

ФОРМАТЫ ДАННЫХ В МНОГОНЕЙРОННЫХ СИСТЕМАХ И ОБРАТНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ МОЗГА

В.Л. Дунин-Барковский,

*Отдел нейроинформатики
Центра оптико-нейронных технологий
НИИ системных исследований
Российской академии наук,
Россия, Москва*

wldbar@gmail.com

*Интернет-лаборатория по обратной инженерии мозга
Им. Дэвида Марра
<http://rebrain.2045.com>*



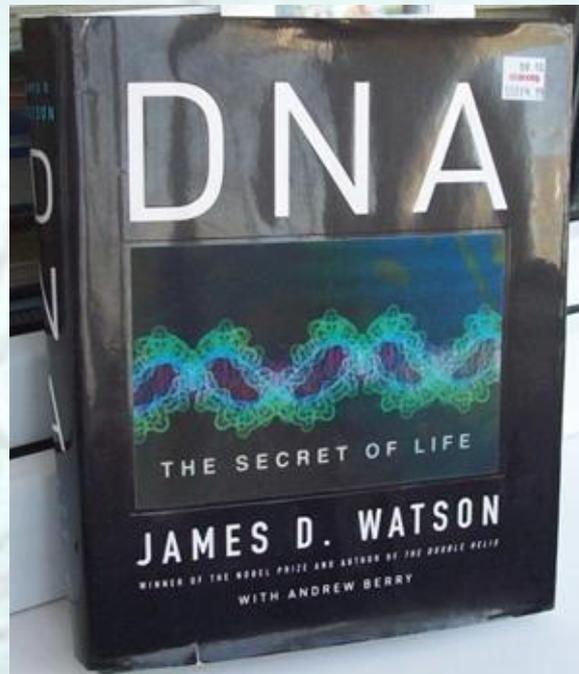
Основная идея этой презентации заключается в том, что сейчас мы как никогда близки к пониманию форматов данных, используемых в нейронных системах.

Это понимание достигается благодаря ряду недавних разработок в этой области, сделанных во многих лабораториях мира. Мы демонстрируем здесь наши старые результаты, имеющие непосредственное отношение к этой проблеме.

Начнём мы с оценки значимости форматов данных для понимания информационных систем в целом.

И, наконец, будут представлены аргументы в пользу потенциального успеха нашего проекта <http://rebrain.2045.ru>, который впервые был представлен 5го сентября в Бостоне на конференции «Нейроинформатика-2011»





INTRODUCTION
THE SECRET OF LIFE

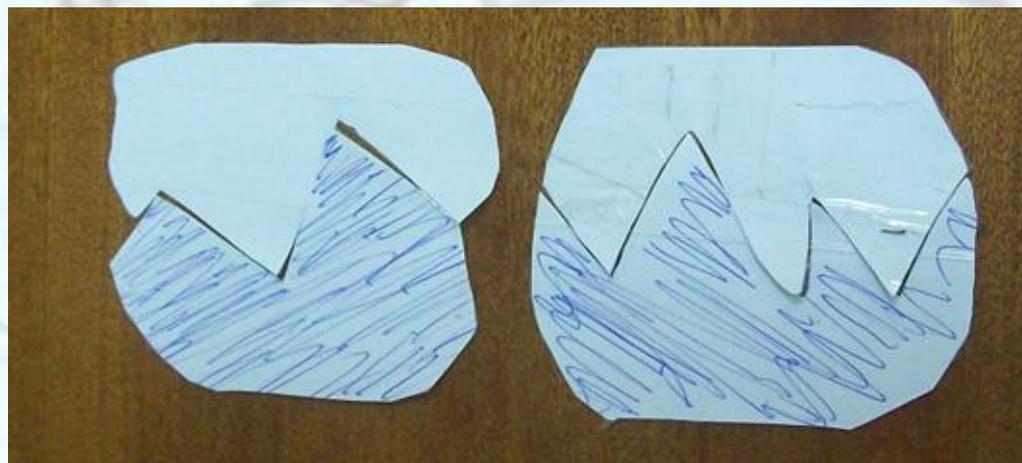
As was normal for a Saturday morning, I got to work at Cambridge University's Cavendish Laboratory earlier than Francis Crick on February 28, 1953. I had good reason for being up early. I knew that we were

basic unit, the nucleotide, which comes in four varieties: adenine (A), thymine (T), guanine (G), and cytosine (C). I had spent the previous afternoon making cardboard cutouts of these various components, and now, undisturbed on a quiet Saturday morning, I could shuffle around the pieces of the 3-D jigsaw puzzle. How did they all fit together? Soon I realized that a simple pairing scheme worked exquisitely well. **A** fitted neatly with **T** and **G** with **C**. Was this

So the code came in threes, and the links from DNA to protein were RNA-mediated. But we still had to crack the code. What pair of amino acids was specified by a stretch of DNA with, say, sequence ATA TAT or GGT CAT? The first glimpse of the solution came in a talk given by Marshall Nirenberg at the International Congress of Biochemistry in Moscow in 1961.

... according to procedures developed at New York University ... by the French biochemist Marianne Grunberg-Manago. She had discovered an RNA-specific enzyme that could produce strings like AAAAAA or GGGGGG. And because one key chemical difference between RNA and DNA is RNA's substitution of uracil, "U," for thymine, "T," this enzyme would also produce strings of U, UUUUU . . . —poly-U, in the biochemical jargon. It was poly-U

Посмотрите, что Уотсон писал в 2005 году, в годовщину открытия структуры ДНК. Они открыли тайну жизни! На самом деле, тогда был открыт формат данных, определяющих наследственность (или филогенез). Эти данные кодируются в последовательности из четырех «букв» - А, G, T, C. И это - всё! Спустя восемь лет, прошедших с 1953 года, в 1961 году в Москве было обнародовано первое открытие в области исследования формата данных онтогенеза – последовательность нуклеотидов UUU кодирует фенилаланин (открытие сделано Ниренбергом). Эти события положили начало развитию и процветанию современной молекулярной биологии. Так что форматы данных, используемых в конкретных информационных процессах, очень важны.



Говоря об этом открытии, я хотел бы выделить один важный момент – чтобы сделать его, не было необходимости в «новом математическом языке».

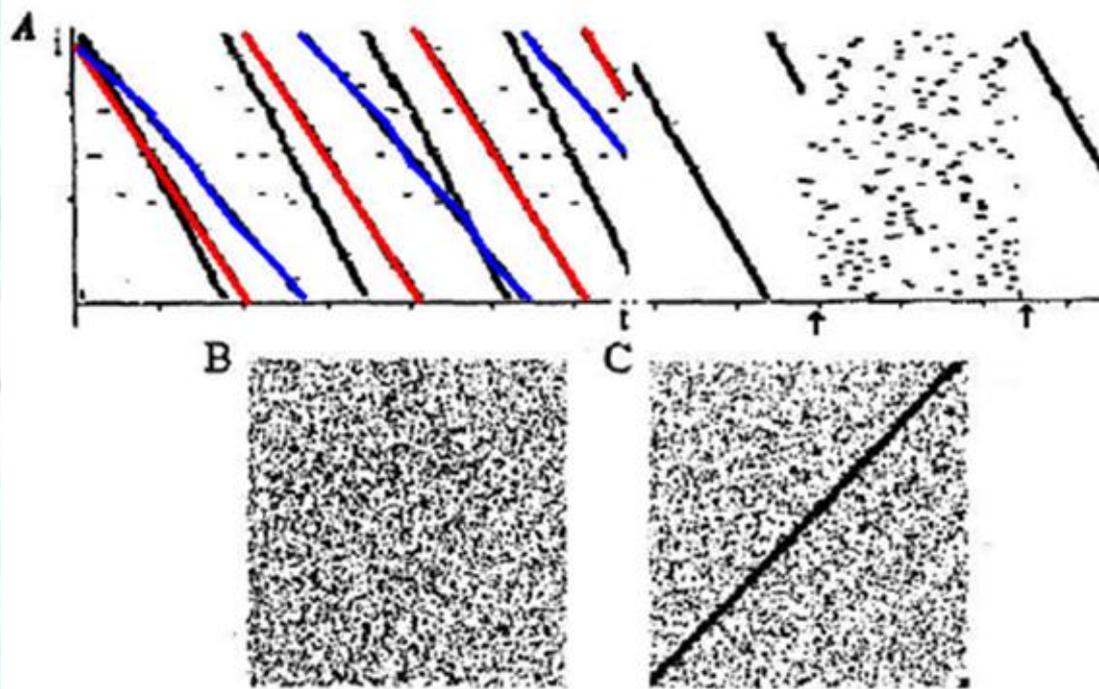
Основные свойства «наследственных букв» были обнаружены благодаря простым манипуляциям с вырезанными из картона моделями нуклеотидов.

Возвращаясь к формату нейронных данных:

Мое присутствие на ВІСА 2011 объясняется тем, что один из важнейших форматов данных для многонейронных систем был обнаружен одним из основателей ВІСА Алексеем Самсоновичем. Я говорю об основополагающей работе Самсоновича и Макнафтона (1997) о так называемом интегрировании пути. Результаты, предшествовавшие данным Самсоновича (Сун-ичи Амари 1971, 1974; Дунин-Барковский и др., 1984 – 1995) и следовавшие за ними (Цодыкс, 2010, Ижикевич, 2010; и многие другие), составляют основную часть моего доклада.

Итак, я опишу основные явления в том виде, в каком мы их впервые заметили.

Для начала мы воспроизвели феномен, впервые описанный Амари. Он обратил внимание на то, что N нейронов, выстроенных на отрезке прямой, с локальными возбуждающими связями и нелокальными тормозными связями (матрица связей типа «мексиканская шляпа»), имеют N устойчивых состояний возбуждения, в которых L последовательных нейронов активны, а остальные - заторможены. Мы лишь замкнули отрезок в кольцо.



Dunin-Barkowski, Osovets, 1994, 1995

Затем мы ввели аккомодацию нейронов. Это позволило нам перейти от множеств стационарных устойчивых состояний к динамике состояний.

Мы получили своеобразный генератор ритмики, основанный на распространении волны в кольце. Скорость распространения волны зависит от порога нейронов. Направление волны определяется (случайным) нарушением симметрии. Матрица связей (и активность в сети) выглядят случайными, когда нумерация нейронов не согласована с характером её активности.

Another NN activity paradigm arise in the explored networks, when we introduce neuron threshold, $\pi_i(t)$ dependence on neuron activity state:

$$\pi_i(t) = \pi_0 + \lambda \int_0^t V_i(t) \cdot h(t - \tau) d\tau,$$

where $h(\theta)$ is a unite function of the duration W and π_0 and λ are constants.



Activity propagates over ring in either direction

Следующий шаг также был простым, но очень важным. Мы изменили номера нейронов случайным образом и добавили к старым связям ещё одну «мексиканскую шляпу», в новой нумерации нейронов. В результате в сети появились устойчивые состояния, соответствующие новому кольцу. А в нейронной сети, содержащей два кольца, активность могла распространяться по каждому из них и в каждом из них - в любом из двух возможных направлений. Для $N=256$ нейронов нам удавалось получить *пять* взаимно независимых колец. И затем мы сделали следующий шаг. Мы внебрили в нейронную сеть «змею». Что такое змея? Ниже представлено формальное определение. Если объяснять на пальцах, то, код «змея в ящике» (SIB) – это нечто вроде полутвёрдой (не надувной, а губчатой) велосипедной камеры, утрамбованной в ящик.

Код «змея в ящике»

$$\rho_{ij} = \begin{cases} |i - j|, & \text{if } |i - j| \leq \delta, \\ \geq \delta, & \text{if } |i - j| > \delta, \end{cases}$$

Определение кода

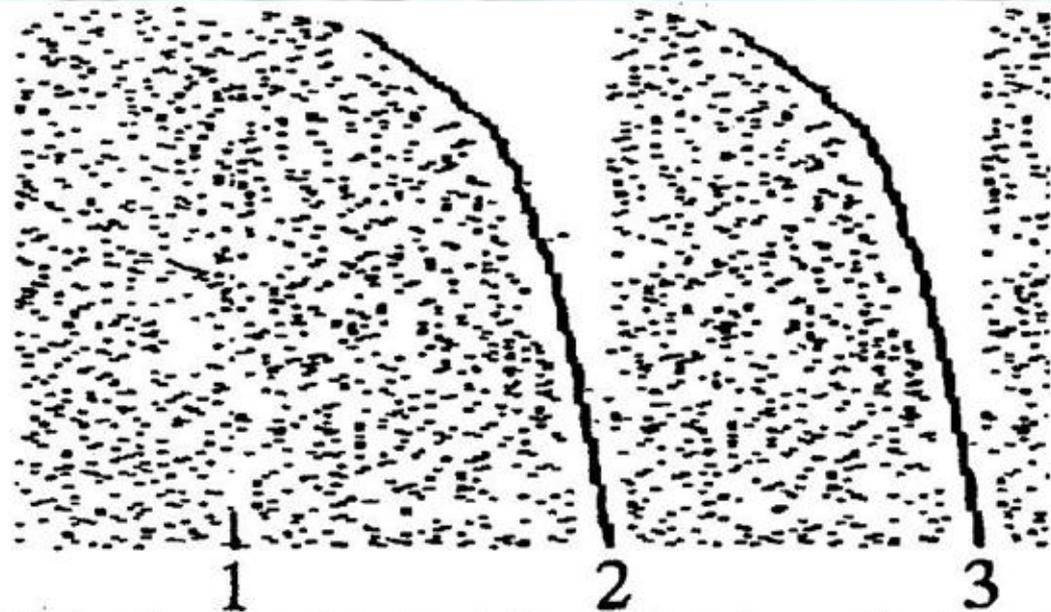
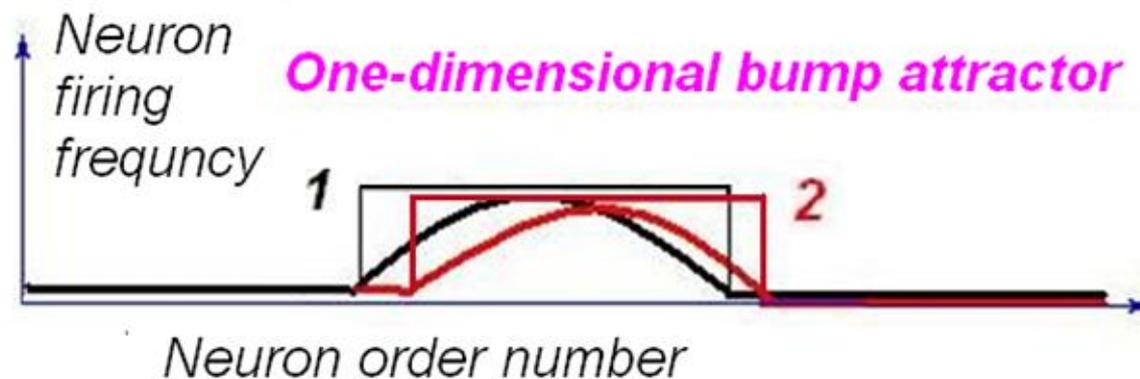


Fig.4. Work of a neural network in which a hyper-ring is written.
1) Phase-ordering of neurons;
2), 3) times of accomplishment of the complete activity cycles.

Код представляет собой последовательность точек, «насыпанных» вдоль оси этой камеры с равномерной плотностью. В результате формирования связей, активность в нейронной сети смогла распространяться вдоль оси «змеи». Этот факт можно легко обнаружить, как показано на рисунке. Достаточно в момент времени t перенумеровать нейроны в соответствии со временем их последнего возбуждения. Как видно из рисунка, «змея» действительно находится в «ящике». А именно: мы видим как бы распространение волны по сети всякий раз, когда активность нейронной сети возвращается к той фазе цикла активности, в которой были перенумерованы нейроны. Получившийся в результате квазинепрерывный аттрактор динамики активности нейронной сети называется «бугорковым аттрактором».

Почему «бугорковым»? Потому что для каждого устойчивого состояния сети существует такая нумерация нейронов, в которой все возбужденные нейроны пронумерованы последовательно, а состояния, полученные при возбуждении нейронов с «чуть-чуть» смещёнными порядковыми номерами, также устойчивы. То есть, для всех устойчивых состояний активности, на локальном уровне (в соответствующей нумерации), имеются как бы «бугорки» активности нейронов.



Two stable states of the network: 1 and 2

За последние два года стало ясно, что бугорковые аттракторы могут быть **ЗАРАНЕЕ СФОРМИРОВАННЫ** в нейронных сетях, по-видимому, при помощи каких-то молекулярных меток

Точные механизмы формирования сети аттракторов все еще не изучены, однако, можно высказать правдоподобные гипотезы о таких механизмах.

Для одномерного циклического аттрактора может быть эффективным, например, следующий механизм.

Пусть M – требуемое число состояний в сети из N нейронов. Мы выберем M молекулярных меток и поместим их на равных расстояниях друг от друга вдоль некоторого (воображаемого) кольца, так что определены расстояния между метками на кольце. Затем для каждого из N нейронов мы случайным образом выберем (M/N) меток, так, чтобы среди меток для каждого нейрона расстояние между каждыми двумя отдельно взятыми метками было не меньше Δ . После этого мы с помощью возбуждающих связей соединим каждый нейрон со всеми нейронами, метки которых находятся на расстоянии, не большем чем δ , от меток данного нейрона. Все остальные связи в сети - тормозные. При определенных значениях M , N , Δ и δ (мы опробовали значения 5632, 512, 150 и 10) в этой сети возникает циклический бугорковый аттрактор SIB-типа.

Последовательность состояний типа «змея в ящике» способна служить дискретной решёткой для представления одномерных переменных.

Процедура получения отображения олигомерных ($d=0,1, 2, 3$) переменных на конечную нейронную решётку (нейронный преобразователь аналогового сигнала в дискретный), основанная на обучении, была подробно разработана Тейво Кохоненом начиная с 1980-х (самоорганизующиеся карты, SOM). Эта методика работает и для бугорковых аттракторов. Возможно, существуют и более эффективные методы получения отображений, чем метод Кохонена.

Для решёток, основанных на бугорковых аттракторах нейронных сетей, существуют ограничения на представление переменных. Дело в том, что размер нейронных сетей, доступных в мозгу для сформированных аттракторов, составляет около $N=10000$. Количество состояний бугоркового аттрактора составляет около $100N = 1000000$. Для одномерной переменной - это хороший динамический диапазон.

Для двумерных переменных мы имеем 1000 градаций решетки для каждого измерения, что тоже неплохо. Для трехмерных – 100, что, пожалуй, уже на грани допустимого. По этой причине, в рамках одной нейронной сети, прямое представление переменных, число измерений для которых превышает $d=3$, вряд ли возможно.

Особый случай для карт Кохонена представляет значение $d=0$.

Рассмотрим этот случай более подробно.

Во-первых, процедура предварительного формирования сети. Опять же, у нас есть M маркеров для распределения между N нейронами. В данном конкретном случае имеется n типов маркеров. Поэтому после случайного распределения у каждого нейрона будет M/N маркеров разных типов. Затем все нейроны, имеющие одинаковые типы маркеров, устанавливают между собой возбуждающие связи. Остальные связи – тормозные.

Динамика нейронной сети с такими связями – это классическая динамика Хопфилда с быстрым переходом из любого состояния в одно из n устойчивых состояний. Важно отметить, что не существует простого правила для выбора матрицы связей нейронов, способной обеспечить однородное распределение n состояний активности среди всех возможных состояний активности. Однако СЛУЧАЙНЫЙ выбор, реализуемый описанной процедурой, обеспечивает распределение, близкое к однородному. Этот факт хорошо известен в теории информации. Его «нейронное» значение впервые отметили Коуэн и Виноград (1963), а Бриндли (1969) предложил первую физиологически правдоподобную модель, эффективно использующую случайные связи.

Следующий шаг исследования аттракторной модели – приобретение значений различными точками аттрактора. Достигается это путем настройки внешних связей нейронной сети. Разумеется, необходимо установить как афферентные (входные), так и эфферентные (выходные) связи.

Настройка афферентных связей обеспечивает свойства типа так называемых «нейронов бабушки». Они приобретаются в ходе процесса, напоминающего обучение персептрона. Настройка выходов нейронной сети обеспечивает состояниям сети свойства «командных нейронов». Очень вероятно, что особую роль в обучении аттракторных состояний могут сыграть циклы обратной связи, включающие в себя свойства сходимости в динамике аттрактора.

Интересно обсудить один частный случай аттракторов. Я имею в виду «нейроны бабушки» для слов. Из сказанного ранее становится очевидно, что аттракторы, представляющие отдельные слова, не зависят от их семантики (то есть, значения). Это соответствует распространенной поэтической метафоре, согласно которой слова существуют сами по себе, независимо от их смысла. Такого рода соображения естественным образом приводят нас к проблемам языка.

Очевидно, что в естественных языках все слова представлены отдельными аттракторами. Технически эти аттракторы имеют тот же тип, что и обычные «нейроны бабушки». Но в отличие от «нейронов бабушки», представляющих природные объекты (например, гром и молнию), они представляют искусственные объекты, созданные людьми. Есть все основания полагать, что изначально комбинации звуков, используемые людьми, были всего лишь звуковыми игрушками, передаваемыми из поколения в поколение.

Но однажды, один из наших предков – фактически величайшая личность в истории человечества – изобрела способ передавать универсальные мысли от человека к человеку, используя уже давно использовавшиеся к тому времени людьми звуковые «игрушки-болтушки».

Разумеется, представители многих видов животных способны обмениваться между собой ограниченным набором мыслей (общим числом менее сотни). Можно привести в пример сигналы тревоги, агрессивный рёв, лай, вой, мурлыканье и т.д.

Однако, число универсальных мыслей, которыми обмениваются люди, неизмеримо больше ста. Это - практически бесконечное число вариантов возможных информационных сообщений.

Несмотря на то, что мы точно не знаем, кем была первая заговорившая личность, следует отдать дань её величию.

Разумеется, все это произошло очень давно. Археологические находки (косвенно) свидетельствуют о том, что это случилось около 75 тысяч лет назад. Скорее всего, уже никто не помнит ни самого этого события, ни имени изобретателя. Однако я бы рискнул указать на вполне определённые древние письменные свидетельства как самого факта изобретения языка (“... в начале было слово...”), так и имени изобретателя. Конечно! Ее звали Ева, потому её и называют матерью всех людей...

Я бы предложил почтить её личность званием

Ева Лингва

Сегодня, 6 ноября 2011 года, мы можем отметить ее 75000-й день рождения.

Прошу прощения за некоторую патетичность. Я просто хочу сказать, что возможно, что сейчас для нас наступило правильное время тщательно проанализировать и обдумать все уже известные детали архитектуры и физиологии мозга, и это может стать кратчайшим путем к пониманию механизмов разума человека.

И последнее. В 1970-е годы те мои коллеги-физики, которые не имели отношения к нейрофизиологии, нередко пеняли мне:

- Почему ты думаешь, что сможешь что-то понять в мозге, подключив к нему пару электродов?

Только представь себе, что можно узнать о процессах, происходящих в компьютере, всего лишь измерив электрическое поле в нескольких точках внутри него!

Сейчас, в 21-м веке, мы знаем, что нельзя подпускать своих врагов (и, возможно, даже друзей) к измерению электрического поля где-либо рядом с вашим компьютером – ведь это отличный способ читать информацию с компьютера. Почему? Потому что мы понимаем принципы работы компьютеров.

Так что, если мы хотим понять мозг, в первую очередь мы должны понять основные ТЕХНИЧЕСКИЕ принципы его работы. И это именно то, что мы собираемся делать в рамках Российского проекта по обратной инженерии мозга. Я надеюсь, что мне удалось продемонстрировать, насколько мы сейчас близки к пониманию самых фундаментальных принципов – формата нейронных данных, нейронного кода. На этом основывается уверенность в том, что мы сможем успешно справиться с нашей работой за ближайшие четыре года. Разумеется, при условии, что нам ещё и повезёт...

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаюискреннюю признательность основателю движения «Россия 2045» Дмитрию Ицкову за создание сайта нашей Интернет-лаборатории по обратной инженерии мозга (названной в честь выдающегося нейротейоретика Дэвида Марра (1945-1980)) и за спонсирование моей поездки на bica 2011.

Также хочу сказать большое спасибо членам формирующейся сейчас «команды» Российского проекта по обратной инженерии мозга:



Особую благодарность приношу выдающемуся современному русскому писателю

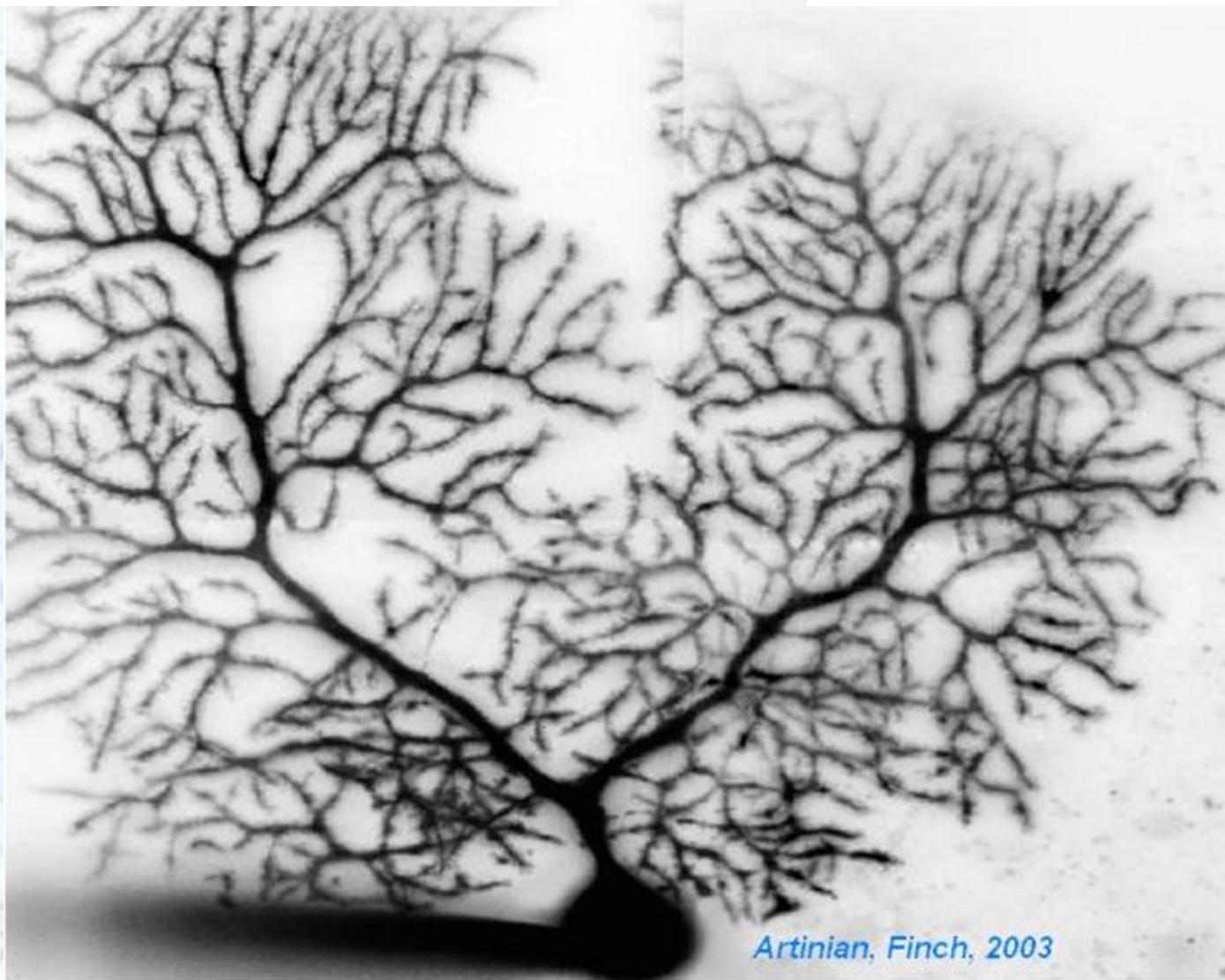
Людмиле Улицкой

за подсказку-напоминание имени изобретательницы языка людей-

Ева Лингва.

<http://rebrain.2045.com>

wldbar@gmail.com



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!