

# ИНТЕЛЛЕКТ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ

**Ю.Л. Словохотов**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: [slov@ipu.ru](mailto:slov@ipu.ru)

**Ключевые слова:** мультиагентные социальные системы, распределенный интеллект, модульная модель интеллекта.

**Аннотация:** Динамические системы взаимодействующих автономных агентов, или мультиагентные социальные системы (МСС), в своей динамике воспринимают, обрабатывают и используют внешнюю информацию, проявляя признаки распределенного интеллекта (РИ). Обсуждается единое описание индивидуального интеллекта агента и РИ МСС в рамках модульной модели интеллекта, который аппроксимирует внешний стимул набором «блоков»-модулей, отражающих характеристики стимула. В организационных системах (экономических, административных, политических и т.д.) роль библиотеки модулей играют правила и инструкции, а «образу» внешнего стимула соответствует ответное действие системы по инструкциям. Динамика интеллектуальных агентов и (или) МСС разделяется на изменения состояний  $\{x_i(t) \in R\}$  и взаимосвязанных с ними образов  $\{\xi_i(t) \in I\}$ , где  $R$  и  $I$  – соответственно реальное (агентное) и информационное пространство. Действия агента в  $R$  направлены к минимуму расхождений образа  $\xi(t)$  и цели  $\xi^{(0)}$  в  $I$ . В дискретном времени состояние агента  $x_i(t) = f[\xi_i(t-1)] + g_i(t-1)$  определяется образом его состояния в предыдущий момент и возмущающим воздействием  $g_i$  вследствие неполного знания. Обсуждаются перспективы применения модели.

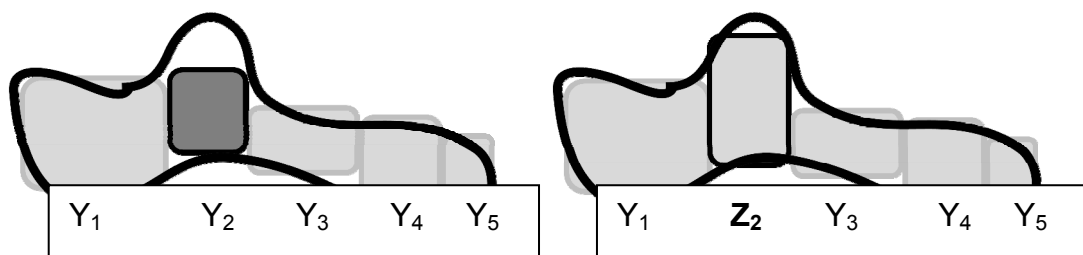
Динамические системы из автономных агентов, в своей деятельности взаимодействующих друг с другом и с окружающей средой, мы назовем *мультиагентными социальными системами (МСС)* в широком смысле слова «социальный»: сильно зависящий от динамической совокупности отношений в некотором множестве субъектов (биологических, экономических, политических и др.). «Неживые» программируемые агенты образуют искусственную МСС (пример – формация беспилотных аппаратов), агенты в расчетной модели (например, клеточные автоматы) – модельную МСС. Системы 1-го уровня, состоящие из индивидуальных агентов (социальные системы в узком смысле слова – из людей либо биологических индивидов), сами могут быть агентами в системе более высокого уровня: экономических субъектах, боевых единицах, политических партиях и т.д.

Изучению МСС и прогнозированию их динамики посвящена обширная литература в экономике, социологии, политологии, теории управления. Структуру совокупности взаимосвязанных агентов представляют графы и сложные сети [1], модели процессов в МСС нередко переносят из статистической и стохастической физики (исследования транспортных потоков, биржи, интернет и др.) [2]. Анализ динамики МСС и прогнозирование устойчивых состояний в таких системах часто осуществляют методами теории игр. Прикладные задачи включают управление организационными системами, городское хозяйство, информационное противоборство, комплексную экспертизу, коллективное принятие решений и многое другое [2-5].

По аналогии с «неживыми» многочастичными моделями физики, моделирование мультиагентных систем обычно основано на сопоставлении или усреднении некоторых фиксированных характеристик агентов, включая нечетко формализуемые (цели, мнения, информированность, полезность). Единого теоретического описания МСС и их динамики в этом подходе не разработано. Кроме нескольких простейших систем (эпидемиология, автомобильное и пешеходное движение, биржа) моделирование МСС не дает количественных предсказаний, а поведение людей в них не воспроизводится методами физики. Распределенный интеллект мультиагентной системы в литературе трактуется весьма ограниченно: как обмен информацией между агентами либо выработка общего «усредненного» мнения («crowd wisdom» [6]) Вместе с тем известно, что организационные системы могут анализировать специализированную информацию намного лучше индивидуумов (экспертиза) и предлагать нетривиальные решения, не сводящиеся к сумме знаний участников («мозговой штурм»).

Мы считаем, что фундаментальной характеристикой системы взаимодействующих агентов является *коллективное целеполагание* и способность воспринимать, обрабатывать и использовать внешнюю информацию, т.е. *распределенный интеллект (РИ)*. *Объективной целью* МСС на заданном интервале времени является результат системной динамики, оптимальный для системы. Различные системы, в том числе из агентов с ограниченными когнитивными возможностями, воспроизводимо и гибко преследуют системные цели (муравейник, пчелиный рой). Наличие РИ следует непосредственно учитывать при эмпирическом описании социальных мультиагентных систем и их моделировании [7].

Для формального описания содержательной интеллектуальной деятельности – производства новой информации как на индивидуальном, так и на коллективном уровнях – нами предложена *модульная модель интеллекта*. В ее рамках внешнее воздействие воспринимается индивидуумом или МСС путем разложения на вызываемые из памяти «блоки», которыми характеризуются параметры воздействия [7]. В индивидуальном сознании блоками служат качества воспринимаемых объектов или явлений, используемые как маркеры в стандартных сочетаниях (например, *тяжелая вода* =  $D_2O$ ), что особенно характерно для иероглифической письменности. В коллективных реакциях на внешние стимулы также можно выделить сохраняемые в памяти компоненты-«иероглифы»: движение муравьев по тропинкам, действия людей в организационных системах по инструкциям, соблюдение законов в государстве и т.д. Нестандартные воздействия на МСС приводят к стохастической замене блоков в схеме реакции на стимул и к закрепляемым отбором изменениям: тропинкам насекомых к новым источникам пищи, внесению поправок в законы, новым показаниям свидетелей и т.д. (рис. 1).



**Рис. 1.** Модульное «отражение» внешнего воздействия (черная линия) в индивидуальном либо коллективном восприятии. Слева – плохо подходящий модуль  $Y_2$  выделен темным цветом, справа – представление с «лучшим» модулем  $Z_2$ . Замена модуля дает новую схему, которая содержит новую информацию:  $Y_1 Y_2 Y_3 Y_4 Y_5 \rightarrow Y_1 Z_2 Y_3 Y_4 Y_5$ .

Понятие объективной цели мультиагентной системы, на первый взгляд формальное, уже на качественном уровне позволяет объяснить ряд особенностей и «аномалий» коллективной динамики различных МСС. Так, объективная, но технически недостижимая цель аппарата управления – полная формализация человеческой деятельности – порождает парадоксальное усложнение отчетности и документооборота при использовании современной оргтехники, компьютеров и интернет. В обстановке военного конфликта объективной целью противостоящих сторон на линии соприкосновения является сохранение напряженности без масштабных боевых действий («странная война» 1939–40 гг. во Франции, стратегические паузы ВОВ весной 1943 и 1944 гг., разделение Кореи и Кипра, нынешние «замороженные конфликты» по периметру РФ). В докладе будет приведен ряд других примеров. Существенно, что РИ организационных систем часто включает конкурентные (рынок), конфликтующие (выборы, парламент) либо антагонистические компоненты (внешняя политика, войны). С другой стороны, рациональность системной динамики увеличивается при ограничении набора возможных действий агентов и при наличии «библиотеки» стандартных реакций (должностные инструкции на предприятиях, военные уставы, дипломатический протокол). Рациональность индивидуального поведения людей также возрастает с сокращением возможностей выбора и становится «ограниченной» при выборе из многих возможностей (пример – переход улицы по светофору и без светофора).

Эмпирические аналогии динамики политических систем с эволюционными и биологическими процессами рассматривает биополитология [8]. «Силу», или «глубину» РИ организационных систем можно количественно оценивать по близости их параметров к объективной цели: в зависимости от обстановки – к максимуму выигрыша, минимуму ущерба, скорейшей эволюции либо наибольшей стабильности и т.д. Это открывает путь к «когнитивным играм», в которых индивидуальные выигрыши агентов  $\{P_i(x_i)\}$  с весами  $\{\omega_i\}$  входят в суммарную оптимизируемую функцию

$$\text{Max}[F(x_1, \dots, x_n) + \sum \omega_i P_i(x_i)]$$

вместе с функцией  $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$  выигрыша системы как объединения конфликтующих субъектов («невидимая рука рынка»). В эволюционной игре отбор таких «мутаций» в стратегиях агентов, которые приближают МСС к объективной цели, позволяет, в частности, воспроизвести возникновение альтруизма в системе, первоначально состоявшей из эгоистических агентов (см. [5]). Схемы восприятия (или стратегии), оптимальные в данной обстановке на данном ландшафте приспособленности, при этом могут оказаться проигрышными после изменения ландшафта.

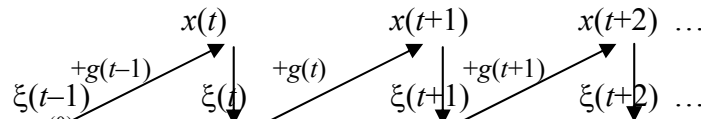
Отражение внешних стимулов в поведении системы («системное восприятие»), неотрывное от протекающей эволюции, позволяет формально разделить динамику модельной МСС на события в «агентном», или «реальном» ( $R$ ) и «информационном» ( $I$ )

пространствах. В первом из них, аналогичном физическому пространству многочастичной «неживой» системы, происходит эволюция состояний агентов во времени  $\{x_i(t)\}$ ; во втором эволюционируют «представления», или «образы», агентов или (и) мультиагентной системы  $\{\xi_i(t)\}$  о своем состоянии. В общем случае состояния  $\{x_i\}$  и представления  $\{\xi_i\}$  разнородны (например, положение источника пищи и конфигурации ведущих к нему муравьиных тропинок). Состояние  $i$ -го агента в момент  $t$  зависит от его представления в предыдущий момент дискретного времени  $\xi_i(t-1)$  и определяет представление в текущий момент  $\xi_i(t)$ :

$$\begin{aligned}x_i(t) &= f[\xi_i(t-1)] + g_i(t-1), \\ \xi_i(t) &= \varphi[x_i(t)],\end{aligned}$$

где  $g_i(t)$  – «непредвиденное» возмущающее воздействие на  $i$ -го агента в  $R$ , вызванное неполным соответствием  $\{x_i\}$  и  $\{\xi_i\}$  (неполным знанием), а также стохастическими факторами. В рамках модульной модели интеллекта представления агентов или системы как комбинации воспринимаемых признаков состояния можно условно выразить вектором  $\xi_i = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ , где  $n$  – число модулей в образе.

Сравнение стимула и его схематического образа (рис. 1) осуществляется в информационном пространстве. Динамика агента или мультиагентной системы направляется сопоставлением схем образа  $\xi$  и цели  $\xi^{(0)}$  (также имеющей блочный либо векторный вид) и минимизацией их расхождений:



где  $|\xi^{(0)} - \xi(t)| \geq |\xi^{(0)} - \xi(t+1)|$  для представлений-векторов. Если рассматривать объекты в  $I$  как множества,  $\xi^{(0)} \cap \xi(t+1) \supset \xi^{(0)} \cap \xi(t)$ .

Предлагаемый алгоритм на основе модульной модели интеллекта с разумными предположениями о функциях  $\varphi: R \rightarrow I$  и  $f: I \rightarrow R$  открывает путь к формальному описанию динамики как индивидов, так и мультиагентных систем, способных воспринимать и анализировать обстановку – т.е. обладающих когнитивными возможностями. Разделение этой динамики на взаимосвязанные процессы в «реальном» и «информационном» пространствах отдаленно напоминает квантовую механику Боба, в рамках которой эволюция системы с  $n$  степенями свободы определяется ее детерминистским движением в потенциале  $U(x_1, \dots, x_n)$  и «направляющей» волновой функцией  $\psi(x_1, \dots, x_n)$  (*pilot wave*). Бомовский формализм активно, но не вполне успешно используют в междисциплинарной физике для моделирования процессов в человеческом сознании, а также для описания обусловленных ими экономических и социальных явлений [9]. В отличие от нашей схемы, обе составляющие бомовского формализма заданы в одном и том же физическом пространстве. Расщепление процесса на «реальный» и «информационный» компоненты увеличивает гибкость модели и расширяет возможности описания (не обязательно квантового) систем, обладающих интеллектом.

## Список литературы

1. Barabasi A.-L., Posfai M.. Network Science. Cambridge University Press, 2016. 475 p.
2. Гасников А.В. (ред.), Введение в математическое моделирование транспортных потоков. М.: МЦНМО, 2013. 428 с.
3. Губко М.В., Новиков Д.А. Теория игр в управлении организационными системами / 2-е изд. М.: Синтег, 2005. 138 с.

4. Губанов Д.А., Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства / 3-е изд. М: МЦИМО, 2018.
5. Чеботарев П.Ю., Цодикова Я.Ю., Логинов А.К., Лезина З.М., Афонькин В.А., Малышев В.А. Анализ сравнительной выгоды эгоистических и альтруистических стратегий при голосовании в стохастической среде // Автоматика и телемеханика. 2018. Т. 79, № 11. С. 127-149.
6. Becker J., Brackbill D., Centola D. Network dynamics of social influence in the wisdom of crowds // PNAS. 2017. Vol. 114, No. 26. P. E5070-E5076.
7. Словохотов Ю.Л., Неретин И.С. К построению модульной модели распределенного интеллекта // Труды ИСП РАН. 2018. Т. 30, № 3. С. 341-361.
8. Олескин А.В. Биополитика. Политический потенциал современной биологии: философские, политологические и практические аспекты. М., 2001, 423 с.
9. Khrennikov A.Y. Ubiquitous Quantum Structure from Psychology to Finance. Springer, 2010. 216 p.