

## Квантовый компьютер: где предел искусственного интеллекта?



**Самая горячая тема сегодня - квантовые вычисления. Вычисления на другом принципе, вычисления с немыслимыми скоростями! Зачем нам квантовый компьютер и где предел искусственного интеллекта?**

Прогресс развивается одновременно по многим направлениям. Но какие-то из тем выступают на первый план и некоторое время сильнее всего прочего будоражат воображение. Например, в 1920-30-е годы такими были химия и радио. В 1950-60-е - ядерная физика и космос. Сегодня это цифровые технологии, и одна из самых горячих тем здесь - квантовые компьютеры. В лентах информационных агентств то и дело мелькают сообщения о достижениях различных фирм и организаций в их разработке и описываются светлые перспективы их применения. «Облако IBM открывает свободный доступ к квантовому компьютеру». «Россия начнет разработку универсального квантового компьютера».

«Google: квантовый компьютер D-Wave в 100 миллионов раз быстрее обычного».

Последуем за трендом и попытаемся разобраться в модном вопросе.

Со времен создания первых действующих компьютеров, вначале электромеханических, действующих как система переключателей, реле (в сущности, таких же, как те, что тогда использовались на телефонных станциях), вычислители (так переводится на русский слово

«компьютер») работали на принципах двоичного счисления. Все данные в задачах представлялись в виде череды нолей и единиц, что соответствовало положению переключателя вкл/выкл. Совершенствовалась элементная база компьютеров: появились ЭВМ, электронно-вычислительные машины, в которых роль переключателей вместо реле взяли на себя вакуумные радиолампы, затем полупроводниковые транзисторы, затем чипы, то есть сначала МИС – малые интегральные схемы, потом БИС – большие интегральные схемы, потом СБИС – сверхбольшие интегральные схемы... Словом, количество элементов на единицу объема все увеличивалось и увеличивалось, производительность все росла и росла. Но принцип оставался все тем же: вкл/выкл, ноль/единица, да/нет. Однако человечество (в лице ученых) в своем неукротимом беге по пути познания осознало, что обсчитать ему хочется вообще все, но есть вещи, которые при таком подходе за разумное количество времени не обсчитаешь. Это, например, современные шифры, точное моделирование молекулярных взаимодействий и химических реакций, системы искусственного интеллекта.

В 1980-х годах благодаря теоретическим работам таких выдающихся умов, как Пол Бениофф, Юрий Манин, Ричард Фейнман, появилась надежда, что эту неприятность можно обойти, применив для вычислений квантово-механические принципы. Если говорить предельно просто, суть заключается в том, что переключатель находится одновременно и в состоянии «вкл» и в состоянии «выкл», во всех возможных состояниях. Это явление называется квантовой суперпозицией и иллюстрируется знаменитым мысленным экспериментом Эрвина Шрёдингера с котом, сидящим в ящике: это когда мы не знаем, жив кот или мертв, пока этот ящик не откроется. Элементарная единица информации в классическом компьютере называется бит. В квантовых устройствах – это квантовый бит, сокращенно кубит (физически можно использовать, скажем, электрон или фотон). Они основаны на двух четко определенных базисных состояниях некоей квантовой системы (спин для электрона или поляризация для фотона), которые можно принять за  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$  («квантовое физическое состояние ноль», «квантовое физическое состояние единица»). Но этими двумя состояниями дело не ограничивается: принцип суперпозиции, если отвлечься на секунду от котов, состоит в том, что если квантово-механическая система может находиться в каких-то состояниях, то она может находиться и в любой суперпозиции этих состояний. То есть, если представить себе привычный двоичный переключатель ноль-единица как отрезок прямой, у которого имеют значение только крайние точки, то кубит – это сфера, ноль и единица – это ее северный и южный полюса, но при этом существуют и имеют значение и все остальные точки на поверхности сферы, другие возможные состояния. Иными словами, для квантовых алгоритмов открываются возможности, которые для бинарных систем просто не существуют. Важно, что при измерении состояния кубита мы получаем не оттенки значений, а снова двоичный код: да и нет, ноль и единица. А квантовый алгоритм – это все посередине между моментом инициализации начального состояния системы и измерением ее конечного состояния. И для того, чтобы получить какие-то значимые результаты, кубитов должно быть множество и они должны взаимодействовать друг с другом. В теории таким образом (на уровне палочек и шариков)

все ясно. Осталось только реализовать захватывающую идею на практике. Что для этого нужно?

В 1995 году физик-теоретик Дэвид Дивинченцо сформулировал условия, необходимые для того, чтобы построить квантовый компьютер. Их называют «критерии Дивинченцо», и их пять:

1. Нужно иметь масштабируемую физическую систему, то есть систему из четко определяемых кубитов с одинаковыми свойствами, где число кубитов может быть произвольным и есть возможность индивидуальной адресации кубитов.
2. Мы должны иметь возможность «инициализировать фидуциальное состояние», то есть попросту уметь приводить кубиты к некоей отправной точке измерений.
3. Нужно обеспечить длительное значимое время декогеренции. При декогеренции квантовая система взаимодействует с окружающей средой, так что ее квантовое состояние неконтролируемо изменяется. А наблюдать любой физический объект можно, только когда он взаимодействует с окружающей средой, в случае наблюдения за квантовой системой энергия воздействия сравнима с энергией самой системы. И вот нужно, чтобы система не теряла нужные для производства вычислений параметры, пока вычисления не будут закончены и считаны.
4. Нам нужен универсальный набор квантовых логических вентилей (они же «гейты», от английского gate – «ворота»), то есть базовых элементов, которые входные состояния кубитов преобразуют в выходные по некоторому закону. Серия этих вентилей, как правило одно-двухкубитных операций, и представляет собой код, который выполняет квантовый процессор.
5. Конечно, если не имеем возможности считывать полученный результат, все остальное бесполезно. И пятый критерий Дивинченцо – это способность кубит-специфичного измерения, то есть мы должны уметь измерять конечное состояние каждого кубита, поскольку в основе квантовых вычислений и лежит процесс изменения квантового состояния кубита.

Как же эти требования реализуются в материале? Из чего же, из чего же, из чего же можно сделать будущее?

Квантовые компьютеры можно построить на основе квантовых точек на полупроводниках: в качестве логических кубитов используются либо зарядовые состояния (электрон присутствует или отсутствует), либо направление электронного и/или ядерного спина в квантовой точке. На сверхпроводящих элементах: логический кубит – присутствие/отсутствие куперовской пары в определенной пространственной области (куперовская пара – связанное состояние двух взаимодействующих через фонон электронов). На основе ионов в вакуумных ловушках (или атомов в оптических ловушках). В

качестве логических кубитов здесь используются основное/возбужденное состояния внешнего электрона в ионе. На основе фотонов. Кубит – поляризация (горизонтальная и вертикальная или правая и левая циркулярная).

На пути реализации технически состоятельных конструкций квантового компьютера, основанного на любом из принципов, стоит огромное количество трудностей, которые ученые и инженеры с присущим Homo sapiens хитроумием и настойчивостью постепенно преодолевают. Но когда будут надежно обеспечены основные требования – высокая точность измерений состояний кубитов и защита от внешних воздействий, сказать трудно. Стабильность систем, где в связанном состоянии находится множество кубитов, тоже остается под вопросом: чем больше кубитов в системе, тем труднее ее обеспечить. А для того, чтобы квантовые вычислительные системы бесспорно доказали свое превосходство над ныне существующими «классическими», они должны состоять из десятков связанных кубитов, работающих без срывов и с малым числом ошибок.

### **Владимиром Заборовский: «Квантовая механика – это, прежде всего, механика, построенная на анализе пространства возможного, а не состоявшегося»**

**С начала разработки квантовых компьютеров прошло очень немного времени, но хотелось бы разобраться уже сейчас не только, как она будет пройдена, но и куда приведет. Об этом обозреватель журнала «Наука. Политех» Иван Ющенко побеседовал с доктором технических наук, ведущим научным сотрудником, профессором Высшей школы математики и вычислительной физики Владимиром Заборовским.**

*Так сложилось, что после школы мы разделены на две группы: «гуманитарии», которые не могут сосчитать сдачу в гастрономе, и «математически одаренные», которые, наверно, могут. И вот они – тот контингент, который поступает на математические, физические и технические факультеты и двигает вперед то, что для всех, включая гуманитариев и вообще полных олухов, составляет сегодня основу жизни: они двигают вперед технический прогресс, дарят человечеству все эти цифровые супертелефоны для просмотра котиков и прочие мыслящие утюги. И мы к этому привыкли. А я вот посмотрел на историю и прикинул, сколько времени прошло от электромеханических счетных машин, которые занимали бескрайние залы и считали ненамного быстрее логарифмической линейки, до нынешнего состояния дел, и выходит это всего лет семьдесят...*

Пятьдесят.

*Ну, пятьдесят – это где-то от микроэлектронных первых машин, а если считать «арифмометры на гужевой тяге».*

Иван, помнишь изречение Соломона? «Всё уже все было!» На самом деле все не совсем так, как пишут в журналах. Первые идеи механических вычислений восходят к античным временам. Более того, был такой монах Раймунд Луллий в XIII веке – он все эти логарифмические линейки сделал тогда еще. Другое дело, что потребителей не было. Ты помнишь, когда Пушкин женился на Натали Гончаровой? 1832 год. В том же году Семён Николаевич Корсаков написал статью (понятное дело, на чисто французском языке) о

создании машин, сравнивающих мысли. Так вот этот человек до того, как придуманы были все эти компьютеры, придумал, как писать программы. Он даже создал свои машины в железе. На самом деле все, что мы сейчас имеем, это развитие гениальных мыслей, высказанных много-много лет назад. Так что за эти 50 лет не произошло ничего... (Смеется.)

*Так или иначе, но сегодня мы привыкли к машинам, где используется двоичная система счисления. И сначала были лампы. Потом транзисторы: микроэлектроника – ура-ура! Показали Хрущёву в 1962 году УМ-1 этот знаменитый, который Старос сделал в Ленинграде. Никита Сергеевич был крайне восхищен. Вариант для управления технологическими процессами назывался «Управляющая машина для народного хозяйства» – УМ-1 НХ, расшифровали остряки: «Ум один – Никита Хрущёв»... И как-то мы вроде были счастливы все эти годы: элементы все уменьшались и уменьшались, мощность росла и росла. Мы помним суперкомпьютер DeepBlue, который победил чемпиона мира по шахматам Гарри Каспарова в 1997 году – так теперь игровая приставка Sony PlayStation в 150 раз мощнее, чем он. Но вот оказалось, что нам все-таки мало. Самая горячая тема сейчас – квантовые вычисления. Вычисления на другом принципе! Вычисления с немыслимыми скоростями! А зачем нам квантовый компьютер?*

Да, он нам не нужен, в общем-то (Смеется.). Самая загадочная часть реальности – наше сознание. Часть, которую мы никакими формальными математическими методами описать не в состоянии. Сознание не арифметизируется, не алгоритмизируется. Возникает вопрос: есть ли еще в природе что-то, что не алгоритмизируется? Есть. А мы сможем использовать эту сложную сущность, чтобы выполнять некоторые более простые операции, – мозг же может считать один плюс два равно три? И получим ли мы какое-нибудь преимущество при этом? Что такое квантовая механика? Это, прежде всего, механика, построенная на анализе пространства возможного, а не состоявшегося. Если ты помнишь, главный принцип квантовой механики – это принцип дополненности. Правильное объяснение сложного процесса возможно только тогда, когда в этом объяснении используются взаимоисключающие понятия: квантовая частица – это и частица, и волна. Не может быть в нашей логике один и тот же объект и частицей, и волной: это принципиально другая сущность.

Так вот замысел квантового компьютера заключается в очень простом применении этой идеи. Что такое современный компьютер? Это устройство, которое считает, и устройство, которое запоминает. Если бы нам удалось все это совместить, то мы бы получили колоссальный эффект параллельного выполнения операций. Так вот квантовый компьютер, считается, что если он заработает (но я-то считаю, что он не заработает), то мы сможем колоссальным образом ускорить расчеты. Но все, что происходит в квантовом мире, вероятно: у нас есть объективная вероятность получить некоторое значение, но мы не можем гарантировать, какое значение мы получим, оно будет взято из пространства возможностей. Если мы многократно повторим эти вычисления, мы сможем получить

некоторое устойчивое в статистическом смысле значение, и тогда мы его возьмем за истинное. Но, слушайте, это выглядит ненадежно. Я, например, не доверяю этому вычислению. Потому что усреднение не учитывает новые данные, появившиеся за время обсчета этого усреднения. Поэтому квантовый компьютер – это некий прототип аналогового нецифрового вычислителя, который доставляет ответы, используя возможности того, что мы называем квантовым параллелизмом, но сами ответы носят вероятностный характер.

*Это можно сравнить с пифией, да? Мы получаем ее предсказания, но как мы их толкуем – другой вопрос: пифия предсказывает смерть царю Филиппу, но пока Филипп не умрет, мы не знаем, в чем смысл предсказания.*

Абсолютно правильно. Когда мы говорим о вероятностях, должны понимать, что это объективное свойство реальности. Но оно может быть состоявшееся и не состоявшееся. Вся наша физика построена на том, что состоялось. Но реальность наша включает и то, что еще не состоялось – это главное отличие нашего мышления от физического процесса. Физики на этом ломаются полностью: физика не использует такого понятия, как «информация»... Есть настоящие физики, которые в чем-то разбираются. Например, Джон Арчибальд Уиллер. Он говорил: «Я думал, что все вокруг меня – материя. Потом, когда я стал повзрослее, я понял, что все вокруг меня – энергия. А теперь я утверждаю, что всё вокруг – информация». “It from bit” – вся материя построена из информации, вот его цитата. Это, конечно, колоссально подрывает примитивную картину мира. Но извините, это люди, которые не с улицы пришли – это физики, квантовые механики. То есть, понимаешь, получается, что мир не состоит из причины и следствия, а он состоит из интенции и реализации. Как я говорю своим студентам: друзья, принцип дополнительности в этой философии состоит в том, что нельзя говорить ни о материальном, ни об идеальном. Правильный ответ: и то, и то.

*Но гонка за квантовым превосходством – все же это реальность, данная нам в ощущении. Так куда же мы бежим, чего хотим?*

Иван, я человек из компьютерных наук. А квантовое превосходство – это физики, они там заключают, кого хочешь. Значит смотри, где мы сейчас находимся с точки зрения прорывного направления развития компьютерных наук. Оставим в стороне квантовые вычислители: я тебе примерно сказал, о чем это. Да, есть класс задач, где они могут быть применены. В общем случае их применение связано с тем, что их результаты являются случайными, и надо иметь очень серьезные аргументы, чтобы такими случайными результатами пользоваться на практике. Возвращаясь к физикам: мы не можем их обойти. Они говорят: физическое пространство четырехмерно, у нас есть три координаты и время. А теперь мы говорим: а мы кто? Мы – физические объекты, вот мы с тобой, или нет? Мы все-таки когнитивны, у нас есть разум и так далее. И тогда возникает вопрос: чем наше существование интеллектуального субъекта отличается от физического объекта? Это имеет прямое отношение к вычислениям: то есть могу ли я вычислить реальность, которую я вижу. Ответ: все, что я вижу, я могу вычислить. Почему? Я могу передвигаться как по

координатам, так и во времени. Но если физический объект может перемещаться во времени только в одну сторону – это стрела времени термодинамическая, то я, если я работаю в когнитивном пространстве, могу ходить и назад, и вперед. Я могу быть и в прошлом – это память, и в будущем – это мой прогноз. Так что когнитивное пространство шестимерно: три координаты и три времени. А технически это выглядит так: мне нужна большая память, потому что все, что сохраняется в памяти, это транспортировка чего-либо во времени. И мне нужна высокая скорость прогнозов, то есть моделирования будущего, для того, чтобы принимать решения сейчас, на которые будет влиять еще не состоявшееся будущее. Это практически чистая квантовая механика: туннелирование, ретропричинность и так далее. Но мы работаем в этом пространстве. Что надо делать нам? Делать вычислители, которые не просто считают, а которые имеют специально организованную память, которая позволяет нам связывать объекты с их текущим состоянием. Как это состояние изменится – это всегда вероятностная вещь. Попытка посмотреть, что было раньше – тоже. Прошлое так же вероятно, как и будущее, потому что мы не можем держать в памяти все события прошлого. То есть мы оставляем только то, что нам надо. Мы должны создавать компьютеры, работающие в шестимерном пространстве, в котором есть три координаты пространственные и три координаты времени. Вот мы этим сейчас и занимаемся.

*И работа таких компьютеров не зависит от элементной базы или нужны какие-то физические принципы для их производства?*

Важнейший постулат естествознания заключается в том, что всё уже есть – вы только разглядите то, что надо. То есть я уже говорил: Корсаков, 1832 год – все, что мы называем искусственным интеллектом, он описал в виде статьи. Принципы не меняются. Конечно, элементную базу надо делать получше: мне нужна большая память, значит, я должен к ней быстро обращаться. Вот сейчас у нас в нашем суперкомпьютерном зале стоит двадцать вторая в мире по быстродействию гиперконвергентная система хранения данных. То есть для компьютера важны не просто счеты, а важна структура хранения данных. Ждать, когда кто-нибудь придумает «нанотрубку», на которой будет сделан квантовый компьютер, не надо.

*Ну, то есть «работайте над своими фотонными и сверхпроводящими компьютерами, но будущее за компьютерами, которые работают в другой плоскости»?*

Конечно. Воспроизводить архитектуру современного компьютера, используя квантовые технологии, глупо, потому что это совершенно другая возможность. Наше сознание, если почитать Пенроуза и так далее, как раз использует квантовые эффекты. А что такое квантовые эффекты? Это суперпозиция. Причем суперпозиция не обязательно физических состояний. Главная идея: вот берем, например, интернет: интернет – это не физическая сеть, это логическая сеть, и потому ей совершенно по барабану, какими каналами связи ты пользуешься. У нее есть только логический интернет-адрес и виртуально-транспортное

соединение. Это виртуальная сеть. Почему она не физическая? Количество людей, которые подключены – это, в принципе, миллиарды, если я вынужден был бы между ними всеми городить физические каналы связи, такая сеть не существовала бы, она была бы слишком сложной. А у меня возникают виртуальные соединения по мере надобности. Виртуализация – в логическом, информационном смысле – это магистральный путь в развитии всех коммуникационных технологий. И нам не надо искать новых физических принципов – нам просто надо применять технологии, которые у нас есть, в разных ипостасях. Главное – архитектура, все компьютеры, которые мы сейчас видим, включая нейронные сети, это воплощение машины Тьюринга.

*Переходим теперь к другому животрепещущему вопросу – искусственному интеллекту. Всячески подчеркивается его главное достоинство – самообучаемость. Подразумевается, что скоро наступит заветный миг, когда могучий искусственный интеллект решит все наши проблемы. Меня смущает то, что учиться он будет, конечно, на том, что делаем мы. И вот если он будет учиться на том, что делаем мы, то страшнее этого не будет ничего. Потому что он, естественно, усвоит все наши ошибки.*

Да, правильно.

*И где же предел искусственности интеллекта? Куда мы здесь идем?*

Для начала нужно определиться с понятиями. Что такое интеллект на вычислительном уровне, если мы его хотим смоделировать. Вот задай кому-нибудь из компьютерщиков вопрос: что такое интеллект?

*Не знаю, что они ответят. Но могу сам попробовать ответить: это машина реагирования на окружающую среду, с мощной прогностической функцией.*

Я из компьютерных наук – наша специальность называется «Математика и компьютерные науки». И в компьютерных науках есть прямая задача: «один плюс два равно три», например. Для прямой задачи есть алгоритм решения. Механически я там передвигаю костяшки на счетах, либо сдвигаю регистры – это не интеллект. А интеллект – это решения обратной задачи. А что такое обратная задача? Если говорить про «один плюс два равно три», то это каким образом я могу эту тройку породить. И любая обратная задача имеет бесконечное количество возможных вариантов решения. В чем смысл решения обратных задач: практически все задачи требуют учета ограничений. Так вот интеллект – это умение решать задачи с учетом ранее полученного опыта. Это не решение по алгоритму – это построение алгоритма получения решения. Мы постоянно решаем такие задачи. Возникает вопрос: а возможно ли построить машину, которая тоже сумеет постоянно решать обратные задачи. И ответ требует учета массы обстоятельств.

*Я люблю научную фантастику, особенно классическую. И здесь мне пришли на ум эти пресловутые «три закона робототехники». То есть, допустим, мы построили роботов, у*



*которых бесконечно совершенные «позитронные» мозги. И вот они строят самостоятельно, исходя из своего опыта и натуры, эти самые алгоритмы решения. А мы им имплантировали наши «не убий». Но если они так совершенны, наши законы будут им по колено, нет? Ведь действовать-то они станут исходя из логики своего существования...*

Нет, Иван, не впадай в крайности. Мы не имеем никаких иллюзий по отношению к тому, что может делать электронное устройство: оно может работать по программе. Единственная свобода действий у него – это поменять программу. Пока не поменяется программа, робот будет действовать так, как нужно. Есть и разные логики, помимо реализованной в современных процессорах, бинарной, булевой логики. Темпоральная, например. Модальная логика. И конечно, мы должны использовать в этих агентах, роботах, киберфизических системах просто определенный класс логик, который поменять они не в состоянии. Ты же, например, не можешь, просто сидя на стуле, заставить свое сердце биться быстрее или медленнее. Потому что мы отключены от некоторых функций, которые управляют физиологией нашего тела. Точно так же любая конструкция, которую мы создадим в виде интеллектуального объекта, будет иметь функции, которые будут недоступны ей из ее функционального пространства. Поэтому я абсолютно не волнуюсь, что роботы нам чего-нибудь там устроят. Другое дело, что мы сами себе можем устроить. Есть классический закон компьютерных наук: в любой программе на тысячу операторов – десять ошибок. Если ты исправишь эти десять ошибок, у тебя появятся новые десять. Написать программу без ошибок невозможно. Но это не ошибки в таком примитивном смысле, а это свойства какие-то, это функции: программы работают точно так, как мы их написали, но мы сами до конца не понимаем, что мы написали. Вспомним Тютчева: «Мысль изреченная есть ложь». И вот в этом опасность, а не в том, что роботы будут агрессивны. В том, что мы можем создать системы, которые мы сами понимать не будем.

*Ну, а если мы еще и отдадим им самим на откуп создание программ – разовьем логически идею искусственного интеллекта, а сами не будем иметь к этому прямого отношения?..*

Нет-нет... Ну, это опять некоторые иллюзии, как насчет квантового компьютера. Что такое современный искусственный интеллект? Это то же самое программирование, только в нем язык программирования заменен на некоторую структуру данных, которую мы как интеллектуальные агенты можем классифицировать. Нейронные сети ничему не учатся сами – они учатся на основе того набора примеров, который посчитали возможным им предоставить мы для настройки. Вместо написания алгоритма там настраиваются весовые коэффициенты нейронов, которые, по сути дела, выполняют те же самые операции, которые выполняют операторы в любой программе. Просто по-другому написано. А напиши на русском языке, на английском, на китайском – смысл остается тот же самый. Поэтому никакого самообучения в первоначальном смысле нет. Там есть некоторые особенности – «реинфорсмент лернинг» (обучение с подкреплением, от англ. reinforcement learning) и так далее, но все это действует в четких рамках достаточно ограниченного набора возможностей.

*Но это современное положение вещей. А тот же reinforcement learning –это же фактически оперантное научение скиннеровское, принцип обучения у живых существ. То есть перед нами фактически система, которая способна потенциально развиваться самостоятельно. Так что боязно чего-то за, так скажем, светлое будущее!*

Ну а была ли большая беда, что люди открыли огонь? Да спрячьте огонь в печку и грейтесь! То же самое и здесь: можно спалить дом, а можно приготовить яичницу. Из любого открытия можно извлечь пользу или обратить его во зло. Поэтому не надо бояться – надо четко понимать, что мы делаем. Все зависит от нас. Даже если посмотреть на возможности наши: у нас в голове сто миллиардов нейронов, у нас длина синаптических связей, знаешь какая, миллион километров! А наши все суперкомпьютеры на шесть-восемь порядков слабее любого человеческого мозга. Вот и всё. И пока мы доберемся до возможностей, соизмеримых с нашими мозговыми процессами, эволюционный процесс пройдет такой, что мало не покажется. Более того, суперкомпьютер потребляет мегаватт электроэнергии, а наш мозг – двадцать ватт, хотя он в миллион раз более мощный в вычислительном смысле. У него есть недостатки, но их можно компенсировать. Поэтому мы сейчас сторонники той концепции – лично я ее активно пропагандирую последнее время, что не надо говорить об искусственном интеллекте: его не будет. Но можно говорить об экзоинтеллекте.

*Это как экзоскелет?*

Да! Чего нам не хватает? Памяти и быстрого счета – все остальное у нас есть. Делайте, пожалуйста, память, которой можно было бы взаимодействие с человеком организовать, и быстрый счет. Прогноз вперед и прогноз назад – всё, больше нам ничего не надо, все остальное мы сами сделаем!