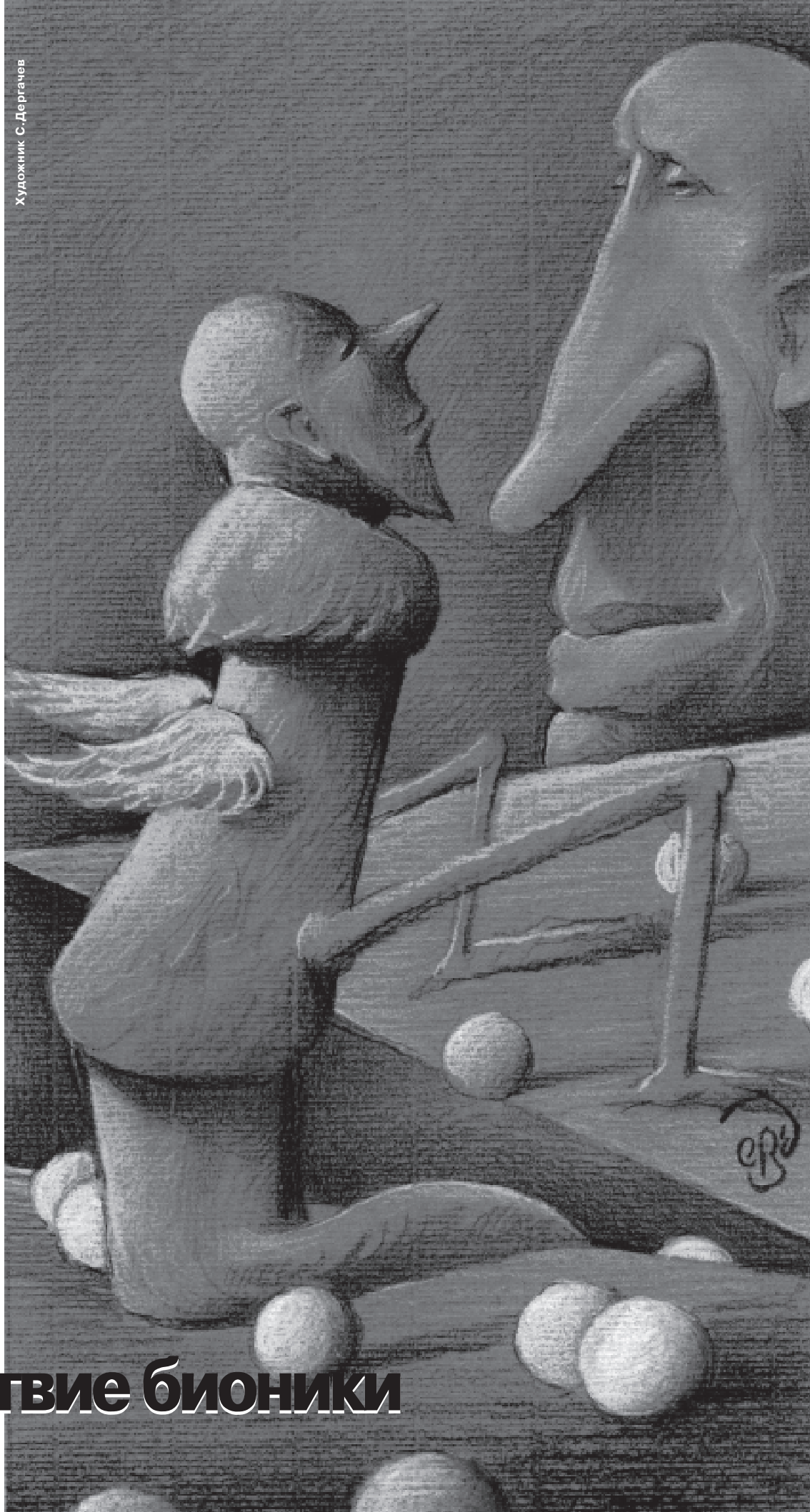


Примерно на середину прошлого века пришелся расцвет бионики. Согласно словарю, это направление кибернетики, изучающее структуру и жизнедеятельность организмов с целью использования... ну и так далее. На самом же деле, в реальном словоупотреблении это было вот что: потрошим мышь и говорим — надо же, как здорово устроено. А ну-ка, паяльники на изготовку, канифоль товсь! Сейчас из болтов и гаек склепаем такое — ни одному империалистическому коту не поймать!

Понять, как устроена природа, непросто. Учебник Вилли и Детье толще Тимошенко и Гере, но дело даже не в толщине, а в другом языке. Причем те, для которых «Биология» — настольная книга, не бежали к читателям «Механики материалов» со своими советами. Поэтому технари, наморщив лобик, учили незнакомые слова и пытались понять, как устроено живое. Не только для бескорыстного восхищения красотой и мудростью устройства мира, но и чтобы слямзить. И немало в этом преуспели, а попутно создали протезы сердечного клапана, коленного сустава и много других, очевидно полезных вещей. Но понемногу данный метод, как и должно было произойти, нашел свое стабильное место среди всех других методов, и страсти поутихли. На некоторое время...

Л.Ашкинази

## Второе пришествие бионики



## Локальный оптимум, и почему он не глобальный

Вот на поверхность земли упал шарик и покатился в сторону понижения рельефа. Если трение будет не слишком велико и не слишком мало, через какое-то время он найдет минимум высоты, ямку и останется в ней (оценка влияния трения предоставляется читателю в качестве легкого домашнего упражнения). Будет ли эта ямка самым низким местом на земле? Посреди двора — колодец, у колодца ограждение, на одном из кирпичей — ямка. Шарик попадает в эту ямку и с тоской глядит на двор, который весь ниже дна ямки. А уж про колодец и говорить нечего. Как отправить шарик в дальнейшее путешествие? Очень просто — щелкнуть по нему.

Эта детская картинка иллюстрирует большую и важную для практики часть прикладной математики — поиск экстремума. Высота земли — функция двух переменных, двух координат — широты и долготы, и нам надо найти минимум, причем обычно не локальный, а глобальный — в пределах всего двора. Методов много, но все они так или иначе включают механизм обработки ситуаций попадания в локальный минимум, и многие из них сводятся к «щелчку» — выходу из локального минимума в произвольном направлении. Кибернетики называют такое воздействие «шумом», случайной помехой. Биолог, если бы его попутал бес заглянуть в толстую книгу с мрачным названием «Поиск экстремума», сказал бы, что это похоже на мутацию.

## О мелькании в глазах

То, что кибернетики называют «шумом», применяется и в более сложных ситуациях. В середине прошлого века американский математик Ф. Розенблатт придумал перцептрон — многослойную структуру из элементов, в которой каждый элемент воспринимает сигналы нескольких элементов из предыдущего слоя и суммирует их «с весами» (элементы первого слоя получают сигналы из окружающего мира). Очень похоже, что дело происходило так: листал он однажды учебник биологии, наткнулся на схему многослойной клеточной структуры сетчатки лягушки и его немедленно настигло сатори. Вот почему зеленая так ловко ловит комаров! — подумал Фрэнк. Потому что клетки первого слоя воспринимают свет, а дальше — каждая клетка в каждом слое суммирует сигналы от нескольких, определенным образом расположенных, клеток предыдущего

слоя, и, если сумма входных сигналов больше порога, она возбуждается и передает сигнал в следующий слой. Причем сеть обучается, то есть пороги возбуждения и схема передачи сигнала могут меняться. Так вот, когда зеленая ловит комаров, идет процесс обучения — «веса» при суммировании подгоняются так, чтобы безошибочно отыскивать вождя комара в окружающем пространстве. И действительно, в сетчатке лягушки нашли группы клеток, «заточенные» на обнаружение черной точки на светлом фоне. Кстати, вы можете легко придумать, как должен обрабатываться сигнал от такой специализированной группы. Нашли там и другие специализированные группы, так сказать, «аппаратно реализованные» алгоритмы. Все это нацелено на распознавание определенных статических образов; можно сделать и так, что перцептрон будет игнорировать неподвижные и реагировать на движущиеся объекты — как лягушка. Например, включая передачу сигнала, только если определенное количество клеток изменило свое состояние.

Оказалось, что конкретные перцептроны, или, как их часто называют, «нейронные сети», в процессе обучения находят именно локальный оптимум. То есть комара они ловят, и другие задачи распознавания решают, и даже курс акций предсказывают. Но часто, как можно показать, существует и другое решение, то есть другие значения порогов и другая схема передачи сигнала между слоями клеток, которая будет решать эту же задачу лучше. А перейти от одного решения к другому нельзя, потому что система находит локальный оптимум и любое маленькое изменение ухудшает ситуацию. Остается прыгать неизвестно куда в надежде перескочить хребет и там, в другой долине, найти другой локальный минимум, который может оказаться лучше. Случайный прыжок... похоже на случайную мутацию.

## Много-много ноликов и единичек

Любой алгоритм можно представить в виде последовательности нулей и единиц. Ну хотя бы так: описание — это последовательность символов, символы можно пронумеровать, числа записать двоичным кодом. Тогда минимальная мутация — это замена нуля единицей (или единицы — нулем), вставление цифры или ее потеря. А не минимальная — потеря куска или зашифрование куска кода из другого алгоритма. Но ведь коды могут взаимодействовать и без мутаций — составляя новый генотип законным спо-



## ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ НАУКИ

собом из генотипов папы и мамы, то есть из частей двух алгоритмов. Все это безобразие и называют нынче генетическими алгоритмами, а мы назвали вторым пришествием бионики.

Замена нулей на единицы и обратно — не самый умный способ обращения с алгоритмами и, уж во всяком случае, не единственный. Кажется более разумным переставлять, замещать, вводить и исключать осмысленные части алгоритмов, то есть такие элементарные части, которые совершают цельное действие. Например, во многих задачах алгоритм записывается в виде логической функции, и можно попробовать взять какой-то осмысленный кусок из одного алгоритма и вставить его в другой алгоритм. Даже с перцептроном можно поступить подобным образом. Например, обучить нейронную сеть распознавать буквы. Другую сеть научить распознавать цифры. Теперь вырезать из одной сети кусок (например, несколько слоев) и вставить в другую. Как будет работать эта сеть? Как она будет обучаться? Скажем, если в одной сети сформировались специализированные группы клеток, как у охотницы на комаров, то они, скорее всего, будут делать свое дело и в комбинированной сети. Тогда комбинированная сеть сможет распознавать и буквы, и цифры. А сможет ли она отличать буквы от цифр, то есть возникнет ли в ней новая способность? Это неизвестно, так как никто такого эксперимента пока не поставил.

## Работа по правилам

Конструктор не может соединять части как попало — чтобы получилось нечто работоспособное, должно соблюдаться множество условий (еще до рассмотрения вопроса об эффективности). Части не должны, например, выводить из строя друг друга. В некоторых областях техники эта задача весьма важна, в некоторых — осознаваема как принципиальная, в иных — решается ад хок, конкретно для каждого случая. Например, в электронике и в медицине существует понятие совместимости материалов, а у радиотех-



## ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ НАУКИ

ников есть даже специальная дисциплина (эта, примерно, семестровый курс) — «электромагнитная совместимость».

При использовании генетических методов создания алгоритмов тоже нужно соблюдать некоторые правила. Например, если мы пытаемся соорудить этим способом маршрут обхода некоторого графа (так называемая «задача коммивояжера»), то заменяемые части маршрута должны начинаться и кончаться в одних и тех же вершинах, поскольку «нуль-транспортровка» пока не вышла из стен лабораторий. Осознание этих правил должно увеличивать эффективность работы. Можно придумать и другие способы комбинирования алгоритмов, но... разве мы не всегда это делаем, когда решаем какие-либо задачи — и научные, и технические?

### Новое или старое, причем вовсе не забытое

Что такое автомобиль? Это такие-то атомы, находящиеся в таких-то точках пространства. Но конструктор, создавая автомобиль, не располагает в пространстве отдельные атомы — он оперирует более крупными деталями, которые, между прочим, тоже кто-то придумал. Вряд ли правильно говорить, что конструктор заимствовал идею болта и гайки из другого автомобиля, но если в каком-то своем проекте он придумал и использовал целый узел, то кто мешает ему использовать его в другом? А болты и гайки можно уподобить продукту одной из ранних стадий эволюции, наследию общего предка.

Далее конструктор, глядя на кулман или экран, вполне может подумать так: а что, если мы вот эту перегородку подвинем на пару миллиметров влево... или вправо... Ну чем не мутации? Создание устройства «скрещиванием» двух устройств — тоже не редкость. Когда встраивают калькулятор в часы, то получают часы с игрушечным калькулятором, а не полноценный гибрид, однако, например, комбинация приемника и магнитофона вполне жизнеспособна. Значит, все эти приемы давно извест-

ны и успешно применяются. В чем же тогда новизна? Или ее вообще нет, просто конструкторы делают все это, не придумывая новых слов, а разработчики алгоритмов заглянули в учебник биологии, стащили оттуда словечко и радуются?

### Зачем нужно осознание

Употребление новых для данной области слов часто (хотя и не всегда) означает определенную стадию понимания, возникновение модели явления или метода, его структуры и в некоторых случаях — механизма действия. Как только мы представляем явление в виде модели, мы вводим параметры. Значит, возникает вопрос о выборе их значений и возможности оптимизации.

При применении генетических методов синтеза алгоритмов этих параметров несколько. Например, частота точечных мутаций, размер и частота заимствования участков генома и другие. В биологии, например, существует понятие об оптимальной частоте мутаций (при фиксированном темпе изменений условий среды). Цивилизация планеты Земля пошла по технологическому пути, и от ледникового периода мы будем защищаться теплоизоляторами, но «биологическая цивилизация» при наступлении глобального похолодания могла бы увеличить частоту мутаций, чтобы приспособиться, а не вымереть. Для этого ее представителям пришлось бы переселиться поближе к природному источнику радиоактивности, «естественному реактору Окло» (если бы он у них был), начать сознательно принимать мутагены, заняться генной инженерией. Увеличивать частоту мутаций мы умеем, и поставить задачу нахождения оптимальной частоты мутаций при тех или иных изменениях окружающей среды можно уже сейчас. Для начала на дрозофилах.

Возникновение понятия, модели означает такую стадию осмысления, при которой модель начинает втягивать в себя рядом лежащие решения. При этом выявляются какие-то новые решения, до этого таившиеся в куче лежащих вместе. Представьте себе тысячу цветных шариков, раскрашенных во всевозможные цвета. Классифицировать и вообще как-то разобраться в этой куче непросто, если мы не знаем модели «цветового треугольника». Но если мы сумеем создать модель аддитивного сложения цветов и вытащим из кучи все шарики цветов, полученных смешением цветов спектра с белым цветом, и посмотрим на то, что останется, мы немедленно осознаем, что «пурпурный» — это смесь синего и красного.

Поэтому осознание того, что такое «генетический алгоритм» (правильнее было бы говорить «генетический метод построения алгоритмов», но это очень длинно), позволит не только оптимизировать алгоритмы, но и понять, есть ли в этой куче еще что-то новенькое.

### А раз так...

...то мы можем позволить себе небольшой экскурс именно что в «кучу» — то есть в область рядом с генетическими алгоритмами. Эволюционировать неким квазибиологическим способом могут не только алгоритмы, но и «железки». Причем сами.

Берем интегральную схему, которая называется «Field Programmable Gate Array» или электрически программируемая матрица вентилялей. Вентилем в радиотехнике называют то же самое, что и в канализации: устройство, которое или пропускает, или не пропускает — только не воду, а ток. Схема состоит из множества ячеек, способных выполнять простейшие функции, но не имеющих между собой фиксированных связей. Связи устанавливаются программой, по командам управляющего микропроцессора, и могут изменяться в процессе работы схемы. Грубо говоря, это схема «с перестраиваемой схемой». Эволюцию на таком устройстве нетрудно организовать при помощи генетического алгоритма. Для этого создается некая «популяция» конструкций, то есть схем соединения элементарных ячеек. Каждая «особь» поочередно испытывается на приспособленность к выполнению поставленной задачи, причем задача может быть какой угодно, например различать два сигнала разных частот или амплитуд. На вход подаются два сигнала, и схема должна по-разному на них отреагировать, например в ответ на один из них — зажечь лампочку. Схемы, которые это делают плохо, — наименее приспособленные — отсеиваются, хорошие скрещиваются, мутируют и так далее, как это принято в генетических алгоритмах. Иногда таким способом удается создать схемы, которые неплохо решают поставленную задачу. Слова «удается создать» кажутся в этой ситуации несколько притянутыми за уши. Лучше было бы сказать — «схемы создаются».

В этом направлении получены самые-самые первые результаты (Адрианом Томпсоном из Университета Сассекса), и выглядят они довольно странно. Схемы действительно работают, но они оказались нетермостабильны. Это первая странность, а вторая вот такая: работа схем в некоторых случаях зависит от того, подано



ли питание на часть схемы, вообще не соединенную цепями передачи сигнала с основной схемой. Авторы почему-то не высказывают очевидную гипотезу: схема каким-то образом использует утечки (они как раз сильно зависят от температуры) и, не исключено, паразитные емкости.

Любая схема может быть описана некоторым алгоритмом обработки сигнала. Поэтому (если пренебречь утечками и емкостями) нет принципиальной разницы — применять ли генетические методы к схемам или к алгоритмам. Однако разработка путем оптимизирующей эволюции схемы «в железе» может пойти быстрее, чем разработка алгоритма обработки и лишь затем реализация его в железе (то есть в кремнии). Но важнее другое: применение генетических алгоритмов в железе автоматически приводит к выполнению важного условия — мы переставляем и заменяем части, которые сами умеют что-то делать. А не случайно выбранные участки длинной цепи нулей и единиц.

В далеком 1985 году два биолога писали в «Химии и жизни», что в технике (как и в биологии) «уже собранные» устройства не эволюционируют. Телевизор есть телевизор, стиральной машиной он не станет, если заменить ему кинескоп на барабан. Прошло двадцать лет, и появились эволюционирующие устройства.

Некоторые биологи считают, что оценки так называемой «вероятности возникновения живого» неверны потому, что не учитывается обмен генами, который эту «вероятность» сильно увеличивает. Например, вирус гриппа — а геном этой инфекции состоит из кусочков, которыми легко могут обмениваться отдельные «особи», — пользуется этим методом всю. (Кстати, понятие вероятности здесь неприменимо, но сейчас речь не об этом.) Возможно, эту вероятность еще более увеличивает некий механизм, контролирующий обмен участками кода, который позволяет переставляться только законченным, осмысленным участкам. Фразам, а не отдельным буквам.

Кстати, замена букв обычно порождает довольно плоские шутки, а слов или тем паче фраз — порождает афоризмы.



*Здравствуйте, уважаемая редакция журнала «Химия и жизнь»! Очень люблю ваш журнал и т. д. и т. п. Понравилась замечательная статья в № 7 2004 года «Газообразные, поверхностно-активные», в которой рассказывалось о забавных явлениях, протекающих в сосудах с несмешивающимися жидкостями. В конце статьи автор спрашивает: «Почему эффект, который наблюдается невооруженным глазом в открытом стакане, потребовал стольких лет для своего открытия? Возможны две версии: первая — не то наливали в стакан, вторая — смотрели в телевизор, а не туда, куда надо, не в Природу». Так вот, если налить в стакан «то самое» (водку или коньяк) и не выпить сразу, а понаблюдать минуты две, то можно увидеть на стенках стопки явление, очень похожее на жидкий занавес, описанный в статье. Это явление также поддерживается за счет испарения, поскольку прекращается, если стакан сверху прикрыть. Однако есть существенные различия: в случае коньяка и водки мы имеем дело с одной фазой, поэтому и физика процесса должна быть несколько иной, но внешне все очень похоже. Для эксперимента лучше попробовать разные напитки и разную посуду, поскольку явственность эффекта зависит как от того, так и от другого.*

*Хотелось бы также узнать о механизмах других загадочных явлений, обойденных школьной программой, которые мы тем не менее регулярно наблюдаем. Например, на поверхности горячего чая можно увидеть легкую дымку, проявляющую странную устойчивость: ее не разрушают конвекционные потоки, которые обязаны присутствовать над горячим чаем. Если присмотреться, то видно, что дымка состоит из очень мелких частичек. Она может внезапно исчезнуть или покрыться сетью «трещин». В целом явление очень интересное, его объяснение, как мне кажется, должно опираться на электростатику. Если знаете отгадку, не томите!*

С уважением  
Григорук Иван Андреевич.



#### ИЗ ПИСЕМ В РЕДАКЦИЮ

Уважаемый Иван Андреевич!

Следует отметить вашу наблюдательность, неординарную способность удивляться, а также проявленную стойкость и выдержку, позволяющую две минуты экспериментировать с бокалом соблазнительного напитка. Замеченное и правильно описанное вами явление образования стекающих капель на стенке бокала с крепкими напитками носит название «винных слез» и привлекает внимание наблюдателей уже 150 лет. Испарение спирта из пленки вина на стенках увеличивает поверхностное натяжение, что приводит к ее стягиванию и образованию капелек, похожих на слезы, которые под действием своего веса идут по стенке бокала вниз. Позже это же явление описал Р. Марангони, и теперь движение на поверхности жидкости из-за разного натяжения называется эффектом Марангони. Именно эти силы приводят в движение, например, бумажный кораблик на воде, если на корме у него находится кусочек мыла. Сейчас в Сети можно найти много фотографий и описаний замеченного вами явления «винных слез». И вы правы, что здесь, как и в случае с новыми газовыми поверхностно-активными веществами, проявляется влияние хорошо знакомых сил поверхностного натяжения.

Что касается устойчивой дымки с сетью «трещин» в прилегающем слое над горячим чаем, то это явление скорее связано с приповерхностной конвекцией и конденсацией паров воды над горячей поверхностью при контакте с поступающей массой более холодного воздуха. Известно, что похожая конвекция наблюдается в тонком слое жидкости (масла или кофе), подогреваемом снизу, и приводит к образованию устойчивой сетки хорошо различимых ячеек (их называют ячейки Бенара), вроде сот, в центре каждой из которых нагретая жидкость поднимается вверх, а по краям охлажденная идет вниз (или наоборот). При контакте таких жидких ячеек с воздухом возможна передача их структуры граничащим слоям газа и пара с попутной конденсацией паров воды и образованием ячеистой дымки из тумана с «трещинами». Но это предположение требует дополнительной проверки.

С уважением  
Стойлов Ю. Ю.

