

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

Нелинейная динамика творческого мышления. Многомодальные процессы и взаимодействие гетероклинических структур

М.И. Рабинович, П. Варона

Динамические процессы творческого мышления, как подтверждено недавними исследованиями методами электроэнцефалографии (ЭЭГ) и функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ), есть взаимодействие между тремя главными составляющими: оригинальностью автора, его автобиографической памятью и целью или стимулом процесса. Разные стимулы инициируют возбуждение разных компонентов памяти и соответственно разных нейронных кластеров и сетей мозга. Новые данные позволяют построить модель рождения и развития творческого мышления, т.е. создать теорию процесса, который сам, по определению, неопределённо структурированный и непредсказуемый, с помощью структурно организованного математического подхода — нелинейной динамики. Обсуждается следующая ключевая концепция: эволюция мысли или сути другой человеческой творческой активности — это характеризующийся внутренней нестабильностью динамический процесс, ведущий к производству новой информации. Для построения нелинейной динамической модели человеческого творчества используются следующие идеи, которые являются общими для большинства мыслительных процессов: 1) математическая модель должна базироваться на переменных, которые представляют эволюцию элементов мозга в их временной когерентности и должны иметь решения, соответствующие метастабильным паттернам (блокам знания) в мозге; 2) модель основана на конкурентной динамике без победителя — нелинейном процессе взаимодействия многих информационных элементов или пространственно-временных режимов, гарантирующем последовательное переключение между метастабильными состояниями и, как результат, определенную устойчивость динамики творчества; 3) модель является открытой диссипативной системой, в которой торможение уравновешивается возбуждением, и в результате, находясь близко к границе неустойчивости, оказывается чрезвычайно чувствительной к информационным воздействиям.

Ключевые слова: нелинейная динамика, нейронные сети, творческое мышление, модели работы мозга

PACS numbers: 05.45.-a, 87.19.L-, 89.75.-k

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.09.038837>

Содержание

- 1. Введение. Мозг и сознание. Необходимые компоненты творческого мышления (846).**
1.1. Мозг и разум. 1.2. Идентификация творческого мышления на уровне физиологии мозга.
- 2. Математика мышления (851).**
2.1. Универсальные динамические модели процессов рождения, кодирования и воспроизведения информации. 2.2. Многомодальность и взаимодействия в иерархии гетероклинических сетей. 2.3. Творчество и патологии: динамические модели. 2.4. Гетероклинические сети. 2.5. Роль лекарственных препаратов в управлении творческими способностями.
- 3. Взаимодействие модальностей (855).**
3.1. Мультимодальность увеличивает возможности творческого мышления и одновременно ёмкость автобиографической памя-

ти. 3.2. Резонансное взаимодействие модальностей. 3.3. Коллективное творчество. 3.4. Мы из джаза.

- 4. Обсуждение (858).**
4.1. Поллок — художник-экзистенциалист. 4.2. Мандельштам — поэт метафоры. 4.3. Гетероклинические химеры — один из возможных математических образов творческого процесса.
- 5. Заключение (859).**

Список литературы (860).

*Поэта взор в возвышенном безумье
Блуждает между небом и землёй.
Когда творит воображенье формы
Неведомых вещей, перо поэта,
Их воплотив, воздушному "ничто"
Даёт и обиталище, и имя.
Шекспир "Сон в летнюю ночь" (V, 1)
(Перевод Т. Щепкиной-Куперник.)*

1. Введение. Мозг и сознание. Необходимые компоненты творческого мышления

1.1. Мозг и разум

Задумываясь о пришедшем вдруг неожиданном решении, мы часто говорим: "случайность". Если бы мы знали, как близки к истине: именно случайно обнаружен-

М.И. Рабинович^(1,a), П. Варона^(2,b)

⁽¹⁾ BioCircuits Institute, University of California, San Diego,
9500 Gilman Drive #0328, La Jolla, CA 92093-0328

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería Informática, Universidad Autónoma
de Madrid, 28049 Madrid, Spain

E-mail: ^(a)mrabinovich@ucsd.edu, ^(b)pablo.varona@uam.es

Статья поступила 22 июля 2020 г.

ные, пришедшие сверху связи между абсолютно разными, не ассоциирующимися друг с другом предметами, понятиями, идеями рождают оригинальные подходы, которые было невозможно предсказать на основании предыдущего опыта. Вообще мгновенные озарения, которые часто связываются с возгласами "ага" или "эврика" — это только пик айсберга — динамического процесса, называемого творчеством.

По сути творчество, т.е. процесс рождения новых и в то же время полезных идей, обычно рассматривается как взаимодействие многих информационных компонент или модальностей активности мозга. Это может быть: свободное блуждание среди идей бездельничающего — отыскающего — мозга (когда на него не действуют сигналы извне или изнутри), применение стандартных подходов не по прямому назначению, а в неожиданных направлениях, использование случайно родившихся ассоциаций.

В 1908 г. на заседании психологического общества Парижа Анри Пуанкаре сделал доклад "Математическое творчество", который, к сожалению, не был записан. В докладе Пуанкаре подчеркнул, что научному открытию предшествует долгая работа, которая отчасти происходит сознательно, а отчасти совершается в области подсознания, когда уже накоплена нужная информация и сделаны необходимые усилия. Затем происходит внезапное озарение, когда части головоломки внезапно сходятся и — эврика! — встают на свои места. Итак, со времён Пуанкаре процесс творчества разделяют на несколько стадий [1]: 1) "подготовка", 2) "осмысление" (фокусирование внимания на трудных моментах), 3) "откровение" ("озарение"), формулировка и осознание новой идеи и, наконец, 4) нахождение места и роли результата в жизни. Практически все эти процессы проходят под контролем внимания.

Заметим, что откровение часто для нас непредсказуемо: "Пишуший стихотворение пишет его, потому что язык ему подсказывает или просто диктует следующую строчку. Начиная стихотворение, поэт, как правило, не знает, чем оно кончится, и порой оказывается очень удивлён тем, что получилось, ибо часто получается лучше, чем он предполагал, часто мысль его заходит дальше, чем он рассчитывал. Это и есть тот момент, когда будущее языка вмешивается в его настоящее. Существует, как мы знаем, три метода познания: аналитический, интуитивный и метод, которым пользовались библейские пророки, — посредством откровения. Отличие поэзии от прочих форм литературы в том, что она пользуется сразу всеми тремя (тяготея преимущественно ко второму и третьему), ибо все они даны в языке; и порой с помощью одного слова, одной рифмы пишущему удаётся оказаться там, где до него никто не бывал, — и дальше, может быть, чем он сам бы желал... стихосложение — колоссальный ускоритель сознания, мышления, мироощущения. Испытав это ускорение единожды, человек уже не в состоянии отказаться от повторения этого опыта...". (И. Бродский, *Нобелевская лекция, Сочинения*, т. 1, Пушкинский дом).

Здесь мы сталкиваемся с многомодальностью творческих процессов. Как минимум, три когнитивные модальности участвуют в процессе стихотворения: логическая, эмоционально интуитивная и то, что называют озарением или, на формальном языке, полезными флюк-

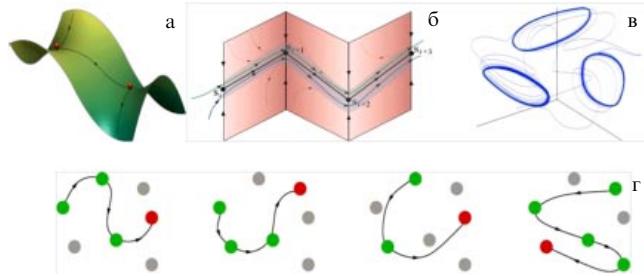


Рис. 1. (В цвете онлайн.) (а) Гетероклиническая цепочка из двух метастабильных состояний (седел), (б) устойчивый гетероклинический канал, состоящий из седловых циклов, (в) гетероклинический канал, состоящий из семи метастабильных состояний. (Адаптированные рисунки из [3, 4].)

туациями. Для описания творческих процессов мы применяем базовую динамическую модель в виде системы нелинейных уравнений в обыкновенных производных для переменных, которые представляют интенсивность пространственно-временных мод соответствующих сетей мозга.

Интересующие нас объекты в фазовом пространстве таких моделей — это метастабильные состояния (седловые точки), которые представляют индивидуальные семантические образы, и гетероклинические траектории, т.е. сепаратрисы, связывающие их в последовательную цепочку, описывающую процесс генерации и обработки потока информации (рис. 1).

Благодаря рассмотрению разного рода неустойчивостей в моделях с несколькими модальностями возможно описать и рождение мысли, и бифуркации озарения. Здесь надо принимать ещё один источник многомодальности творческого процесса — это общение автора с читателем (или со зрителем), образ которого поэт держит в своём воображении. Такое общение влияет на творческий процесс с самого начала, увеличивая его сложность и непредсказуемость. Вот как это выразила Анна Андреевна Ахматова:

За что-то меня упрекают
И в чём-то согласны со мной...
Так исповедь льётся немая,
Беседы блаженнейший знай.
("Читатель," 1959 г.)

Поскольку каждая модальность генерируется своей нейронной сетью мозга, описание творческого процесса с помощью нелинейной динамики требует анализа взаимодействия таких сетей, что и отражено в названии настоящего обзора.

Говоря о мысли автора, которая даже в момент создания стиха (скульптуры, музыки и т.д.) принадлежит не только ему, но и читателю, слушателю и т.д., мы часто задумываемся: как формулируется в мозге мысль, которую хочется донести до читателя? Откуда вообще она берётся? Как небольшой объём серого вещества вызывает ощущения и фантазии? Часто кажется невероятным, что жидкость материальных процессов мозга может породить "вино сознания". Это и есть главная проблема, лучше сказать головоломка, возникающая при рассмотрении взаимоотношений разума с мозгом (или разума с телом). Неспособность достичь единого решения проблемы разум — тело остаётся в основе психо-

логии и является основным вопросом к "единой теории психологии (ЕТП)" [2].

Здесь необходимо обсудить, что мы понимаем под словом "разум" (mind). Что именно люди имеют в виду, когда они используют именно этот термин. Чаще всего они обращаются к месту обитания сознания, т.е. к чувству "я", которое кажется проводником мысли, как-то связанной с мозгом (телом), но также, по-видимому, и отделимой от него. Идея жизни после смерти интуитивно приемлема для многих, потому что наша интеллектуальная жизнь кажется настолько отличной от наших тел, что мы можем вообразить их независимость. Это приводит к дуализму здравого смысла, что и является частью религиозных мировоззрений. Естественно, что самосознание — это одна из функций разума.

Известная когнитивная революция 1960-х годов родилась при взаимодействии работ по теории информации, искусственноному интеллекту и кибернетике. Это дало начало вычислительной теории разума, которая предлагает решение большей части вопросов, относящихся к динамике взаимоотношений разум–мозг. Вычислительная теория сознания утверждает, что нейронная система является системой обработки информации. Она переводит измеряемую активность тела и окружающей среды на информационный язык разума.

С формальной точки зрения "пространство разума" — это функциональное пространство, в котором представлены математические образы разных мыслительных процессов мозга при их развитии во времени. Размерность пространства зависит от сложности математической модели, отражающей эти процессы. Если в таком пространстве представлены многие мыслительные модальности, то оно будет иметь иерархическую структуру.

Вычислительная теория сознания явилась огромным прорывом, потому что она впервые позволила в принципе, т.е. идеологически, отделить разум от тела – мозга. Хотя когнитивная революция была большим шагом вперёд, возникли проблемы, связанные с увлечением искусственными алгоритмическими задачами, которые имели небольшую связь с другими элементами психологических явлений, такими как сознательный опыт, культура, автобиографическая память и т.д. Сегодня ситуация с когнитивной динамикой качественно иная. По выражению Ричарда Фейнмана: "Если вы хотите реально понять, как что-то работает, создайте это".

По отношению к человеческому разуму, хотя данная цель ещё не достигнута, наука интенсивно движется в этом направлении. Добавим, что до решения инженерной проблемы моделирования сознания ещё неопределённо далеко.

Цель настоящего обзора — на основании известных примеров дать представление о многомодальной теории творческого мышления человека.

1.2. Идентификация творческого мышления на уровне физиологии мозга

1.2.1. Свободный поиск. Очевидно, что потребность в творческом мышлении — это ответ на ситуацию, которая предоставляет автору определённую свободу, т.е. не ограничивается жёсткими рамками и часто не имеет чётко фиксированных целей. Напротив, нетворческий режим предполагает движение по определённому пути. Обычно это "путь наименьшего сопротивления", кото-

рый характеризуется ожидаемым и эффективным результатом (здесь часто работают вариационные принципы, например принцип свободной энергии [5]). На сегодняшний день много известно о динамике работы мозга в таком будничном режиме.

Основные особенности *динамики творческого мышления*, наоборот, связаны с вариабельностью возможностей участия определённых областей мозга в конкретных аспектах творчества, таких как многозначное понимание, образность, ассоциативное мышление, способность к самовыражению и т.д. Иными словами, творческий мозг должен быть организован несколько иначе, чем обычный.

Считается, что три ключевые сети нейронов вовлечены в творческий мыслительный процесс: 1) сеть пассивного режима (default mode network), не выполняющая ничьих заданий, именно она ответственна за спонтанное мышление и фантазирование; 2) сеть выявления значимости информации (salience network), именно эта сеть участвует в таком методе оперативного решения проблемы, как "мозговой штурм", однако она не гарантирует постоянного возникновения креативных идей, если жизненный опыт человека незначителен и в памяти не содержится воспоминаний об уникальных событиях или нестандартных ситуациях; 3) исполнительная сеть (executive control network), эта сеть обнаруживает важную информацию в окружающей среде или в автобиографической памяти, которая может пригодиться в поставленной задаче. Когда дело доходит до творческого процесса, именно исполнительная сеть отвечает за сортировку идей, возникающих в сети пассивного режима работы мозга.

Приведём вначале только один пример. Авторы эксперимента из Гарварда попросили 163-х добровольцев решить задачу творческого характера, когда сканировали активность мозга с помощью функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ). Пока машина записывала импульсы мозга участников, у каждого из них было по 12 секунд, чтобы придумать наиболее творческое использование простого предмета, который им показывали на экране. Как известно, одним из препятствий на пути к творческому мышлению является лёгкость, с которой обычные привычные решения навязывают себя разуму. Некоторые участники эксперимента не смогли избежать такого соблазна. Например, когда спросили о творческом использовании носка, мыла и обёртки от жевательной резинки, менее творческие участники ответили соответственно: "прикрывать ноги", "создавать мыльные пузыри" и "упаковывать жевательную резинку". Для тех же предметов более творческие испытуемые предложили другое применение: метод фильтрации воды, способ запечатывания конвертов и антенну для радиоприёмника [6].

При анализе фМРТ-данных изучались особенности мозговой активности. У оригинально мыслящих участников экспериментаторы обнаружили сильную связь между тремя упомянутыми нейросетями мозга: а) "сетью пассивного режима" (Default Mode Network or Imagination Network), ответственной за спонтанное мышление и блуждание мысли при отсутствии сформулированной цели и внешних сенсорных возбуждений; б) сетью фокусирования внимания и принятия решений на основе уже имеющейся у человека информации (Executive or Central Attention Network) и в) сетью вы-

явления значимости информации (Salience Network), которая ответственна за координацию информации, полученной из окружающей среды, с тем, что нам подсказывает автобиографическая память. Первые две из этих сетей имеют обыкновение конкурировать между собой, т.е. каждая сеть попеременно подавляет другую. Однако результаты сканирования показали, что мозг более творческих людей способен задействовать обе эти сети одновременно, т.е. креативный мозг использует их информационные ресурсы более эффективно (рис. 2).

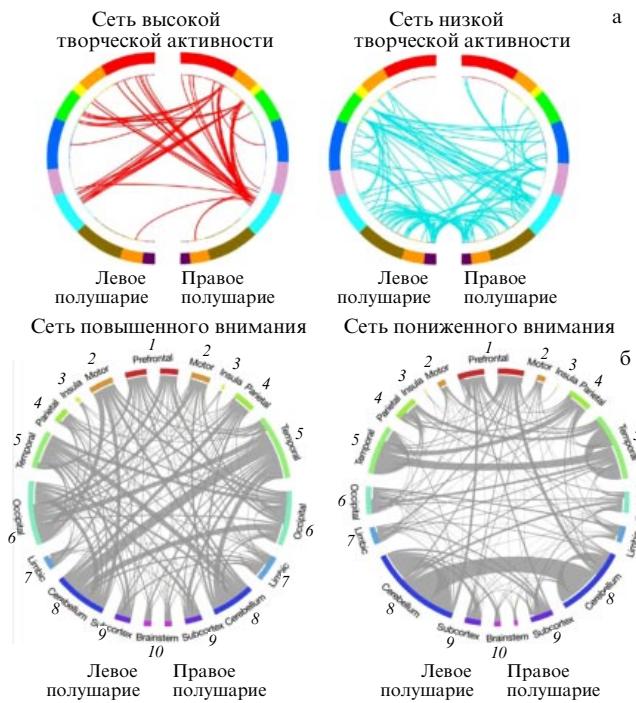


Рис. 2. (В цвете онлайн.) Функциональные связи в ассоциированных с творчеством сетях, иллюстрирующие взаимодействие между двумя полусферами мозга. (Модифицированные рисунки из [6, 7].) Результаты, представленные на рис. а, как и на рис. б, получены в процессе детальной обработки большого количества томографических данных (фМРТ-анализа) в экспериментах со многими участниками, выполненных разными группами учёных с разными целями. Если на рис. а представлены структуры функциональных связей между крупномасштабными сетями мозга, ответственными за творчество [6], то на рис. б анализируются аналогичные связи в более специализированной задаче о предсказании уровня внимания (см. [7]). Рис. б: 1 — префронтальная кора, 2 — моторная кора, 3 — островковая доля, 4 — теменная доля, 5 — височная доля, 6 — затылочная доля, 7 — лимбическая система, 8 — мозжечок, 9 — подкорковые структуры, 10 — ствол мозга.

1.2.2. Разделение функций между полушариями. Развенчание мифа. Мы все знакомы с классической догмой, что левое полушарие ответственно за решение аналитических и логических задач, в то время как правое — за эмоции и творчество. Современные эксперименты показали, что это не так. Выяснилось, что творческий потенциал зависит от активности трёх глобальных сетей (мы о них только что говорили), и они представлены и в том и в другом полушарии (рис. 3). Эти сети включают в себя взаимодействующие блоки мозга, которые функционально объединяются в моды, координируясь между собой при выполнении определённых творческих задач. В разделе 4 мы ещё вернёмся к этим задачам.

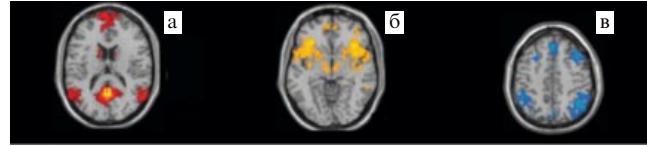


Рис. 3. (В цвете онлайн.) Портреты активности трёх главных "участников" творческого процесса: сети воображения (а), сети внимания и контроля (б) и сети реализации (в). Вместе они, как предполагается, производят творческую мысль. (Модифицированный рисунок из [8].)

Мы привели здесь параллельно результаты этих работ как иллюстрацию устойчивости и надёжности фМРТ-исследований функциональных связей между крупномасштабными сетями мозга, выполненными недавно разными группами экспериментаторов (рис. 3). Таким образом, несмотря на сомнения некоторых исследователей, этот подход вполне заслуживает доверия.

Если творчество определять с точки зрения качества продукта (песня, изобретение, поэма или художественное полотно), то левое полушарие играет ключевую роль [9]. Однако если творчество понимается как способность человека находить неожиданные решения в трудных ситуациях или на ходу анализировать, то ведущую роль играет правое полушарие. Это иллюстрирует эксперимент, результаты которого представлены на рис. 4 (см. также [10]).

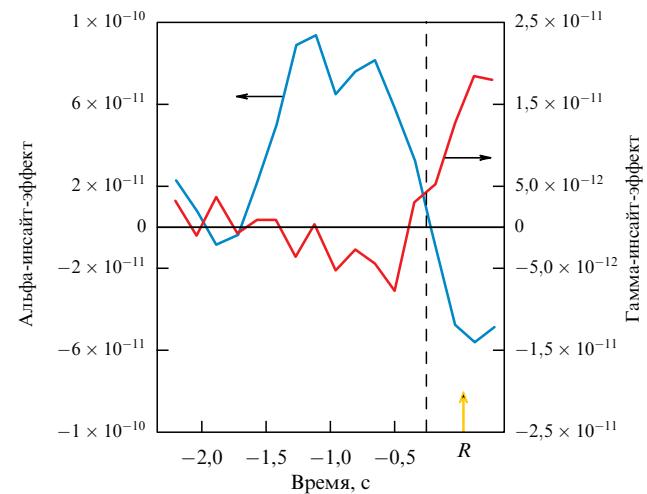


Рис. 4. (В цвете онлайн.) Анализ ЭЭГ, снятых при решении творческих проблем, показывает различную организацию возбуждения сетей мозга, в зависимости от того, получено решение интуитивно или с помощью анализа: перед тем как решение достигается интуитивно, наблюдается повышение активности в альфа-диапазоне (10 Гц) в затылочной части мозга; в то же время если решение получено с помощью анализа, то сразу после решения следует всплеск высокочастотной активности гамма-диапазона в правой височной доле (модифицированный рисунок из [11]) (см. также [12]).

Такое понимание согласуется с предыдущими исследованиями, показывающими, что основная сеть эпизодической памяти и воображение совместно участвуют в дивергентном мышлении [6, 13] и особенно левая нижняя теменная доля имеет решающее значение для генерации новых идей [14].

Эти результаты помогают выяснить роль мысленного моделирования отдельных эпизодов в творческом познании при предположении, что они происходят на уровне базовых конструктивных процессов, таких как концептуальная комбинация понятий [15].

1.2.3. Ассоциации. Один из ключевых механизмов творческого мышления — это информационные ассоциации, поддерживаемые автобиографической памятью. Важно, что ассоциации могут быть не только между двумя информационными объектами, но и между большим их числом. Выделяют, в частности, биассоциации. Они отличаются от генерации простых ассоциаций более сильной активацией в гиппокампе (рис. 5) и нижней теменной доле (например, угловой извилине), которые представляют собой узлы центральной сети, связанные с эпизодической памятью и фантазией [16]. Этот результат свидетельствует о том, что интеграция двух несвязанных концепций поддерживает процессы генерации новых эпизодов, отвечающих этим сигналам. Из эксперимента следует, что генерация двойных ассоциаций не просто представляет собой обобщённую версию генерации ассоциаций, но и является новым динамическим процессом, который опирается на качественно разные когнитивные механизмы для достижения эффективной творческой активности, одновременно используя и па-

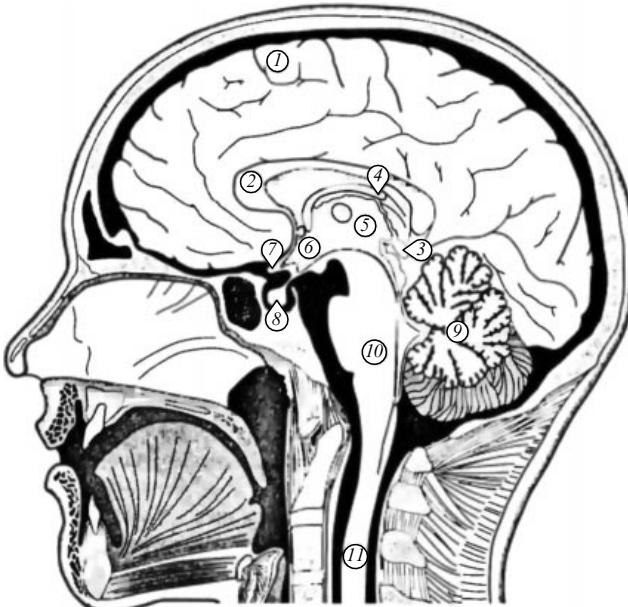


Рис. 5. Схематическое изображение головного мозга, продольный разрез: 1 — кора больших полушарий (cortex) с извилинами большого мозга (cerebrum); 2 — мозолистое тело (corpus callosum), соединение между левым и правым полушариями; 3 — эпифиз (шишковидная железа, ночью вырабатывающая гормон сна мелатонин, задерживающий у детей наступление половой зрелости); 4 — свод конечного мозга (fornix), транспортирующий информацию памяти из гиппокампа в сосцевидное (corpus mamillare) тело в задней части гипоталамуса, из памяти информации затем следует далее к таламусу и коре больших полушарий; 5 — таламус, куда информация поступает от органов чувств и памяти; 6 — гипоталамус, имеющий решающее значение для выживания индивидуума и всего вида; 7 — пересечение зрительных нервов (оптическая хиазма); 8 — гипофиз; 9 — мозжечок (cerebellum); 10 — ствол мозга; 11 — спинной мозг [17].

мять о прошлом, и информацию о воображаемом будущем.

Естественно предположить, что многомодальность творческого процесса способствует сложным ассоциациям. В этом смысле участие в процессе "второго Я", т.е. *alter ego* может оказаться чрезвычайно плодотворным.

Alter ego

И. Бродскому

*Создавая
Общий почерк,
Рушишив
Однородность строчек,
Отражая повороты,
Метишь рифмами скачки
И ноты Шёнберга,
Стравинского,
И нега,
Что по душе тебе
И alter ego,
Легко взлетают в облака
На годы
И века.*

М.И.Р.*

"Второе я" принимает в творческом процессе людей искусства деятельное участие — делает его динамику многомодальной. Закончим этот раздел словами Марка Шагала: "Нам нравится быть включёнными в невидимую сторону нашей формы и духа, без чего наша внешняя жизнь оказывается неполна" (рис. 6).

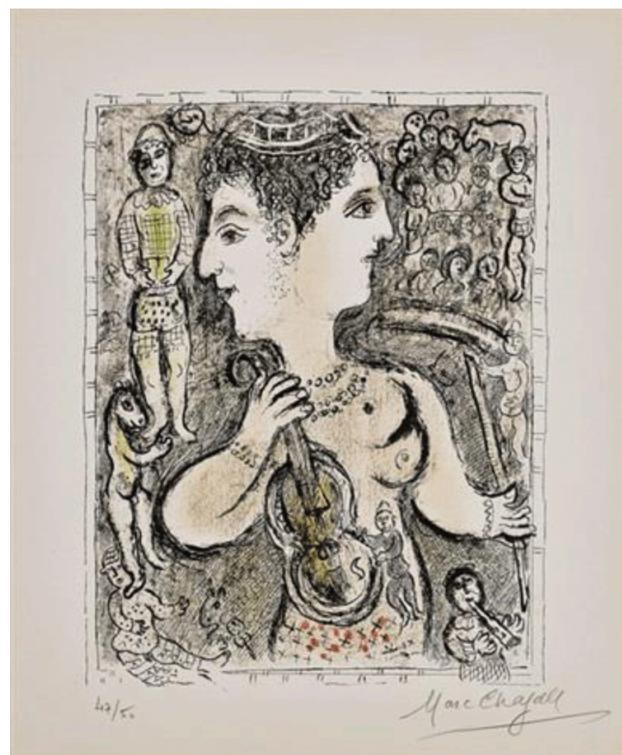


Рис. 6. Марк Шагал "Двойное лицо" (цветная литография, 1978 г.).

* Литературный псевдоним Михаила Израилевича Рабиновича — М.И.Р. (Примеч. ред.)

2. Математика мышления

Важно не то, что строго,
а то, что верно.
А.Н. Колмогоров

2.1. Универсальные динамические модели процессов рождения, кодирования и воспроизведения информации

2.1.1. Кинетические уравнения. Мы говорили во введении, что мозг представляет воспринимаемую информацию о процессах в окружающей среде и собственной активности в виде цепочек (или "букетов" в случае многомодальных процессов), состоящих из метастабильных состояний, которые в фазовом пространстве соответствующей модели образуют гетероклинические сети. Такие цепочки или сети представляют и процессы генерации, т.е. создания, информации, и её обработку (кодирование), и воспроизведение (память).

Интересно, что с точки зрения информационной динамики процессы, которыми мы интересуемся при анализе мышления, очень похожи на процессы саморепликации РНК (построение мира РНК (RNA world)). Не случайно они описываются аналогичными кинетическими уравнениями: уравнениями автокатализитических реакций (РНК-репродуктивность) [18] и пришедшими из экологии уравнениями типа Лотки – Вольтерры [19, 20]. Для удобства чтения основные модельные уравнения теории мышления собраны в табл. 1. Главная особенность кинетических уравнений состоит в том, что они одновременно описывают и процессы рождения информации, и кодирование, и воспроизведение, т.е. память. Приведённые уравнения сравнительно просты, поскольку мы интересуемся процессами вблизи границ устойчивости. Фактически это нормальные формы для таких процессов.

2.1.2. Сознание как многомодальный цепочечный процесс взаимодействия информационных потоков. Интеллектуальная активность человека — это дискретный переходный процесс и, по крайней мере, его эволюционная сторона может быть описана динамическими уравнениями. Подобное утверждение, связанное с сознанием, не столь очевидно. Распространено мнение, что сознание является интригующим, но слишком сложным явлением и, следовательно, темой, не готовой для математического описания. Тем не менее взаимно согласующиеся данные экспериментов по восприятию себя и окружающего мира позволяют предположить, что все компоненты или модули сознания, такие как автобиографиче-

Таблица 1. Основные модельные уравнения теории мышления *

Кинетические уравнения * $\tau_i^m \frac{dx_i^m}{dt} = x_i^m \left(\sigma_i^m(R^m, S^m, C^m) - \sum_{j=1}^{K^m} \rho_{ij}^m x_j^m - \sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^{K^m} \xi_{ij}^m x_j^k \right)$
Формирование блоков (chunking) $\frac{dX_i^{lk}}{dt} = X_i^{lk} \left(\sigma_i^{lk}(S, C) Y^{lk} - \sum_j^{N^{lk}} \rho_{ij}^{lk}(S, C) X_j^{lk} \right)$ $\tau \frac{dY^{lk}}{dt} = Y^{lk} \left(\left(V^l - \beta(C) \sum_i^{N^{lk}} X_i^{lk} \right) - Z^{lk} \right)$ $\theta(C) \frac{dZ^{lk}}{dt} = \sum_m^M \xi_l^{km}(S, C) Y^{lm} - Z^{lk}$ $T \frac{dV^l}{dt} = V^l \left(\left(1 - \delta(C) \sum_j^{M^l} Y^{lj} \right) - W^l \right)$ $\Theta(C) \frac{dW^l}{dt} = \sum_q^P \zeta^{lq}(S, C) V^q - W^l$
Связывание (binding) $\tau_{X_i}^m \frac{dX_i^{km}}{dt} = X_i^{km} \left(\sigma_i^m - \sum_{j=1}^{N_{\text{events}}} \rho_{ij}^{km} X_j^{km} - \sum_{k=1}^{N_{\text{events}}} \sum_{j=1}^M \xi_{ij}^{klm} X_j^{kl} \right)$
* Условия устойчивости. Для анализа устойчивости гетероклинической последовательности можно рассмотреть метастабильные состояния, например состояния равновесия S_1, \dots, S_n автономной системы. Пусть собственные значения $\lambda_1^{(i)}, \dots, \lambda_n^{(i)}$ матрицы системы, линеаризованной вблизи S_i , расположены так, что $\lambda_1^{(i)} > \dots \geq \operatorname{Re} \lambda_{m_i}^{(i)} > 0 > \operatorname{Re} \lambda_{m_i+1}^{(i)} \geq \dots \geq \operatorname{Re} \lambda_n^{(i)}$. Тогда m_i -размерное неустойчивое многообразие W_i^u есть строго неустойчивое одномерное многообразие W_i^{uu} , тангенциальное собственному вектору, соответствующему $\lambda_1^{(i)}$. Гетероклинический канал (или цикл) может служить аттрактором, если так называемая седловая величина удовлетворяет условию $-(\operatorname{Re} \lambda_{m_i+1}^{(i)}) / \lambda_1^{(i)} = v_i > 1$ для всех i .

ская память, внимание, обучение и генерация мыслей, являются последовательными динамическими процессами. В указанных последовательных процессах одни когнитивные объекты временно преобладают над другими. Механизм такого переключения связан с действием принципа "конкуренция без победителя" (Winnerless competition (WLC) principle [21–25]), который реализуется в нейросетях мозга за счёт взаимного несимметричного ингибирования сетевых мод.

Математически это можно описать как переход между окрестностями различных метастабильных со-

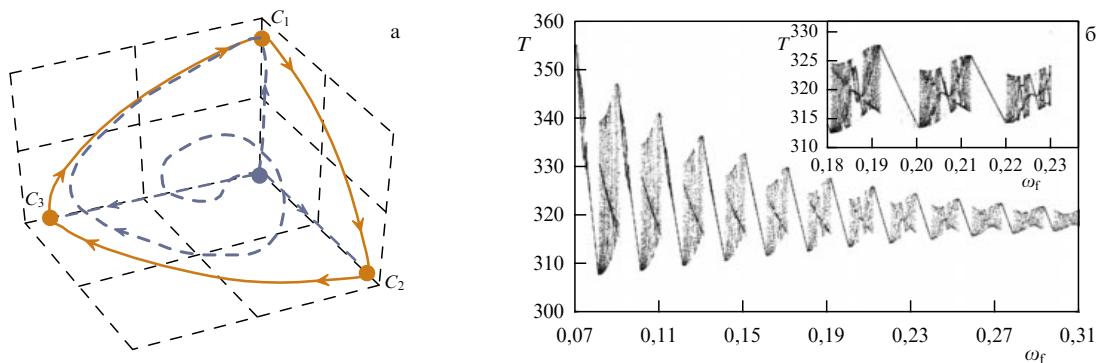


Рис. 7. Гетероклинический контур. (Модифицированный рисунок из [28].)

Таблица 2. Гетероклинические сети в фазовом пространстве

Динамика мышления, которая может быть объяснена гетероклиническими сетями			
Когнитивные явления	Гетероклиническая схема	Фазовый портрет	Литература
Гетероклиническая синхронизация			[28, 29]
"Связывание" (binding) модальностей			[30, 31]
Формирование блоков (chunking)			[32]
Химеры			[33, 34]

стояний, т.е. полуаттракторов, сформированных в функциональных иерархических сетях мозга посредством обучения и самосовершенствования [26, 27]. Информационное содержание подобных метастабильных состояний зависит от функции, выполняемой рассматриваемыми сетями мозга в заданный отрезок времени. Например, это могут быть энgramмы — следы памяти (устойчивые комбинации активированных сетей в эпизодической памяти человека, представляющие увиденное) или фрагменты семантических данных (математические теоремы, любимые стихотворения и пр.), которые содержатся в его семантической памяти.

Если мы стремимся создать динамическую теорию таких процессов, то мы должны найти ответы по крайней мере на следующие вопросы: как мозг иерархически организует последовательное переключение между энграммами, чтобы сохранить его устойчивым и воспроизведимым, и сколько энграмм одновременно может участвовать в переключениях без потери информации? Последний вопрос, очевидно, связан с информационной ёмкостью соответствующего когнитивного процесса. Если процесс не является надёжным, то мы можем

столкнуться с психическим расстройством. Слишком устойчивая последовательная динамика, из которой нет выхода, также может привести к патологическому поведению.

Творческие люди отмечены гибкой и изменчивой динамикой нейронных сетей мозга. Сейчас достигнуто понимание, что наиболее контрастно проявляются три группы мыслительных процессов, связанных с сетевыми взаимодействиями во время творческой работы: целенаправленным извлечением информации из памяти, подавлением доминантных (банальных) реакций и сосредоточением внимания на анализе собственного "я".

2.2. Многомодальность и взаимодействия в иерархии гетероклинических сетей

Процесс конкуренции без победителей, точнее с временнымными победителями (WLC), обеспечивает не только существование функциональной гетероклинической цепочки, но и приводит к устойчивой переходной динамике и воспроизводимости таких последовательных переключений при изменении начальных условий. Надёжность гетероклинического канала вытекает из

того, что траектории в окрестности цепочки сепаратрис не покидают её до тех пор, пока не будет достигнут конец канала (см. рис. 1). Обычно это простой аттрактор, т.е. устойчивая точка, либо предельный цикл.

Различные модальности, образующие сознание, модулируют друг друга. Математически это можно описать в рамках канонической модели, если ингибирование, приводящее к цепочкам метастабильных состояний, не слишком сильно и метастабильные состояния тогда могут иметь не одну, а несколько нестабильных сепаратрис (т.е. характеризуются несколькими положительными показателями (см. табл. 1 и 2)), которые соединяют различные метастабильные состояния и образуют взаимосвязанные гетероклинические каналы в фазовом пространстве соответствующей модели. При этом совместная динамика может оказаться довольно сложной, в том числе хаотической [3]. На рисунке 7, например, показано влияние одной модальности, периодически изменяющейся во времени, на другую, описываемую гетероклиническим предельным контуром (рис. 7а).

2.3. Творчество и патологии: динамические модели

2.3.1. Процессы творчества. Общепринято, что творческая идея или действие должны быть оригинальными, неожиданными и в то же время полезными (или приятными). Творчество возникает благодаря динамическому взаимодействию между глобальными сетями мозга и не является специфической функцией какой-то конкретной области мозга. С динамической точки зрения критический этап в творческих процессах можно рассматривать как случайное блуждание среди множества различных информационных шаблонов, случайность которых можно количественно охарактеризовать значением энтропии Колмогорова – Синай [35]. Как только этот этап завершается, система переходит от нерегулярного режима поиска к новому метастабильному режиму, использующему обратные связи между всеми этапами, включающими рабочую память.

У человека творческие процессы различной природы, такие как поэтическая композиция, музыкальная импровизация и живопись, поддерживаются теми же сетями мозга, которые взаимодействуют во время любой сознательной творческой деятельности. Такая универсальность естественно согласуется с идеей о том, что математическая структура творчества в динамической модели должна быть инвариантной для разных классов творчества. Разумно предположить, что этот принцип инвариантности применим и к психическим расстройствам с тем же теоретическим формализмом, основанным на динамике метастабильных состояний и гетероклинических структур.

2.3.2. Обсессивно-компульсивное расстройство. Приведём в качестве примера динамический анализ обсессивно-компульсивного расстройства (ОКР), который может характеризоваться назойливыми мыслями или образами, подталкивающими к последовательным компульсивным ритуалам. Появляющаяся новая область *нелинейной динамической психиатрии* предлагает вычислительные методы, а также феноменологическое понимание для более эффективного, чем статическое, лечения ОКР. Динамическое прерывание ритуалом будничной мыслительной деятельности может быть представлено в фазовом пространстве взаимодействием между соот-

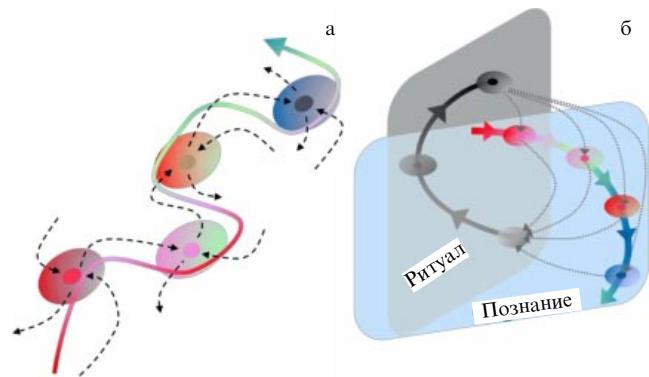


Рис. 8. (В цвете онлайн.) ОКР — на рисунке видно, что ритуал может прервать ход мыслительной работы на каждом шагу. После завершения ритуала система вернётся к работе, но в общем случае уже в других условиях. (Модифицированный рисунок из [36].)

ветствующими этим процессам модальностями, т.е. двумя гетероклиническими каналами (рис. 8). Совместная мыслительно-эмоциональная динамика, управляемая этим взаимодействием, часто хаотически повторяется. Соответствующие бифуркции в рамках динамической модели определяются изменением функциональных связей, т.е. значений элементов матрицы связей, в базовой модели. Обсуждаемые модели могут подсказать, как сохранить стабильность мыслительных характеристик, нарушив динамическую устойчивость ритуала. Например, это можно сделать, контролируя уровень торможения с помощью внешнего стимула, доставляемого в нужное время.

Естественно предположить, что развивающиеся сейчас интерактивные подходы, основанные на динамических моделях, обеспечат новые процедуры лечения и реабилитации, в том числе когнитивное взаимодействие между искусственным интеллектом и людьми.

2.4. Гетероклинические сети

2.4.1. Представление процесса мышления. Последовательный процесс мышления представляется в фазовом пространстве сетью гетероклинических каналов. Каждый канал соответствует своей модальности и связан с другими нестабильными сепаратрисами. Информационная ёмкость рабочей памяти, т.е. количество шаблонов, которые мы можем вспомнить без ошибок в их порядке следования, конечно и обычно не слишком велика. Однако мы можем успешно вспомнить более информативные последовательности, если создадим группы элементарных элементов (инграмм), т.е. блоки. Их часто называют *чанками* (chunk). Мы можем продолжать увеличивать такую иерархию и создавать блоки из блоков (суперчанки) и т.д. Наглядным примером является письменный текст: блок — это предложение, а суперблок — это абзац. Обзор других гетероклинических сетей представлен в табл. 2.

2.4.2. Моды мультимодальных сетей мозга. Бернард Шоу однажды сказал: "Воображение — это начало творчества. Вы представляете, чего хотите, вы получаете то, что представляете, и, наконец, вы создаёте то, что хотите". Поразительно, что нынешняя модель нейробиологии, стоящая за творчеством, очень близко следует этим словам, даже спустя 75 лет после их написания. Когда

мы думаем о творчестве, на ум часто приходит искусство. Большинство людей согласно с тем, что все писатели, художники и актёры — творческие люди.

Но откуда берутся креативные идеи и что делает некоторых людей более креативными, чем другие? Вопреки романтическим представлениям о чисто спонтанном процессе, всё больше свидетельств экспериментов по психологии и нейрофизиологии указывает на то, что творчество требует когнитивных усилий — отчасти для преодоления отвлекающих факторов и "липкости" предшествующего знания (вспомните, как люди часто начинают со штампов, когда их просят что-то разработать). В свете этих результатов мы можем рассматривать общее творческое мышление как динамическое взаимодействие между автобиографической памятью и системами управления. Без памяти наш разум был бы чистым листом, не способствующим творчеству, которое требует знаний и опыта. Но без умственного контроля мы не смогли бы подтолкнуть мышление в новых направлениях и не застриять в том, что мы уже знаем.

Здесь надо сделать отступление о рабочей памяти, способной временно сохранять и затем воспроизводить последовательности информационных элементов или блоков. Это могут быть поэтические образы в строфе, промежуточные мысли, образующие концептуальную цепочку математического доказательства и т.д. Естественно, для эффективности творческого процесса исходный порядок образов в последовательности должен сохраняться при воспроизведении информационной последовательности. Этот порядок обеспечивается сформировавшейся в процессе запоминания (обучения) матрицей связей соответствующего гетероклинического канала. Величина ингибирующих связей между метастабильными состояниями ограничена сверху их самоингибированием и не может быть слишком велика. Поэтому конкуренция без победителя способна обеспечить устойчивость лишь относительно коротких последовательностей [37].

Творческое мышление частично поддерживается нашей способностью представлять будущее, т.е. предвидеть события, которые ещё не произошли. При планировании каких-либо событий, от ужина до предстоящего отпуска, мы обычно полагаемся на своё воображение, чтобы представить, как может выглядеть будущее. Интересно, что та же область мозга, а именно гиппокамп, которая позволяет нам представить будущее, вовлечена в воспоминание о прошлом. Гиппокамп представляет собой область в форме морского конька, встроенную в теменную долю мозга. Он играет ключевую роль в объединении деталей опыта: людей, мест, объектов, действий — как для точного воссоздания прошлых событий, так и для яркого конструирования возможных будущих событий. Ранние исследования с пациентами с амнезией предоставили чёткие доказательства роли гиппокампа в запоминании и воображении, обнаружив, что у пациентов с повреждением этой области возникали проблемы и с тем и с другим. С тех пор экспериментаторы использовали фМРТ для изучения того, как мозг запоминает и воображает.

2.4.3. Странствующие мысли. Для воспоминания прошлого опыта и воображения будущего важным является разветвлённая сеть в коре, о которой мы уже говорили, — сеть пассивного режима. Эта сеть получила название от

ранних исследований томографии мозга, которые обнаружили, что области, которые она соединяет, — медиальная префронтальная кора, задняя поясная извилина, двусторонние нижние теменные доли и средние височные доли — имеют тенденцию активироваться "по умолчанию", когда люди просто расслабляются и томограф не следит за выполнением конкретной задачи, оставляя человека наедине со спонтанными мыслями — иногда их называют странствующими (блуждающими) мыслями — обычно это воспоминания о том, что было, и воображение о том, что предстоит. Этому сопутствуют наши память и воображение, включающие гибкую рекомбинацию деталей, таких как люди, места и события, с которыми мы сталкивались. Данный феномен часто называют конструктивным эпизодическим моделированием. Здесь важно участие гиппокампа. Гибкая природа эпизодического восприятия представляется особенно полезной для творческого мышления.

Уже очень давно привлекает внимание вопрос: могут ли творческие способности быть улучшены, и если да, то как? Исследования показывают, что инструменты нейробиологии можно использовать для прогнозирования способности людей мыслить творчески, основываясь на силе их мозговых сетевых связей [38]. Но пока не ясно, как эти связи можно укрепить.

2.5. Роль лекарственных препаратов в управлении творческими способностями

В настоящее время ведутся клинические исследования с использованием психodelиков. Такие исследования возобновились после длительного периода полной остановки изучения этих препаратов, случившейся в 1960-е годы. Одной из положительных сторон подобных исследований является то, что они позволяют углубить наше понимание сознания.

В 2016 г. исследователи из Императорского колледжа (Imperial College) Лондона впервые использовали технологию фМРТ, чтобы увидеть, как ЛСД (от нем. *Lysergsäureidiethylamid*) изменяет работу мозга. Одной из главных находок оказалось то, что ЛСД отчасти дезорганизует активность коры мозга, что позволяет мозгу оперировать свободнее, т.е. с меньшим количеством ограничений. Как оказалось, психodelики также усиливают коммуникацию между отделами мозга, которые в обычных условиях мало общаются, и наоборот, снижают коммуникацию между отделами, которые активно сообщаются. Это также имеет отношение к описанному многими "растворению собственного я", когда нормальное чувство "себя" пропадает. Взамен нередко появляется чувство связности с другими, с природой, т.е. в широком смысле с окружающим миром.

"ЛСД размывает границу между чувством о себе и другими людьми во время бесед на социальные темы. Используя МРТ, нам удалось показать, что это происходит по той причине, что наркотик воздействует на те части мозга, которые отвечают за работу самосознания. И эти же сдвиги в активности клеток поменяли то, как добровольцы общались с окружающими", — описывает Катрин Преллер [39], нейрофизиолог из Университета Цюриха (Швейцария).

ЛСД — диэтиламид лизергиновой кислоты, или просто "кислота", был случайно открыт известным химиком Альбертом Хоффманом в 1938 г. во время экспериментов со спорами паразитического гриба-спорыни. Изна-

чально ЛСД предполагалось использовать в качестве средства для лечения шизофрении, однако "кислота" быстро стала популярным психохемическим веществом среди молодёжи в 1960-х годах. В последние годы, как отмечает К. Преллер, среди медиков и нейрофизиологов возник повторный интерес к ЛСД и другим психохемическим препаратам. Наблюдая за тем, как эти препараты действуют на мозг добровольцев, учёные пытаются понять, как именно они изменяют работу психики и сознания, что даёт возможность оценить границы их использования в качестве лекарственных средств.

Конвергентные классические галлюциногены, или психохелики, вызывают изменённое состояние сознания, характеризующееся изменениями настроения, сенсорного восприятия, мышления и чувства индивидуальности. Следовательно, психохелики предоставляют уникальную возможность исследовать нейрофармакологические и механистические основы восприятия, мышления и сознания. Естественно, интерес к психохемическим соединениям растёт, поскольку они открывают замечательные перспективы для понимания изменения нейронных состояний и их потенциала в клинических применениях.

3. Взаимодействие модальностей

3.1. Мультимодальность увеличивает возможности творческого мышления и одновременно ёмкость автобиографической памяти

При исследовании когнитивных процессов в мозге человека психологи обычно выделяют три вида систем хранения информации, поступающей извне или вырабатываемой самим мозгом: сенсорная память, кратковременная, или оперативная, память и долговременная, или пожизненная, память. Ёмкость сенсорной памяти, т.е. количество единиц информации, которое она в состоянии запечатлеть, практически не ограничена. Но эта память сохраняет копии того, что человек увидел, услышал или ощущил, очень недолго — от 0,5 до 2 секунд.

С помощью фокусирования внимания часть информации из сенсорной памяти может быть переведена в оперативную память, где время жизни уже порядка 1 мин. Туда же попадает и новая информация, вырабатываемая в процессе размышлений самим мозгом.

Если мозг сочтёт какую-то информацию, хранящуюся в кратковременной памяти, важной, то она переходит в долговременную память. Эта память — статическая, т.е. информация раз и навсегда "вырубается на камне", фиксируется на "магнитном" диске, или в генах. В то же время оперативная память — феномен динамический. Информация представляется меняющейся во времени формой волн, очерёдностью возбуждения тех или иных нейронных групп и т.д. Хранится такая "временная" информация в нейронных цепочках с обратной связью, что обеспечивает её реверберацию. Биологические механизмы, ответственные за хранение динамической информации, очень интересны, однако они не связаны с механизмами, ответственными за предельную ёмкость оперативной памяти, и рассмотрение выходит за рамки данного обзора.

Обычно ёмкости оперативной памяти нам не хватает. С каждым случалось, спросив в незнакомом городе дорогу к гостинице, где-то на полпути забыть, куда

двигаться дальше — налево или направо. Также мы не успеваем донести до записной книжки цифры телефонного номера, не нарушив порядок их следования, и т.п.

В 1956 г. Дж. Миллер обнаружил в экспериментах со звуковыми сигналами, что ёмкость оперативной памяти у человека порядка семи. Число 7 появлялось в опытах с запоминанием зрительных последовательностей. Оно же возникало и при попытке воспроизвести услышанную фразу, которая содержит более семи лингвистических единиц и во многих других экспериментах и жизненных ситуациях. Действительно магия.

Попытаемся дать рациональное объяснение избранности этого числа, имея в виду оперативную память. Прежде всего договоримся о том, что ёмкость памяти — это не то число информационных единиц, которое было послано в память, а число единиц информации, которое из памяти извлекается, причём в правильной временной последовательности (что принципиально и для воспроизведения маршрута, и для эффективности сохранения телефонного номера). Другими словами, при кооперации оперативной памяти с центрами мозга, которым необходимо последовательно использовать хранимую информацию для выполнения каких-то когнитивных или поведенческих функций, единицы этой информации должны поступать "потребителю", соблюдая очередь.

Предположим, что мы хотим произнести только что придуманную нами фразу: "Желания наши есть судьба, намерения важнее, чем удача". Здесь восемь слов и смысл фразы определяется их порядковым номером в цепочке. При воспроизведении одного слова в мозгу активизируется определённая группа нейронов (клuster), отвечающая за его хранение. Чтобы другие слова фразы не всплыли раньше, нарушив порядок, активность соответствующих им клустеров должна на данный момент давляться за счёт ингибиторных связей между клустерами. Только тогда воспроизведение фразы будет устойчивым и смысл высказывания сохранится.

Математический анализ условий устойчивости подобных динамических цепочек с конкурирующими друг с другом элементами (это конкуренция "без победителя" [24]), показал, что воспроизведение не нарушается, если сила ингибиторных связей между клустерами возрастает экспоненциально (!) с увеличением числа информационных элементов оперативной памяти. Другими словами, если воспроизведение последовательности числом информационных единиц 7 или 8 требует силы ингибиторной связи порядка 15 (в относительных единицах), то для воспроизведения 10 элементов связь должна быть уже порядка 50, а для 13 единиц — около 200 (что с биологической точки зрения абсолютно нереально), т.е. должна быть много выше "магической" (см. ниже).

Психологам и психиатрам хорошо известно, что ёмкость кратковременной, т.е. оперативной, памяти связана с уровнем интеллекта. Чтобы доказать это, Матзел и сотрудники из Университета Ратгерса (США) провели эксперименты на модели — большой группе мышей (60 грызунов). Оказалось, что мыши, имеющие недавний опыт прохождения одного лабиринта, проходили другой лабиринт с похожими фрагментами гораздо быстрее, чем нетренированные участники. Были проверены и другие стороны интеллекта. Результаты подтвердили, что интеллектуальные упражнения, повышающие ёмкость оперативной памяти (не требующие подклю-

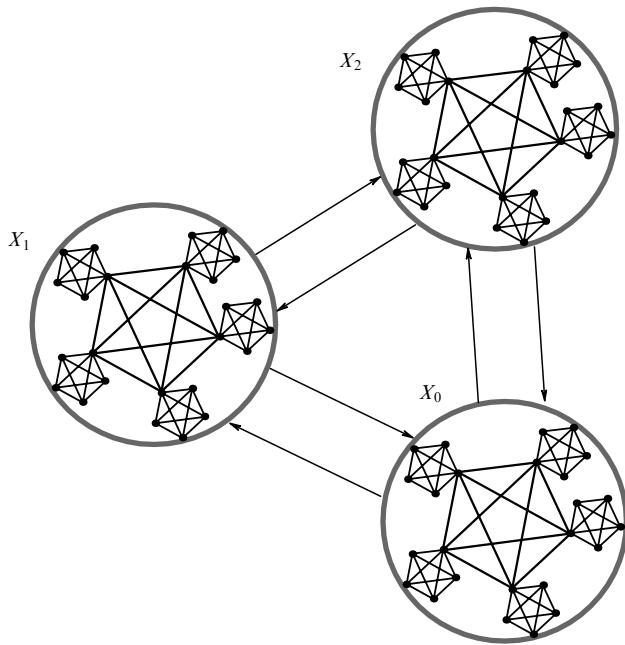


Рис. 9. Модель иерархической организации крупномасштабных сетей мозга, участвующих в творческом процессе.

чения долговременной памяти), приводят к усилению когнитивных способностей.

Важно подчеркнуть, что, как отмечал ещё Дж. Миллер, магическое число семь появляется только тогда, когда мы работаем с односторонней или одномерной информацией, например, или со звуковой, или со зрительной, или с осознательной. Однако если подключаются факторы, связанные с их взаимодействием или тем более с ассоциацией, скажем, текста и музыки, хранящейся в долговременной памяти, то ёмкость оперативной памяти может быть много выше. Так, например, если сочинённую выше фразу связать с мелодией песни

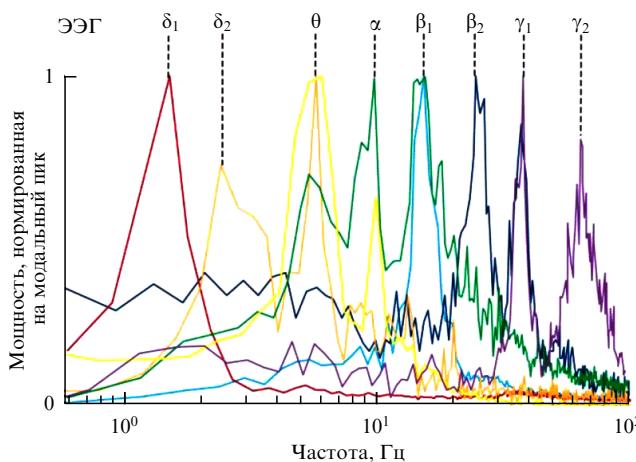


Рис. 10. (В цвете онлайн.) Несколько модальных пиковых частот постоянных ритмов, генерируемых в изолированном неокортике *in vitro*. Все ритмы генерировались во вторичных соматосенсорных (теменных) срезах коры, поддерживаемых в искусственной спинномозговой жидкости (artificial Cerebrospinal Fluid, aCSF). Ритмы записывались в виде локальных потенциалов поля (Local Field Potentials, LFP), результатирующие спектры (из 60-секундных периодов данных) наносились на график с мощностями, нормированными на модальный пик. (Модифицированный рисунок из [40].)

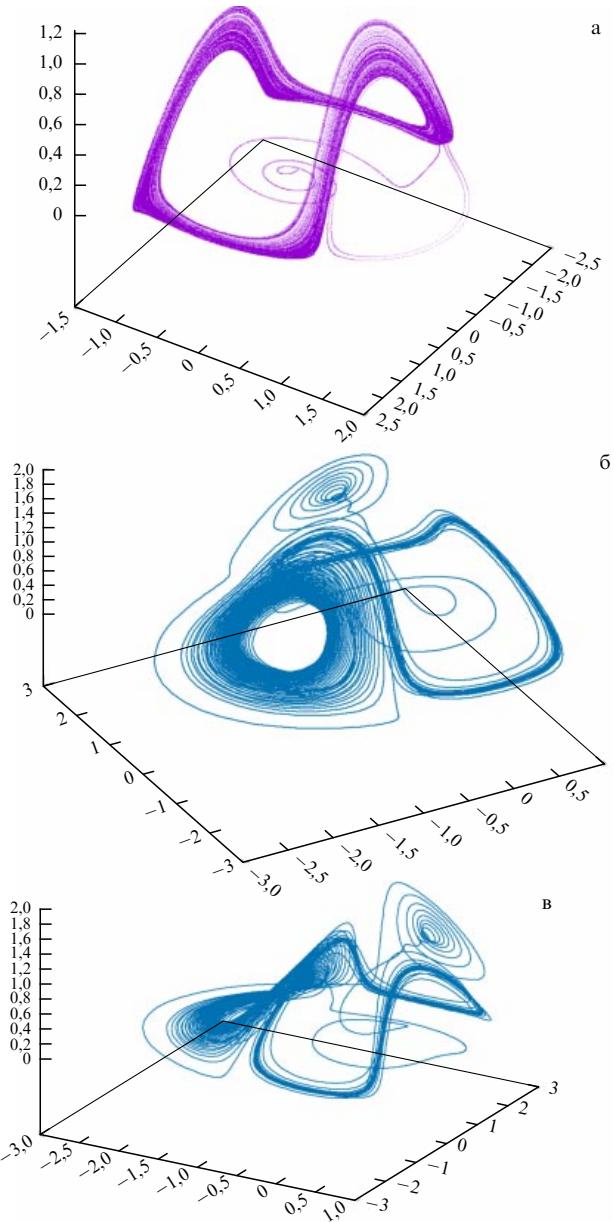


Рис. 11. (В цвете онлайн.) РФ-аттрактор для значений параметров $\gamma = 0,1$, $v = 0,2715$ (а) и $\gamma = 0,1$, $v = 0,14$ (б, в).

(подойдёт одна из песен Окуджавы), то оперативная память вполне способна воспроизвести и полную строфу: "Желанья наши есть судьба. Намеренья важнее, чем удача, как по мишеням мчащимся стрельба, отмечена случайности печатью с самим собой неравная борьба". Здесь уже не 7 слов, а 21 слово.

Ёмкость оперативной памяти варьируется и для людей с различными заболеваниями мозга. Так, при дислексии связи между различными группами мозга ослаблены и ёмкость оперативной памяти оказывается существенно ниже средней. При аутизме, наоборот, сила связей и их число могут быть значительно больше, поэтому некоторые люди, страдающие аутизмом, в состоянии воспроизвести в заданной последовательности и сотню случайных чисел. Удивительный феномен продемонстрировал в октябре 2009 г. аутист художник Стефан Вилтмер. Он в течение 20 мин рассматривал панораму Нью-Йорка с вертолёта и затем, здание за зданием,

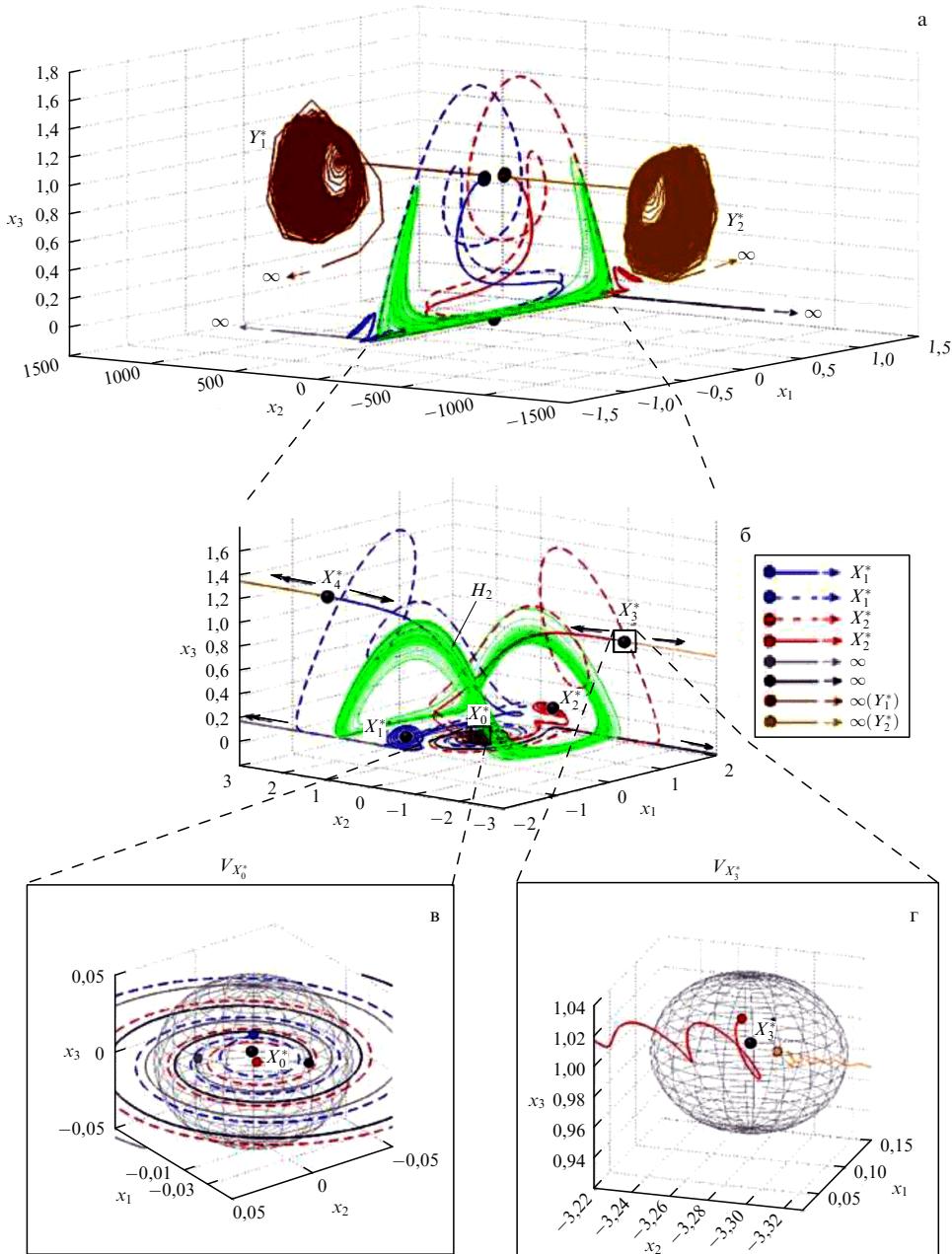


Рис. 12. (В цвете онлайн.) Скрытый хаотический аттрактор. Скрытый аттрактор выделен зелёным с частью траекторий, уходящих от него; оставшиеся траектории стремятся к устойчивым равновесиям. (Модифицированный рисунок из [44].)

воссоздал в карандаше на пятиметровом панно Рокфеллер-центр, Эмпайр-стейт-билдинг и близлежащие небоскрёбы, стадионы и гавани Манхэттена. Интересно, что и при запоминании панорамы, и при её последовательном воспроизведении Вилтмер слушал одну и ту же знакомую музыку.

3.2. Резонансное взаимодействие модальностей

Как упоминалось ранее, творческое мышление включает активность как минимум трёх ключевых сетей мозга, которые в процессе совместной работы кооперируются или последовательно подавляют друг друга. Такое взаимодействие при творческом процессе может быть и регулярным, и хаотическим во времени. Чем быстрее такое переключение происходит, тем выше творческий потенциал мозга, переключение связей между возможно-

стями сетей: воображения, ориентированной на принятие решений, и сети, ориентированной на детали их исполнения.

Всё определяется силой и архитектурой связи между упомянутыми выше ключевыми сетями. Сеть согласования отвечает за мониторинг того, какая из этих сетей наиболее подходит для обработки идей в данный момент и для переключения на другую сеть по мере необходимости. Например, при создании нового гитарного соло вам сначала потребуется увеличить активность в сети воображения, чтобы вызвать эмоциональную активность и запустить обратную связь, необходимые для создания нового музыкального мотива. Однако, как только творческая изюминка возникла, сеть согласования переключает активность на сеть исполнительного внимания, чтобы создать рабочую память о переходной мелодии и

сосредоточиться на том, чтобы закодировать музыку в запоминающуюся последовательность.

Эти качественные представления можно оформить в математическую теорию. Если сосредоточиться на формулировании принципов и нахождении новых динамических образов, то можно представить специфику творческого мышления на феноменологическом уровне взаимодействия пространственно-временных мод возбуждения коры головного мозга, которые в общем случае модулируют активность друг друга в возбудимой нейронной среде.

Схематизируя модель, мы рассмотрим три крупномасштабные сети: внимания, памяти и "отдыха" (свободного размышления), которые, взаимодействуя между собой посредством взаимных ингибирующих связей, создают глобальную "творческую сеть" (рис. 9). Каждой из образующих сетей отвечает своя полоса синхронизации ритмов мозга в ЭЭГ. Обозначим частоту, где максимальна активность сети внимания, как ω_0 , сети памяти ω_1 и сети отдыха ω_2 . В модельных кинетических уравнениях соответствующие интенсивности представляются переменными $X_0(t)$, $X_1(t)$ и $X_2(t)$. $X_j(t) \approx A_j(t) \times \exp[i(\omega_j t + \varphi_j)]$. При выполнении условия резонанса $2\omega_0 = \omega_1 + \omega_2 + \Delta\omega$ модельные уравнения после некоторых упрощений могут быть записаны в канонической форме (уравнения Рабиновича – Фабриканта (РФ))

$$\dot{x} = y(z - 1 + x^2) + \gamma x,$$

$$\dot{y} = x(3z + 1 - x^2) + \gamma y,$$

$$\dot{z} = -2z(v + xy).$$

РФ-модель [41] иллюстрирует рождение разнообразных хаотических режимов трёх резонансно связанных модальностей (см. рис. 9). Фазовое пространство этой модели организовано чрезвычайно сложно ввиду присутствия множества метастабильных состояний, т.е. седловых равновесий и неустойчивых циклов. Богатство динамики иллюстрируют рис. 10 – 12. Даже при сохранении параметров изменение начальных условий приводит к разным хаотическим структурам (см. рис. 11, 12). Здесь $\gamma = 0,1$ и $v = 0,2715$.

Если говорить о подобных моделях в связи с осмыслением творческой активности мозга, то нужно заметить, что модель не может быть предельно простой, а именно, для богатства динамики необходимо рассмотреть взаимовлияние фазовых соотношений и интенсивностей разных модальностей друг на друга. В РФ-модели это обеспечивается кубичной нелинейностью, благодаря которой появляются "виртуальные" сёдла [42, 43].

3.3. Коллективное творчество

Все мы, в особенности люди творческих профессий, дорожим мнением окружающих. Оно создаёт настроение, часто определяющее результат, когда речь идёт о коллективном творчестве. На формальном языке это выражается в том, что уровень функциональных связей между творческими сетями мозга становится зависящим как от параметров, так и от уровня и знака самооценки, а также взаимной оценки партнёров. Это может способствовать и творческому коллективному подъёму, и потере коллективного вдохновения или смелости. Ниже мы рассмотрим взаимодействие творческих объектов при моделировании джазовой импровизации.

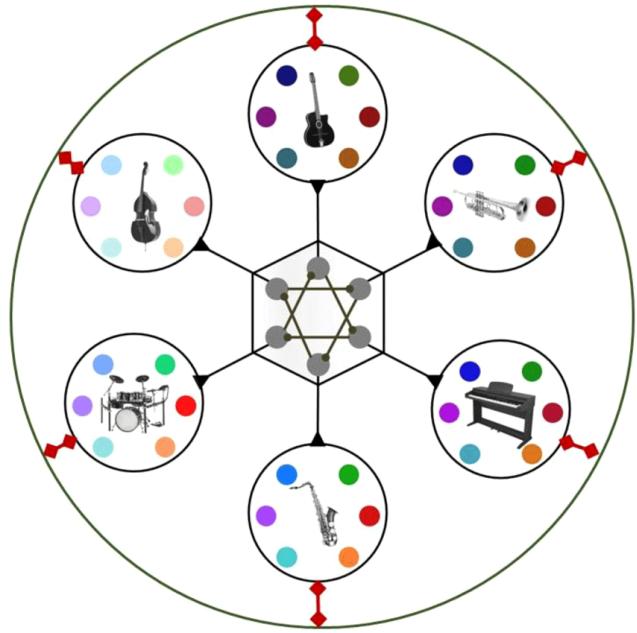


Рис. 13. (В цвете онлайн.) Коллективное творчество группы солистов (шестиугольная организация) реализуется за счёт того, что они по очереди солируют в присутствии друг друга и, значит, под влиянием друг друга. (Модифицированный рисунок из [3].)

3.4. Мы из джаза

При моделировании коллективной импровизации группы солистов (рис. 13) динамика творческого ансамбля описывалась шестью семействами канонических уравнений Лотки – Вольтерры. Переключение от одного солиста к другому осуществлялось дополнительной модальностью — вниманием. Число компонент в каждом семействе определялось числом различных тем. Это и есть число метастабильных состояний для каждого гетероклинического канала. Для оценки уровня импровизации использовалась размерность Каплана – Йорка (Kaplan – York Dimension, KYD) (см. [25]). Результаты представлены на рис. 14.

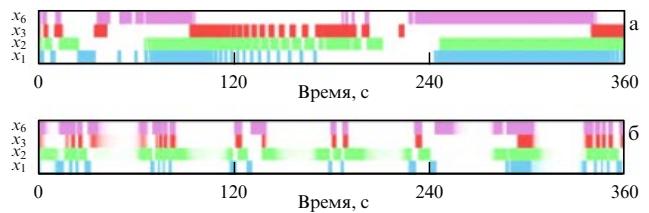


Рис. 14. (В цвете онлайн.) (а) Джазовый музыкант играет независимо. Параметр оригинальности KYD = 4,05. (б) Тот же солист в цепочке солистов, последовательно сменяющих друг друга, параметр творчества KYD = 4,63. (Модифицированный рисунок из [3].)

4. Обсуждение

В самом начале наших обсуждений процессов творческого мышления (см. эпиграф) возник вопрос: затрагивают ли они подсознательное в мозге человека, или творения без сознания не бывает? Сейчас можно ответить. Если кратко, то творческий процесс в отдельных его частях *может быть подсознательным*.

Созданные в результате творческого процесса музыка, художественное полотно, скульптура, поэма и др. вступают в диалог со зрителем. Произведение становится итогом субъективного переживания художника, пока он его создавал, и зрителя, пока он его воспринимает. Естественно, подсознание здесь, конечно, играет принципиальную роль.

Таким образом, подсознательным в значительной мере оказывается не только сам процесс творения, но и его динамическое восприятие. К этому следует относиться как к экспериментальному факту и соответствующим образом строить математическую модель кажущегося неформализуемым экзистенциального творческого процесса. Приведём здесь два примера: живопись Дж. Поллока и поэзию О.Э. Мандельштама.

4.1. Поллок — художник-экзистенциалист

Существование предшествует сущности.
Жан-Поль Сартр

Поллок не копировал природу, он придумал динамическую технику, рождающую образы, которые могут существовать в природе. Обходя по периметру обширные полотна, раскатанные по полу своего сарая, Поллок покрывал их каплями краски в один или несколько слоёв (рис. 15).



Рис. 15. (В цвете онлайн.) Картина Поллока "Алхимия" (1947 г.).

Хотя эта новая техника была признана важнейшим достижением в эволюции современного искусства, значимость и эмоциональное воздействие созданных узоров оказывались неоднозначными и Поллок часто уничтожал свои картины. Анализ образов Поллока показывает, что, во-первых, их геометрическая структура является фрактальной, напоминающей картины природы, и, во-вторых, размерность фракталов увеличивалась вместе с опытом художника [45].

4.2. Мандельштам — поэт метафоры

Мандельштам как поэт метафоры, т.е. преобразования разных модальностей бытия: природного и портретного, визуального и музыкального и т.д. — не с целью донести до читателя некое сообщение, а создать у читателя ощущение, как при действии гипноза. Замечательный пример — его *Восьмистишия*. Мандельштам в эссе о поэзии "Разговор о Данте" объясняет, что содержательным блоком его произведений является не слово и не предложение, а некоторый образ, который не связан жёстко с формой: "В поэзии

важно только исполняющее понимание — отнюдь не пассивное, не воспроизводящее и не пересказывающее". Загадка поэтической речи Мандельштама, её магия, по мнению литератороведов¹, кроется в том, что он общается с читателем, опираясь более на подсознание, чем на сознание. Гипнотическая природа его поэзии им кажется очевидной.

Нас здесь интересуют нейрофизиологические механизмы и анализ динамики соответствующей творческой активности мозга, т.е. взаимодействия сознательного и бессознательного подпроцессов.

4.3. Гетероклинические химеры — один из возможных математических образов творческого процесса

Недавние исследования (ЭЭГ, фМРТ) показали, что с точки зрения анатомии мозга за сознательную и подсознательную его активность ответственны одни и те же нейронные сети: 1) сеть по умолчанию (default mode network), 2) сеть, контролирующая внимание (executive attention network), 3) сеть покоя (silence network) (рис. 16).

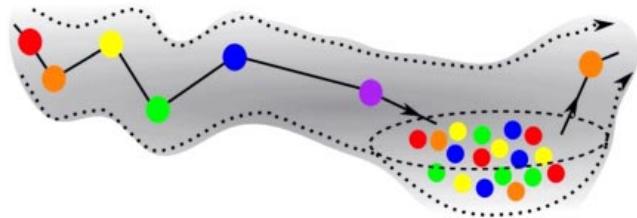


Рис. 16. (В цвете онлайн.) Химера — крупночастичное представление сложной траектории (см., например, обзор [46]). После регулярного отрезка траектория попадает в хаотический овраг, затем выходит оттуда, переключаясь на устойчивый гетероклинический канал. (Модифицированный рисунок из [33].)

5. Заключение

Завершая статью, необходимо упомянуть о проблеме взаимодействия человеческого и компьютерного творчества, т.е. мозга с искусственным интеллектом (ИИ) [47–49]. В этой области мы находим исключительно привлекательные и в то же время озадачивающие проблемы, например, как удержать творческий потенциал ИИ под контролем. В частности, какие следует выбрать наблюдаемые, временные динамика которых содержит информацию о неудобных (опасных) для человека намерениях. Никогда нет уверенности, что в результате творческого самообучения ИИ не организует себе общения с мозгом "на равных", нарушая иерархию.

Здесь, конечно, внимание должно фокусироваться на архитектуре совместной творческой сети. Она должна включать в себя сети внимания, критической оценки, совместного принятия решений в условиях неопределённости и коллективные эпизодическую и семантическую память. Естественно, динамика соответствующего процесса должна быть устойчивой.

¹ См., например: А.В. Хлыстова *Магия поэтики О. Мандельштама* (М.: РУДН, 2009), Е.Ю. Глазова *Метаморфоза слова. Теоретическая мысль Осипа Мандельштама* (М.: Издательский дом ЯСК, 2019) Е. Глазова, М. Глазова *Подсказано Дантом. О поэтике и поэзии Мандельштама* (Киев: Дух и литература, 2012) (Примеч. ред.)

Сейчас подобные исследования только начинают разворачиваться [50 – 54].

Авторы чрезвычайно призательны К.В. Анохину, сделавшему полезные замечания по тексту статьи, в особенности по соответствующей терминологии на русском языке.

Список литературы

1. Poincaré H *Le Valeur de la Science* (Paris: E. Flammarion, 1905)
2. Henriques G *A New Unified Theory of Psychology* (New York: Springer, 2011)
3. Rabinovich M I, Tristan I, Varona P *Neurosci. Biobehav. Rev.* **55** 18 (2015)
4. Rabinovich M I, Simmons A N, Varona P *Trends Cogn. Sci.* **19** 453 (2015)
5. Friston K *Nat. Rev. Neurosci.* **11** 127 (2010)
6. Beaty R E et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **115** 1087 (2018)
7. Rosenberg M D et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **117** 3797 (2020)
8. Bressler S L, Menon V *Trends Cogn. Sci.* **14** 277 (2010)
9. Rosen D S et al. *NeuroImage* **213** 116632 (2020)
10. Fink A et al. *Human Brain Mapping* **30** 734 (2009)
11. Jung-Beeman M et al. *PLoS Biol.* **2** e97 (2004)
12. Stevens C E (Jr.), Zabelina D L *Curr. Opin. Behav. Sci.* **27** 154 (2019)
13. Madore K P, Addis D R, Schacter D L *Psychol. Sci.* **26** 1461 (2015)
14. Benedek M, Fink A *Curr. Opin. Behav. Sci.* **27** 116 (2019)
15. Benedek M et al. *NeuroImage* **210** 116586 (2020)
16. Schacter D L et al. *Neuron* **76** 677 (2012)
17. Swaab D F *We are Our Brains: A Neurobiography of the Brain, from the Womb to Alzheimer's* (New York: Spiegel and Grau, 2014)
18. Coveney P V *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A* **361** 1057 (2003)
19. Afraimovich V S, Rabinovich M I, Varona P *Int. J. Bifurc. Chaos* **14** 1195 (2004)
20. Varona P, Rabinovich M I *Proc. R. Soc. Lond. B* **283** 20160475 (2016)
21. Rabinovich M, Huerta R, Laurent G *Science* **321** 48 (2008)
22. Rabinovich M et al. *Phys. Rev. Lett.* **87** 68102 (2001)
23. Rabinovich M I, Varona P, Selverston A I, Abarbanel H D I *Rev. Mod. Phys.* **78** 1213 (2006)
24. Venaille A, Varona P, Rabinovich M I *Phys. Rev. E* **71** 061909 (2005)
25. Rabinovich M I, Friston K J, Varona P (Eds) *Principles of Brain Dynamics: Global State Interactions* (Cambridge, MA: MIT Press, 2012)
26. Рабинович М И, Мюзинолу М К *УФН* **180** 371 (2010); Rabinovich M I, Muezzinoglu M K *Phys. Usp.* **53** 357 (2010)
27. Rabinovich M, Tristan I, Varona P *PLoS One* **8** e64406 (2013)
28. Rabinovich M I, Huerta R, Varona P *Phys. Rev. Lett.* **96** 014101 (2006)
29. Afraimovich V S, Zaks M A, Rabinovich M I *Chaos* **28** 053107 (2018)
30. Rabinovich M I, Afraimovich V S, Varona P *Dyn. Syst.* **25** 433 (2010)
31. Afraimovich V, Gong X, Rabinovich M *Chaos* **25** 103118 (2015)
32. Rabinovich M I, Varona P, Tristan I, Afraimovich V S *Front. Comput. Neurosci.* **8** 22 (2014)
33. Rabinovich M I, Sokolov Yu, Kozma R *Front. Syst. Neurosci.* **8** 220 (2014)
34. Bick C *Phys. Rev. E* **97** 050201 (2018)
35. Zhao Y, Pesin Y *J. Stat. Phys.* **158** 447 (2015)
36. Rabinovich M I, Varona P *JAMA Psychiatry* **74** 771 (2017)
37. Bick C, Rabinovich M I *Phys. Rev. Lett.* **103** 218101 (2009)
38. Latorre R, Varona P, Rabinovich M I *Neurocomputing* **331** 108 (2019)
39. Preller K H et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **116** 2743 (2019)
40. Roopun A K et al. *Front Neurosci.* **2** 145 (2008)
41. Рабинович М И, Фабрикант А Л *ЖЭТФ* **77** 617 (1979); Rabinovich M I, Fabrikant A L *Sov. Phys. JETP* **50** 311 (1979)
42. Danca M-F *Nonlin. Dyn.* **86** 1263 (2016)
43. Danca M-F, Kuznetsov N *Mathematics* **9** 652 (2021)
44. Danca M-F, Kuznetsov N, Chen G *Nonlin. Dyn.* **88** 791 (2017)
45. Taylor R P et al. *Front. Hum. Neurosci.* **5** 60 (2011)
46. Стрелькова Г И, Анищенко В С *УФН* **190** 160 (2020); Strelkova G I, Anishchenko V S *Phys. Usp.* **63** 145 (2020)
47. Rabinovich M I, Varona P *Front. Comput. Neurosci.* **12** 73 (2018)
48. Rabinovich M I, Varona P, in *Biomimetic and Biohybrid Systems. First Intern. Conf., Living Machines 2012, Barcelona, Spain, July 9–12, 2012. Proc.* (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7375, Eds T J Prescott et al.) (Berlin: Springer, 2012) p. 228
49. Иванецкий Г Р *УФН* **188** 965 (2018); Ivanitskii G R **61** 871 (2018)
50. Доронина-Амитонова Л В и др. *УФН* **185** 371 (2015); Doronina-Amitonova L V et al. *Phys. Usp.* **58** 345 (2015)
51. Иванецкий Г Р *УФН* **189** 759 (2019); Ivanitskii G R **62** 711 (2019)
52. Иванецкий Г Р, Морозов А А *УФН* **190** 1165 (2020); Ivanitskii G R, Morozov A A **63** 1092 (2020)
53. Tomsett R et al. *Patterns* **1** 100049 (2020)
54. Храмов А Е и др. *УФН* **191** 614 (2021); Hramov A E et al. *Phys. Usp.* **64** (6) (2021) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2020.06.038807>

Nonlinear dynamics of creative thinking. Multimodal processes and the interaction of heteroclinic structures

M.I. Rabinovich^(1,a), P. Varona^(2,b)

⁽¹⁾ *BioCircuits Institute, University of California, San Diego,
9500 Gilman Drive #0328, La Jolla, CA 92093-0328*

⁽²⁾ *Departamento de Ingeniería Informática, Universidad Autónoma de Madrid,
28049 Madrid, Spain*

E-mail: ^(a) *m.rabinovich@ucsd.edu*, ^(b) *pablo.varona@uam.es*

The dynamic processes of creative thinking, as confirmed by recent studies using electroencephalography (EEG) and functional magnetic resonance imaging (fMRI), are interactions among three main components: the originality of the author, the author's autobiographical memory, and the purpose or stimulus of the process. Different stimuli initiate the excitation of different memory components and, accordingly, different neuronal clusters and brain networks. New data make it possible to build a model of the birth and development of creative thinking, i.e., to elaborate a theory of a process that is itself, by definition, indefinitely structured and unpredictable, with the use of a structurally organized mathematical approach — nonlinear dynamics. The following key concept is discussed: the evolution of thought or the essence of other human creative activity is a dynamic process characterized by internal instability leading to the generation of new information. To construct a nonlinear dynamic model of human creativity, the following ideas common to most mental processes are used: (1) a mathematical model should be based on variables representing the evolution of brain elements in their temporal coherence and should have solutions corresponding to metastable patterns (blocks of knowledge) in the brain, (2) the model is based on competitive dynamics without a winner, i.e., a nonlinear process of interaction of many information elements or spatio-temporal modes, which guarantees sequential switching between metastable states and, as a result, a certain stability of the dynamics of creativity, (3) the model is an open dissipative system in which inhibition is balanced by excitation; as a result, being close to the boundary of instability, it turns out to be extremely sensitive to information influences.

Keywords: nonlinear dynamics, neural networks, creative thinking, models of brain functioning

PACS numbers: **05.45.-a**, **87.19.L-**, **89.75.-k**

Bibliography — 54 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **191** (8) 846–860 (2021)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.09.038837>

Received 22 July 2020

Physics – Uspekhi **64** (8) (2021)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2020.09.038837>