



Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях — 2019

ТРУДЫ VI ВСЕРОССИЙСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ



Нижний Новгород
2019

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики Российской академии наук
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Национальный исследовательский университет ВШЭ
Сургутский государственный университет ХМАО-Югры
Приволжский исследовательский медицинский университет
Межрегиональная ассоциация когнитивных исследований
Российская ассоциация нейроинформатики
ООО «Медуза»

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА В КОГНИТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ – 2019

**ТРУДЫ
VI ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

Нижегород
ИПФ РАН
2019

УДК 159.9.07(063)
ББК 88.25я431
Н49

Издано по решению редакционно-издательского совета
ФИЦ «Институт прикладной физики РАН»

Ответственные редакторы
доктор физико-математических наук **В.А. Антонец**,
доктор биологических наук **С.Б. Парин**,
доктор физико-математических наук **В.Г. Яхно**

Редакционная коллегия
Н.Н. Кралина, И.В. Нуйдель, С.А. Полевая

Александров И.О., Максимова Н.Е., Заварнова Ю.А., Свиридов В.С., Турубар Д.С. Эйлерова характеристика непланарностей в топологии психологических структур // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2019 : труды VI Всероссийской конференции / Федер. исслед. центр Ин-т приклад. физики РАН [и др.] ; отв. ред. В.А. Антонец, С.Б. Парин, В.Г. Яхно. – Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2019. С. 18 – 21.

Н49 **Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2019** : труды VI Всероссийской конференции / Федер. исслед. центр Ин-т приклад. физики РАН [и др.] ; отв. ред. В.А. Антонец, С.Б. Парин, В.Г. Яхно. – Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2019. – 234 с. + 10 с. аннот.

ISBN 978-5-8048-0092-6

Сборник содержит доклады VI Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2019» (Нижний Новгород, 23–27 сентября 2019 г.). Конференция посвящена текущему состоянию, перспективам и новым возможностям экспериментальных исследований и формализованного описания когнитивных процессов, а также проблемам создания симуляторов живых систем.

В сборник включены доклады по следующим темам: механизмы и модели адаптивных и ментальных процессов в когнитивных системах; подходы и инструменты для исследования функциональной динамики живых и технических когнитивных систем; прикладные вопросы моделирования и регистрации когнитивных процессов.

УДК 159.9.07(063)
ББК 88.25я431

Эйлерова характеристика непланарностей в топологии психологических структур

И.О. Александров¹, Н.Е. Максимова¹, Ю.А. Заварнова²,
В.С. Свиридов³, Д.С. Турубар⁴

¹Институт психологии РАН, г. Москва, e-mail: almax2000@inbox.ru

²ГАУГН, г. Москва, e-mail: juliazavarnova@mail.ru

³Федеральный медицинский исследовательский центр психиатрии и наркологии МЗ РФ,
Московский НИИ психиатрии, e-mail: psyastral@mail.ru

⁴Национальный научно-практический центр детской гематологии, онкологии и иммунологии им. Дм. Рогачёва,
г. Москва, e-mail: dturubar@gmail.com

Исследование топологии психологических структур (ПС) позволяет выделить варианты сложности организации ПС и связать их с содержательными характеристиками психологического взаимодействия.

Неоднородная семантическая сеть, представляющая ПС, которая сформирована в определенной институционализированной предметной области (ИПО), описывается как множество компонентов, фиксирующих информационные модели взаимодействий индивида (носителя ПС) с различными составляющими ИПО. Компоненты ПС связаны отношениями, по крайней мере, семи типов (группа диахронических отношений следования строгого и нестрогого порядка, а также образующих петли и циклы, группа синхронических отношений, обозначенных логическими операторами AND, XOR и IOR) [5]. Целостная сеть, представляющая ПС, содержит составляющие, которые обладают различной топологией. Так, кроме безмасштабных подмножеств сети, образованных, например, отношениями следования, AND и XOR, выделяются локально масштабированные подмножества сети, образованные отношениями IOR. В подмножествах сети, сформированных синхроническими отношениями, выявлены группы вершин сети (компонентов ПС), которые описываются непланарными графами K_5 и $K_{3,3}$ [5, 6]. Поскольку непланарные графы укладываются без пересечений на торической поверхности, топология ПС на непланарных подмножествах приобретает размерность тора, т. е. для такой локальной области ПС эйлерова характеристика $\chi = 0$ [9, 10].

Установлено, что группы компонентов, связанные как графы K_5 и $K_{3,3}$, распределены в популяции неравномерно. Выборка участников исследования при помощи кластерного анализа была разделена на группы, с различной степенью успешности решавшие задачи методики «Ход шахматного коня» (ХШК); эти группы различались также по эффективности в стратегической игре «Крестики-нолики на поле 15×15 » (ХО), так что одни и те же участники исследования были наиболее успешны или, напротив, наименее успешны одновременно в двух тестовых методиках. В ПС, реконструированной для ИПО «Крестики-нолики на поле 15×15 », во всех группах участников исследования были найдены непланарные множества компонентов, причем однодольные графы K_5 достоверно чаще присутствовали в ПС наименее

успешных групп, а двудольные $K_{3,3}$ – в ПС наиболее успешных [5, 6]. Непланарные графы $K_{3,3}$ достоверно чаще встречаются в ПС у участников исследования, которые наиболее успешны в стратегической игре двух партнеров, при этом известно, что сама возможность взаимодействия игроков обеспечивается формированием кроссиндивидуальной (надиндивидуальной) ПС [3, 4]. На этом основании высказано предположение, что группы компонентов ПС, содержащие двудольные непланарные графы $K_{3,3}$, связаны с организацией кроссиндивидуальных составляющих ПС.

Цель работы: формально описать варианты непланарных составляющих ПС, установить их соотношение с особенностями выполнения стратегической игры ХО и решения задач ХШК, а также характеристиками межиндивидуальных отношений.

Гипотезы исследования: (1) в организации ПС присутствуют группы компонентов, описываемых непланарным двудольным графом, соответствующим «двухдырочному» тору, т. е. ПС содержат локальные подмножества с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$; (2) количество групп с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$ снижается у лиц, наименее успешных в решении задач ХШК и достигает минимума у лиц с расстройствами шизофренического спектра (для которых характерен дефицит в социальных взаимодействиях).

Методика

В исследовании приняли участие 158 чел. Популяционную выборку составили студенты московских вузов 118 чел. (66 женщин, 52 мужчины, 17–40 лет, медиана = 21 год). Пациенты с расстройствами шизофренического спектра – 40 чел. (18 женщин, 22 мужчины, 18–59 лет, медиана = 30 лет), были отобраны лечащим врачом и клиническим психологом (20 чел. из стационара, 20 – на амбулаторном лечении) в соответствии с диагнозами (по МКБ-10): F20 – шизофрения – 21 чел., F21 – шизотипическое расстройство – 10 чел., F25 – шизоаффективное расстройство – 9 чел.

Участники исследования, полностью прошедшие процедуру формирования компетенции в стратегической игре ХО (300 ходов в последовательных играх) и хотя бы приступившие к решению задач ХШК (популяционная выборка 118 чел., выборка пациентов – 23 чел.), были разделе-

ны на 7 групп (0–6). Пациенты, решавшие все задачи всех серий ХШК, составили группу 1; отказавшиеся от решения этих задач на каком-либо этапе после получения инструкции составили группу 0. Популяционная выборка разделена на 5 групп, по использованию одного из 5 вариантов семантики решения задач ХШК [5, 6], так, что наиболее успешные участники составили группу 6, а наименее успешные (отказавшиеся от решения, использовавшие семантику-1) – группу 2. Группы 0 и 1 (выборка пациентов) и 2 и 3 (популяционная выборка) аналогичны по результатам кластеризации, но созданы с целью разделения участников из популяционной выборки и пациентов. Четыре пациента, вошедшие в группы 3–6, были исключены из анализа. (Подробное описание разбиения выборки на группы см. в [5, 6].)

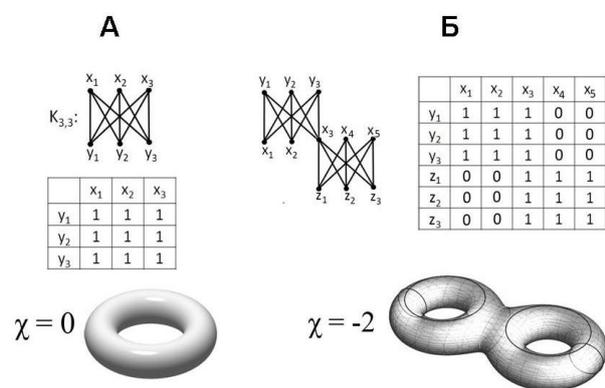


Рис. 1. Непланарные составляющие ПС с эйлеровой характеристикой $\chi = 0$ (А) и $\chi = -2$ (Б). На А и Б – представление этих составляющих в виде графов, в форме матриц смежности и в графике (на А – однодырочный тор, на Б – двухдырочный)

Для оценки характеристик межиндивидуальных отношений у части участников популяционной выборки (40 чел.) использовали методику ДМО Л.Н. Собчик [8].

Непланарные подграфы выделяли на сетях, представляющих ПС, образовавшихся при формировании компетенции в игре «Крестики-нолики на поле 15×15», используя алгоритмы, описанные в [1, 5]. Алгоритм поиска непланарностей в работе [5, 6] был построен в буквальном соответствии с теоремой Понтрягина – Куратовского [9] – определяли графы, содержащие подграфы K_5 или $K_{3,3}$. В данной работе (в отличие от [5, 6]) определяли не количество связанных подмножеств сети, содержащих непланарный подграф $K_{3,3}$ (см. рис. 1, А), а количество пар двудольных графов $K_{3,3}$, связанных за счет пересечения по одной вершине и образующих «двухдырочные» торы (см. рис. 1, Б, пересечение двух подграфов $K_{3,3}$ по вершине x_3). Оценивали также и количество «однодырочных» торов (см. рис. 1, А). Для каждого участника исследования оценивали количество множеств вершин подмножества сети, образованной отношениями XOR с эйлеровыми характеристиками $\chi = 0$ и $\chi = -2$, максимальные значения суммы единичных элементов матрицы смежности, представляющей подграф сети (т. е. количество отношений

XOR в данной матрице), и общую сумму для всех выявленных непланарных групп. Данные обрабатывали с помощью пакета *SPSS Statistics 17.0*.

Результаты

Подмножества компонентов ПС, связи которых образуют непланарные графы, обладающие эйлеровой характеристикой $\chi = -2$ (рис. 1, Б), были выявлены в ПС участников исследования во всех группах в количестве от 0 до 5. В группе 6 такие подмножества компонентов были найдены у всех участников исследования, в других группах популяционной выборки их количество градуально снижается (в группе 3 – у 44 испытуемых из 61, у 72%) и достигает минимума в группах пациентов: в группе 1 – у 5 из 9 чел. (55%), а в группе 0 – у 5 из 12 (41%). Заметим, что присутствие в ПС непланарных графов, обладающих эйлеровой характеристикой $\chi = 0$ (рис. 1, А), распределено принципиально иначе – они отсутствуют только в группах участников исследования, отказавшихся от решения задач ХШК – 1 (выборка пациентов) и 2 (популяционная выборка).

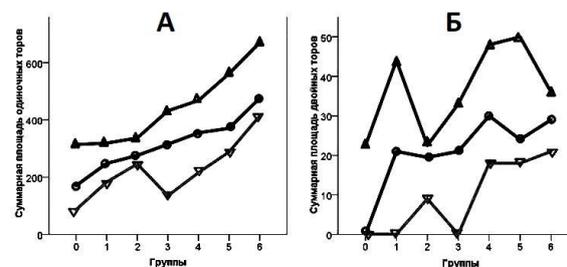


Рис. 2. Суммарное количество отношений XOR в непланарных составляющих ПС с эйлеровыми характеристиками $\chi = 0$ (А) и $\chi = -2$ (Б) в разных группах испытуемых. По оси абсцисс – группы 0–6. По оси ординат – сумма единичных элементов всех матриц смежности (количество отношений XOR) для каждого участника исследования. Кружки – медианы распределений для каждой группы, треугольники «вниз» – 1-й квартиль, треугольники «вверх» – 3-й квартиль

На рис. 2 показаны распределения сумм единичных элементов матриц смежности для каждого участника исследования, описывающих непланарности с эйлеровыми характеристиками $\chi = 0$ (рис. 2, А), и $\chi = -2$ (рис. 2, Б), по всем группам. Только для «двухдырочных торов» медианные значения этих величин достигают нуля в группе 0 (выборка пациентов). Показано градуальное снижение сумм единичных элементов матриц смежности для непланарностей с эйлеровыми характеристиками $\chi = 0$ и $\chi = -2$ (тест Джонкхира-Терпстра, 7 уровней, для однодырочных торов: статистика $Std J-T = 3.896$, $p = 9.76 \cdot 10^{-5}$; для двухдырочных торов: статистика $Std J-T = 2.987$, $p = ,003$). Если исключить группу 0, в которой количество торов двух видов резко снижается, то градуальность снижения сумм единичных элементов матриц смежности сохраняется (тест Джонкхира-Терпстра, 6 уровней, для однодырочных торов: статистика $Std J-T = 3.148$, $p = ,002$; для двухдырочных торов: статистика $Std J-T = 2.023$, $p = ,043$).

Организация непланарных групп с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$ (сформированных в ПС при овладении компетенцией в стратегической игре ХО) показала достоверную связь с временем решения сложных задач методики ХШК (трехходовые и четырехходовые задачи), но не с временем выбора хода в игре ХО. Это установлено с помощью множественного регрессионного анализа, зависимые переменные – медианные значения времени решения задач, независимые – характеристики непланарных групп компонентов с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$ (количество и сумма единичных элементов всех матриц смежности) для каждого участника исследования, процедура BACKWARD. Характеристики четырех регрессионных моделей времени решения для разных серий заданий ХШК: $df = 2; .474 \geq R \geq .231; .211 \geq R^2_{adj} \geq .038; 16.39 \geq F \geq 3.44; .035 \geq p \geq 5.64 \cdot 10^{-7}$. Регрессионные модели времени решения задач ХШК, независимыми переменными которых были аналогичные параметры непланарных групп компонентов с эйлеровой характеристикой $\chi = 0$, не достигали уровня значимости.

Регрессионная модель времени выбора хода в стратегической игре ХО, независимыми переменными которых были свойства непланарных групп компонентов с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$, была не значима. Значимая связь времени выбора хода в игре была показана для свойств непланарных групп компонентов с эйлеровой характеристикой $\chi = 0$: $df = 1; R = .361; R^2_{adj} = .123; F = 19.58; p = 2.01 \cdot 10^{-5}$.

Проведен факторный анализ набора переменных, характеризующих успешность стратегической игры (соотношение выигрышей и проигрышей), время и параметры набора альтернатив выбора хода, энтропийную меру сложности организации ПС в стратегической игре [2], оценки успешности решения задач методики ХШК (количество правильных решений, решения задач не с первой попытки, количество нерешенных задач, время, затраченное на решение задач с четырьмя ходами и задач с блоками (см. [5, 6]) и оценки сумм единичных элементов матриц смежности для непланарных групп с эйлеровыми характеристиками $\chi = 0$ и $\chi = -2$). Характеристики факторного решения: матрица 135×15 ; метод главных компонент, вращения не использовали; КМО = .658; Det = .002; тест сферичности Бартлетта $\chi^2 = 638.93$; выделено 6 факторов, объясняющих 76,21% дисперсии. Сумма единичных элементов матриц смежности для непланарных групп с эйлеровой характеристикой $\chi = 0$ с весом .837 вошла в фактор II (17,66% дисперсии) совместно с оценками количества правильно решенных задач методики ХШК (.417), времени выбора хода (.518) и количества устраненных альтернатив при выборе хода в игре ХО (.577), энтропийной оценкой сложности организации ПС, фиксирующей компетенцию в стратегической игре ХО (.796). Переменная, представляющая общее количество отношений XOR для непланарных групп с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$ с весом -.489 вошла в

фактор IV (9,88% дисперсии) совместно с оценками количества альтернативных вариантов при выборе хода (.636) и количеством альтернатив, устраненных при выборе хода (.500).

Следует заметить, что для непланарных групп с эйлеровыми характеристиками $\chi = -2$ выявлена значимая парная корреляция с энтропийной оценкой сложности организации ПС: для количества подмножеств сети с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$, $df = 134$, $R_s = .314$, $p = 2.17 \cdot 10^{-4}$, для оценки сумм единичных элементов всех матриц смежности для групп компонентов с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$, $df = 134$, $R_s = .205$, $p = .017$.

Выявлена достоверная связь между параметрами непланарных групп с эйлеровой характеристикой только $\chi = -2$ (но не с $\chi = 0$) и оценкой межличностных отношений (методика ДМО Л.Н. Собчик), по октанту 1 («властный-лидирующий тип межличностных отношений»): для количества подмножеств сети с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$, $df = 40$, $R_s = .375$, $p = .017$, для оценки сумм единичных элементов всех матриц смежности для групп компонентов с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$, $df = 40$, $R_s = .501$, $p = .001$.

Обсуждение результатов

Результаты работы показывают, что с приобретением компетенции формируются составляющие ПС с локальными топологическими особенностями неоднородной семантической сети. Эти составляющие обладают свойствами непланарности, т. е. не могут быть уложены на плоской поверхности без самопересечения. Согласно теореме Понтрягина – Куратовского [9], графы, содержащие в качестве подграфа двудольный граф $K_{3,3}$, могут быть уложены на торической поверхности (на однодырочном торе). Топологически такая группа связанных компонентов ПС имеет эйлерову характеристику $\chi = 0$. Организация сети, не имеющая признаков непланарности, по-видимому, обладает либо плоской, либо сферической топологией и имеет эйлерову характеристику $\chi = +2$. В наиболее примитивных, линейно организованных областях сети эта характеристика должна равняться единице.

В работе показано, что в организации сети, представляющей ПС, формируются также пары двудольных графов, образующие двойные, «двухдырочные» торы. Эти локальные области сети имеют эйлерову характеристику $\chi = -2$.

Таким образом, пространство ПС имеет «кусочную» топологию; разные области имеют различные эйлеровы характеристики: +2, +1, 0, -2.

В данной работе рассмотрено лишь подмножество неоднородной сети, образованное синхроническими отношениями XOR, вносящими запреты на одновременную актуализацию компонентов ПС. Если группы компонентов, содержащие двудольный граф $K_{3,3}$, уложенные на поверхность однодырочного тора без самопересечений (взаимных помех), синхронно согласовывают активность *двух* подмножеств компонентов (описанных как доли

графа), то в группе компонентов организованной как два непересекающихся подмножества (см. рис. 1, Б, первое подмножество y_1, y_2, y_3 ; второе подмножество z_1, z_2, z_3), связанные через подмножество x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 (уложенные на поверхности двухдырочного тора), возникают новые степени свободы в реализации синхронных запретов актуализации компонентов ПС. Такая качественно особая организация может быть рассмотрена как координирующая.

В работе описаны непланарные группы компонентов ПС, сформированной в ИПО «Стратегическая игра». Важно заметить, что выявлены статистически достоверные связи характеристик этих непланарных групп компонентов с формированием и реализацией иной ПС, сформированной в ИПО «Ход шахматного коня». Учитывая представления о процессах формирования ПС, сформулированные на основе положений системно-эволюционной парадигмы [4], можно предположить, что сходство топологии ПС, сформированных при взаимодействии с различными ИПО обеспечивается процессами ауторепликации ПС, репликаторами которых и, возможно, аттракторами служат топологические организации, частично проявившиеся в выявленных в данной работе локальных торических подмножеств сети с эйлеровыми характеристиками $\chi = 0$ и $\chi = -2$.

Результаты работы показывают, что непланарные группы с эйлеровыми характеристиками $\chi = 0$ и $\chi = -2$ качественно различны не только топологически, но и по их содержательной специфике в рамках целостной организации ПС. Судя по полученным парным корреляциям, а также по результатам множественной регрессии и факторного анализа, непланарные группы с эйлеровой характеристикой $\chi = 0$ (однодырочные торы) связаны преимущественно с реализацией конкретных взаимодействий с ИПО, с процессами выбора из сформированного набора альтернатив, как устранением степеней свободы. Для более сложно организованных групп компонентов – непланарных групп с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$ (двухдырочные торы) – выявлены связи с процессами создания наборов альтернатив для последующей их селекции. Именно группы с такой эйлеровой характеристикой делают возможной координацию одновременной актуализации несовместимых альтернатив. Принципиально важной представляется связь таких групп компонентов с характеристиками межличностных отношений. Можно предполагать, что группы компонентов, организация которых топологически гомеоморфна двойному (двухдырочному) тору, могут быть составляющими кроссиндивидуальных ПС, обеспечивающих возможности межличностных взаимодействий (см. [3, 4]).

В пользу такого предположения говорит также и выявленный дефицит непланарных образований с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$, т. е. двухдырочных торов, в выборке пациентов, особенно в группе 0. Важно, что для непланарных образований с эйлеровой характеристикой $\chi = 0$, для однодырочных торов выраженное снижение в группе пациентов не является столь резким, как для двухдырочных. Поскольку нарушение в сфере социальных взаимодействий входит в перечень наиболее важных симптомов шизофрении, именно радикальное снижение темпа формирования непланарных образований с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$ может служить возможным претендентом на роль маркера этого спектра расстройств.

Исследование выполнено при помощи гранта РФФИ (проект №18-00-00245 КОМФИ), Институт психологии РАН.

Литература

1. Александров И.О. Формирование структуры индивидуального знания. М. : Институт психологии РАН, 2006.
2. Александров И.О., Максимова Н.Е. Оценка сложности организации структуры индивидуального знания // Третья международная конференция по когнитивной науке. Тезисы докладов. Т. 1. М. : Художественно-издательский центр, 2008. С. 181–182.
3. Максимова Н. Е., Александров И. О. Компоненты психологического взаимодействия и возможность их операционализации // Человек, субъект, личность в современной психологии ; отв. ред. А. Л. Журавлев, Е. А. Сергиенко; материалы конференции, т. 3. М. : Институт психологии РАН, 2013. С. 161–164.
4. Максимова Н.Е., Александров И.О. Возможная траектория эволюционного развития психологии. Часть II. Организация предметной области психологии // Психол. журн. 2016. Т. 37, №2. С. 5–18.
5. Максимова Н.Е., Александров И.О., Заварнова Ю.А., Свиридов В.С., Турубар Д.С. Дифференциация и организация психологических структур при взаимодействии индивида с новыми предметными областями. Часть I. Свойства аутореплицирующихся структур и их операционализация // Психол. журн. 2019. Т. 40, № 1. С. 15–27.
6. Максимова Н.Е., Александров И.О., Заварнова Ю.А., Свиридов В.С., Турубар Д.С. Дифференциация и организация психологических структур при взаимодействии индивида с новыми предметными областями. Часть II. Эмпирические доказательства существования аутореплицирующихся структур // Психол. журн. 2019. Т. 40, № 2. С. 47–65.
7. Осипов Г.С. Приобретение знаний интеллектуальными системами. М. : Наука, 1997.
8. Собчик Л.Н. Диагностика межличностных отношений ; практическое руководство к традиционному и компьютерному вариантам теста. М. : Боргес, 2010.
9. Харари Ф. Теория графов. М. : Мир, 1973.
10. Шапкин Ю.А. Эйлерова характеристика. М. : Наука, 1984.