



Глава 8.

Заколдованный пик

Я включил двигатель, и машина весело покатилась к холму. Спидометр принялся отсчитывать километры, шины шуршали по колючей траве... Так мы ехали минут двадцать. Когда спидометр показал, что пройдено пятнадцать километров, Хлебовводов спохватился:

— Что же это получается? — сказал он. — Едем, едем, а холм где стоял, там и стоит. Поднажмите, товарищ водитель, что же это вы, браток?

— Не доехать нам до холма, — кратко сказал комендант. — Он же заколдованный, до него и не дойти... Только бензин даром сожжём.

— А. и Б. Стругацкие «Сказка о тройке»

Неоднократно заявлялось, в том числе и уважаемыми авторами *«Пределов роста»*, что «точного» значения доступных человечеству геологических ресурсов мы не знаем. Это, конечно, правда, но правда не вся. Разберём на примере.

Когда я вижу незнакомую канистру для бензина, не могу сказать точно: двадцать литров или тридцать. Более того, не прикасаясь к канистре, не могу сказать: бензина на доньшке или под пробку. Я же не Вольф Мессинг! Одно знаю железобетонно. Кубометра бензина в канистре нет. Для этого Альбертом Эйнштейном быть не надо, а можно вспомнить арифметику из начальной школы. Кубометр — это кубик с размером ребра 1 метр, а незнакомая канистра — явно меньше метра по каждому из трёх измерений.

Спорить с приятелем, сколько в канистре бензина: пять литров или двадцать пять — непродуктивно, но хотя бы интересно. Спорить, есть ли там 1'000 литров или всего 990 — глупо.

Теперь представьте, я уже повертел канистру в руках, ознакомился с надписью на пробочке: «25 литров», пару раз заправил лодочный моторчик. Можно спорить, осталось ли в канистре 14 литров бензина, или всего 10. «Точно» мы не знаем. Споры могут быть жаркими и вполне конструктивными: каков объём бака у мотора? Сколько там было до первой заправки? Каков расход на сто километров плавания? Можно усовершенствовать технологию наших оценок: померить уровень палочкой, либо взвесить канистру (тут же споры об арифметической точности и плотности горючего). Вдруг, кто-то наивный заявляет: «В канистре — бесконечное количество бензина! Мы же заправились два раза — бензина хватило. Значит, и дальше будет всегда хватать. Исторический опыт». Ошибку формальной логики — найдите сами.

Определившись с объёмом канистры и длиной маршрута, пессимист станет готовить потихоньку вёсла, чтоб когда бензин кончится, догresti куда требуется. Реалист достанет вёсла сразу: и упражнение, и сэкономим бензин

на всякий пожарный случай. Оптимист отправится в плавание без вёсел вообще, в надежде, что посреди озера дежурят спасатели с запасной канистрой бензина.

В этой главе мы будем употреблять геологические термины, которые требуют пояснения для не-геологов (а геологи могут до формулы {8.1} пропустить, но прочитайте-таки определение «месторождения»).

Нефть не сидит под землёй в пещерах, а распределена по объёму. В горных породах (не употребляйте слово «камни») существуют пустоты: поры и трещины. Объём соединённых пор в среднем на кубометр породы называется эффективной пористостью и измеряется в безразмерных единицах. Например, $\varphi_e=0.100$ означает, что в кубометре породы ровно 100 литров соединённых пор⁸². В порах сидит, в основном, вода, а углеводороды присутствуют по желанию. Объём воды, поделенный на объём пор, называется **водонасыщенностью** и тоже записывается в безразмерных единицах. В России использовалась буквочка K_v , но мы будем использовать международное обозначение S_w . Если S_w равно 0.300, то при пористости 0.100 в кубометре породы $(1-0.3) \times 0.1 \times 1'000 = 70$ литров нефти (или газа). Это называется **геологические запасы**.

Если порода глинистая, часть воды может быть извлечена только выпариванием, либо помещением породы в вакуум или ультрацентрифугу. Этот объём называется **остаточной водонасыщенностью** S_{wirr} ($K_{во}$). Наконец, часть нефти тоже крепко цепляется за породу и может быть извлечена лишь с использованием большого количества энергии (например, размолоть породу и полить щелочью). Называется **остаточной нефтенасыщенностью**, S_{or} ($K_{но}$)⁸³.

Наконец, нефть сидит под землёй при повышенных температуре и давлении. Когда выходит на поверхность и остывает – меняется в объёме. Каково изменение – зависит от вида нефти и глубины залежи. Коэффициент B_o варьирует в широких пределах: от 1.0 для «мёртвой» нефти на малых глубинах до 3.0 у лёгких и летучих сортов на больших⁸⁴.

Если $S_{or}=0.400$, то всего можно извлечь $(1-0.3-0.4) \times 0.1 \times 1'000 = 30$ литров нефти. Это – **технически извлекаемые запасы**. Отношение технически-извлекаемых и геологических называется **техническим коэффициентом извлечения нефти**, $KИН_t$. В нашем примере $KИН_t = 30/70 = 0.43$.

Любой объём горной породы, где $1-S_w-S_{or} > 0$ – называется **продуктивной залежью** (ещё используются термины «пласт» и «продуктивный горизонт», хотя и не совсем верно). Геологические запасы⁸⁵, технически-извлекаемые запасы и $KИН_t$ выражаются формулами:

82 Есть ещё не соединённые поры (ваги), но они роли не играют.

83 Для газа условно считается, что остаточные объёмы определяются атмосферным давлением.

84 Есть ещё формулы для газа и газового конденсата, но мы загромождать книгу не будем. Желающие могут обратиться к специальной литературе.

85 Геологические запасы ещё называют STOIP (Stock Tank Oil In-Place)

$$UR = \frac{V \cdot \varphi \cdot (1 - S_w)}{B_o} \quad \text{– геологические запасы (ultimate reserves)}$$

$$URR = \frac{V \cdot \varphi \cdot (1 - S_w - S_{or})}{B_o} \quad \text{– технически-извлекаемые (ultimate recoverable)}$$

$$КИН_T = \frac{URR}{UR} = \max\left(0, 1 - \frac{S_{or}}{1 - S_w}\right) \quad \{8.1\}$$

Одна или несколько продуктивных залежей, собранные в какой-либо географической точке, называются **месторождением**. В этом месте чистая геология кончается, и начинается экономика и инженерное дело. Представьте себе одинокую залежь размерами 500×500 м и **мощностью** (у геологов слово «толщина» зарезервировано для троллей) 10 м. Пусть пористость, S_w и S_{or} – как в примере выше. Тогда технически-извлекаемые запасы 500×500×10×30=75 млн литров, или 470 тыс баррелей. Для простоты положим, что всю нефть можно добыть одной скважиной за 40 лет (о дебитах реальных скважин поговорим позже). Является ли залежь месторождением?

Пусть текущая цена нефти \$50 за баррель, а географическая точка залежи – на кукурузном поле Джо Смита, в штате Юта. 470 тыс баррелей = \$23.5 млн. в текущих ценах. Дорога? К ферме Смитов уже проложена дорога. Электричество? Вот сельская ЛЭП. Жильё? У Джо – большой дом. Транспорт? На ферме есть трактор и два грузовика. Продовольствие? Я же сказал: «на кукурузном поле». Привезти простейшую буровую и пробурить скважину – скажем, миллион долларов. Ещё миллион – оборудование скважины: обсадная колонна, насосно-компрессорные трубы, насос-качалка, сепаратор и так далее. После сдачи скважины в эксплуатацию стоимость добычи определяется текущим ремонтом и ценником цистерны-нефтевоза, три раза в неделю забирающего продукт. Джо считает чистую прибыль: более \$20 млн за 40 лет, то есть по пол-лимона в год. Недурственно! Залежь является месторождением, и нужно бурить. Более того, после бурения эта залежь будет оставаться месторождением при любой цене нефти на рынке. Если невыгодно продавать, Джо просто на какое-то время остановит скважину. Охрана оборудования и ремонт фермерской дороги выполняются параллельно с обработкой кукурузного поля.

Теперь предположим, что залежь находится не в Юте, а на *планете Шелезяка*TM Аляске. До ближайшего жилья – 300 км, до ближайшей дороги – 100 км по безлюдной тундре, ЛЭП нет, *ничего нет*. Естественно, кроме буровой понадобится ещё бригада строителей, чтобы отсыпать грунтовку. Везить нефть на вездеходе или на вертолёте или разгрести зимник – себе дороже. Стоимость бурения выше, арктическое оборудование тоже стоит больше. Скажем, освоение и эксплуатация обойдутся не в 3.5 млн баксов, а в 10. При цене нефти \$50 за баррель залежь кое-как является месторождением.

При цене \$20 за баррель заморачиваться не стоит, только деньги потратите. Более того, если дорога уже построена, а скважина пробурена – оборудование посреди арктической пустыни требует ухода и охраны. Летят вертолёты – *привет Мальчине*TM техникам, охранникам, дорожникам и прочим вахтовикам. А что им ещё в тундре делать, не оленей же пасти... Если цена нефти упадёт ниже критической – вахтовиков увольняют, оборудование ломается или его разворовывают на запчасти. Когда цена вернулась обратно, запускать единственную скважину может стать неинтересно – смотря что своровали и насколько развезло дорогу. Залежь-то осталась, а месторождение – закончилось.

Наконец, наша маленькая залежь может оказаться посреди Тихого океана, с глубиной воды 3 км. Ясно, ни при какой цене нефти эту залежь разрабатывать не станут. Энергия в дизтопливе для буровой, топочном мазуте для пароходов, керосине для вертолётов, угле для выплавки стали и так далее намного превышает энергию 470 тыс баррелей, что можно из залежи добыть. Шансов превратиться в месторождение у этой одинокой залежи нет. Ни при каких обстоятельствах⁸⁶.

С твёрдыми энергетическими ископаемыми: углём и битумом – ситуация точно та же, что и с жидкими и газообразными, только формулы подсчёта немного другие. Залежь угля 500 тыс тонн безусловно является месторождением, если на глубине 200 м в индустриальной Англии. Она же, расположенная на глубине 600 м посреди «задворков» Австралии (до ближайшей автодороги – 450 км) может быть, а может не быть месторождением в зависимости от текущей цены энергоресурсов. И она же никогда не станет месторождением, если расположена под километровым панцирем льда в Антарктиде.

В своей знаменитой статье 1956 года [19], Марион Кинг Хабберт⁸⁷ сформулировал три условия, которым должна удовлетворять кривая добычи (геологи говорят: «дебита») отдельной нефтяной скважины, залежи, месторождения, всех месторождений одной страны или всей планеты. Как и с «*Эссе о природе народонаселения*» Мальтуса, статья Хабберта быстро обросла мифами и городскими легендами. Цитировать не умеющих читать «последователей» мы не будем, а обратимся к первоисточнику, лишь добавив данные, добытые геологами за прошедшие с момента публикации 60 лет. Вот три условия, как изложено в статье:

1. На минус бесконечности по времени дебит равен нулю.
2. На плюс бесконечности по времени дебит равен нулю.
3. Функция дебита ограничена в любой момент времени. В самом деле, скважин или месторождений с бесконечно большим притоком быть физически не может.

⁸⁶ Надо ли объяснять, что доставка энергетических полезных ископаемых на Землю из космоса имеет смысл лишь для какого-нибудь трития?

⁸⁷ M.K.Hubbert. Существует русское написание «Хубберт». С точки зрения произношения и стандартной транслитерации это неверно. Тогда английская фамилия писалась бы «Hoobbert».

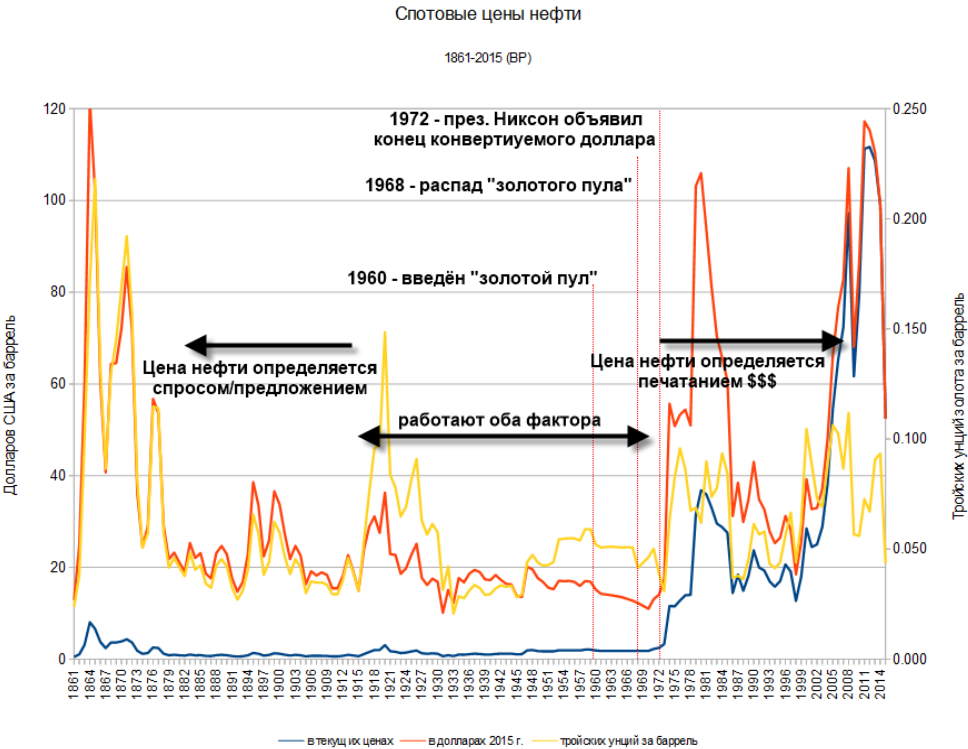
Отсюда следует очевидный математический вывод для максимальных извлекаемых запасов (UUR):

$$URR=Q_{\infty}=\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial Q}{\partial t} dt \quad \text{– ограничен} \quad \{8.2\}$$

Для помнящих теоремы Вейерштрасса, написанное выше – не более чем математическая тавтология, однако даже некоторым инженерам образца 1956 года это не было очевидно. Не очевидно это многим и 60 лет спустя.

Отсюда простое следствие: если в вашей системе дифференциальных уравнений производная извлечения минеральных ресурсов от времени не обращается в ноль на плюс и минус бесконечности – реальную природу ваша модель не описывает, как бы вы не старались.

Всё выше сказанное не относится к сфере финансов. После того, как бумажные деньги оторвали от золотого эквивалента, бумажек можно напечатать очень много. А теперь ассигнации заменили электронными импульсами в памяти компьютера – и любая бесконечность стала доступна. Ниже приведена цена нефти на спотовом рынке с 1861 года. Красная кривая – в пересчёте на доллары образца 2015 года, с учётом инфляции. Жёлтая – цена нефти в тройских унциях золота.



Кто сказал, что \$50 за баррель – «дёшево»? «Дёшево» – это \$10.98 в 1970 году⁸⁸. Кто сказал: «скачок цен на нефть в 2007»? После Первой Мировой цена в золоте была выше.

Первое следствие постулатов Хабберта: цена (денежное выражение) стоимости минеральных ресурсов зависит как от добычи/потребления, так и от скорости увеличения денежной массы. То есть, творчески меняя скорость печатного станка, ценник минерального ресурса можно сделать абсолютно любым.

В Интернете, да и в серьёзных экономических статьях, циркулирует множество заявлений «экспертов», начинающих комментарии словами: «Если цена нефти пойдёт вверх, то...» или, эквивалентно: «Если цена нефти двинет вниз, тогда...» После этих слов можно найти даже вполне достойные предсказания. Когда читаете такое, заменяйте контекстно: «цена нефти» на «денежная эмиссия США» – и картина мира моментально прояснится. Например заявление: «Если цена нефти пойдёт в верх, «сланцевые» компании выживут» следует читать: «Если США объявит новый QE, «сланцевые» компании выживут, а если не объявит – сдохнут».

Установив, что цена нефти в долларах важна, но не является истиной в последней инстанции, вернёмся к условиям Хабберта. Далее мы будем полагать, печатный станок работает в штатном режиме, а все деньги приводятся к условным долларам 2015 года. На нашем месторождении дяди Джо в Юте, единственная скважина может работать, как показано в программке `\Chapter 08\Test_01_Well.py`



В 1955 году сейсморазведкой обнаружили потенциальную структуру, но есть

88 Или \$1.80 в долларах 1970 года. Это не за три литра нефти, а за 159.

там нефть или нет – неизвестно. В 1960 тридцатилетний фермер Джо принял решение: бурить! Пошёл в банк и взял ссуду. Приехала буровая бригада с вышкой и за несколько недель сделала требуемую дырку в земле. Из дырки вытекает каждый день по 24 барреля нефти. Называется «фонтанная добыча», хотя никакого фонтана нефти на кукурузном поле, конечно, нет. Фонтаны били в 1870, когда на экологию всем было плевать, а в 1960 это означает, что нефть течёт в сепаратор сама, подталкиваемая из залежи пластовым давлением. Ограничение в 24 барреля – от мощности (толщины) пласта, проницаемости пород и конструкции скважины.

Сразу заметим, что профиль добычи единственной скважины Джо удовлетворяет условиям Хабберта: до 1960 – ноль, и после 2030 – тоже ноль, а сверху дебит ограничен 24 баррелями в сутки.

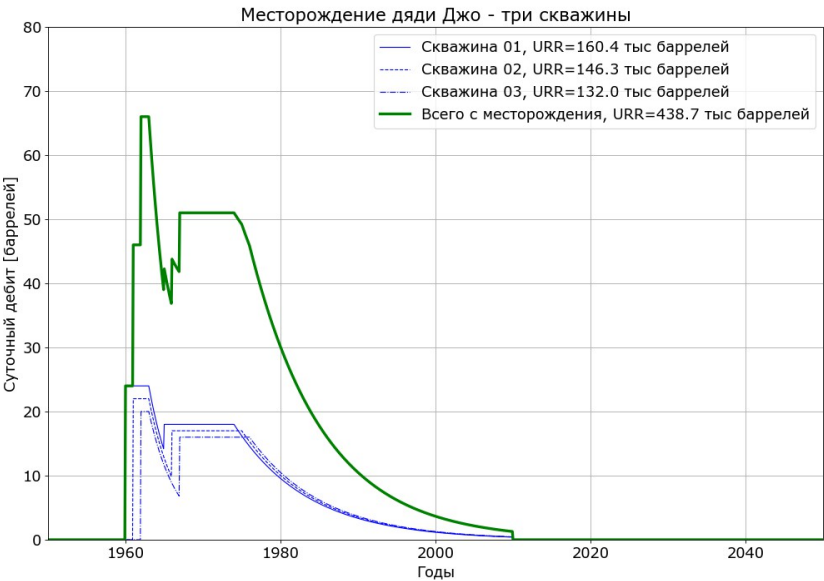
Если Джо ничего не знает про нефтедобычу, он предположит, что 24 барреля в сутки будут течь, пока нефть не кончится, то есть $470'000/24=19'500$ дней, или 53 года. Как видим, его хитрый план получать по пол-ляма в год уже накрылся, но и \$440 тыс – вполне приличные деньги. Однако в 1970 Джо обнаруживает, что нефти добывается всё меньше и меньше. Из-за понижения пластового давления, диаметр скважины и мощность пласта перестали быть ограничителями. В 1980 (двадцать лет прошло) бодрый пятидесятилетний Джо Смит из накопленных денег проводит гидроразрыв пласта и ставит насос-качалку с электроприводом. До 1990 скважина даёт по 18 баррелей в сутки, то есть стабильный доход \$330 тыс в год.

Далее начинается неуклонный спад производства. Насос-качалка по-прежнему подымает в сутки 18 баррелей, но там всё меньше и меньше нефти и всё больше и больше воды. В 2000 году сорокалетний Бубба Смит-младший, сын-наследник умершего в семьдесят лет Джо Смита, добывает менее 10 баррелей ежедневно, и его доход – \$180 тыс годовых. В 2020 скважина будет добывать менее 3 баррелей в сутки и официально станет «стриппером», то есть умирающей скважиной, а Бубба – типичный богатенький пенсионер среднего класса с годовым доходом около \$50 тысяч. Наконец, в 2030 насос-качалка в последний раз сломается, чинить бесполезно. Семидесятилетнему Смит-младшему придётся выложить последние сбережения, чтобы привести территорию в порядок и подчистить разливы. Сорокалетний Джо Смит III получит в наследство всё то же кукурузное поле, а посередине – стальной обрубок обсадной колонны. И станет снова фермером.

Общая добыча из скважины составит 310 тыс баррелей, то есть реальный «экономический» КИН_э = $310/1'100 = 0.28$, что гораздо меньше чем подсчитанный выше КИН_т = 0.43. Чистая прибыль за 70 лет – \$13 млн. Что можно сделать, чтобы повысить КИН_э? Провести повторные гидроразрывы, а ещё лучше – пробурить ещё две скважины, как в программе \Chapter 08\Test_02_Well.py.

В 1962-1964, Джо Смит имел миллионные доходы, да и до середины

восьмидесятых совсем не бедствовал. Зато в 2000 году Буббе Смит-младшему старик оставил три «стриппера» посреди кукурузного поля, доход в \$65 тыс годовых и расписку, что сынок приведёт природу в порядок. Вплотную заняться сельским хозяйством семейке Смитов придётся уже в 2010, а Джо Смит III вырастет не миллионером, а обычным деревенским пацаном (надеемся, дедушка не потратил всё на баб и «Феррари», а отложил внуку пол-лимона баксов). Заметим, что в маленькой залежи (500×500 м) две жадные соседки отобрали у первой скважины около 150 тыс баррелей суммарной добычи.



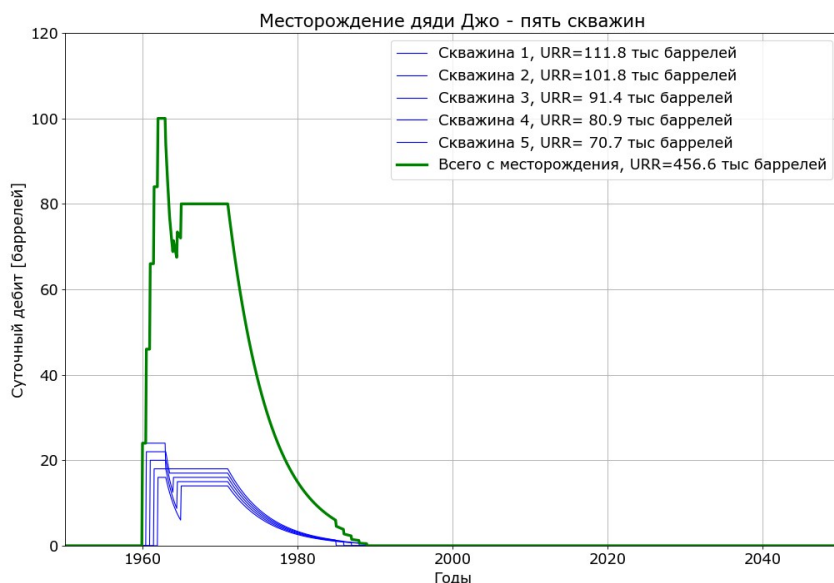
На две лишние скважины и дополнительное оборудование потрачено ещё три миллиона. Общая добыча составила 440 тыс баррелей, реальный КИН_г = 440/1100 = 0.40. Чистая прибыль за 50 лет – \$15.7 млн, то есть деньги потрачены не зря! Опять-таки, зелёнькая кривая добычи асимметрична, но удовлетворяет условиям Хабберта.

Что произойдёт, если пробурить не три, а пять скважин? Программа \Chapter 08\Test_03_Well.py

Получается, последние две скважины мы бурили за 18 тыс дополнительных баррелей добычи. Общая добыча из 5 скважин составила 457 тыс баррелей, реальный КИН_г = 457/1'100 = 0.42 – выше головы (КИН_г) не прыгнешь. Чистая прибыль за 25 лет – \$13.4 млн. Помните, что наши деньги условные, и всё приводится к долларам 2015 года? Значит, на двух дополнительных скважинах мы потеряли деньги, а программа бурения трёх скважин была оптимальна.

Предположим, Джо Смит в 1955 структуру открыл, но бурить не стал. В 2010 Бубба Смит-младший продал унаследованную ферму нефтяной компании. Эти

не стали бурить ни пять скважин, ни три, а пробурили одну «суперскважину», слегка сэкономив время и деньги на бурении, но не жалея денег на гидроразрывы и обсадную колонну⁸⁹.



Давайте поглядим, что получится, если применить «новейшие» технологии⁹⁰.
 Программа \Chapter 08\Test_04_Well.py

Горизонтальная скважина пронзает нашу залежь из конца в конец, немедленно после спуска колонны выполняется 10-стадийный гидроразрыв, то есть наша единственная скважина эквивалентна как минимум сорока «классическим» скважинам Джо Смита из 1960 года, а начальный дебит – 1000 баррелей в сутки. На дебите 200 – спускают погружной электронасос.

Извлечено меньше, чем тремя скважинами. Через десять лет на кукурузном поле торчит тот же стальной обрубок... Я сказал: «кукурузном поле» – и поторопился! При многостадийном гидроразрыве под землю закачали пару тонн метанола и десять тонн лигроина. Потом, согласно технологии, вода с химией вернулась на поверхность! Что метанол делает с природой? Спросите у знакомого химика.

Если вы считаете эту историю грустноватой, не печальтесь. Семейка Смитов в одном поколении была миллионерами. А мы перейдём к месторождениям в 10

⁸⁹ Стоимость колонны пропорциональна длине скважины, а не вертикальной глубине. В вертикальной скважине делают один гидроразрыв, а в горизонтальных – несколько (так называемых стадий). Экономится несколько часов «постановки на скважину», а рабочее время на каждую «стадию» и химикаты – те же, что и для одиночного разрыва вертикальной скважины. И вообще, одна технически-сложная горизонтальная скважина необязательно дешевле нескольких простых вертикальных с тем же суммарным дебитом.

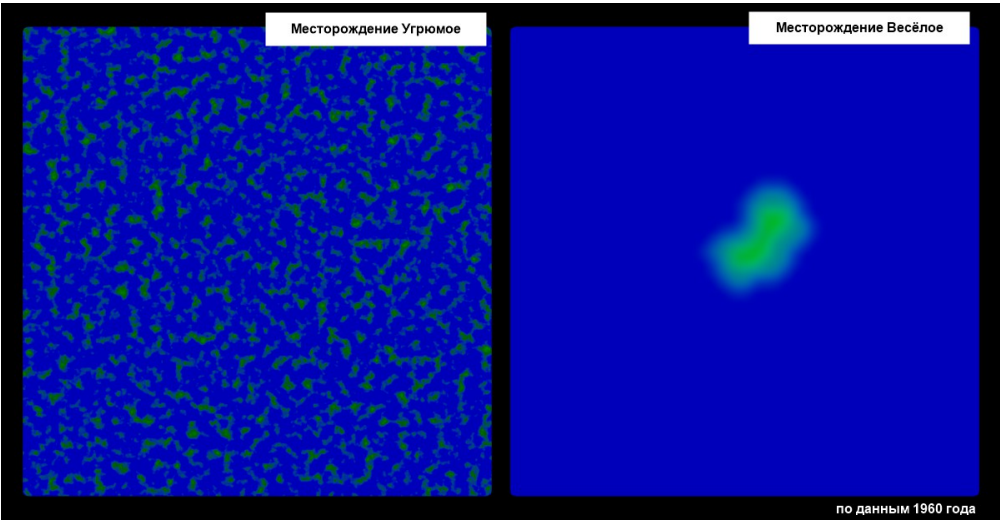
⁹⁰ Ниже будет показано, «новейшие» они условно. Гидроразрыв известен Прогрессивному Человечеству с середины XIX века.

раз больше по линейным размерам.



Итак, месторождение Весёлое состоит из одной залежи размерами примерно 5000×5000 м и мощностью 100 м. Пусть эффективная пористость 0.200, $S_w=0.300$ и $S_{or} = 0.300$, а $B_o=1$ – для простоты вычислений. По формулам {8.1} подсчитаем:

- Геологические запасы. $5000 \times 5000 \times 100 \times 0.2 \times (1-0.3) = 350$ млн кубометров, или 2.20 млрд баррелей.
- Технически-извлекаемые запасы. $5000 \times 5000 \times 100 \times 0.2 \times (1-0.3-0.3) = 200$ млн кубометров, или 1.25 млрд баррелей.
- Предельный $KIN_t = 200/350 = 57\%$



Месторождение Угрюмое тоже имеет 1.25 млрд извлекаемых, но представляет собой 2500 маленьких залежей класса «дядя Джо» из примера выше, по 0.5 млн баррелей каждая. Залежи разбросаны на площади 250×250 км. Геологические запасы Угрюмого даже выше, чем у Весёлого: 2.90 млрд баррелей. Это оттого, что KIN_T ниже: 0.43 – как в прошлом примере.

Ясное дело, Угрюмое может надёжно считаться «месторождением» только в местах, где есть дороги, жильё и прочие прелести цивилизации – например, в штате Юта. На Аляске та же группа залежей может быть, а может не быть месторождением, а посреди Тихого океана – это и не месторождение вовсе, смотрим логику выше. Весёлое является «месторождением» и в обжитой Юте, и в приполярной Аляске независимо от рыночной конъюнктуры, а в Тихом океане может быть, а может не быть месторождением, в зависимости от текущей цены ресурсов.

Какое месторождение будем разрабатывать первым?

Тут мы подходим к ещё одной интересной аналогии: о плотности энергии. Представьте, что вам надо поставить избушку-пятистенку посреди строевого леса. Строевого – как в армии. Ровненькие сосны стоят поротно. «Управление прямо, остальные напра-а-во!» При наличии нескольких мускулистых парней, растущих из плеч рук и бензопилы (с той самой канистрой) – задача имеет, как говорят математики, нетривиальное решение. За конечное время T , валим конечное число сосен C и строим ненулевую избушку I .

Теперь представьте, вы ведёте строительство не в строевом лесу, а в лесостепной зоне. Для простоты те же звенящие на ветру сосны, но расстояние между отдельно-окопавшимися деревьями – 500 метров. Повалили первую сосну, уложили в сруб три бревна. Дальше, надо с бензопилой на плече пройти полкилометра, чтоб повалить вторую сосну. Ещё надо доставить брёвна к месту строительства. При том же количестве пряморуких мускулистых сапиенсов, за время T повалить C не удастся. Ненулевая избушка I таки получится, но после огромных усилий, и покрыв лесоповальной активностью и брёвнотаскальным потом территорию в несколько квадратных километров.

Усложним задачу, как в армии. Даю вводную: вражеские сосны окопались с интервалом 5 км. Мне не нужно быстро и хорошо, мне нужно, чтоб ты... короче, ты понел. Тяжело в ученье – легко в бою. Но это в армии. Математик подсчитает, что та же бригада пряморуких прямоходящих будет строить избушку ну очень долго. Чтоб получить ненулевую I за приемлемое T , бригаде понадобится четвёрка лошадей, или лучше – трактор.

Наконец, вводная из серии «миссия невыполнима». Пустыня Кирдык-Курум! Вместо строевых сосен, с интервалом 50 м произрастают кустики верблюжьей колючки. Кто сказал: древесина закончилась? Древесины ещё навалом,

ножками не ленись! Вот только при помощи одной бензопилы построить нетривиальную избушку-пятистенку из верблюжьей колючки тяжело. Решение **И** получается нулевым. При любом **Т**. Не оттого, что руки не оттуда, а потому что количество «концентрированных» сосен стало менее необходимо-достаточного **С**.

Оптимист заявляет: применим новые технологии. Великолепно. Размолоть колючку в щепки, залить эпоксидной смолой, надеть как-бы «брёвен»... Конечно. Только, на какой территории придётся проводить заготовки древесины, и сколько на это понадобится тракторов, лошадей и разумных сапиенсов? Избушка получается золотой, точнее, платиново-иридиевой. С брюликами.

В первую голову, решают трудозатраты. Хотя в реальной жизни надо ещё много чего учесть: политическую ситуацию в стране, наличие или отсутствие пресной воды в районе разработки, сейсмическую активность и так далее.

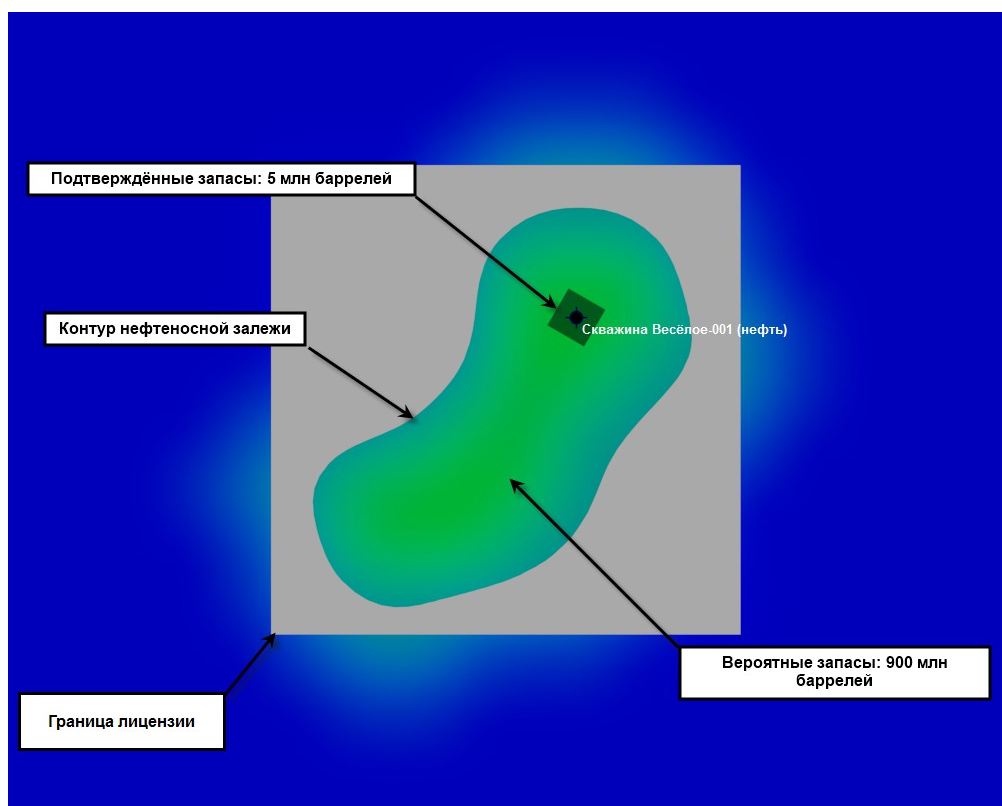
Если и Весёлое, и Угрюмое находятся в Юте, решение однозначно: Весёлое разрабатывается первым! Если Угрюмое в Юте, а Весёлое – в Тихом океане, Угрюмое опередит наверняка. А если Угрюмое в Юте, а Весёлое – на Аляске, возможны варианты.

Просто для примера, начнём с Весёлого (на Аляске). В 1960 году по данным сейсморазведки определили потенциальную структуру. В 1965 пробурили первую скважину. Эта скважина – разведочная, и нефти из неё добывать не станут. Точнее, добудут десяток тысяч баррелей и сожгут ярким факелом – называется **опробование**.



По данным геофизических исследований в скважине и опробования прикинут запасы залежи. В газете «*Нью-Йорк Таймс*» на второй странице статья: «Компания *Весёлая Нефть* открыла на Аляске месторождение с запасами более 2 млрд баррелей!» Заметим, что число в статье несколько меньше, чем посчитанные нами 2.2 млрд баррелей геологических запасов, но гораздо больше, чем 1.25 млрд запасов технически-извлекаемых. Вообще, слово «геологические» от «запасов» куда-то пропало. Публике про «извлекаемые» знать ни к чему. Однако и сказать: «мы нашли 10 миллиардов» нельзя. За намеренный обман инвесторов в Америке сажают.

Если бы месторождение Весёлое находилось в джунглях Амазонки, а компания называлась «*Дивертидо-Петролео*», газеты в Рио напечатали бы «НЕВЕРОЯТНОЕ ОТКРЫТИЕ!!! 200 МИЛЛИАРДОВ БАРРЕЛЕЙ!!!». В Латинской Америке ~~врать~~ — ~~лежам~~ сообщать достоверную информацию уважаемым инвесторам — признак хорошего тона. А найдись Весёлое на просторах Западной Сибири, газета «*Известия*» написала бы просто: «Вчера в Кремле состоялось вручение Орденов Ленина геологам Пупкину и Калупкину за открытие крупного месторождения нефти». Циферки геологических запасов в СССР, и где что лежит — государственная тайна; за разглашение — сам поедешь на Колыму что-нибудь геологическое открывать.

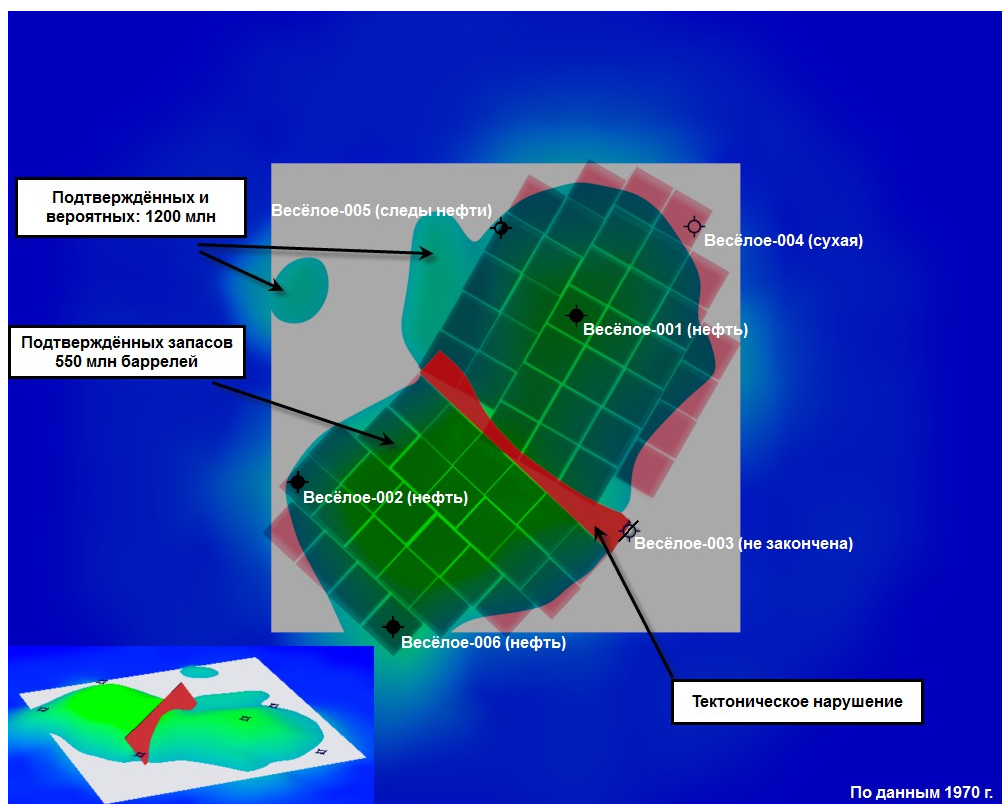


Но мы с нашим примером пока останемся на Аляске 1960-х годов. Помимо

громкой, но пустой статейки в «Нью-Йорк Таймс», компания *Весёлая Нефть* подаёт вполне официальные отчёты в геологическую службу USGS и в Комиссию по ценным бумагам SEC. Что там написано? «Подтверждённые извлекаемые запасы: 5 млн баррелей.

Всего пять миллионов баррелей? Ага. По правилам SEC 1960 года называть «подтверждёнными» можно лишь там, где у вас есть опробованная скважина! Причём, именно квадрат, а не круг или эллипс. Инженер-разработчик образца 2017 года заливается весёлым смехом: вот идиоты, они думают, что нефть течёт по квадратам! Не хохочи, – говорит коллега из далёкого 1960, – мне бы твои компьютеры. Компы пока для военных и космоса, а мы считаем на арифмометрах, оттого и квадратик. Упрощение.

Более того, SEC всегда требовала (и сейчас требует), чтобы подтверждённые запасы были железобетонные! Вероятность добыть не меньше подтверждённых запасов в 1960 году была 100%. Больше добыть имеешь право, меньше – ни в коем случае. Если чуть меньше – штрафы, если сильно меньше – тюрьма. Не говоря уж о полном крахе геологической карьеры: если раз по-крупному соврал, в нефтяную компанию даже дворником не возьмут. На рубеже XXI века требование снизили. Теперь хотят вероятность 90%. Офисного планктона хватает, мало настоящих инженеров. За регулярное всовывание шеи в петлю платят неплохие деньги!



Однако время движется. В 1966-1967, Компания *Весёлая Нефть* подтаскивает к месторождению пару разведочных буровых и бурит ещё пять скважин **оконтуривания**, с опробованиями. Скважина номер 004 попадает в воду, на 005 – лишь следы нефти. Скважину 003 вообще не добурили из-за аварии, зато она обнаружила тектоническое нарушение – разлом, позже интерпретированный по сейсмике. Вероятные запасы подтверждаются, хотя и несколько не так, как представлено на картах 1960 года.

Далее следует планирование разработки, прокладка автодороги и трубопровода, отсыпка площадок, строительство заводика: установки комплексной подготовки нефти (УКПН), и тому подобное техническое творчество. В 1970 бурят первую добычную скважину, и далее каждые полтора-два месяца (а то и быстрее) – по новой дырке в земле. Добыча нарастает.

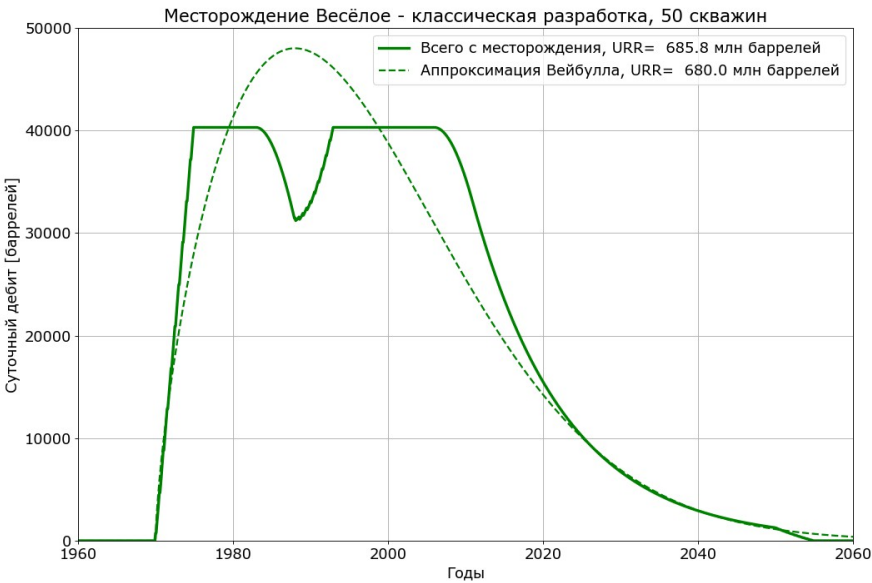
А сколько нужно скважин? В классической нефтянке используется понятие выработки ресурса. Всё крупное оборудование: обсадные колонны, задвижки, сепараторы и так далее, имеют характерную продолжительность жизни 40 лет⁹¹. Именно на это время и рассчитывают в среднем «полочку» добычи месторождения. Хотя, последние десять лет правило нарушают сплошь и рядом, но об этом ниже.

Считаем программкой `\Chapter 08\Test_05_Field.py` Если на Весёлом пробурить всего пять скважин, ничего хорошего не выйдет. КИН, $\approx 57.9/1800 \approx 3\%$. Слишком много нефти остаётся в земле!



91 Если хотите, можно использовать мировую константу 42, рассчитанную вице-президентом РАЕН С.П.Капицей.

Попробуем 50 скважин (индивидуально скважины рисовать не будем, чтобы не загромождать график). Программа \Chapter 08\Test_06_Field.py:



Уже получается вполне прилично. Общая добыча 680 млн баррелей за 90 лет, к 2050 году КИН, $\approx 680/1800 \approx 38\%$. Консервативная нефтяная компания может принять проект за основу. Определился диаметр нефтепровода и производительность УКПН: 40 тыс баррелей в сутки. Подтверждённых запасов отрапортовано всего 550 млн, мы их добудем легко, SEC не оштрафует.

В нашем упрощённом примере, мы провели планирование разработки за четверть часа. На деле это может занимать пару лет интенсивной работы группы специалистов. Расписание бурения и положение скважин «полируют» до абсолютного оптимума; до хрипоты спорят, сколько скважин надо: 48 или 50, бурить ли скважину Весёлое-028 после Весёлое-022, или после Весёлое-039, и так далее. Самое интересное, что когда начинают бурить, все эти хитрые планы не работают. *«Первая жертва войны: ваш хитрый план боевых действий»*, – как сказал Черчилль.

В бурении и освоении случаются аварии и прочие досадные промахи, оттого не всё идёт строго по плану, «фронт» слева несколько менее крут, и кривая статистически выравнивается. Валлоди Вейбулл в 1951 году предложил удобную кривую для описания реальной добычи из месторождения:

$$Weib(t)=\begin{cases}bk\left(b\left(t-t_o\right)\right)^{k-1}e^{-\left(b\left(t-t_o\right)\right)^k}&t-t_o\geq 0\\0&t-t_o<0\end{cases}\quad\{8.3\}$$

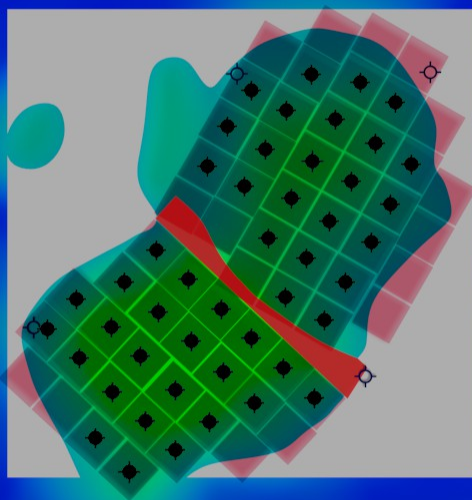
Здесь:

t – время в годах;
 t_0 – начало промыслового бурения;
 k – параметр формы;
 b – вертикальный масштаб.

Заметим, что функция Вейбулла удовлетворяет критериям Хабберта {8.2}. Удобна она тем, что добыча месторождения начинается с конкретной даты (в нашем числовом примере – с января 1970 года). Хотя даже для месторождений на 50 скважин, функция Вейбулла не учитывает технических ограничений, например диаметра трубопровода или размеров сепараторов на УКПН.

Каковы трудозатраты на разработку месторождения? Пятьдесят скважин за пять лет можно сделать двумя арктическими буровыми. Четыре вахтовые буровые бригады по сто человек, плюс всякие прочие подрядчики-дорожники и трубопроводчики. Пусть в долларах 2015 года одна скважина стоит те же 10 миллионов, отстегнув на дорогу, трубу и вагончики для нефтяников. Тогда освоение всего месторождения – порядка \$500 млн. Надо накинуть \$100 млн на разведку и прочие удовольствия. При добыче 40 тыс в сутки и цене нефти \$50 за баррель, компания *Весёлая Нефть* отобьёт свои инвестиции с 1965 по 1972 менее чем за год, и в 1974 уже начнёт получать чистую прибыль (за вычетом расходов на логистику и текущий ремонт). На самом деле, всё не просто хорошо, а ещё лучше. Вот как выглядит отчёт SEC в 1980 году:

Месторождение Весёлое



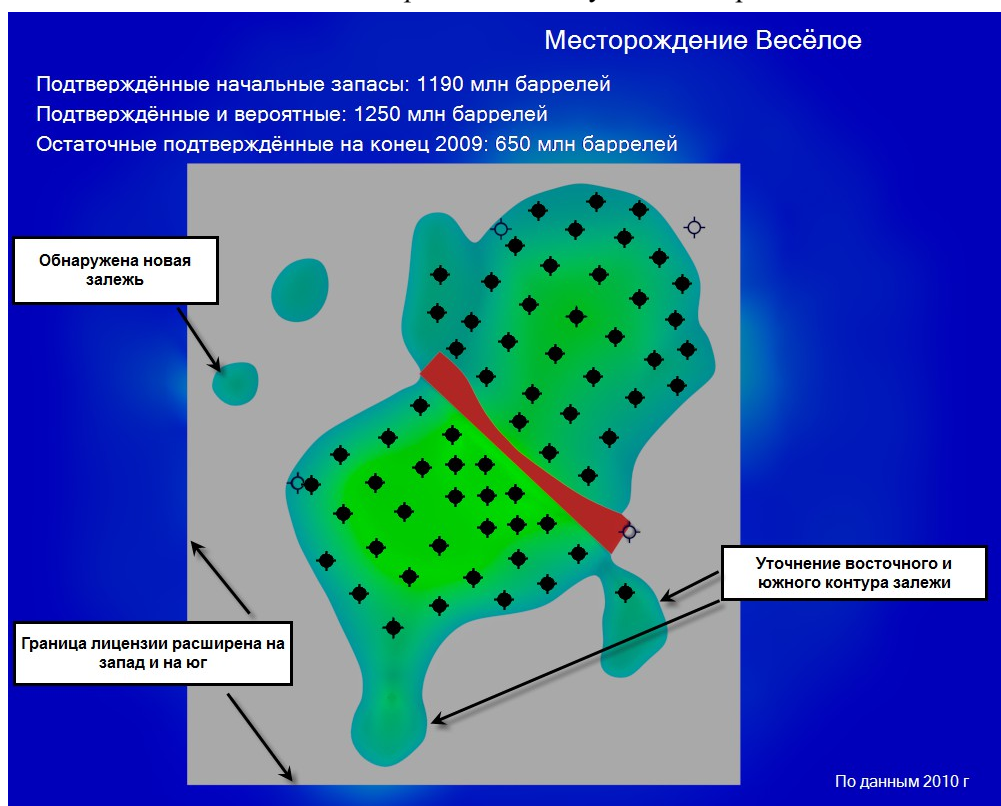
Подтверждённые начальные запасы: 1120 млн баррелей
Подтверждённые и вероятные: 1200 млн баррелей

По данным 1980 г

Во-первых, добычных скважин не 50, как запланировано в 1969 году, а всего 45. Инженеры – народ консервативный; лучше перебдеть, чем недобдеть. Когда запустили в работу сорок пятую, общий дебит с месторождения превысил 40 тыс баррелей в сутки, а больше нам и не надо: труба не позволяет.

Во-вторых, на той же геологической карте подтверждённые запасы скакнули с 550 млн баррелей до 1'120. Чудо? Конечно, нет! Когда писали отчёт 1970 года, в большинстве квадратиков пористость поставили не 0.200, а 0.160, а водонасыщенность – не 0.300, а 0.450. Если бы поставили больше, аудиторы SEC выписали бы штраф за обман инвесторов. На основании одной скважины в центр залежи и пяти по краям ничего иного поставить и нельзя. Правила SEC простые: в квадрате, где есть скважина – ставьте по факту. В остальных – минимальные запасы по данным самой плохой контурной скважины, в нашем случае «Весёлое-005». К 1975 разбурено 45 «квадратов», проведены геофизические работы в скважинах. Значит, в этих квадратах разрешается ставить факт.

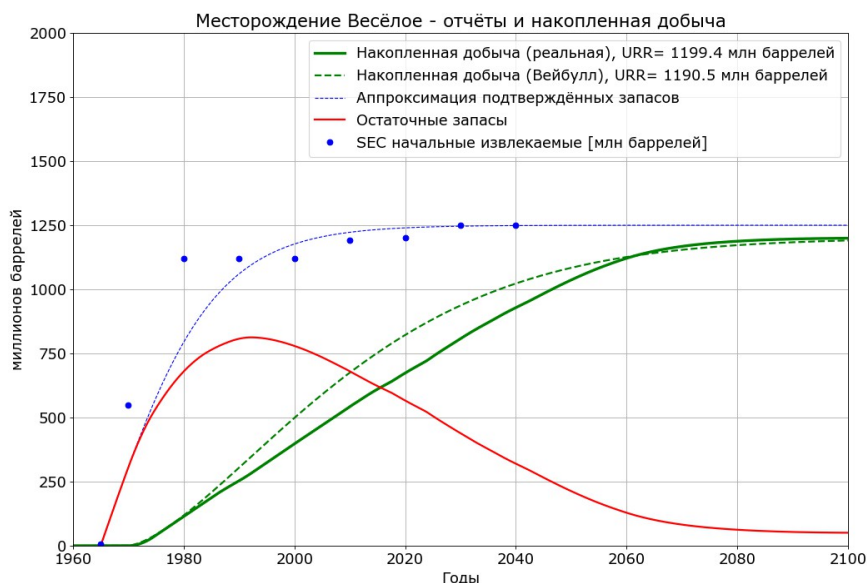
Как выглядит отчёт *Весёлой Нефти* в 2010? Тут ещё интереснее.



Подтверждённые запасы скакнули до 1'190 млн баррелей. Квадратики исчезли. Это оттого, что в 2010 году вместо квадратиков SEC принимает «оценку Р-90». На рабоче-крестьянский это переводится так: «С вероятностью 90% в месторождении есть 1'190 млн баррелей». Циферка 1'250 – это «оценка Р-50»

(либо есть 1'250 баррелей, либо нет – то есть, *либо встречу динозавра, либо не встречу*TM). Заметим, что часть прироста запасов появилась из-за расширения границ лицензии на запад и юг, а на западе обнаружили маленькую залежь класса «дядя Джо». Если бы не было большого месторождения посередине, с этой малявкой на Аляске никто бы не заморачивался. Однако к 2010 на большом месторождении есть труба и УКПН, проложены дороги, стоит вахтовый посёлок, работает ТЭЦ. Это автоматически переводит ближайшие залежи класса «дядя Джо» в разряд месторождений. Причём, вряд ли компания *Весёлая Нефть* будет писать SEC отдельный отчёт ради пары скважин. Запасы найденной маленькой залежи просто добавляют к запасам большой.

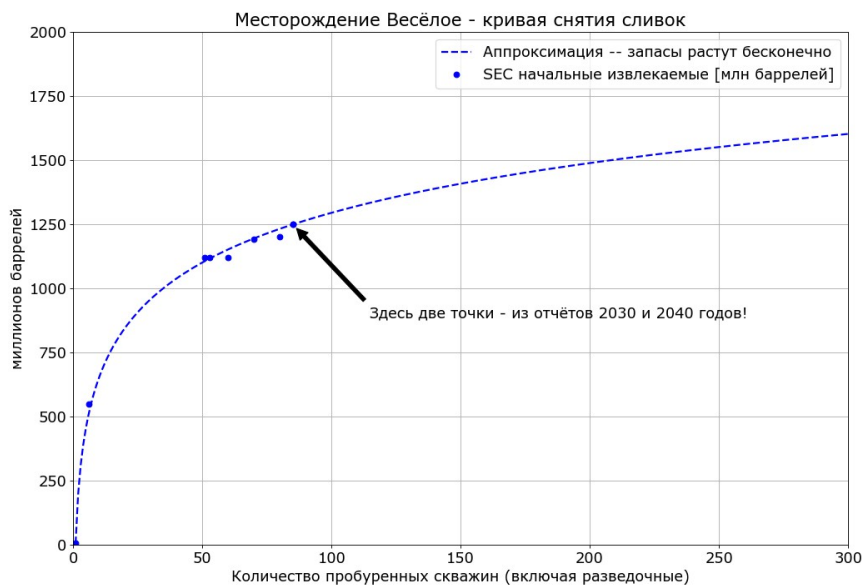
Считаем программкой \Chapter 08\Test_07_Creaming.py



Синие точки – наши отчёты в SEC. Тут возникает один способ ~~развода неграмотных лохов~~ привлечения новых инвесторов, которым невозбранно пользуются многие нефтяные компании, в том числе очень солидные. Если рисовать точки по времени разработки месторождения, как выше, всё встаёт на свои места. Сразу после открытия запасы консервативно занижены, далее, по мере освоения месторождения, мы узнаём что там под землёй всё точнее и точнее, и наконец оценка выходит на «полочку», выше которой не будет.

В семидесятые годы прошлого века кто-то придумал рисовать по горизонтальной оси не время, а количество пробуренных скважин. В программе \Chapter 08\Test_08_Creaming.py показано, как это делается. Как видим, кривая увеличения запасов «визуально» превратилась в логарифм! Далее немедленно следует вывод, что если пробурить не 85, а 300 скважин, запасы станут свыше 1'600 млн баррелей. Хитрым перцам ясно, что не только

300, но и сто скважин никто бурить не станет, потому что бесполезно: месторождение вышло на кривую безудержного спада добычи.



Для полноты картины покажем, как менялись оценки запасов месторождения Весёлое от времени.

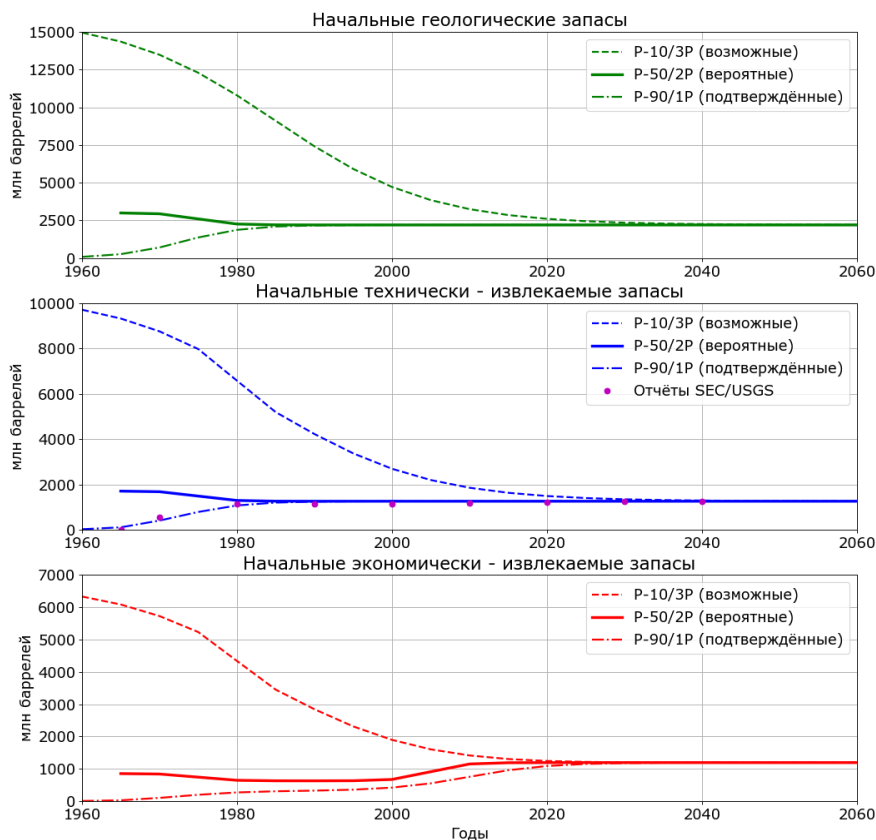
Надо сказать, что в таком виде геологи представляют данные крайне редко и исключительно для внутреннего употребления компании. Действительно, для нашего учебно-тренировочного месторождения Весёлое подобную картинку имеет смысл рисовать лишь в 2010 или в 2020 году, когда всё уже давно пробурено и все инвестиционные решения так или иначе сделаны. Кого волнует, что там посчитали геологи в далёком 1965? Нам, однако, картинка будет интересна чуть позже, когда от Весёлого мы перейдём к прикидкам запасов углеводородов для планеты в целом.

На картинке три комплекта графиков: зелёные – геологические запасы, синие – технически-извлекаемые запасы (по формулам {8.1}), и красные – экономически-извлекаемые запасы в соответствии с планом разработки. Каждый комплект кривых имеет три линии: толстая сплошная – начальные запасы с вероятностью 50%, штрих-пунктир – те же начальные с вероятностью 90%⁹² и наконец пунктирные линии для вероятности 10%. На математическом сленге геостатистиков эти кривые называются P-50, P-90 и P-10. Для менеджмента существует и упрощённая номенклатура: P-90 называется «1P», от английского «proved/proven», то бишь «подтверждённые». P-50 носит имя «2P», от «proved and probable» – это «подтверждённые и вероятные». Наконец,

92 Большинство западных нефтяных компаний пользуется «отступом» 10% и рассматривает вероятности P-90, P-50 и P-10. Некоторые компании используют отступ 5%, другие – 15%, но таких «отступников» от негласного стандарта немного.

P-10 называется «3P», то есть «proved, probable, and possible» – «подтверждённые, вероятные и возможные». У западных нефтегеологов есть пословица (на мотив стихика о волшебных кольцах у Толкина): «1P – для финансистов, чтоб платить, 2P – для инженеров, чтобы добывать, 3P – для инвесторов лохов, чтобы надувать».

Вероятностные оценки запасов месторождения Весёлое



В 1960 году на Весёлом верхняя оценка геологических запасов была 15 млрд баррелей, а нижняя – ноль. По данным сейсмоки было известно, что под землёй есть «геологическое тело» площадью около 65 км². Это число довольно точное. Однако абсолютные глубины залегания и мощности пластов по сейсмике могут быть оценены лишь приближённо, а главное неясно, есть ли в породе вообще нефть.

Скважину «Весёлое-001» пробурили в 1965 году, причём в месте, которое по данным сейсморазведки казалось тогда наиболее удачным. Скважина не только обнаружила нефть, но и позволила геофизикам «откалибровать глубины». Появилась достаточно надёжная оценка реальной нефтеносной

площади и мощности пласта, а также параметры пласта для уравнения {8.1}. На графике появилась первая точка Р-50, минимальная оценка отлепилась от нуля и двинулась слегка вверх (5 млн баррелей), а верхняя оценка слегка опустилась, так как стало ясно, что нефтеносная площадь быть 65 км² никак не может – нижняя часть залежи до такой-то глубины заполнена водой.

С 1965 по 1970 год ведётся доразведка и планирование разработки. Оценки Р-90 продолжают расти, а Р-10 – снижаться. Выполнена лабораторная обработка керна и шлама из разведочных скважин, построена динамическая модель месторождения, разработчики и экономисты прикидывают, сколько потребуется скважин и сколько всё удовольствие может стоить.

С 1970 года начинается добычное бурение, и геологические модели еженедельно пополняются данными из новых добывающих скважин. По мере накопления данных меняются оценки. Заметим интересную картину: внутренние (для служебного пользования) оценки технически-извлекаемых запасов по Р-90 и Р-50 к 1980 году почти сравнялись (оценка Р-90 несколько ниже, как ей и положено быть), а вот Р-10 по-прежнему показывает более 6 млрд баррелей извлекаемых запасов. Такая асимметрия вызвана прагматическими причинами. Если «банкирская» оценка 1Р и инженерская 2Р сильно неверны (как в большую, так и в меньшую сторону), легко можно остаться банкротом. А если просчитались с оценкой 3Р – не страшно. Лохи на то и лохи, чтобы покупать на непроверенные оптимистичные данные. Естественно, главбух требует от геолога уточнить 1Р, главный инженер – 2Р, а уточнение 3Р производят, если осталось время, желание и деньги в бюджете главного геолога.

Медленнее всего сходятся оценки экономически-извлекаемых запасов. На примере Весёлого, в 1970 году геолог может быть уверен, что без капитального ремонта скважин (КРС) и гидроразрывов не обойдётся, однако понятия не имеет, начнут ли программу КРС в 1980 или в 1995 году. В 1988 (по факту) инженерная команда планирует КРС, да обвалилась цена нефти, и главбух росчерком пера переносит упражнение на 1991. Короче, с экономически-извлекаемыми вопросами всегда чуть больше, чем есть ответов у начальства.

Однако через 55 лет после открытия, в 2020 году, с месторождением так или иначе всё ясно, а оценки 1Р, 2Р и 3Р становятся уже почти одинаковыми.

Небольшое лирическое отступление о недавнем прошлом. В СССР ежеа банкиров, как известно, не было. Лохи и сейчас не перевелись, но тогда они ещё не были инвесторами. Оттого в СССР 1Р, 2Р и 3Р не применяли, а использовали категории А, В, С₁ и С₂. «А» – детально разведанные (чаще уже находящиеся в разработке). «В» – предварительно разведанные запасы полезных ископаемых. Категория «С₁» – запасы разведанных месторождений сложного геологического строения и слабо разведанные запасы по экстраполяции геологических данных с детально разведанных участков месторождений. Наконец, «С₂» — перспективные, неразведанные запасы на

основании общих геологических соображений с учётом аналогичных подробно разведанных залежей.

Находись Весёлое не на Аляске, а в Западной Сибири, в 1950 году «из общих соображений» насчитали бы 3 млрд тонн (25 млрд баррелей) C_2 . В 1965, пробуравив первую скважину, отапортовали бы 400 млн тонн (геологических, в СССР их также звали «балансовыми») C_1 . Окончив оконтуривание и приступив к добычному бурению – 200 млн т (извлекаемых) категории В, а с примерно к 1985 году всё месторождение стало бы категорией А со 160 млн т (1.2 млрд баррелей) начальных извлекаемых запасов, и чуток на неразбуренных флангах осталось бы в категории В.

В 1990-х западные ~~люди~~ инвесторы отчего-то полагали, будто $A+B+C_1+C_2 \approx 3P$, а $A+B+C_1 \approx 2P$. Советские геологи не спешили их разубеждать, тем более что все реальные числа запасов – не только нефти – были всё равно секретны. На самом деле $A+B+C_1 \leq 3P$, а C_2 – это просто «общие соображения» на предмет ещё не состоявшейся геолого-геофизической разведки. Как результат, многие инвестиционные решения западников в постсоветских республиках оказались неоправданно рисковыми – и закономерно провалились. О приключениях одного из инвесторов – компании «Серинус Энерджи» – вна Украине я подробно писал в главе 6. Канадско-польская фирма имела честь убедиться, что категория C_2 – это всего лишь C_2 , пусть даже «общие соображения» пряником от Кудрявцева и Голда.

Помимо деления на геологические и извлекаемые, связанные строгой формулой {8.1}, бюрократы разных стран высасывают из частей тела разные другие определения. В СССР, помимо C_2 , были ещё и «перспективные» C_3 , а также «региональные» D_1 , D_2 , D_3 . В частных нефтяных компаниях США бывает деление запасов на «разбуренные», «ещё не разбуренные», «добываемые», «условные». В Евросоюзе деление ещё сложнее: есть «перспективные», «индикативные», «измеренные», «выверенные», «предполагаемые», ну и ещё с десяток терминов.

Основная цель этих «категорий» – офисная имитация бурной деятельности и развод инвесторов на деньги. О категориях запасов можно писать отдельные книги, и много даже написано⁹³, но подавляющему большинству читателей они неинтересны. Когда о «подтверждённых запасах» нефти, газа или угля рассуждает специалист-геолог, он имеет в виду чиста-конкретные запасы, то есть пользуется одним из бюрократических определений. А вот когда с веб-страницы Интернет про «подтверждённые» поёт песнь специалист-пиарщик – враньё может быть абсолютно любое. Даже у бюрократов уши вянут.

Почему SEC и USGS требуют консервативного подхода в оценке запасов? Инженеры вообще консервативны по природе, в отличие от ура-экономистов навроде Р.Слоана, Дж.Саймона и Б.Ломборга. У экономистов «исторический опыт» кончается данными прошлого десятилетия, а технари помнят ошибки

93 Гутман И.С. «Методы подсчета запасов нефти и газа» М.: Недра, 1985.

предшественников.

В 1861 году 32-летний горный инженер и геолог Эдвард Халл написал монографию об угольных запасах Великобритании [20]. Детально разобраны все 17 угленосных провинций Англии и отдельно – Шотландия, с геологическими колонками, устройством шахт и прочими прелестями. Наши предки кое-что понимали в горном деле. Приведём сводную таблицу⁹⁴, как в книге на странице 187.

Провинция	Каменноугольный период		Перекрытые отложения	
	Площадь, кв миль	Подтверждённые запасы угля, англ. тонн	Площадь, кв миль	Вероятные запасы угля, англ. тонн
Англесия	9	незначительные	неизвестно	неизвестно
Бристоль и Сомерсет	45	746	105	1'742
Коалбрук	28	28	неизвестно	неизвестно
Кумберленд	25	97	неизвестно	неизвестно
Денбингшир	47	490	20	412
Дерби и Йорк	760	8'800	400	8'000
Дурхам и Нортумбленд	460	4'270	225	3'000
Флинтшир	35	20	неизвестно	неизвестно
Дин	34	561	неизвестно	неизвестно
Уир		незначительные	неизвестно	неизвестно
Ланкашир	217	4'010	25	500
Лейстершир	15	1'618	30	400
Сев. Стаффордшир	75	1'618	20	619
Юж. Стаффордшир	93	973	неизвестно	неизвестно
Шревсбури		незначительные	неизвестно	неизвестно
Юж. Уэльс	906	16'000	неизвестно	неизвестно
Уоррикшир	30	417	107	1'767
ВСЕГО Англия и Уэльс	2'779	38'080	Более 932	Более 16'440
ВСЕГО Шотландия	1'720	25'323	неизвестно	неизвестно
ВСЕГО	4'499	63'403	Более 932	Более 16'440

По подсчётам Э.Халла, месторождения угля занимали не менее 5'431 квадратных миль, то есть 6% площади Великобритании, и содержали не менее

94 Длинная английская тонна 1'020 кг. В пределах погрешности можно считать равной метрической тонне.

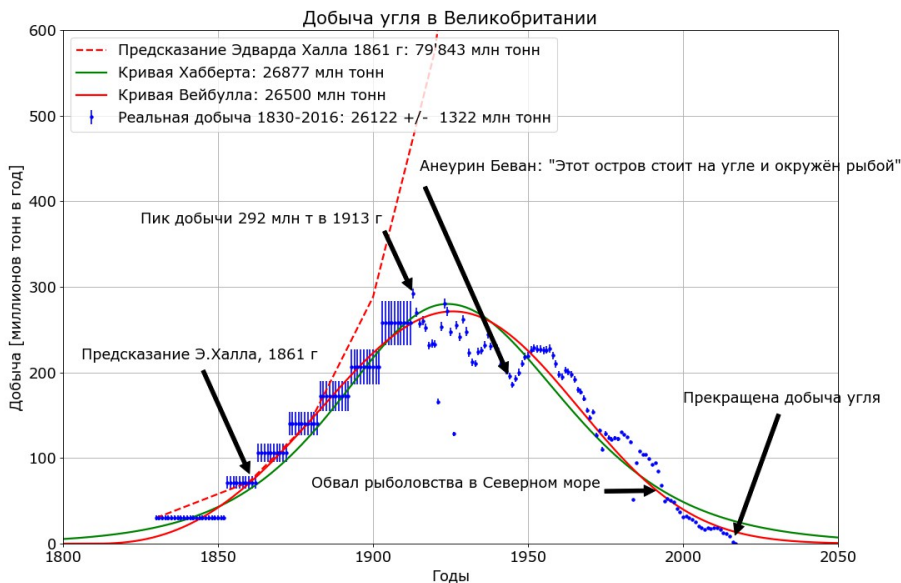
79'843 миллионов тонн угля. Нас, воспитанных на математической статистике и физике, точность до одного миллиона тонн, конечно, смешит, но так у автора.

Геолог знал, что в 1860 Великобритания добывала 72 млн тонн угля в год, значит, 79'800 миллионов тонн хватит на 1'100 лет. Конечно, заявлял учёный, добыча будет возрастать! Известно, что в 1830 году Британия добывала только 30 млн тонн. Можно прикинуть, на сколько хватит запасов угля, если добыча станет удваиваться каждые 20 лет (стр 237).

Год	Добыча, млн тонн	Год	Добыча, млн тонн
1860	72	1960	2'304
1880	144	1980	4'608
1900	288	2000	9'216
1920	576	2020	18'432
1940	1'152	2033-2034	42'979

В таком случае, писал Халл, прогноз будет пессимистичен. Великобритании хватит собственного угля лишь до 2034, то есть на 172 года⁹⁵. Впрочем, нестрашно: уголь можно везти морем из Америки и Австралии! Притом учитывается только уголь до глубины 4'000 футов, то есть 1'220 метров. Если применять стальную крепь вместо деревянной и научиться охлаждать забой, шахты можно делать существенно глубже.

Посмотрим, что получилось в Великобритании на самом деле. Программа \Chapter 08\Test_09_Hull_UK_Prediction.py



⁹⁵ У Халла в книге арифметическая ошибка. На самом деле при удвоении добычи каждые 20 лет разведанных запасов должно было хватить лишь до 1962 года, то есть ровно на столетие.

Эдвард Халл прожил долгую и продуктивную жизнь: был избран членом Британской Академии Наук в 1867 и президентом Ирландского Геологического Общества в 1873. Уже выйдя в отставку, добился прекращения детского труда на угольных шахтах Британии (в 1900 году). Умер в почтенном возрасте 88 лет, пережив британский Пик Угля на четыре года. Да, самое главное предсказание не сбылось. В 1913 году британская угольная промышленность поставила рекорд: добыто 292 миллиона тонн. Во время Первой Мировой последовал спад, в 1923 добыча восстановилась до 280 млн тонн – и немедленно покати́лась под горку. Показатель 2015 года – 8.6 млн тонн, то есть втрое меньше, чем в 1830. В 2016 закрылась последняя шахта. В апреле 2017 – выведены в резерв две последние угольные ТЭЦ. Великобритания стала «безугольной экономикой».

Каковы запасы угля в Британии-2018? В наличии стратегический запас антрацита⁹⁶ в Южном Уэльсе: 250 млн тонн. То есть ровно одна годовая добыча 1911-1912 года. Остальные месторождения технически выработаны «в ноль». Общая добыча с 1830 года – $26'120 \pm 1'322$ млн тонн, то есть 33% от расчётных запасов Э.Халла.

Где ошибся наш геолог? Очень просто: он полагал, что каждая «залежь» есть «месторождение» и не учитывал затраты энергии на добычу (говоря грубо, спутал геологические запасы с технически извлекаемыми). В Англии 10-сантиметровый пропласток угля на глубине 50 метров от поверхности является месторождением. Такой же пропласток на глубине 1'200 м является бесполезной залежью, и так ей навсегда и останется, какой бы ни была цена. Вы можете привезти в Англию рабов или послать восьмилетних пацанов обратно в шахты, но энергия добытого угля меньше энергии, потраченной на добычу.

А вот с максимальной глубиной угольных шахт в 1220 м горный инженер из далёкого 1861 почти не ошибся. Самая глубокая угольная шахта «Джунрих II» находилась в Чехии: 1550 метров, выработана «в ноль» и закрыта в 1991. Следующая самая глубокая – в Англии, городок Клок-Фэйс, 1400 м. Тоже «в ноль» и тоже закрыта – в 1966 году. Шахта Спригхилл в Канаде – 1350 м, закрыта в 1958. А вот ещё работающие: «Комсомольская» (Россия) – 1200 м, «им. В.М.Бажанова» (Донецкая обл. Украины; в 2011 произошло обрушение копра, вроде бы остановлена в 2014) – 1200 м, «им. А.А.Скочинского» (Донецкая обл. Украины) – 1200 м, «Прогресс» – 1340 м, и почти побившая рекорд Чехии «Шахтёрская Глубокая» – 1546 м (правда про эту тоже неизвестно, работает или нет, может кто подскажет?)

Вообще за золотом, цинком, никелем шахтёры лезут и куда глубже: «Мпоненг» в Южной Африке уже на глубине 3900 м. Но это золото. Там можно строить железобетонные тоннели, прокладывать двадцатидюймовые трубы и качать ледяную воду для айр-чиллеров по двадцать тонн в секунду. Кстати, система дублированная. Если обе холодильные линии встанут на сорок минут,

96 Тот самый «кардифф» на дредноутах Первой Мировой, ага.

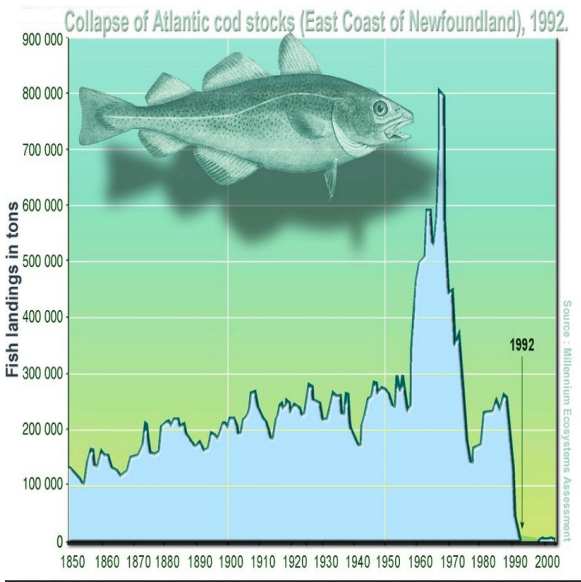
шахтёры буквально сварятся заживо. Если такие же холодильники ставить в угольной шахте, «чёрное золото» выйдет по цене жёлтого.

Кстати, на 2015 год, средняя глубина шахты в Китае уже превышает 600 м, а до глубины 100-120 м все известные месторождения выработаны «в ноль».

Однако простим геологу XIX века вполне честную ошибку. Второе начало термодинамики было сформулировано Клаузиусом и Кельвином только в 1850 году. Хотя и спустя сто лет некоторые перцы термодинамику не всосали. Британский политик Анеурин Беван в 1945 году просвещал выбравших его шахтёров Уэльса:

This island is made mainly of coal and surrounded by fish. Only an organising genius could produce a shortage of coal and fish in Great Britain at the same time.

Этот остров [имеется в виду Великобритания] сделан из угля и окружён рыбой. Нужно обладать завидным организационным талантом, чтобы сделать в Британии **нехватку рыбы и угля одновременно**. [речь в Блэкпуле 24 мая 1945; перепечатано «Дейли Геральд» 25 мая]



Вылов атлантической трески (в тоннах в год) показан на врезке. Не могу не согласиться с великим лейбористом: организационный талант в Британии в избытке, нехватку таки устроили. Ценная треска обвалилась в 1992, а за ней лосось и тунец. К 2003 году осталась только килька на шпроты, а в ней обнаружили ртуть и ДДТ. Что одновременно происходило с углём – смотрим выше.

Кроме условий {8.2} М.К.Хабберт предложил и фундаментальное решение, удовлетворяющее таким условиям. Запишем обыкновенное дифференциальное уравнение (геологи зовут его уравнением Хабберта, а врачи и химики – уравнением Ричардса):

$$\frac{\partial Q(t)}{\partial t} = j \left[1 - \left(\frac{Q(t)}{Q_{\infty}} \right)^{\gamma} \right] Q(t) \quad Q(-\infty) = 0 \quad \{8.4\}$$

Здесь:

Q – некий минеральный ресурс: нефть, газ, уголь, золото, как функция от времени; производная – это добыча в год;

Q_{∞} – весь ресурс в месторождении или на планете;

γ – показатель возрастания сложности добычи при истощении ресурса.

j – коэффициент продуктивности, зависящий от технологии добычи.

Логическое обоснование простое. Сначала производство минерального ресурса растёт по экспоненте: чем больше производство – тем больше спрос. Затем приходит примерно половина добычи – «Пик», и поиск сырья становится делом всё более трудным. Несмотря на спрос, добыча падает.

Заметим, что уравнение {8.4} – математически похоже на уравнение Мальтуса-Ферхюльста {3.4}, только буквы поменялись, да появилась степень. Приведём аналитическое решение. Заменим:

$$U(t) = \left(\frac{Q(t)}{Q_\infty} \right)^\gamma \quad Q(t) = Q_\infty U^{\frac{1}{\gamma}} \quad \frac{\partial Q(t)}{\partial t} = \frac{Q_\infty}{\gamma} U^{\frac{1}{\gamma}-1} \frac{\partial U}{\partial t}$$

Подставляя полученное в {8.4}:

$$\frac{Q_\infty}{\gamma} U^{\frac{1}{\gamma}-1} \frac{\partial U}{\partial t} = j [1 - U(t)] Q_\infty U^{\frac{1}{\gamma}} \quad \frac{\partial U}{\partial t} = j \gamma [1 - U(t)] U(t)$$

Последнее уравнение решил за нас Ферхюльст, а решение приводилось в главе 3 – формула {3.5}.

$$U(t) = [1 + e^{-\gamma j(t-t_0)}]^{-1} \quad Q(t) = Q_\infty [1 + e^{-\gamma j(t-t_0)}]^{-\frac{1}{\gamma}}$$

Чаще нас интересует не сама функция $Q(t)$, а сколько можно добыть за год:

$$Hubb(t, \gamma) \equiv \frac{\partial Q(t)}{\partial t} = j Q_\infty \frac{e^{-\gamma j(t-t_0)}}{[1 + e^{-\gamma j(t-t_0)}]^{\frac{1}{\gamma}+1}} \quad \{8.5\}$$

При $\gamma = 1$ кривая упрощается:

$$Hubb(t, 1) \equiv q_{peak} \frac{4 e^{-\sigma(t-t_0)}}{[1 + e^{-\sigma(t-t_0)}]^2} \quad \{8.6\}$$

Здесь:

q_{peak} – расход (добыча за единицу времени) на пике;

$\sigma = j \gamma$ – наклон кривой;

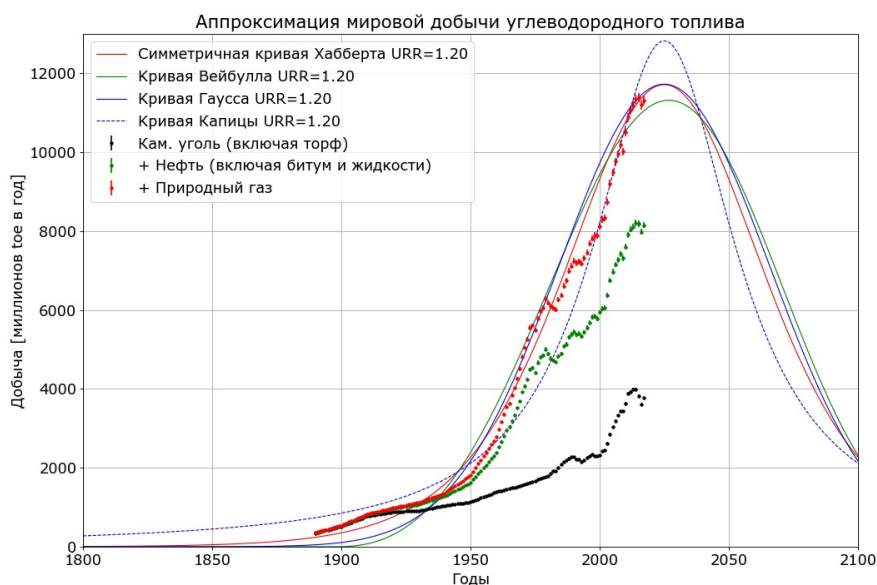
t_0 – точка пика

Кривая {8.6} носит название функции Хабберта, или **хаббертианы**, хотя математики использовали её и до Хабберта. Хаббертиану часто путают с похожей кривой Гаусса из математической статистики.

$$Gauss(t) \equiv \frac{\partial Erf(t)}{\partial t} = q_{peak} e^{-\sigma(t-t_0)^2} \quad \{8.7\}$$

Подобие и правда есть, но **гауссиана** к решениям уравнения Мальтуса отношения не имеет. Нельзя не отметить, однако, что и «капициана» из пятой главы, и гауссиана – удовлетворяют условию Хабберта {8.2}.

Как хаббертиана накладывается на реальную добычу угля в Великобритании – мы показали выше. Теперь посмотрим, как для планеты всей. Используются те же данные по добыче ископаемого топлива, что и в предыдущей главе. Сборка по производству угля, газа и нефти составлена по данным отчёта BP 2017 года [10] с добавлением «хвоста» с 1890 по 1964 по данным американского EIA. Все данные пересчитаны в тонны условной нефти по методике BP. «Нефть» включает газовый конденсат, NGPL («широкие фракции природного газа») и нефть из битума («синкруд»), но не включает биотопливо. «Уголь» включает все градации, в том числе суббитуминозный уголь и лигнит. Программа \Chapter 08\Test_10_Hubbert.py



По абсолютным величинам тройка «уголь-нефть-газ» вроде бы прошла пик в 2013 году, хотя газ продолжает расти, а нефть остаётся на «полочке» 4'250 млн тонн в год. Снижение производства – по углю, причём в основном в Китае. Напомним, что де-факто снижение производства угля в Китае пошло примерно с середины 2013 года, когда никто ещё не слышал ни про нефть по двадцать пять баксов, ни про Китайский Биржевой Коллапс, ни про Китайские Экологические Инициативы, ни про Внезапный Переход Китая к Технологическому Развитию. Похоже, правительство Китая задним числом прикручивает объяснялки к суровой геологической действительности. Про истощение китайских запасов угля упоминалось выше, и на нём мы остановимся подробнее в последующих главах.

Кривая Хабберта лучше всех укладывается на данные, хотя и не описывает их

идеально. Гауссиана и кривая Вейбулла занижают добычу до 1940 года, а кривая Капицы – наоборот, завышает. У всех трёх кривых одинаковая величина $URR = 1.2$ триллиона тонн нефтяного эквивалента (тое).

Подведём итоги:

- В 1956 году М.К.Хабберт сформулировал условия, применимые к функции дебита (или годовой добычи) в реальных геологических моделях отдельных скважин, месторождений, стран или всей планеты.
- Функция «хаббертиана» с одним выраженным пиком не обязательно есть единственное решение. Критериям Хабберта удовлетворяет множество функций, в том числе функция Вейбулла, гауссиана, или функция Капицы. Сумма этих функций тоже может удовлетворять критерию.
- Нами рассмотрен пример малого месторождения с извлекаемыми запасами менее 0.5 млн баррелей. Показаны три возможных кривых добычи, объяснены геологические термины.
- Далее, рассмотрен пример среднего месторождения с извлекаемыми запасами более 1 млрд баррелей. Продемонстрировано, как меняются со временем: (а) геологическая модель, (б) подтверждённые ресурсы, (в) дебит.
- Продемонстрирована так называемая «кривая снятия сливок» и объяснено, что под «сливками» хитрые геологи понимают не нефть, а денежки из карманов необразованных инвесторов.
- На примере среднего месторождения показано, как изменяются вероятностные оценки запасов от времени и полученных геологических данных.
- На примере реальных данных Великобритании показано прохождение Пика Угля и полное исчерпание ресурса в «технологический ноль» за примерно 200 лет активной добычи.
- Приведены данные по добыче каменного угля, «нефти и жидкостей» и природного газа в мире. В первом приближении, они лучше всего описываются хаббертианой с $URR=1.2 \cdot 10^{12}$ тонн нефтяного эквивалента. Однако и другие разобранные кривые с тем же URR достаточно хорошо ложатся на калибровку.
- Те, кто называет сторонников Пика Хабберта мальтузианцами, – совершенно правы. «Пикники» – мальтузианцы не только по духу, но и в строгом математическом смысле, так как используют уравнение Мальтуса-Ферхюльста.