиуретана? В день население Земли потребляет 1.0 млн тонн различной пластмассы.

Мировое производство энергии по отчёту "BP" 2017 г

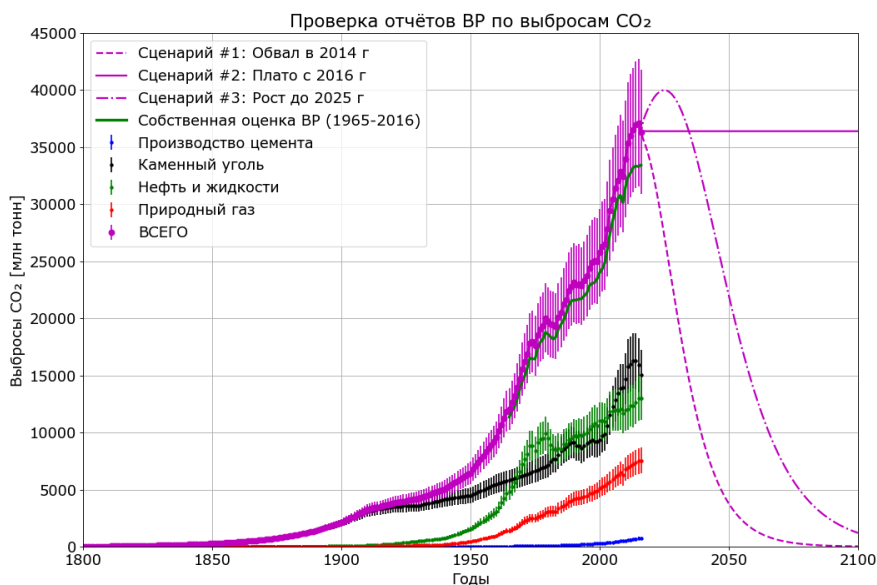


Предупреждаю сразу: все задачки с подвохом, а количество «рабов» заключённых в 11.5 млрд тое нефти, газа и угля внезапно измеряется многими сотнями миллиардов. На каждого жителя Земли – от Билла Гейтса до последнего индийского нищего – приходится в среднем до тысячи «углеводородных рабов», и никакие ветряки их полностью не заменят.

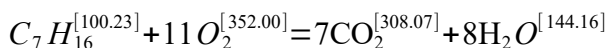
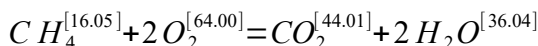
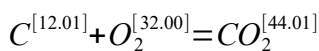
О возобновляемых источниках энергии подробно будет в отдельной главе, а пока попробуем откалибровать энергетические отчёты «BP» по независимым данным. Специально для климатически озабоченных заранее поясню: я не буду делать никаких выводов о глобальном потеплении или похолодании. Просто хочу убедиться, что правительства и нацкомпании не сильно врут уважаемой «British Petroleum».

На картинке ниже (программа \Chapter 09\Test_13_CO2.py) представлен расчёт для периода 1965-2016 на основании данных «BP» и EIA о добыче угля, нефти и газа. Начиная с 2017 года представлены три сценария:

1. «Обвал» индустрии в 2015 году (о котором нам пока не сообщают);
2. Выход на «полочку» потребления природных углеводородов;
3. «Углеродная экономика» продолжает расти до 2025 года.



Основное использование угля, нефти и природного газа на планете Земля – в топку! При сгорании выделяется углекислый газ. Сколько конкретно? Напишем химические формулы:



При сгорании 1 т графита, метана и гептана выделяется соответственно 3.66, 2.74 и 3.08 т углекислого газа. На тонну реального каменного угля приходится несколько меньше, чем у графита, так как кроме углерода в угле есть несгораемые остатки (зола). На тонну природного газа – несколько больше, чем у метана, так как присутствуют более длинные алканы. Наконец, тонна нефти может давать несколько больше или несколько меньше, чем тонна гептана, в зависимости от состава на конкретном месторождении.

По энергии, однако, тонна угля грубо эквивалентна 0.48 тонны нефти, а тонна метана при стандартных условиях – это 1'525 м³ газа, то есть 1.37 тонны нефтяного эквивалента. Отсюда, на тонну нефтяного эквивалента сгоревшего угля, газа и нефти должно выделяться около 7.63, 2.00 и 3.08 тонны CO₂ соответственно. С другой стороны, уголь, нефть и газ не обязательно сжигают. Часть углерода из угля уходит в производство стали, часть углерода из газа – в пластмассы и прочую нефтехимию, а значит в атмосферу (по крайней мере сразу) не попадает. «ВР» в своих расчётах использовала коэффициенты 3.96,

2.35 и 3.07 тонн на toe.¹⁰¹ Ещё одним антропогенным источником CO₂ на планете является производство цемента, с выбросами газа до 735 млн тонн в 2015 году.

По данным той же «BP», в 2016 году человечество потребило 3'732 млн toe угля, 3'204 млн toe газа и 4'418 млн тонн нефти. Если всё это сжечь с нашими коэффициентами 7.63, 2.00 и 3.08, получится 48.5 млрд тонн углекислоты, с коэффициентами «BP» – 35.9 млрд тонн, а сама «BP» отапортовала в том же году 33.4 млрд тонн. Как видим, неопределённость в расчётах довольно высока, а выбросы мы знаем не лучше, чем с точностью $\pm 15\%$. Примем в качестве оценки по порядку величин 36 ± 4 млрд тонн углекислого газа¹⁰².

На середину 2017 года в атмосфере 406 ± 4 ppmv (частей на миллион объёмных) CO₂, а масса атмосферы $5.1480 \cdot 10^{15}$ тонн. Чтобы определить вес углекислоты в атмосфере, надо перевести объёмные единицы в массовые, поделив на средний молярный вес воздуха 28.97 г/моль и умножив на вес CO₂ 44.01 г/моль. Итого: $406 \cdot 10^{-6} \cdot 44.01 / 28.97 \cdot 5.1480 \cdot 10^{15} = 3.2 \cdot 10^{12}$ тонн. Значит, в 2016 году человечество выбросило в атмосферу $3.6 \cdot 10^{10} / 3.2 \cdot 10^{12} = 1.1 \pm 0.2\%$ от массы атмосферной углекислоты¹⁰³ или дополнительные 4.6 ppmv.

Куда углекислый газ девается из атмосферы? Постоянная секвестрация обеспечивается двумя геологическими процессами:

1. Захоронением биомассы с последующим превращением в кероген, далее в уголь, нефть или природный газ. Фактически, процесс обратный сжиганию ископаемого топлива;
2. Биогенным и хемогенным осаждением в виде карбонатов, например тех же коралловых рифов или панцирей фитопланктона. Самый известный карбонат? Известняк! Осаждение карбонатов есть процесс, приблизительно обратный производству цемента.

Есть ещё несколько способов надолго затолкать углекислый газ в земную кору, например заморозить в ледники, но в текущий геологический период они существенной роли не играют.

А всякие леса, джунгли, бескрайние колхозные поля и прочие «лёгкие планеты»? Они-то как раз углекислый газ никуда не заталкивают, а просто гоняют по бесконечному кругу. Если по-простому: выросла травка, пришёл барашек, скушал, выдохнул. Человек съел барашка, тоже выдохнул. Что

101 Methodology for calculating CO₂ emissions from energy use. <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-carbon-emissions-methodology.pdf> В 2017 году компания стала учитывать, что часть углерода использована для химического синтеза и в виде CO₂ в атмосферу не попадает.

102 Все вулканы мира производят ежегодно не более 0.32 млрд тонн: <https://www.skepticalscience.com/volcanoes-and-global-warming.htm> Конечно, год на год не приходится, и в иные годы вулканическая активность может быть сравнима с выбросами человека. Однако, такие супер-извержения бывают всего лишь несколько раз в столетие.

103 Международные организации приводят CO₂ как «выброс углерода», базируясь на идее, что надо учитывать метан и прочие газы, содержащие углерод. Однако наша калибровка именно по углекислоте. Для перевода тонн CO₂ в «тонны углерода» делите на коэффициент $2 \cdot 16 / 12.01 + 1 = 3.66$

вылезло из противоположного отверстия – переработали бактерии. Всё. Океанская вода тоже хранилищем в геологическом смысле не является, а просто огромный аккумулятор – забирает и отдаёт в зависимости от температуры и текущей концентрации в воздухе. Стрелевые сосны секвестрируют CO₂ примерно на 150 лет (время долгое, но не геологическое): сто лет растут до небес, а потом в брёвнах избушки-пятистенки, что обсуждали в прошлой главе. Избушка сгнила от старости, либо – не дай Бог – сгорела, углекислота вернулась в атмосферу.

Если бы геологические процессы секвестрации не работали совсем, с 1800 года в атмосферу добавилось бы от сжигания угля, нефти и газа $1.62 \pm 0.25 \cdot 10^{12}$ тонн углекислоты, то есть $1.62 \pm 0.25 \cdot 10^{12} \cdot 0.658 / 5.1480 \cdot 10^{15} = 207 \pm 30$ ppmv. Концентрация углекислоты до индустриальной эпохи по данным гляциологов составляла 280 ± 15 ppmv, значит сегодня обсерватория на Мауна Лоа¹⁰⁴ показывала бы нам 487 ± 45 ppmv, на 81 больше, чем на самом деле.

К счастью, образование керогена и известняка продолжается, и земная кора отбирает углекислоту у атмосферы. Чтобы посчитать тренд, применим дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = q(t) + \delta \left(1 - \frac{Q(t)}{Q_0} \right) \quad Q(0) = Q_0 \quad \{9.2\}$$

Здесь:

Q(t) – концентрация вещества от времени

Q₀ – равновесная (начальная) концентрация

q(t) – поступление (или убыль) вещества от времени

δ – скорость химической реакции от концентрации

Если концентрация в точности равна равновесной, то вся прибавка (либо убыль) зависит от q(t). Если концентрация Q(t) выше равновесной, система поглощает / разлагает вещество, и наоборот, если концентрация Q(t) ниже равновесной, система выделяет или синтезирует вещество. Функция q(t) задаётся численно – это наш график антропогенных выбросов углекислоты.

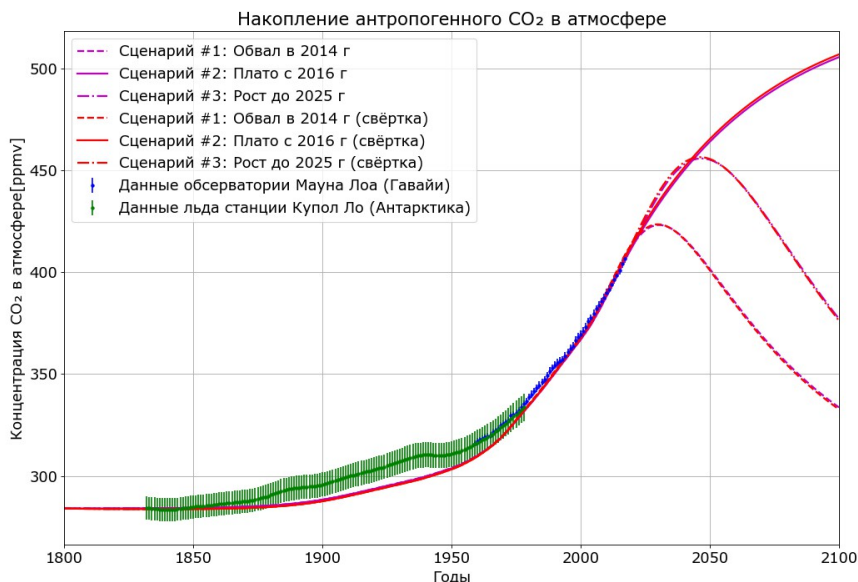
Решение также можно найти в виде функции свёртки (чисто-аналитическим оно не является, так как функция q(t) – произвольная дискретная):

$$Q(t) = Q_0 + q(t) * e^{-\sigma t} = Q_0 + \int_{-\infty}^{+\infty} q(\tau) e^{-\sigma(t-\tau)} d\tau \quad \{9.3\}$$

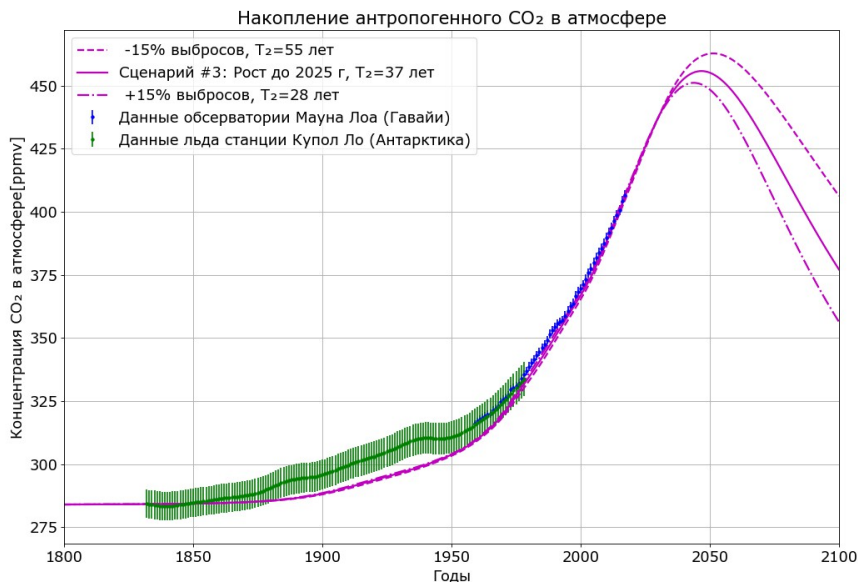
$$\sigma = \frac{\delta}{Q_0}$$

104 В реальном времени: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

Программа \Chapter 09\Test_14_CO2.py:



Что если мы ошиблись, и выбросы CO₂ на 15% выше или ниже? Программа \Chapter 09\Test_15_CO2.py моделирует неопределённость для сценария 3:



Хорошие новости: время двукратного снижения «лишнего» CO₂ в атмосфере – от 28 до 55 лет (наиболее вероятное 37 лет), что примерно соответствует работе фитопланктона и коралловых. Всю углекислоту учли парой простых

уравнений; корреляция с химией и с данными по добыче – вполне удовлетворительная. Инопланетяне углекислый газ не воруют, но и свой к нам не сбрасывают. Интересно относительное повышение CO_2 по сравнению с моделью в период 1875-1960. Вероятно, совпадает с активной распашкой прерий в США и целины в Казахстане, хотя и трудно сказать однозначно.

В сценарии 3 концентрация углекислоты в атмосфере не превысит 460 ppm, что на 30 ppm ниже, чем в базовом сценарии Й. Рандерса из главы 7. Увеличение концентрации CO_2 в атмосфере, вне всякого сомнения, – дело человеческой промышленности, однако влияние человека на глобальный климат, вероятно, преувеличено.

А вот новости плохие: на основании исключительно наблюдений CO_2 различить три сценария («обвал», «полочка», или «дальнейший рост») и определить, куда пошла планета после GFC 2008 года, к сожалению, пока невозможно. Мы узнаем это достоверно лишь лет через десять-пятнадцать.

Итак, о добыче углеводородов с 1965 по 2014 годы уважаемая *«Бритиш Петролеум»* нам сильно не врёт. Бумага всё стерпит, но одновременно подделывать данные измерения углекислоты в десятках международных обсерваторий, в том числе на нашей станции *«Восток»* в Антарктиде – требуются герои покруче Джеймс-Бондов. Это вам не в сейфах *«Сауди Арамко»* шуровать.

Количество отпитого из нашей пивной кружки мы кое-как знаем.

Теперь возьмём одно из крупнейших месторождений – шестое в мире по извлекаемым запасам нефти – настоящее нефтяное сокровище: Самотлор, открытое в 1965 году. Посмотрим, можно ли определить извлекаемые запасы исключительно по кривой добычи, а потом сравним с официальной оценкой компании.

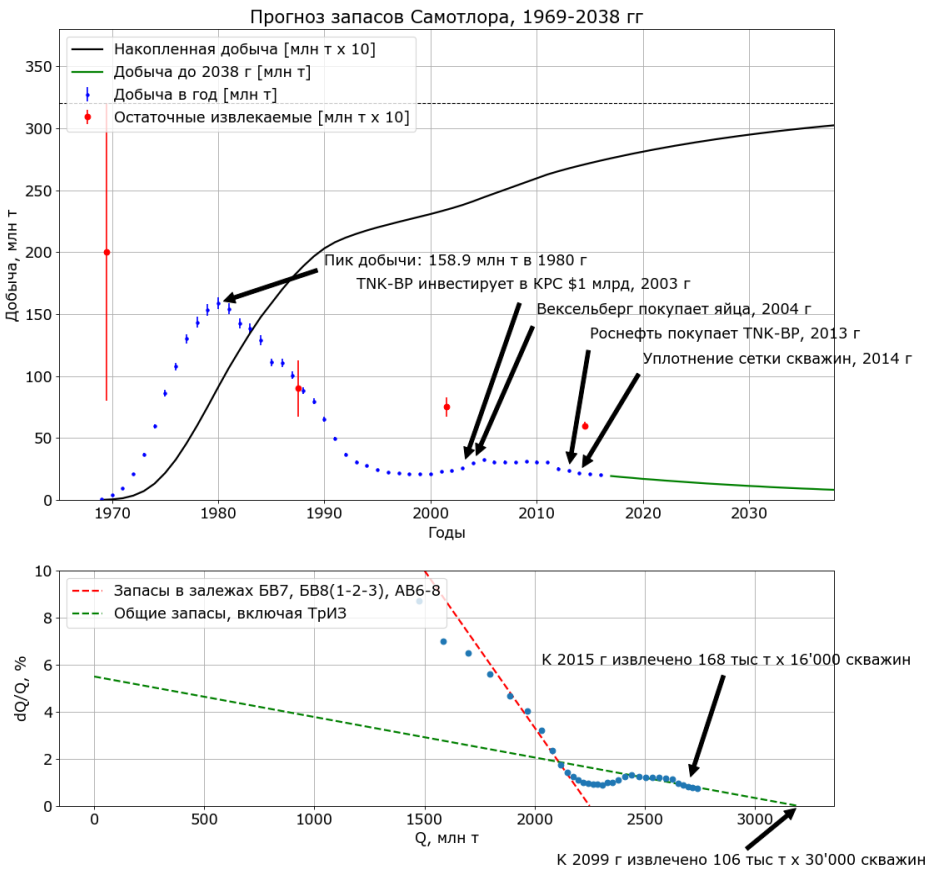
Заявления об открытии месторождений можно почерпнуть из газет, а в некоторых странах есть и доступные для публики официальные данные по геологическим и извлекаемым запасам. Конечно, далеко не во всех газетных статьях численные значения отражены правдиво, а в правительственной информации могут быть и весьма консервативные – заниженные – оценки. В некоторых странах, например в России, данные по запасам и добыче на конкретных месторождениях рассекречивают спустя десятилетия. Наконец, есть страны, в том числе Саудовская Аравия и КНР, где все данные по индивидуальным месторождениям со времён Второй Мировой считаются государственной тайной, за разглашение – расстрел (или декапитация, если вам больше нравится) по приговору закрытого суда.

На *«Весёлом»* отчёты мы несли в американскую геологическую службу USGS, а также в Комиссию по Ценным Бумагам SEC. В СССР похожие документы отправляли в Комиссию по Запасам. Если бы СССР стоял по сию пору, точные

числа из тех отчётов мы бы узнали году примерно в 2065. Однако с Самотлором нам повезло. В 2003 была сформирована, а в 2013 году – продана «Роснефти» компания «ТНК-ВР», и смелые британские учёные информацию слили газете «Нью-Йорк Таймс»¹⁰⁵.

Год отчёта	Геологические (балансовые) запасы STOIP, млн т	КИН _t	Остаточные извлекаемые запасы URR-Q, млн т	Накопленная добыча Q, млн т
1969	3'600	56%	2'000	0
1987	5'200	52%	900	1'800
2002	6'100	51%	750	2'350
2015	7'100	46%	600	2'700

Данные отрисованы программой \Chapter 09\Test_16_Samotlor.py :



По форме график добычи несильно отличается от разработки гипотетического

105 Kramer, Andrew E. "Mapmakers and Mythmakers: Russian Disinformation Practices Obscure Even Today's Oil Fields," *New York Times* (1 December 2005)

месторождения «*Весёлое*», что мы обсуждали в предыдущей главе, только на «*Весёлом*» у нас было 2 млрд баррелей геологических запасов, а в реальном Самотлоре – больше: 53-55 млрд баррелей. Соответственно и по вертикальной оси теперь отложены не баррели в сутки, а миллионы тонн в год. Желающие могут подогнать к данным Вейбуллиану по формуле {8.3}.

Добычное бурение на Самотлоре началось в 1969 году; до этого бурили разведочные скважины. Процесс, ничем не отличающийся от нашего гипотетического «*Весёлого*», только масштаб побольше. За четыре года геологические запасы C_1 были доведены с «чегой-то есть» до 3'600 млн тонн, из которых 2'000 признали технически извлекаемыми. По мере бурения добычных скважин, категории залежей менялись на А и В, а числа уточнялись. В 1981 г Самотлор отчитался о миллиарде тонн накопленной добычи, и по имеющейся в распоряжении геологов (на тот момент) информации, в залежах месторождения оставалось не менее 1'700 млн т.

В олимпиадном 1980 году добыча Самотлора достигла пика 158.9 млн тонн – и немедленно покатила под горку¹⁰⁶. В начале 90-х добыча вышла на «колеблющуюся полочку» 25-30 млн т в год. И старые, и новые хозяева пытались вносить оживляж. Программа капремонта скважин (КРС), в том числе с использованием гидроразрывов, началась ещё в 1995. В 2003 подсоединилась «*ВР*», инвестировавшая в КРС и дополнительное бурение \$1 млрд. Характерно, что один из совладельцев – Виктор Вексельберг – одновременно инвестировал десятую часть этой суммы не в парней из «*Шлюмберже*», а в пасхальные яички от «*Фаберже*». В реальность восстановления добычи до уровня 100 млн т в год Вексельберг вряд ли верил: удалось удержать «полочку», и достаточно. Ещё до покупки «*TNK-ВР*» «*Роснефтью*» в 2013 году добыча сошла с «полочки» и принялась падать по 7-8% ежегодно.

В 2014 году дочкой «*Роснефти*» – АО «*Самотлорнефтегаз*» – начата программа уплотнения сетки: более 570 новых скважин за 3 года. Успехи впечатляют. Удалось снизить спад добычи «всего» до 4% в год¹⁰⁷.

Это совершенно не значит, что Самотлор следует списывать со счетов. С годовым дебитом 18-20 млн тонн, даже при цене нефти \$50 за баррель, АО «*Самотлорнефтегаз*» добывает нефти на \$5 млрд ежегодно, а задолженность по кредитам – около \$13.7 млрд. Лицензии на добычу – до 2038 года, есть план продления жизни месторождения до 2099. К тому времени месторождение будет выглядеть примерно как показано на картинке ниже. На снимке – Охинское нефтяное месторождение на Сахалине, где нефть открыли в 1880 году, а крупномасштабная разработка начата японцами в 1920. Накренившаяся насос-качалка и «пьяные столбы» – не ошибка фотографа. Болото же, а зимы суровые!

¹⁰⁶ Для желающих – взгляните снова на графики добычи угля и атлантической трески в стоявшей, как известно, на угле и несомненно окружённой рыбой Великобритании – страницы 159-160.

¹⁰⁷ Интервью гендиректора «*Самотлорнефтегаз*» Валентина Мамаева агентству «*Рейтер*». Скачано 21 июля 2017 с <https://ru.investing.com/news/>



Площадь Самотлора относительно невелика: 1'751 км². На каждом квадратном километре, таким образом, находилось изначально 1'850 тыс тонн извлекаемых запасов. Всего к 2015 году пробурено почти 16 тыс скважин; каждая добыла в среднем 168'000 т нефти. Сетка скважин довольно плотная – по 9-10 скважин на км².

Как по данным ежегодной добычи прикинуть общие извлекаемые запасы: URR? Если спад добычи следует кривой Хабберта {8.6}, то:

$$Q(t) = \text{Sig}(t) = \frac{URR}{1 + e^{-\sigma(t-t_0)}}$$

$$Q'(t) = \text{Hubb}(t) = \sigma \frac{URR}{[1 + e^{-\sigma(t-t_0)}]^2} (1 + e^{-\sigma(t-t_0)} - 1)$$

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{\sigma}{URR} (URR - Q) \quad \{9.4\}$$

То есть касательная к графику пересекает ноль в точке (URR, 0). Метод носит имя «линеаризация Хабберта», хотя придумал его не Хабберт, а последователи.

Кривая добычи Самотлора – не хаббертиана, а решений два: 2'300 и 3'200 млн тонн накопленной добычи. Это оттого, что в пределах месторождения не одна залежь, а много. Условно их можно разделить на две группы. В первую входит «кормилица наша» – залежь пласта БВ8¹⁻²⁻³ мегионской свиты нижнемелового периода¹⁰⁸. К ней примыкают, хотя и не на всей площади

¹⁰⁸ Чтобы не было разночтений, номенклатура геологических объектов по отчёту «Самотлорнефтегазгеология» 1987 г. Для не-геологов: в нефтянке середины прошлого века пласты обозначались буквами и цифрами, нумерация по алфавиту и сверху вниз. Когда после уточнения геологического строения надо было разбить, скажем, пласт БВ7 на два, им давали имена БВ7¹ и БВ7², чтобы не переименовывать нижележащие. Надстрочные индексы изображались поворотом барабана

месторождения, БВ7¹⁻² и АВ6-8. В этой группе содержалось более 1'900 млн т извлекаемых запасов. В прошедшем времени – оттого что залежи практически выработаны. На некоторых скважинах на тонну добытой нефти приходится 25 кубометров воды. Вылить загрязнённую нефтью воду нельзя, оттого приходится тратить энергию, закачивая обратно в пласт.

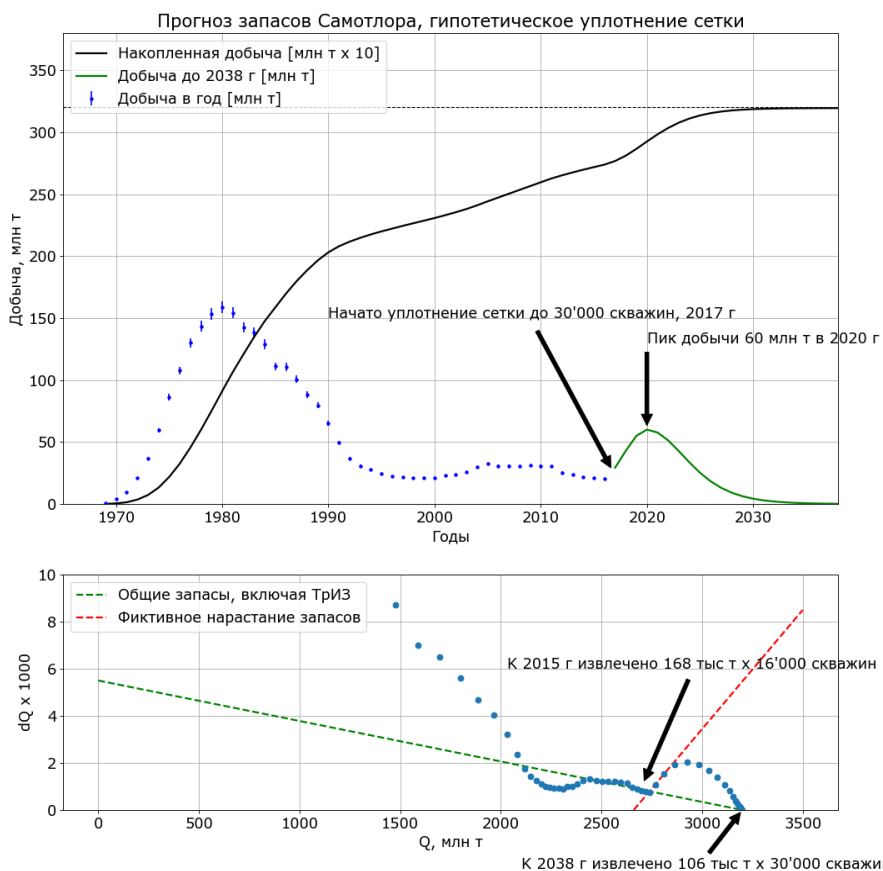
Сейчас добыча Самотлора ведётся в основном из второй группы залежей, и там-то полный зоопарк. Границы месторождения расширяли малопродуктивными залежами класса «Дядя Джо», точно так же, как мы с вами делали на гипотетическом «Весёлом». Самый крупный объект в пределах собственно Самотлора – залежь пласта АВ1¹⁻², с тонкими глинистыми пропластками – так называемый «рябчик» – содержит основную остаточную нефть, которая по российским инструкциям проходит как ТриЗ – Трудно Извлекаемые Запасы. Новая скважина без гидроразрыва даёт тут 3-5 тонн нефти в сутки, но при этом вместе с нефтью на поверхности сразу же появляется до 25% воды. После гидроразрыва из скважины можно получить и 50 тонн в сутки, однако гидроразрывы часто уходят в обводнённые пласты, и тогда скважина становится бесполезна, ну разве что под закачку воды поставят. Именно из «рябчика» на Самотлоре добывают до 50% сегодняшней нефти. Естественно, ни одна пробуренная в АВ1 скважина 168 тыс т не даст; в лучшем случае речь идёт о 10-15 тыс тонн при времени жизни скважины 20-25 лет. Однако много скважин умирает, не дотянув до этого почтенного возраста. Из-за этого показатель **«средняя добыча на скважину»** падает.

У линеаризации Хабберта есть огромный недостаток: он работает только при снижении добычи. Предположим, что в 2017 году «Самотлорнефтегаз» получил кредит \$60 млрд, привёз буровые и пробурил за три года 13-14 тыс новых скважин, уплотнив сетку примерно вдвое. Предположим также, что проблеме утилизации огромного количества загрязнённой воды как-то порешали и ударным трудом довели добычу до 60 млн т в 2020 году. Хотя такой сценарий экономически несостоятелен (денег не дадут), технически ничего невозможного в нём нет: платите реально большие бабки, буровики понаедут. Программа \Chapter 09\Test_17_Samotlor.py .

На кривой dQ/Q появляется скачок, и какое-то время возникает впечатление, что запасы месторождения возрастают бесконечно. После 2025 года геология всё расставит на свои места, но лет 8-10 можно втирать инвесторам. Как результат, в 2038 году продлевать лицензию не потребуется, а в среднем каждая из 30'000 скважин добудет те же 106 тыс т нефти.

После извлечения «извлекаемых» запасов, под землёй останутся «неизвлекаемые». На Самотлоре числа огромны: до 4'000 млн т. Технически извлечь их можно, и человечество уже таковыми технологиями располагает. Да простят мне коллеги-нефтяники «научную фантастику низкого прицела» в стиле А.П.Казанцева.

пишущей машинки «на щелчок». Однако, крутить туда-сюда было неудобно, оттого появлялись имена типа БВ71 и БВ72.



На поверхности (за бюджетные деньги) построены ядерные реакторы. Электрическая энергия идёт в шахты. Там, на глубине 2-3 км, бесплатно (коммунизм же!) трудятся наши герои-шахтёры. Порода вынимают угольными комбайнами, мельчат, промывают раствором каустической соды, жидкость откачивают в отстойники. Нефть отслаивается, а каустик – качаем обратно под землю. Отработанным иламом можно заполнять старые выработки. Каждый из элементов технологии ещё в XX веке вполне освоен и есть примеры применения. Золотые шахты в ЮАР – уже куда глубже 3 км. Отмывка нефти – канадские «нефтяные пески». Про ядерные реакторы и угольные комбайны и говорить нечего. Одна проблема: не хватает пока героев!

Подкрутив колёсико фантастической реальности, заменяем ядерные реакторы на термоядерные, или реакторы-бридеры, героев – на роботов. Хотите антиутопию? Вместо героев – рабы, вместо комбайна – отбойный молоток. Или лучше так. Физик Пупкин изобретает генератор торсионного поля. Установка размером с пачку сигарет работает от трёх пальчиковых батареек. Приехав на месторождение и хорошо прицелившись, жмёт кнопка... и

торсионное поле выключает смачивание! Нефть бодро отрывается от стенок пор и несётся к ближайшей скважине: «Бери меня, человек! Я твоя навеки».

Вы думаете, я просто ёрничаю? Ничего подобного. Прогуглите: «микрелептонные генераторы, нефтедобыча». А если серьёзно, то технологии **интенсификации** в современной нефтянке условно делятся на пять групп:

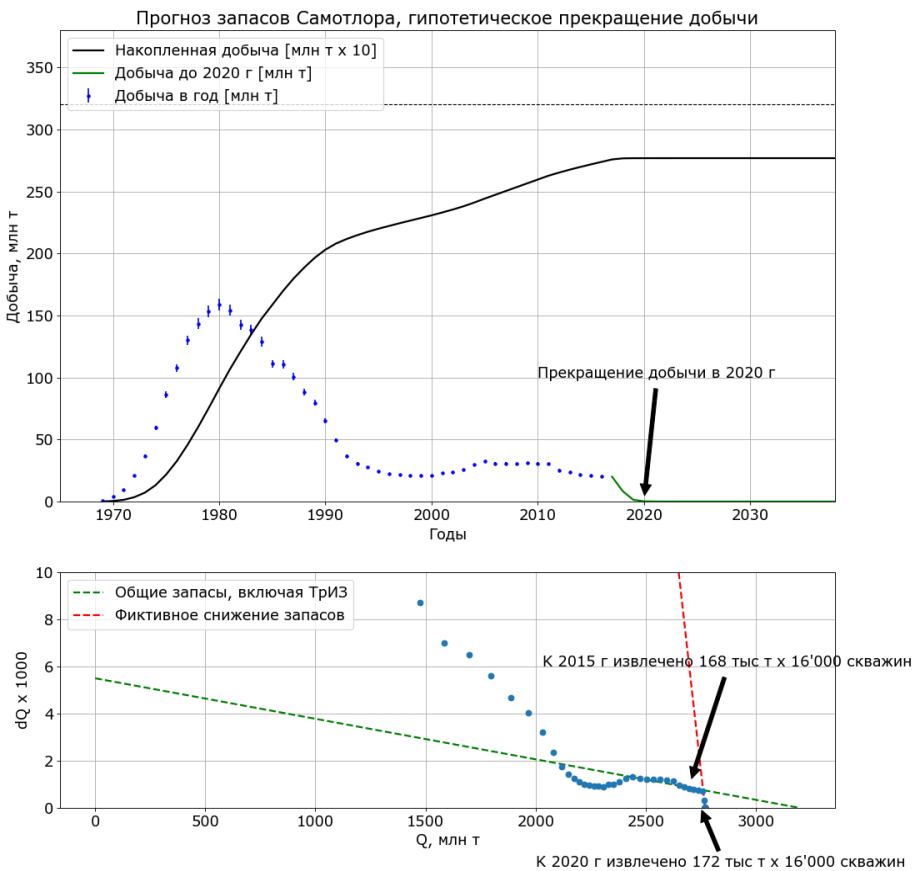
1. Увеличивающие КИН_г. Открытые карьеры, как на разработке битуминозных песков к Канаде. Подземное расплавление нефти паром – Steam Assisted Gravity Drainage (SAGD) – для сверхтяжёлых нефтей. Закачка поверхностно-активных веществ (ПАВ) или уголекислоты – это уже не десятки процентов, а лишь 1-2% КИН; хотя на огромном Самотлоре даже 1% – это 70 млн т дополнительной нефти. Такие технологии неизбежно затрачивают огромное количество энергии, сравнимое с энергией получаемой нефти: карьерному самосвалу требуется куда больше, чем насосу-качалке, ПАВ делают из природного газа, и так далее.
2. Увеличивающие дебит из скважин, возможно при некотором снижении КИН_г. Добудем извлекаемые на сто лет раньше, но кое-что придётся в земле оставить. Типичный представитель – гидроразрыв пласта. Сюда же относя: кислотная обработка (особенно в карбонатных породах), различные методы поддержания пластового давления и т. п. Энергии и материалов тратится меньше, чем в первой группе, однако тоже много.
3. Увеличивающие время продуктивной работы скважины за счёт сокращения износа оборудования и удлинения периода между КРС. Здесь и антикоррозийные покрытия, и анодная защита, и фильтры от выноса песка, и ультразвуковые излучатели для срыва парафиновых бляшек с насосно-компрессорных труб, и более живучие центробежные погружные насосы – всего не перечислить.
4. Удешевление и ускорение бурения и КРС. Увеличение точности и информативности геологоразведки. Любые разумные предложения, как сэкономить бабки и энергию, или не бурить лишних скважин – принимаются!
5. Наконец, шаманские танцы с бубном. Эти «технологии» хотя и стоят приличных денег, энергии потребляют совсем немного. Скважинам они почти не вредят, правда и на дебит не влияют. Зато начальник может отчитаться о внедрении новой техники, офисный планктон на презентации отдохнёт душой да премии себе выпишет, ну и проф. Выбегалло будет сыт-одет-обут и в шоколаде. Про такие технологии было в главе 6, хотя все разоблачать – никакой книги не хватит.

Так что, когда сообщают, что «существующими технологиями из Самотлора можно извлечь ещё 3 млрд тонн нефти», вам не врут совершенно. Забывают

только разъяснить затраты: «За каждую тонну в сутки будут горбиться одиннадцать эков в шахте. При этом, из каждой тонны добытой нефти шахта будет потреблять на собственные нужды 900 кг».

Ясно, что никаких эков и шахт на Самотлоре не будет; добывать будут и дальше скважинами и насосами (качалками или погружными, неважно). Можно предложить и альтернативный сценарий: в «Роснефти» кто-то большой решил, что надо оставить 600 млн тонн нефти в «рябчике» будущим поколениям. Поднял трубу, по-геологически вякнул. По столу кулаком – брякнул: «Увольняйте шесть тысяч народу, закрывайте скважины, мать-перемать!» Экономически, опять же, такое произойти никак не может, но технически – запросто. Прекращать добычу проще, чем поддерживать.

Программа \Chapter 09\Test_18_Samotlor.py



В этом случае посчитанные по методу «линеаризации Хабберта» извлекаемые запасы дадут всего 2'770 млн тонн при $KIN_3=39\%$. Это не означает, естественно, что под землёй не осталось ни капли извлекаемой нефти. Сам Хабберт от огульного использования линеаризации предостерегал! Писал

всегда и везде, что критериям, кроме хаббертианы, удовлетворяет ещё масса функций, а также любая сумма этих функций.

Заметим, что в случае прекращения разработки месторождения одна скважина в среднем извлекает не 106 тыс тонн, как в примере выше, а 172 тыс тонн. Умножение какой-то средней производительности на будущее количество производственных единиц – типичная ошибка, которую делают перцы и классические экономисты.

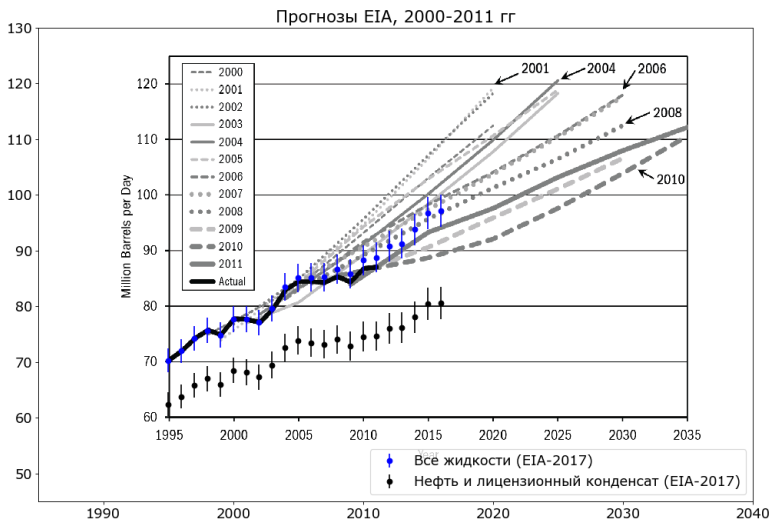
Задачка из начальной школы. «Сборщик Василий собрал за 4 часа 9 велосипедов. Сколько велосипедов соберут Василий, Пётр и Сергей за полную рабочую смену 8 часов?»

Чего тут считать? Один сборщик делает за смену $9 \times 2 = 18$ велосипедов, $18 \times 3 = 54$.

Вы не дочитали условия задачи, дорогой экономист! «Известно, что Василий после обеда обычно употребляет, и ему уже не до велосипедов. Пётр – не сборщик, а поросёнок. Он хороший парень, притом не пьёт ни грамма, но копытцами собирать велосипеды несручно». Внезапно, от посчитанных вами полусотни велосипедов осталось 27.

Вы опять не дочитали, дорогой перец! «Сергей – ударник коммунистического капиталистического труда. Он за смену собирает 150% нормы». Ага, значит, 36. Правильный ответ?

«Но на завод привезли только 33 передних колеса». И так далее. Проблема не так тривиальна, как может показаться, а производство зависит от массы параметров. Рассмотрим прогнозы мировой добычи нефти, которые выдаёт американская EIA. Программа \Chapter 09\Test_19_Prediction_EIA.py



С 2000 по 2007 год прогнозы выдавались оптимистические, и каждый год добыча до них не доставала. В 2009 году на волне глобального экономического кризиса наступил перелом сознания, и прогнозы пошли в пессимистическую сторону. Самый плохой прогноз был в 2010, но к счастью, не оправдался. Самый точный прогноз пока – 2008 года, то есть в год кризиса.

Тем не менее, он предсказывает 110 млн баррелей в сутки к 2028 году, и это вряд ли сбудется. Экономисты EIA никогда это официально не признают, но просто анализируя данные, можно прикинуть алгоритм подобных прогнозов:

1. На основании данных по потреблению нефти и данных ООН по численности населения Земли посчитать среднее производство нефти на душу населения за последние 3 года.
2. Домножить полученное значение на прогноз ООН по населению и пересчитать в баррели в сутки.
3. PROFIT.

Так как население Земли последние 25 лет растёт линейно по 83 млн человек в год, то и прогноз получается всегда приблизительно линейный, а наклон графика отражает экономическую активность землян за предыдущие три года. В этом смысле «реалисты» из EIA ничем не отличаются от «оптимистов» из IEA¹⁰⁹. Последние в прогнозе 2000 года утверждали, что в 2016 году из планеты удастся выкачать 5400 млн тонн нефти, то есть те же 110 млн баррелей в сутки.

Когда экономисты говорят, мол сторонники Пика Нефти «постоянно ошибаются в прогнозах», следует перцев самих ткнуть носом в прогнозы бесконечного линейного развития, которые сбываются лишь случайно.

Итоги главы:

- По данным отчётов «BP» за 2008-2017 годы проведена грубая прикидка статистической точности. Погрешность данных в отчётах «BP» (и американской EIA) – не лучше $\pm 3\%$, по-видимому, до $\pm 5\%$. Так как исторические данные по добыче до 1965 года имеют разброс тоже около $\pm 5\%$, наше определение суммарной накопленной добычи нефти, газа и угля не может быть точнее.
- Абсолютные значения в отчётах «BP» проверены по независимым данным – накоплению антропогенного CO_2 в атмосфере по наблюдениям станций Мауна Лоа и ледового керна станции Купол Ло. В пределах заявленной погрешности $\pm 5\%$ данные «BP» по добыче достоверны. Характерное время двукратного сокращения антропогенного углекислого газа в атмосфере – от 28 до 55 лет (наиболее вероятное 37 лет).

¹⁰⁹ См. график в главе 2 на странице 36.

- На примере разведанного месторождения Самотлор показана невозможность определения извлекаемых запасов нефти на основании лишь данных по добыче (например, по методу «линеаризации Хабберта»). Для определения запасов требуются геологические данные, которые для большинства месторождений (за пределами США, Канады и ещё нескольких стран), к сожалению, являются секретными.
- Показана порочность методик предсказания объёмов добычи и потребления невозобновляемых ресурсов на основе линейной регрессии.